

INAUGURAL - DISSERTATION
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Naturwissenschaftlich - Mathematischen
Gesamtfakultät
der Ruprecht - Karls - Universität
Heidelberg

vorgelegt von
Dipl.-Phys. Michael Walter
aus Neuenbürg (Enzkreis)

Tag der mündl. Prüfung: 30. Juni 2004

**Entwicklung, Bau und Alterungsstudien
von
Straw Tube Driftkammern
für das
Äußere Spurkammersystem
von LHCb**

Gutachter:

Prof.Dr. Franz Eisele

Prof.Dr. Norbert Herrmann

Zusammenfassung

Das Physikalische Institut Heidelberg ist an der Entwicklung und dem Bau des Äußeren Spurkammersystems für das LHCb-Experiment am CERN beteiligt. Das Äußere Spurkammersystem wird modular aus 5 m langen Strawtube-Driftkammern zusammengesetzt.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung von einem Driftkammer-Prototypen Ende 2001 bis zum endgültigen Kammerdesign zum Start der Serienproduktion im Frühjahr 2004 in Heidelberg. Basierend auf den bei der Prototypherstellung und bei anschließenden Betriebstests gewonnenen Erfahrungen, wurden einzelne Detektorcomponenten und der Produktionsprozess in mehreren Iterationen optimiert.

Zusätzlich zu den Betriebstests des Prototypen wurden Betriebs- und Alterungstests in der Röntgenanlage des Physikalischen Instituts durchgeführt. Neben einzelnen Kammermaterialien wurden in speziell entwickelten Kammern die zwei Zählgase Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) und Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) im Vergleich getestet und der Einfluss des Wassergehalts in den Gasen auf Korrosion oder Ablagerungen an den Anodendrähten untersucht. Als Resultat dieser Untersuchungen wurde gefunden, dass unabhängig vom Wassergehalt mit dem ursprünglich vorgesehenen Zählgas Ar/CO₂/CF₄ unkontrollierbare Alterungseffekte auftraten und Drähte angegriffen, bzw. zerstört wurden. In trockenem Ar/CO₂ konnten dagegen keine Effekte beobachtet werden, die den Betrieb der Strawtube-Driftkammern gefährden. Daher soll es für den Betrieb im Äußeren Spurkammersystem von LHCb verwendet werden.

Abstract

The Institute of Physics in Heidelberg participates in the development and construction of the Outer Tracker (OT) of LHCb at CERN. The OT is a modular system of straw tube drift chambers of up to 5 m length.

This thesis reports the prototyping at the end of 2001 and the developments up to the definite design at the beginning of the mass production in spring 2004 at Heidelberg. Based on the experience gained from the prototype production and following operation tests, several components of the chamber, as well as the production process were gradually optimized.

In addition to the operation tests of a full size prototype, ageing studies were performed with specially designed chambers at the X-ray facility of the Institute of Physics. Two drift gases Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) and Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) were tested to compare their ageing properties. Moreover the impact of the water content in the gases on wire etching and deposits on the anode wires was studied. In addition the possible impact of different construction materials on ageing was studied. As a result of this studies, it was found that uncontrollable effects occurred independent of the water content with the drift gas Ar/CO₂/CF₄, which was the baseline solution, and some wires were damaged or even destroyed. In contrast, with dry Ar/CO₂ no ageing effects were observed, which affects the operation of the straw tube drift chambers. This gas will therefore be used as drift gas for the Outer Tracker.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	\mathcal{CP} -Verletzung	1
1.2	Das LHCb-Experiment	4
1.3	Der LHCb-Detektor	4
1.3.1	Das Spursystem	5
1.3.2	Teilchenidentifikation	7
1.3.3	Reoptimierung des LHCb-Detektors	7
1.4	Das Äußere Spurkammersystem	8
1.5	Funktionsprinzip der Strawtubes	10
1.6	Die Ausleseelektronik	12
1.7	Das Zählgas	13
1.8	Kenngrößen der Strawtubes	15
1.9	Alterungseffekte in Gasdetektoren	15
2	Entwicklung und Bau der Driftkammermodule	19
2.1	Generelle Richtlinien für den Modulbau	19
2.1.1	Materialauswahl für den Modulbau	19
2.1.2	Umgebungsbedingungen beim Modulbau	22
2.2	Konstruktion eines 3 m langen Prototypen	23
2.2.1	Der Entwurf des Prototypen	23
2.2.2	Fertigung des Prototypen	28
2.2.3	Erste Tests und Erfahrungen mit dem Prototypen	30
2.3	Spezifikation und Optimierung der Strawtubes	37
2.4	Modulproduktion nach optimiertem Entwurf	40
2.4.1	Spezielle Vorrichtungen für die Kammerproduktion	40
2.4.2	Die Produktion der Driftkammermodule	43
2.4.3	Strahlungslänge eines Driftkammermoduls	52
2.5	Testproduktionen von Modulboxen	52
2.5.1	3 m lange Modulbox	52
2.5.2	5 m lange Modulbox	53
2.5.3	Fazit aus der Modulboxproduktion und den Testmessungen	57
3	Betriebseigenschaften von Strawtubes	59
3.1	Gasverstärkung	59
3.2	Ratenkapazität	59
3.3	Crosstalk	61

3.4	Bereich um Drahtpositionierer	62
3.5	Betriebseigenschaften der Strawtubes im Prototypen	63
3.5.1	Betriebstests im Labor	63
3.5.2	Betriebstests im HERA-B-Experiment	67
3.6	Fazit aus den Betriebstests	69
4	Untersuchung auf Anodenalterung	71
4.1	Die Röntgenanlage	71
4.2	Strahlungsbedingung im Vergleich zu LHCb	71
4.3	Sensitivität auf Alterungseffekte	72
4.3.1	Messmethode	72
4.3.2	Beobachtung	73
4.3.3	Schlussfolgerung	75
4.4	Alterungstest eines prototypähnlichen Testmoduls	75
4.4.1	Beschreibung des Moduls	75
4.4.2	Betrieb der Kammer im Teststand	77
4.4.3	Anodendrahtanalyse der bestrahlten Region	81
4.4.4	Fazit der ersten Alterungsmessung	82
5	Materialtests im Röntgenmessstand	85
5.1	Erweiterter Aufbau des Teststandes	85
5.2	Alterungsmessung mit Materialbehälter	86
5.2.1	Testmessung mit leerem Materialbehälter	86
5.2.2	Alterungstest mit Schutzfolien	88
5.3	Inspektion der Anodendrähte	91
5.4	Fazit des Alterungstests	93
6	Ätzprozesse am Anodendraht	95
6.1	Motivation für die weiteren Alterungstests	95
6.2	Eigenschaften bei verschiedenen Feuchtigkeiten	97
6.2.1	Der Einfluss des Wassergehalts auf die Gasverstärkung	97
6.2.2	Der Einfluss des Wassergehalts auf die Ratenkapazität	98
6.2.3	Der Einfluss des Wassergehalts auf Dunkelpulse und Ströme	101
6.3	Alterungstests bei verschiedenen feuchten Zählgasen	101
6.3.1	Das Doppelkammermodul für die Alterungstests	101
6.3.2	Aufbau des Teststandes	103
6.3.3	Betriebsbedingungen während der Alterungstests	103
6.3.4	Alterungstests mit Ar/CO ₂	106
6.3.5	Alterungstests mit Ar/CO ₂ /CF ₄	115
6.3.6	Vergleich der beobachteten Alterungsphänomene in Ar/CO ₂ und Ar/CO ₂ /CF ₄	125
7	Betriebstest mit endgültigen Materialien	127
7.1	Betriebstests mit zwei Zählgasen	127
7.1.1	Das Doppelkammermodul für die Betriebstests	127
7.1.2	Betrieb unter Röntgenbestrahlung	128
7.1.3	Untersuchung der bestrahlten Kanäle	134

7.1.4	Fazit aus diesem Betriebstest	135
7.2	Weitere Betriebstests mit Ar/CO ₂ /CF ₄	138
7.2.1	Die Betriebsbedingungen und das Langzeitverhalten	139
7.2.2	Untersuchung der bestrahlten Kanäle	143
7.2.3	Fazit aus den Betriebstests	146
8	Vergleich zwischen Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄	149
8.1	Die Betriebseigenschaften im Vergleich	149
8.2	Bewertung der Alterungstests	154
8.2.1	Alterungstests in der Röntgenanlage	154
8.2.2	Alterungseffekte in anderen Detektorsystemen	157
8.3	Fazit und Ausblick auf anstehende Untersuchungen	158
	Abbildungsverzeichnis	164
	Tabellenverzeichnis	165
	Literaturverzeichnis	167

Kapitel 1

Einleitung

1.1 \mathcal{CP} -Verletzung

Nachdem 1957 die Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung entdeckt wurde [78], betrachtete man zunächst noch die \mathcal{CP} -Operation als Erhaltungsgröße. Allerdings wurden bald Anzeichen von \mathcal{CP} -Verletzung im System neutraler Kaonen gefunden. Die durch starke Wechselwirkung in Kollision erzeugten neutralen Kaonen sind Zustände mit definierter Strangeness:

$$K^0 = |\bar{s}d\rangle \quad (1.1)$$

$$\bar{K}^0 = |s\bar{d}\rangle \quad (1.2)$$

Es sind keine Zustände der \mathcal{CP} -Operation.

$$\mathcal{CP}|K^0\rangle = -|\bar{K}^0\rangle \quad (1.3)$$

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

Da K^0 und \bar{K}^0 in den selben Endzustand zerfallen können (sowohl in zwei als auch in drei Pionen), können sich die Teilchen über die schwache Wechselwirkung vermischen. Durch Linearkombination beider Zustände lassen sich \mathcal{CP} -Eigenzustände konstruieren:

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle\} \quad \text{mit} \quad \mathcal{CP}|K_1^0\rangle = +1 \cdot |K_1^0\rangle \quad (1.5)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle\} \quad \text{mit} \quad \mathcal{CP}|K_2^0\rangle = -1 \cdot |K_2^0\rangle \quad (1.6)$$

Die \mathcal{CP} -Eigenzustände stimmen in guter Näherung mit den experimentell nachgewiesenen Teilchen K_L und K_S überein.

Aufgrund der negativen intrinsischen Parität der Pionen und mit vorausgesetzter \mathcal{CP} -Erhaltung, kann K_1^0 mit positivem \mathcal{CP} nur in zwei Pionen zerfallen und K_2^0 mit negativem \mathcal{CP} ausschließlich in drei. Der Phasenraum für den Zerfall in drei Pionen ist wesentlich kleiner als für den Zerfall in zwei. Deshalb ist die Lebensdauer von K_2^0 wesentlich länger als die von K_1^0 .

Experimentell wurde nachgewiesen, dass ein langlebiges K^0 mit einer Wahrscheinlichkeit von 3×10^{-3} in zwei Pionen zerfällt [79]. Daraus folgt entweder, dass der

\mathcal{CP} -Eigenzustand K_2^0 nicht identisch ist mit dem Eigenzustand der starken Wechselwirkung K_L^0 (indirekte \mathcal{CP} -Verletzung) oder K_2^0 doch in zwei Pionen zerfallen kann (direkte \mathcal{CP} -Verletzung). Die im System der neutralen Kaonen beobachtete \mathcal{CP} -Verletzung ist zwar mit dem Standardmodell kompatibel, es fehlt aber der Beweis, dass die Natur tatsächlich diesen Weg gewählt hat. Außerdem reicht die beobachtete \mathcal{CP} -Verletzung nicht aus, um die Baryonasymmetrie im Kosmos zu erklären.

Da im System neutraler B-Mesonen (B_d^0 und B_s^0) mehr Zerfallskanäle als im Kaonensystem existieren, bietet sich darin die Chance 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 der Ladung $\frac{2}{3}q_e$ (u, c, t) nicht mischen, während die Mischung der übrigen drei Quarks durch eine unitäre 3×3 Matrix beschrieben wird, die *Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Mischungsmatrix* (CKM-Matrix) [80]

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Diese Matrix wird durch vier Parameter definiert. Mit den experimentell beobachteten kleinen Mischungswinkeln hat sich als Näherungsform der CKM-Matrix die Wolfenstein-Parametrisierung [81] mit den vier reellen und unabhängigen Parametern λ , A , ρ und η durchgesetzt:

$$V_{CKM} \approx V_{CKM}^{(3)} + \delta V_{CKM} \quad (1.8)$$

Dabei ist die Entwicklung in λ bis zur Ordnung $\mathcal{O}(\lambda^3)$ gegeben durch:

$$V_{CKM}^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & \lambda^3 A(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1 - \rho - i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

mit $\lambda = \sin \theta_{Cabibbo} = 0,22$.

Da λ klein ist, zeigt die Wolfenstein-Parametrisierung, dass die Diagonalelemente ungefähr 1 und die Nichtdiagonalelemente dagegen klein sind. Der kleine Term δV_{CKM} ist gegeben durch:

$$\delta V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -iA^2\lambda^5\eta & 0 & 0 \\ A(\rho + i\eta)\frac{\lambda^5}{2} & (\frac{1}{2} - \rho)A\lambda^4 - iA\lambda^4\eta & 0 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Die Forderung nach Unitarität der CKM-Matrix $V_{CKM}^\dagger \cdot V_{CKM} = V_{CKM} \cdot V_{CKM}^\dagger$ führt zu einem System aus 12 Gleichungen. Davon sind 6 Normalisierungsrelationen. Die restlichen 6 Orthogonalisierungsrelationen lassen sich durch Dreiecke gleicher Fläche in der komplexen Ebene darstellen. Die zwei relevanten Dreiecke für das B-Mesonensystem sind in Abbildung 1.1 dargestellt. Die zugehörigen Orthogonalisierungsrelationen sind gegeben durch:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0 \quad (1.11)$$

$$V_{ud}^*V_{td} + V_{us}^*V_{ts} + V_{ub}^*V_{tb} = 0 \quad (1.12)$$

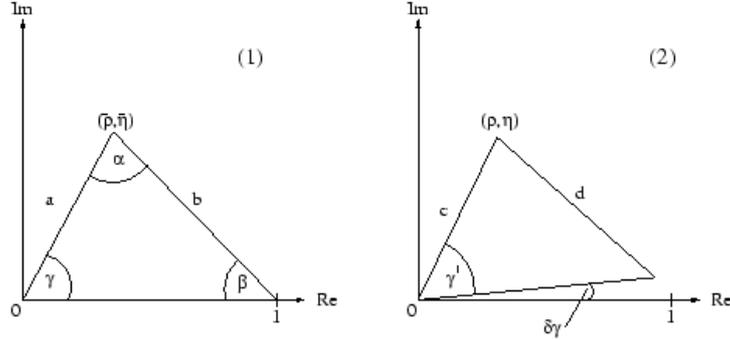


Abbildung 1.1: Unitaritätsdreiecke der CKM-Matrix. Die zugehörigen Orthogonalitätsrelationen sind Gleichung 1.11 für (1) und Gleichung 1.12 für (2).

Die Variablen $\bar{\rho}$ und $\bar{\eta}$ sind mit ρ und η verknüpft durch:

$$\bar{\rho} = \rho \left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right) \quad (1.13)$$

$$\bar{\eta} = \eta \left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right) \quad (1.14)$$

Wird δV_{CKM} vernachlässigt, sind die beiden Dreiecke gleich und man spricht von „dem Unitaritätsdreieck“ der CKM-Matrix. Die Messgenauigkeit bei LHCb macht allerdings eine Entwicklung bis zur vierten Ordnung notwendig.

Die Winkel in den Dreiecken können sowohl indirekt über die Messung der Seitenlinien, als auch direct aus \mathcal{CP} -Asymmetrien innerhalb des Standardmodells bestimmt werden. Sollten die Werte nicht übereinstimmen, wäre dies ein Hinweis auf neue Physik.

Die vier Seiten a bis d aus Abbildung 1.1 sind gegeben durch:

$$a = \frac{\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right) V_{ub}^*}{\lambda |V_{cb}|} \quad (1.15)$$

$$b = \frac{V_{td}}{\lambda |V_{cb}|} \quad (1.16)$$

$$c = \frac{V_{ub}^*}{\lambda |V_{cb}|} \quad (1.17)$$

$$d = \frac{\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right) V_{td}}{\lambda |V_{cb}|} \quad (1.18)$$

Die Werte von $|V_{cb}|$ und $|V_{ub}|$ werden durch B-Zerfälle bestimmt, der Wert von $|V_{td}|$ über $B_d^0 - \bar{B}_d^0$ -Oszillationen.

In Tabelle 1.1 sind die Zerfälle aufgeführt, mit denen die Winkel direkt bestimmt werden können. Die Winkel werden dabei über die Zerfallsasymmetrie \mathbf{A} von B und \bar{B} gemessen:

$$\mathbf{A} = \frac{\Gamma(B \rightarrow f) - \Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(B \rightarrow f) + \Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{f})} \quad (1.19)$$

Gemessener Parameter	Zerfallskanal	Sichtbares Verzweigungsverhältnis
$\beta + \gamma$	$B_d^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$0,5 \times 10^{-5}$
β	$B_d^0 \rightarrow J/\Psi K_S^0$	$3,6 \times 10^{-5}$
$\gamma - \delta\gamma$	$B_s^0 \rightarrow D_S^\pm K^\mp$	$1,0 \times 10^{-5}$
$\delta\gamma$	$B_s^0 \rightarrow J/\Psi \Phi$	$5,4 \times 10^{-5}$
γ	$B_d^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^{*0}$	$3,3 \times 10^{-7}$

Tabelle 1.1: Wichtige Zerfallskanäle bei LHCb zur direkten Bestimmung der Winkel in den Unitaritätsdreiecken der CKM-Matrix [54].

Dabei sind f und \bar{f} die Zerfallsprodukte. Die Verzweigungsverhältnisse sind wie in Tabelle 1.1 aufgeführt recht klein. Daraus folgt die Notwendigkeit einer hohen Statistik von B-Mesonen, um eine möglichst große Anzahl von Zerfällen nachzuweisen.

1.2 Das LHCb-Experiment

LHCb ist ein dediziertes Experiment zur Untersuchung seltener B-Zerfälle. Zusammen mit ATLAS [82], CMS [83] und ALICE [84] soll es 2007 am *Large Hadron Collider* LHC vom CERN in Betrieb genommen werden. An den vier Wechselwirkungspunkten, wo sich die Experimente befinden, werden am LHC bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 14$ TeV Protonen mit Protonen zur Kollision gebracht¹. Die Rate, mit der die Teilchenpakete kollidieren, (*bunch crossing Rate*) wird 40 MHz sein.

Für das LHCb-Experiment ist eine durchschnittliche Luminosität von $2 \times 10^{32} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ vorgesehen, die schon zu Betriebsbeginn von LHCb erreicht werden soll. Mit dem gesamten Wirkungsquerschnitt für inelastische Wechselwirkung $\sigma_{inel} \approx 80 \text{ mb}$ werden durchschnittlich 0,53 Wechselwirkungen pro *bunch crossing* erwartet.

Als Wirkungsquerschnitt für die $b\bar{b}$ -Produktion werden $500 \mu\text{b}$ angenommen. Damit werden im LHCb-Experiment eine jährliche Produktion von $4,5 \times 10^{11} B_d + \bar{B}_d$ und $1,3 \times 10^{11} B_s + \bar{B}_s$ erwartet.

Für die Rekonstruktion der interessanten Zerfälle ist es von entscheidender Bedeutung, dass der LHCb-Detektor eine hervorragende Teilchenidentifikation für Elektronen, Myonen, Kaonen und Pionen bei einer hohen Reinheit und Effizienz besitzt. Außerdem ist eine sehr genaue Bestimmung des Primärvertexes und der Sekundärvertizes der B-Mesonen notwendig.

1.3 Der LHCb-Detektor

Der LHCb-Detektor ist als Vorwärtsspektrometer konzipiert, das einen Winkelbereich von 10 mrad bis 300 mrad (250 mrad) in der horizontalen (vertikalen) Ebene senkrecht zum Strahlrohr abdeckt. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass bei hohen Energien

¹Es werden auch Beschleunigungsläufe mit schweren Ionen durchgeführt, die allerdings von LHCb nicht genutzt werden.

die produzierten b - und \bar{b} -Hadronen vorwiegend unter einem kleinen Winkel in die selbe Hemisphäre fliegen. Abbildung 1.2 zeigt die Korrelation zwischen den Produktionswinkeln der beiden B-Mesonen bei LHCb. 25 % aller produzierten B-Mesonen werden im Akzeptanzbereich des LHCb-Detektors erwartet [45].

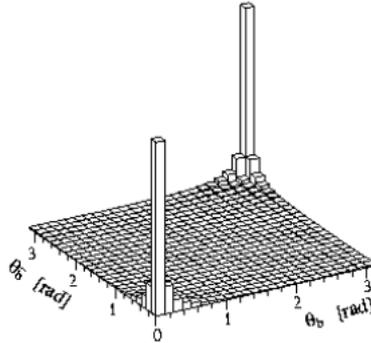


Abbildung 1.2: Die Winkelkorrelation der in einem Ereignis produzierten b - und \bar{b} -Hadronen. Die Polarwinkel wurden mit dem Ereignisgenerator PHYTHIA berechnet. [54]

Abbildung 1.3 zeigt die schematische Seitenansicht des fast 20 m langen LHCb-Detektors. Er besteht aus dem Spursystem mit Vertex-Detektoren, Spurkammern und Magneten, sowie dem System zur Teilchenidentifikation, bestehend aus zwei *Ring Imaging Cherenkov Detektoren* (RICH), den Kalorimetern und dem Myondetektor.

1.3.1 Das Spursystem

Der VELO des Vertex-Detektorensystems

Der Vertex-Locator VELO befindet sich in einem Vakuumtank direkt am Strahlrohr um den pp -Wechselwirkungspunkt bei $y=z=0$ in Abbildung 1.3. Er besteht aus insgesamt 21 Stationen von Siliziumstreifendetektoren. Der VELO erlaubt die Rekonstruktion des Vertex und den Nachweis von sekundären Vertizes, die vom Zerfall langlebiger Teilchen stammen.

Das Spurkammersystem

Die Hauptaufgaben des Spurkammersystem sind [1]:

- Spuren geladener Teilchen zwischen VELO und den Kalorimetern mit hoher Effizienz zu finden und ihren Impuls präzise zu messen. Um z.B. im Zerfall $B_s \rightarrow D_s K$ eine Massenauflösung von $10 \text{ MeV}/c^2$ zu erhalten, ist eine Impulsauflösung von $\delta p/p = 0,4 \%$ notwendig.
- Präzise Richtungsmessungen von Spursegmenten als Information über den Teilchendurchgang für RICH 1 und RICH 2.

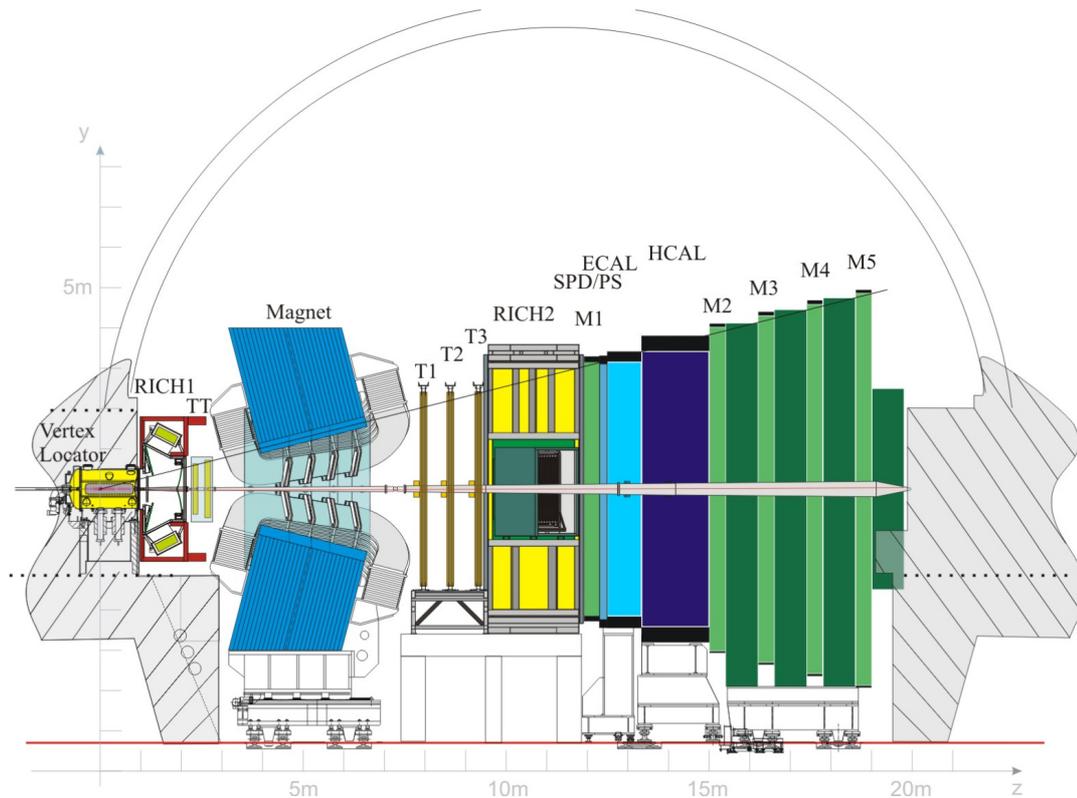


Abbildung 1.3: Schema des LHCb-Detektors (Seitenansicht)

- Verbindung der gemessenen Spursegmente im VELO mit den Kalorimetern und dem Myondetektor.

Das Spurkammersystem besteht aus dem *Trigger Tracker* TT zwischen RICHI 1 und Magneten und den Stationen T1 - T3, die sich zwischen dem Magneten und RICHI 2 befinden. T1 - T3 ist aufgeteilt in das Innere Spurkammersystem (*Inner Tracker*) und das Äußere Spurkammersystem (*Outer Tracker*). Der Inner Tracker und der komplette Trigger Tracker bestehen aus Siliziumstreifendetektoren. Für das Äußere Spurkammersystem wird die Strawtubetechnologie verwendet. Die Aufteilung in zwei Detektortechnologien ist notwendig, weil einerseits eine großflächige Abdeckung mit Siliziumdetektoren zu aufwendig ist, und andererseits die Strawtube-Driftkammern für den Betrieb bei den hohen Teilchenflüssen direkt am Strahlrohr ungeeignet sind.

Der Magnet

Zwischen den Spurkammerstationen TT und T1 befindet sich der warme Magnet mit einem vertikal orientierten Feld bis zu 1,1 T. Die durchquerenden geladenen Teilchen werden in der horizontalen x-Ebene abgelenkt. Um die verlangte Impulsauflösung $\delta p/p = 0,4\%$ zu erreichen ist ein integriertes Magnetfeld von 1 Tm notwendig.

1.3.2 Teilchenidentifikation

Die Cherenkov Detektoren RICH 1 und RICH 2

Die Aufgabe der *Ring Imaging Cherenkov Detektoren* RICH 1 und RICH 2 ist die Separation von Kaonen und Pionen. RICH 1 wird zur Identifikation von Teilchen mit Impulsen von 1 GeV/c bis etwa 60 GeV/c verwendet und befindet sich noch vor dem Magneten. RICH 2 befindet sich direkt hinter der Spurkammerstation T3. Er hat einen Akzeptanzbereich von 10 - 120 mrad (x-Ebene) bzw. 10 - 110 mrad (y-Ebene) und ist für die Identifikation der Teilchen mit hohen Impulsen zuständig.

Für RICH 1 und RICH 2 ergibt sich für die Kaon-Identifikation zwischen 2 GeV/c und 100 GeV/c eine durchschnittliche Effizienz von 88 %. Die durchschnittliche Rate falsch identifizierter Pionen liegt im gleichen Impulsbereich bei 2,7 % [55].

Die Kalorimeter

Mit dem Kalorimetersystem werden Hadronen, Photonen und Elektronen identifiziert. Ein Teilchen durchquert zuerst den *Preshower Detektor* PS. Falls es sich um ein Elektron oder Photon handelt entsteht ein nachweisbarer Schauer. Die Hauptaufgabe des PS Detektors ist die Unterdrückung von π -Hintergrund für den Elektron-Trigger [45]. Im Elektromagnetischen Kalorimeter ECAL wird die gesamte Energie von e und γ absorbiert, während die Hadronen (π , p , n) zum größten Teil im Hadronischen Kalorimeter HCAL aufschauern.

Der Myondetektor

Der Myondetektor besteht aus 5 Stationen mit 80 cm Stahlplatten dazwischen. Die Station M1 befindet sich in Strahlrichtung noch vor dem Kalorimetersystem, M2 - M5 dahinter. Als Detektortechnologie werden zum Großteil Vieldraht Proportionalkammern MWPCs² eingesetzt. Im Bereich nahe dem Strahlrohr ersetzen *Triple-GEM*³ Detektoren die MWPCs [36] in der Station M1.

Neben der Identifikation von Myonen hat M1 die zusätzliche Aufgabe präzise Messungen des Transversalimpulses p_t für den Level-0 Trigger zu liefern.

1.3.3 Reoptimierung des LHCb-Detektors

Der zuvor beschriebene ist der bereits reoptimierte LHCb-Detektor [44]. Die Reoptimierung verfolgt zwei Ziele:

1. Reduktion von Detektormaterial
2. Verbesserung des Triggers

Das ursprünglich im *Technical Proposal* [54] vorgesehene Materialaufkommen bis zum RICH 2 stieg bis zum Erscheinungsdatum des *Outer Tracker Technical Design Report* [1] im Herbst 2001 von 40 % auf 60 % der Strahlungslänge X_0 . Mit hohen Strahlungslängen verringert sich die Nachweisbarkeit von Elektronen und Photonen. Außerdem steigt die Vielfachstreuung geladener Teilchen, was zu einer Erhöhung der

²MWPC = *multi wire proportional chamber*

³GEM = *gas electron multiplier* [35]

*Occupancy*⁴ im Spurkammersystem führt.

Durch ein neues, dünneres Strahlrohr und durch Modifikationen am VELO und RICH 1 konnte Material eingespart werden. Die im *Outer Tracker Technical Design Report* vorgesehenen 9 Spurkammerstationen wurden auf den TT und die Stationen T1 - T3 reduziert, ohne dass dabei die Spurrekonstruktion verschlechtert wird [44]. Die ursprünglich im Magneten vorgesehenen Stationen fallen dabei komplett weg. Das Detektormaterial bis zum RICH 2 im reoptimierten LHCb-Detektor entspricht wieder den ursprünglich vorgesehenen 40 % der Strahlungslänge X_0 .

Zur Verbesserung des Triggers wurde die Magnetfeldabschirmung vor dem Magneten entfernt, damit bereits am TT Impulsmessung möglich ist.

1.4 Das Äußere Spurkammersystem

Abbildung 1.4 zeigt die Ereignissimulation einer rekonstruierten pp -Wechselwirkung in LHCb. Die Rate für Ereignisse mit einer inelastischen Wechselwirkung ist 9,3 MHz, bzw. 3,0 MHz für Ereignisse mit mehr als einer inelastischen Wechselwirkung [1].

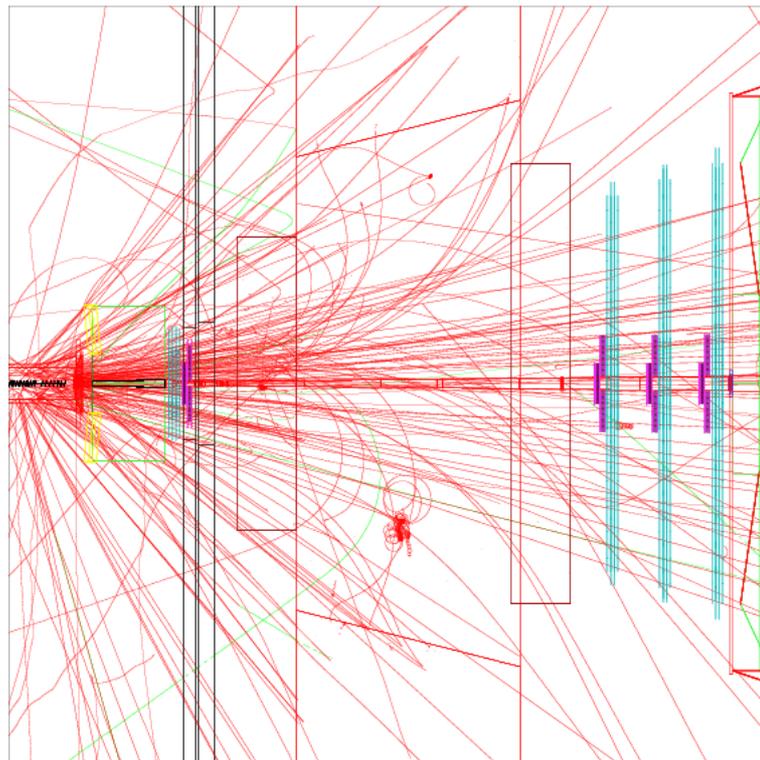


Abbildung 1.4: Ereignissimulation im LHCb-Detektor (Ansicht von oben). TT und Inneres Spurkammersystem sind dunkelviolett dargestellt, die Stationen T1 - T3 vom Äußeren Spurkammersystem sind hellblau dargestellt. [56]

Bei diesen hohen Raten und Spurdichten sind die Anforderungen an das Äußere Spur-

⁴Occupancy = Anzahl angesprochener Kanäle pro Ereignis [%]

kammersystem:

- Nachweis geladener Teilchen mit hoher Effizienz
- hohe Ortsauflösung (\Rightarrow hohe Impulsauflösung)
- schnelle Signalauslese
- niedrige Occupancy
- Abdeckung großer Flächen

In Abbildung 1.5 sind die drei Äußeren Spurkammerstationen T1 - T3 zusammen mit dem Inneren Spurkammersystem und dem TT dargestellt. Die Stationen T1 - T3 sind ungefähr 6 m breit und 5 m hoch. Das Äußere Spurkammersystem überdeckt den gesamten Akzeptanzbereich bis 250 mrad (vertikal) und 300 mrad (horizontal). Nur der Bereich direkt um das Strahlrohr wird mit den kreuzförmig angeordneten Inneren Spurkammern abgedeckt. Der Übergang vom Inneren zum Äußeren Spurkammersystem ergibt sich durch die Forderung, dass die Occupancy in den Äußeren Spurkammern 10 % nicht überschreiten soll. Mit zunehmender Occupancy wird die Rekonstruktion der Teilchenspuren erschwert. Die Effizienz der Spurrekonstruktion nimmt ab und die Anzahl falsch rekonstruierter Spuren (*ghost tracks*) steigt [45].

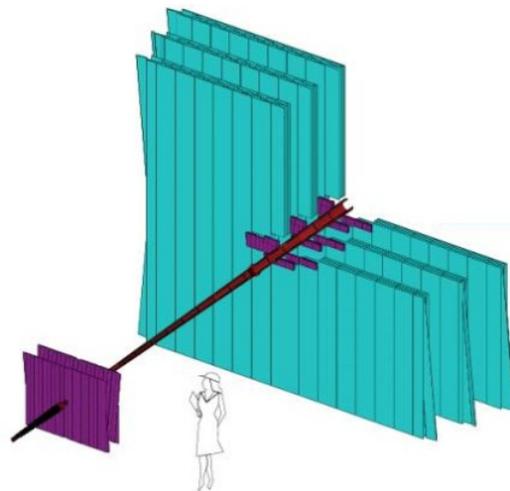


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung des Spurkammersystems. TT und Inneres Spurkammersystem sind dunkelviolett dargestellt, die Stationen T1 - T3 vom Äußeren Spurkammersystem hellblau dargestellt.

Das Äußere Spurkammersystem wird aus einzelnen Driftkammermodulen zusammengesetzt. Ein einzelnes Modul ist bis zu 5 m lang, 34 cm breit und 3,1 cm hoch. In Abbildung 1.6 ist der Aufbau eines 5 m langen Driftkammermoduls schematisch dargestellt. Es besteht aus zwei Lagen mit jeweils 128 Strawtubes. Die Strawtubes sind Driftröhrchen mit 5 mm Durchmesser und bestehen aus elektrisch leitfähigem Plastik mit einer äußeren Aluminiumlage. Sie sind ungefähr 2,5 m lang, da die Auslesekanäle in der Modulmitte unterbrochen sind, um die Occupancy niedrig zu halten. Die Strawtubes werden jeweils an den Kammerenden ausgelesen. Benachbarte Strawtubes einer Lage liegen mit einem *Pitch*⁵ von 5,25 mm nebeneinander. Die zwei Modullagen liegen

⁵*Pitch* = Abstand von Mitte zu Mitte

übereinander und bilden zusammen mit den Seitenwänden eine geschlossene Kammer. In jeder Station werden die vertikal orientierten Kammermodule in vier Lagen hinter-

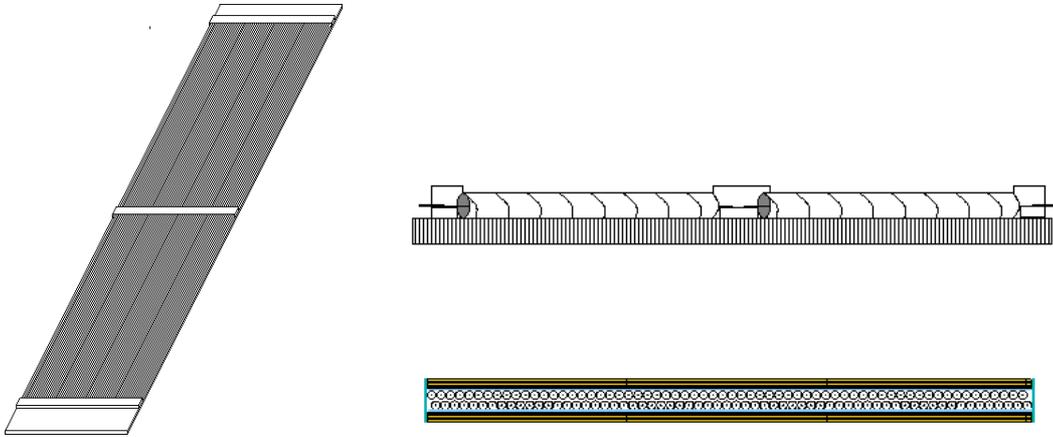


Abbildung 1.6: Schematischer Aufbau eines Driftkammermoduls. Die drei Skizzen sind nicht maßstäblich. **Links:** Eine 5 m lange Lage mit 128 Strawtubes. Jeweils 64 liegen nebeneinander in der oberen und unteren Hälfte der Lage. **Rechts oben:** Strawtubes längs einer 5 m langen Lage. Sie sind ca. 2,5 m lang und in der Mitte getrennt. **Rechts unten:** Querschnittsskizze durch das aus zwei Lagen bestehende, 34 cm breite Modul.

einander angeordnet. Ein einzelnes Modul liefert von einem durchquerenden, ionisierenden Teilchen nur eine Koordinate in der Ebene der Spurkammerstationen. Um die zweite Koordinate in dieser Ebene bestimmen zu können, sind die Kammermodule der inneren Stationslagen gegenüber den äußeren um $+ 5^\circ$ bzw. $- 5^\circ$ um ihre Mittelachse in der zur Strahlrichtung senkrechten Ebene gedreht.

Abbildung 1.7 zeigt für eine äußere Lage die Anordnung der Driftkammermodule um das Strahlrohr. Die Module über und unter dem Strahlrohr sind ungefähr 2,5 m lang. Insgesamt besteht das Äußere Spurkammersystem aus den in Abbildung 1.7 gekennzeichneten 7 verschiedenen Modultypen. Die Anzahl verschiedener Typen wurde so weit wie möglich minimiert, um die Serienproduktion der Module zu vereinfachen.

Um einen freien Zugang zu den einzelnen Modulen und zu anderen Detektorkomponenten zu gewähren, können die Spurkammerstationen in zwei Hälften vom Strahlrohr seitlich weggefahren werden.

1.5 Funktionsprinzip der Strawtubes

Die Strawtubes sind Proportionalzähler in denen die Driftzeit gemessen wird. Die Kathodenröhrchen bestehen aus elektrisch leitfähigem Plastik und haben einen Durchmesser von 5 mm. Ein goldbeschichteter Wolframdraht mit $25 \mu\text{m}$ Durchmesser dient als Anode, an die eine positive Hochspannung HV angelegt wird. Die Strawtubes werden mit Zählgas gespült.

Durchquert ein minimal ionisierendes Teilchen (MIP) den Strawtube, ionisiert es entlang seiner Spur das Zählgas. Die erzeugten Primärelektronen haben unterschiedliche

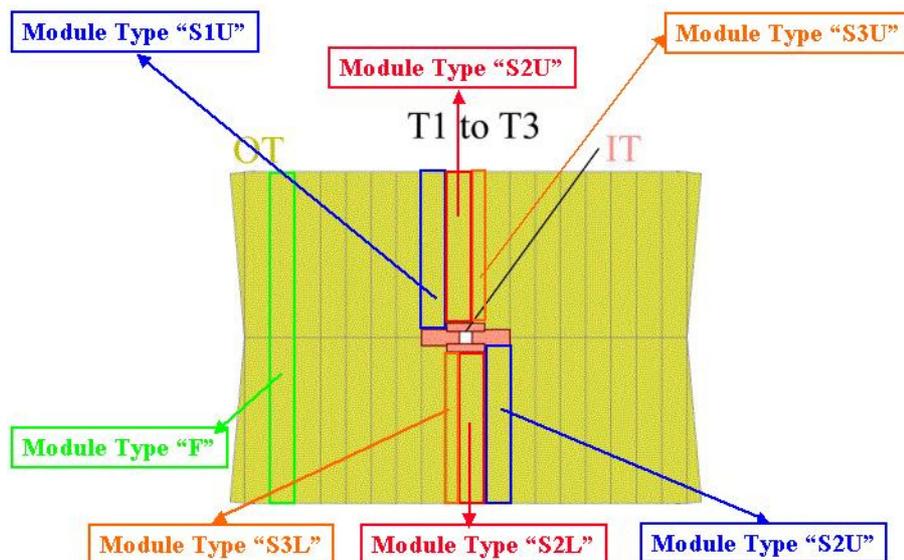


Abbildung 1.7: Anordnung der Driftkammermodule in einer äußeren Lage um das Strahlrohr. Links und rechts sind nach außen überstehende Bereiche der um $\pm 5^\circ$ gedrehten Module der inneren Lagen zu erkennen.

Energien und können im Bereich von wenigen μm um den Ort der Primäriionisation Sekundärelektronen erzeugen. Es entstehen *Cluster* von Elektronen (Abbildung 1.8).

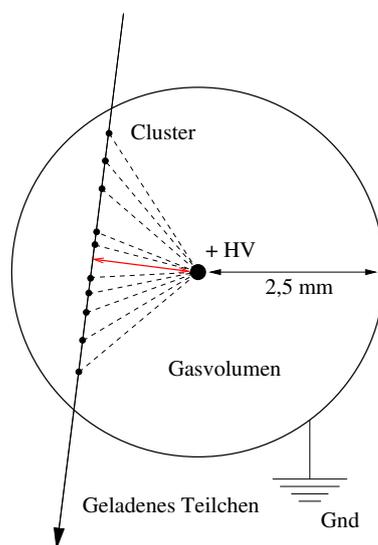


Abbildung 1.8: Skizzierter Querschnitt eines Strawtubes. Ein durchgehendes, geladenes Teilchen ionisiert das Zählgas entlang seiner Spur. Der kürzeste Abstand zwischen Spur und Anode ist rot markiert.

Die Elektronen driften im elektrischen Feld zur Anode. Die elektrische Feldstärke als

Funktion des radialen Abstands r von der Strawtubeachse beträgt

$$E(r) = \frac{V_0}{r \ln \frac{R}{R_a}} \quad (1.20)$$

mit V_0 = angelegte Spannung, R = Strawtuberadius und R_a = Drahtradius. Nahe der Anode wird das elektrische Feld so stark, dass die beschleunigten Elektronen die Ionisationsenergie des Zählgas übersteigen. Es kommt zum Gasverstärkungsprozess, bei dem lawinenartig Sekundärelektronen durch Ionisation erzeugt werden. Die Ionen und Elektronen induzieren ein Signal auf dem Anodendraht, das an einem Drahtende kapazitiv ausgekoppelt wird.

Die Zeitdifferenz zwischen Wechselwirkung im Experiment (t_0) und Auslösen des Triggers durch das Anodensignal (t_1) wird mit einem *Time-to-Digital Converter* TDC gemessen. Bei bekannter Driftgeschwindigkeit $v_D(r)$ der Elektronen im Zählgas kann mit

$$r = \int_{t_0}^{t_1} v_D(r(t)) dt \quad (1.21)$$

der radiale Abstand r des *Clusters* berechnet werden, der den Trigger auslöste. Dabei wird angenommen, dass der Cluster beim kürzesten Abstand zwischen Spur und Anode entstand (Abbildung 1.8). Ist dies nicht der Fall entsteht ein Fehler in der Ortsmessung. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen, die Nachweiseffizienz und die räumliche Auflösung hängen vom verwendeten Zählgas ab. Die Komposition und Eigenschaften des Zählgas für das Äußere Spurkammersystem werden in Kapitel 1.7 diskutiert.

1.6 Ausleseelektronik des Äußeren Spurkammersystems

Dieser Abschnitt bietet einen knappen, schematischen Überblick der Ausleseelektronik der Driftkammermodule [57]. Für jeden Strawtube wird die Driftzeit der *Cluster* gemessen, die beim Durchgang eines geladenen Teilchens erzeugt werden. Die Referenzzeit t_0 ist der Zeitpunkt der *pp*-Wechselwirkung im LHCb-Experiment. Die gemessenen Zeiten werden digitalisiert, zwischengespeichert und im Falle eines positiven Level-0-Triggersignals über Glasfaserkabel an den Level-1-Zwischenspeicher übermittelt. Die Ausleseelektronik besteht aus mehreren Elementen.

HV-Durchführungsplatine: Diese Platinen sind integrierte Komponenten der Driftkammermodule (Kapitel 2.4.2, Abbildung 2.23). Sie befinden sich jeweils an den Enden einer Modullage, bzw. an dem vom Strahlrohr entfernten Ende bei den Halbmodulen. Über sie werden die Anoden der Strawtubes mit HV versorgt. Außerdem definieren sie das Grundpotential für die Ausleseelektronik und die Strawtubes.

HV-Versorgungsplatine: Jeweils zwei dieser Platinen werden direkt mit den HV-Durchführungsplatine durch ein stabiles Stecksystem verbunden. Über sie wird die HV an 32 Kanäle (Strawtubes) verteilt und die Signale der einzelnen Kanäle kapazitiv ausgekoppelt.

ASDBLR-Platinen: Diese Platinen sind mit zwei ASDBLR-Chips [58] bestückt. Der ASDBLR ist ein integrierter Baustein mit Vorverstärker-, Pulsformungs- und Baseline Restauration-Stufe und Diskriminator. Ein Chip besitzt 8 Kanäle.

OTIS-Platine: Auf dieser Platine befindet sich der OTIS-Chip [59]. Der OTIS ist ein integrierter Baustein, der vom ASIC Labor Heidelberg [60] entwickelt wurde. Seine wesentlichen Bestandteile sind der TDC für die Driftzeitmessung in 32 Kanälen und der Zwischenspeicher für die Daten, die im Falle eines positiven Level-0-Triggersignals an den Level-1-Zwischenspeicher übermittelt werden.

GOL/Aux Platine: Von der GOL/Aux Platine [61] wird die Versorgungsspannung der Ausleseelektronik verteilt und geregelt, Level-0-Signale und die Referenzzeit für den OTIS empfangen und die Daten vom OTIS über Glasfaserkabel an den Level-1-Zwischenspeicher übermittelt.

In Abbildung 1.9 ist die Anordnung der Platinen für eine Lage am Kammermodulende dargestellt.

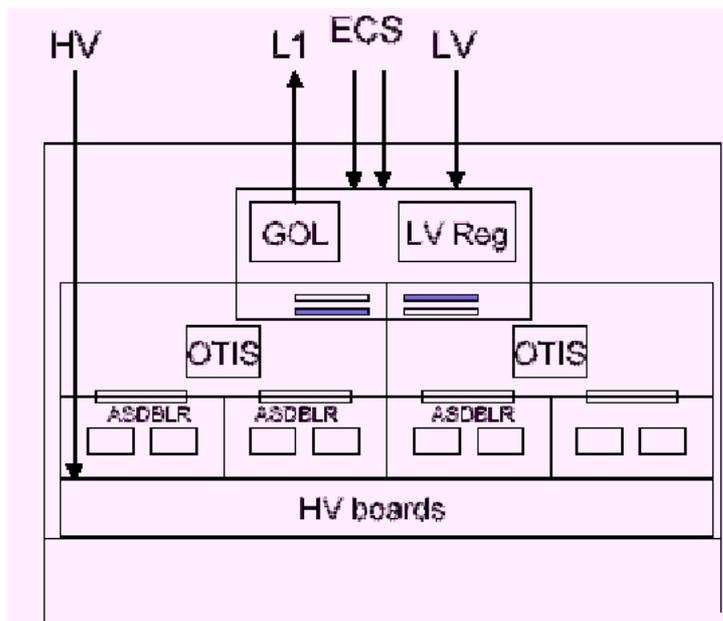


Abbildung 1.9: Schematische Darstellung der Ausleseelektronik einer Lage am Ende eines Driftkammermoduls. Die HV Boards sind auf die HV-Durchführungsplatine eines Driftkammermoduls gesteckt.

1.7 Das Zählgas

An die Zählgaskomposition für das Äußere Spurkammersystem werden verschiedene Anforderungen gestellt. Bezüglich der Betriebssicherheit im Experiment soll es folgende Eigenschaften haben:

- Es soll nicht brennbar, explosiv oder giftig sein.

- Es darf keine Komponenten des Detektors oder des Gassystems angreifen.
- Es muss strahlenhart sein. Es darf auch unter Bestrahlung keine Alterungseffekte hervorrufen, die den Betrieb der Driftkammern gefährden.

Bezogen auf die geforderten Betriebseigenschaften der Strawtubes, muss das Zählgas folgendes erfüllen:

- Zum Nachweis der ersten Cluster am Anodendraht soll es eine große Gasverstärkung haben.
- Für eine schnelle Signalauslese soll die Driftgeschwindigkeit für Elektronen groß sein.
- Um eine gute Ortsauflösung zu erreichen, sollen Diffusion und Attachment gering sein.

Attachment bezeichnet den Effekt, bei dem sich ein Elektron niedriger Energie (\sim eV) beim Stoß an ein Molekül des Zählgases anlagert. Der Effekt ist vernachlässigbar klein für Edelgase, muss aber berücksichtigt werden, wenn elektronegative Gase beigemischt werden. Mit steigendem Attachment steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der zum Anodendraht nächste Cluster die Anode nicht erreicht (Abbildung 1.8). Dadurch werden Energie- und Ortsauflösung der Strawtubes schlechter.

Die ursprünglich vorgesehene Zählgasmischung für das Äußere Spurkammersystem von LHCb ist Ar/CO₂/CF₄ im Volumenverhältnis (Vol.-%) 70:10:15. Im Vergleich zu Helium oder Neon besitzt Argon eine kleine mittlere Ionisationsenergie von 15,7 eV [41] und daher eine hohe Gasverstärkung. Bei 0,3 eV hat es ein Minimum im Elektronen-Wirkungsquerschnitt, dem sogenannten Ramsauer-Minimum. Das Minimum entsteht durch einen quantenmechanischen Interferenz-Effekt, bei dem die Hüllen- und die Drift-Elektronen im gleichen Energiebereich liegen, so dass das Gas für die Drift-Elektronen nahezu transparent wird. Durch die größere freie Weglänge steigt die Driftgeschwindigkeit der Elektronen und die Diffusion nimmt ab.

CF₄ hat aufgrund seiner Vibrations- und Rotationsmoden einen großen inelastischen Wirkungsquerschnitt für Elektronen mit Energien \geq 0,5 eV. Unter 0,5 eV wird der Wirkungsquerschnitt relativ klein. Durch Beimischung von CF₄ in Argon wird die Elektronenenergie in den Bereich des Ramsauer-Minimums verschoben, wodurch die Driftgeschwindigkeit zunimmt. In Abbildung 1.10 sind für verschiedene Ar/CF₄-Mischungen die Driftgeschwindigkeiten als Funktion der elektrischen Feldstärke dargestellt.

Das CO₂ wird als Quenchgas (Löschgas) verwendet. Quenchgase besitzen einen großen Wirkungsquerschnitt für UV-Photonen, die im Gasverstärkungsprozess bei höheren elektrischen Feldern entstehen. Die Quenchgase verhindern, dass sich die UV-Photonen ausbreiten und im Gasraum oder an der Kathode weitere Photoelektronen erzeugen.

CF₄ ist ein elektronegatives Gas mit hohem Attachment, das die Ortsauflösung im Strawtube verschlechtert. Bei der Festlegung der Mischungsverhältnisse ging man deshalb ein Kompromiss zwischen hoher Driftgeschwindigkeit und guter Ortsauflösung ein [1].

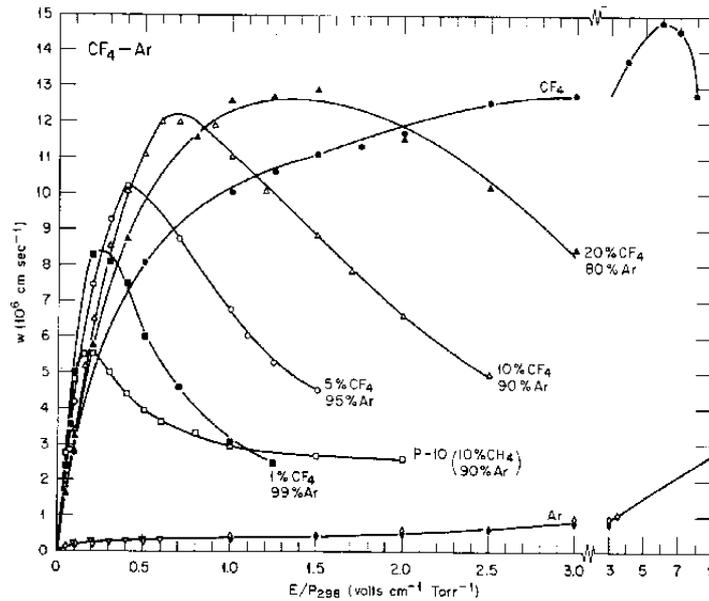


Abbildung 1.10: Die Driftgeschwindigkeiten als Funktion der elektrischen Feldstärke bei 1 Torr und 298° K in Ar/CF₄ bei verschiedenen Mischungsverhältnissen [62].

1.8 Kenngrößen der Strawtubes

Mit dem Zählgas Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) und bei einer Anodenspannung von + 1550 V ist die *effektive Gasverstärkung* (Kapitel 3.1) im Strawtube $G_{eff} \approx 40000$, die Ortsauflösung $< 200 \mu\text{m}$ und die Driftzeit $< 35 \text{ ns}$. Die hohe Driftgeschwindigkeit erlaubt eine Auslese der Teilchensignale von den Strawtubes innerhalb zweier *bunch crossings*⁶ ($\cong 50 \text{ ns}$). Das ist eine genügend kurze Zeitspanne, da im LHCb-Experiment im Mittel nur in jedem zweiten *bunch crossing* eine Wechselwirkung erwartet wird. Mit der Ortsauflösung von $< 200 \mu\text{m}$ wird die geforderte Impulsauflösung $\delta p/p = 0,4 \%$ erreicht.

1.9 Alterungseffekte in Gasetektoren

Gasetektoren werden seit langem in den Experimenten der Hochenergiephysik vielseitig eingesetzt. Fast immer konnten dabei nach unterschiedlich langem Betrieb unter Bestrahlung Änderungen in ihrem Betriebsverhalten festgestellt werden. Typische Beobachtungen sind Verlust von Gasverstärkung und Energieauflösung, sowie das Auftreten zusätzlicher Ströme. In vielen Fällen wurden die Gasetektoren unbrauchbar, bzw. zerstört. Die Vielfalt der Effekte, die solche Verhaltensänderungen verursachen, ist sehr groß und wird mit dem Begriff *Alterung* zusammengefasst.

Art und Umfang von Alterungseffekten können von vielen Parametern abhängen, wie z.B. Strahlendosis, Strahlenart, Größe der bestrahlten Fläche, Gasfluss, Druck und

⁶*bunch crossing* = Kollision der Teilchenpakete

Temperatur. Die Betriebs- und Strahlungsbedingungen im Experiment lassen sich in der Regel nicht im Labor herstellen. Deshalb können auch in erfolgreich getesteten Kammern im späteren Experiment Alterungseffekte auftreten.

Polymerisation

Eine häufige Ursache von Alterungseffekten ist die Polymerisation. Beim Gasverstärkungsprozess kann der nahe Bereich um die Anode als Plasma mit hoher Energiedichte angesehen werden. Darin können Polymerisationsprozesse ausgelöst werden, wie sie aus der Plasmachemie bekannt sind [33]. Dabei entstehen durch Dissoziation Radikale⁷, die sich aneinander binden und große Moleküle, quergebundene Polymere, bilden. Polymere sind fest, haben ein gutes Haftvermögen an Oberflächen, sind resistent gegen die meisten Chemikalien und schwer löslich. Leichte Polymere werden mit dem Gasfluss fort getragen. Schwere und komplexe Polymere lagern sich an Elektroden und verursachen typische Alterungseffekte.

Polymerisation ist stark von der Zusammensetzung des Plasmas abhängig. Zum Beispiel können in Driftkammern, die unter Bestrahlung mit CH₄-haltigem Zählgas betrieben werden, nach kurzer Betriebsdauer durch Polymerisation verursachte Alterungseffekte beobachtet werden [4].

Materialien

Oft reichen geringe Verschmutzungen des Zählgases aus, um Polymerisationsprozesse auszulösen. Daher dürfen keine ausgasende Materialien im Gasvolumen verwendet werden. Außerdem müssen alle Materialien ausreichend strahlenhart sein. Das bedeutet, sie dürfen unter der Bestrahlung im Experiment nicht ihre mechanischen, chemischen oder elektrischen Eigenschaften verändern.

Alterungseffekte an Anodendrähten

Typische Alterungseffekte an den Anodendrähten sind Ablagerungen von Polymeren oder von Bestandteilen des Zählgases. Es können sich Schichten, aber auch Strukturen an den Drähten bilden, wie z.B. *Whiskers*. Das sind senkrecht vom Draht abstehende, härchenartige Gebilde aus Polymeren. Die Ablagerungen führen in der Regel zu Verlust von Gasverstärkung und Energieauflösung.

Ein weiterer Alterungseffekt ist die Anodendrahtkorrosion. Je nach der Zusammensetzung im Plasma können Radikale entstehen, die den Anodendraht angreifen. Die Stärke der Anodenkorrosion hängt von der Art und der Qualität des verwendeten Drahtmaterials ab. Neben Ätzprozessen konnte auch schon ein Anschwellen der Drähte beobachtet werden [63].

Eine gängige Maßangabe für die Bestrahlung von Gasdetektoren ist die über die Betriebsdauer angesammelte Ladung pro cm Anodenlänge. Der relative Verlust der Gasverstärkung pro 1 C/cm ist als Alterungsrate definiert [7].

⁷Radikale = Atome oder Moleküle mit einem oder mehreren ungepaarten Valenzelektronen

Der Maltereffekt

Der Maltereffekt [64] ist ein häufig beobachteter Alterungseffekt an den Kathoden. Er tritt auf, wenn auf der Kathode eine dünne isolierende Schicht entsteht (z.B. durch Polymerisation). Die positiv geladenen Ionen lagern sich auf der Schicht an und erzeugen mit der induzierten Ladung an der Kathode ein hohes elektrisches Dipolfeld. Ab etwa 10^7 V/cm kommt es zu Feldemission und Elektronen werden aus der Kathode gezogen. Viele der Elektronen driften zur Anode und lösen einen neuen Gasverstärkungsprozess aus, bei dem wiederum positive Ionen erzeugt werden, die sich auf der isolierenden Schicht der Kathode anlagern und dort das Dipolfeld verstärken.

Der Maltereffekt führt zu Rauschen und Dunkelströme, die auch erhalten bleiben, wenn die Bestrahlung des Gasdetektors unterbrochen wird. Erst wenn die Versorgungsspannung für eine Weile abgeschaltet wird, normalisiert sich das Betriebsverhalten des Gasdetektors wieder.

Der Einfluss von CF_4 auf Alterung

CF_4 wird häufig aufgrund seiner Eigenschaft verwendet, die Driftgeschwindigkeit im Zählgas zu erhöhen. Darüber hinaus wurden in einigen Alterungsstudien beobachtet, dass es Polymerisationsprozesse nicht nur verhindern, sondern auch bereits entstandene Polymere von den Elektroden wieder lösen kann [65]. Es erzeugt im Gasverstärkungsprozess sehr reaktive Radikale. Der Nachteil ist, dass wegen der hohen Reaktivität die Auswahl der Kammermaterialien weiter eingeschränkt werden muss. In einigen Studien wurde beobachtet, dass sogar die Anodendröhte angegriffen wurden.

In Heidelberg wurden Alterungsstudien durchgeführt, um den Einfluss von CF_4 auf die Alterung von Driftkammermodulen zu untersuchen. Unter anderem sind sie Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Kapitel 2

Entwicklung und Bau der Driftkammermodule für das Äußere Spurkammersystem

Das Äußere Spurkammersystem besteht aus 120 Halbmodulen unterschiedlichen Typs und 180 Modulen der vollen Länge von 5 m (Kapitel 1.4, Abbildung 1.7). Die Halbmodule werden im *Andrzej Soltan Institut for Nuclear Studies* in Warschau produziert [66], 120 der langen Module am NIKHEF in Amsterdam [43] und 60 lange Module am Physikalischen Institut in Heidelberg.

Ende 2001 wurde der erste Prototyp in Heidelberg fertiggestellt. Bis zum Start der Serienproduktion Anfang 2004 wurden Kammerdesign, Einzelkomponenten und der Produktionsablauf in mehreren Schritten optimiert. Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung und Produktion der Kammern vom Prototypen bis zum Beginn der Serienproduktion.

2.1 Generelle Richtlinien für den Modulbau

Auf dem Weg zur Entwicklung der endgültigen Driftkammermodule, gibt es von Beginn an Richtlinien, die unbedingt einzuhalten sind. Speziell bei der Materialauswahl für die Einzelkomponenten gibt es aus unterschiedlichen Gründen starke Einschränkungen.

2.1.1 Materialauswahl für den Modulbau

Die Auswahlkriterien der Materialien richten sich nicht nur nach den mechanischen und elektrischen Eigenschaften. Wegen der zu erwartenden immensen Strahlendosen müssen sie zudem strahlenhart sein. Darüber hinaus muss für alle Materialien, die im Modulinneren mit dem Zählgas in Kontakt kommen, gewährleistet sein, dass sie nicht ausgasen. Bereits im Bereich weniger ppm^1 können Verunreinigungen im Zählgas Alterungseffekte auslösen (Kapitel 1.9).

¹1 $ppm = part\ per\ million$, ein Tausendstel Promille

Materialien für die Strawtubes

Die Strawtubes sind aus zwei Folien als Spiralföhrchen gewickelt (Abbildung 2.1). Die beiden Lagen werden mit nicht ausgasendem und strahlenhartem Kleber zusammen geklebt. Die innere Lage der Strawtubes dient als Kathode der Driftröhrchen. Das

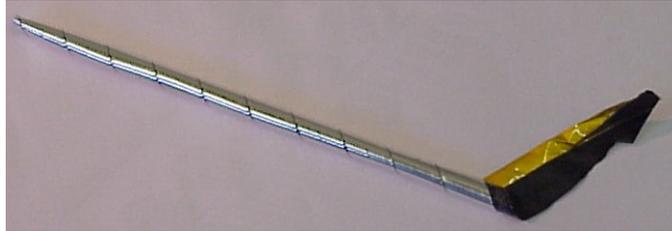


Abbildung 2.1: Die Strawtubes werden aus zwei Folien zweilagig gewickelt. Die schwarze innere Lage (Kathode) besteht aus leitfähigem Plastik (KaptonXC), die äußere aus Aluminium-Kapton-Laminat.

Kathodenmaterial muss folgende Eigenschaften besitzen:

- elektrische Leitfähigkeit,
- Strahlenhärte,
- Resistenz gegen Fluorkohlenwasserstoffe (wegen des CF_4 -Anteils im Zählgas),
- nicht ausgasend,
- geringe Strahlungslänge.

Die für den Bau des Äußeren Spurkammersystems von LHCb verantwortlichen Gruppen² profitierte bei der Materialauswahl für die Strawtubes von den Arbeiten und Erfahrungen von ATLAS, HERA-B und COMPASS [1]. Demnach wurde leitfähiges Kapton als Kathodenmaterial ausgewählt. Kapton, oder Polyimid, ist ein aromatisches, nicht ausgasendes Polymer und gehört zu den strahlenhärtesten Plastikmaterialien [8]. Durch Dotierung mit graphitischem Kohlenstoff wird die notwendige elektrische Leitfähigkeit hergestellt. Produziert und bezogen wird dieses Material von der Firma DuPont [67]. Die Produktbezeichnung lautet Kapton-160XC/370. Der Graphitanteil liegt bei 25 Vol.-%, die Foliendicke beträgt $40 \mu\text{m}$ und der Oberflächenwiderstand $370 \Omega/\square$.

Für die zweite äußere Lage wurde zuerst eine $25 \mu\text{m}$ dicke Aluminiumfolie verwendet, für den jetzt anstehenden Bau aber ein Laminat, bestehend aus $12,5 \mu\text{m}$ Aluminium und $25 \mu\text{m}$ Kapton. Das Aluminium dient als Abschirmung gegen einstreulende Störsignale und verringert das Übersprechen von Signalen auf benachbarte Kanäle.

Anodendraht

Aus einer ganzen Reihe von Alterungstests und verschiedenen Experimenten hat man gelernt für die Anoden goldbeschichtete Drähte zu benutzen [2], insbesondere wenn die Zählgas Mischung CO_2 und CF_4 enthält. Für unsere Driftkammermodule wird ein goldbeschichteter Wolframdraht mit $25 \mu\text{m}$ Durchmesser und einem Goldanteil von

²Im Folgenden: Outer Tracker Gruppe

6 Vol.-% verwendet. Er wird hergestellt und bezogen von der Firma California Fine Wire [68]. Der gleiche Draht kam auch in den Kammern des Äußeren Spurrkammersystems in HERA-B zum Einsatz.

Plastikmaterialien und Kleber für den Modulbau

Ein Driftkammermodul besteht aus vielen verschiedenen Einzelteilen, die zum Teil nur aus Plastikmaterialien hergestellt werden können. Die meisten Plastikmaterialien gasen allerdings stark aus oder sind nicht strahlenhart. Deswegen kommen sie für den Modulbau nicht in Frage. Das Gleiche gilt für Klebstoffe, wobei die Verwendung von Kleber beim Modulbau unvermeidlich ist. Bei der Vielzahl von Alterungs- und Ausgasungstests von verschiedenen Experimenten der Hochenergiephysik konnten allerdings Listen von Materialien und Klebern erstellt werden, die verwendet werden dürfen [4],[8],[11].

Neben Kaptonfolien kamen für den Bau unserer Driftkammermodule drei Plastikmaterialien in die nähere Auswahl: PEEK, ULTEM und NORYL. Wie auch Kapton, sind es Polymere mit eingebundenen aromatischen Gruppen, auch sie gasen nicht aus und sind strahlenhart. Die aromatischen Gruppen absorbieren die Anregungsenergie, wobei der angeregte Zustand zum Grundzustand zerfällt, ohne dass die Bindungen aufbrechen und Radikale gebildet werden [8].

PEEK oder Polyetheretherketon: Es hat eine hohe mechanische Robustheit, chemische Beständigkeit, ist ein guter Isolator und kann über weite Temperaturbereiche eingesetzt werden.

ULTEM oder Polyetherimid: Es ist chemisch weniger beständig, besitzt aber sonst ähnlich gute Eigenschaften wie PEEK. Es ist günstiger als PEEK und lässt sich besser verkleben.

NORYL N110: NORYL ist modifiziertes Polyphenylenether (PPE), mechanisch robust, hydrolytisch stabil und gut isolierend. Es absorbiert nur gering Wasser (im Gegensatz zu Kapton). Über weite Bereiche ist es thermisch stabil, schmilzt aber bereits bei 115°C.

Für die Verklebung der Einzelteile dürfen nur strahlenharte und nicht ausgasende Kleber verwendet werden. Zusätzlich müssen sie eine gute Hochspannungsfestigkeit besitzen. Da die 5 m langen Module nicht ohne weiteres in einem Ofen erwärmt werden können, verwenden wir bei der Kammerproduktion Kleber, die bei Raumtemperatur aushärten. Außerdem können so auch Materialien mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten verklebt werden, ohne dass es zu Verformungen kommt.

Stycast 1266 (A+B): Stycast 1266 ist ein Epoxidharzkleber aus zwei Komponenten, produziert und bezogen von E & C Speciality Polymers [69]. Er wurde bereits beim Kammerbau für das Innere Spurrkammersystem bei HERA-B verwendet [12]. Er besitzt eine geringe Viskosität (0,65 Pa·s), gute Benetzungseigenschaften und eignet sich für großflächige Klebungen. Mit Stycast können Plastik, Metall und Glas verklebt werden. Bei Raumtemperatur ist er nach 16 h vollständig ausgehärtet. Der Nachteil dieses Klebers ist, dass es sich dabei um kein perfektes Plastik handelt. Er hat kristalline Eigenschaften und bei mechanischer Belastung bilden sich leicht kleine Risse.

Araldite AY 103 und HY 991: Der Epoxidkleber Araldit AY 103 mit dem Härter

HY 991 wird beim Bau des ATLAS Transition Radiation Tracker und der GEM³-Detektoren des COMPASS-Experiments verwendet [4]. Er ist zähflüssiger (Anfangsmischviskosität: 3 - 4 Pa·s) als Stycast, aber ebenso hochspannungsfest, strahlungshart und gast nicht aus. Bei Raumtemperatur härtet er nach 24 h vollständig aus (Tabelle 2.1).

Temperatur	°C	20-25	40	60	80	100
Härtungsdauer	h	24	4	2	-	-
	min	-	-	-	30	15
Zugscherfestigkeit bei 23°C	N/mm ²	10-13	12-14	15-18	18-20	18-20

Tabelle 2.1: Härtungsbedingungen für Araldit AY 103 gemischt mit dem Härter HY 991 [13].

Microglasbubbles: Dabei handelt es sich um mikroskopische Glaskügelchen, die als Füllstoff oder Verdickungsmittel dem Kleber beigefügt werden können, ohne selbst auszugasen oder die Hochspannungsfestigkeit des Klebers zu beeinträchtigen. Die Viskosität der Kleber kann dadurch erhöht werden. In Araldit AY 103 mit HY 991 können Microglasbubbles bis zu einem Mischungsverhältnis von 1:1 Volumen eingerührt werden, ohne dessen Klebeeigenschaften signifikant zu verschlechtern.

Platinen für die Hochspannungsversorgung

Im Kammerinneren müssen Platinen für die Verlötung und Kontaktierung der Anodendrähte eingebaut werden. Wie alle Materialien, die im Modul mit dem Zählgas in Kontakt kommen, darf das Material für diese *PCBs*⁴ nicht ausgasen und muss strahlenhart sein. Für die Driftkammermodule werden *PCBs* aus dem feinfädigen und halogenfreien Epoxidharzglasfasergewebe G10 verwendet.

2.1.2 Umgebungsbedingungen beim Modulbau

Produktionsstätte

Die Driftkammermodule werden in einem Reinraum produziert. Dadurch wird die Verunreinigung des inneren Kammervolumens durch Staubpartikel um Größenordnungen verringert. Insbesondere ölige und fettige Staubpartikel, die sich auf den Elektroden ablagern, können im Kammerbetrieb unter anderem Stromüberschläge (*Trips*) und Dunkelströme verursachen und so den Gesamtbetrieb der Kammer verschlechtern, bzw. gefährden. Verunreinigungen im Gasvolumen der Kammer können außerdem Alterungseffekte initiieren.

Die Produktionsstätte muss klimatisiert sein. Große Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen müssen vermieden werden, um Verformungen und Ausdehnungen der Einzelteile zu verhindern. Anderenfalls entstehen mechanische Spannungen im fertiggestellten Modul, wodurch sie verbiegen oder Klebungen aufreißen können.

³ *GEM* = gas electron multiplier [35]

⁴ *PCB* = printed circuit board

Reinigungsprozeduren

Alle Einzelteile werden vor dem Einbau sorgfältig gereinigt, um Verschmutzungen im Kammerinneren zu verhindern und gegebenenfalls bessere Klebungen zu erreichen. Standardmäßig werden Verunreinigungen und Fette mit Ethanol (absolut) beseitigt. Sind die Teile genügend klein, werden sie im Ultraschallbad gereinigt, ansonsten werden sie mit fusenfreien Tüchern abgewischt.

2.2 Konstruktion eines 3 m langen Prototypen

Ziel war es einen ersten realistischen Prototypen herzustellen. Dabei sollen die gleichen Produktionsschritte und Materialien wie in der späteren Serienproduktion verwendet werden. Erfahrungen zu sammeln, frühzeitig eventuelle Schwachpunkte aufzuspüren und diese gegebenenfalls zu korrigieren, waren die wesentlichen Aspekte für den Bau des Prototypen.

2.2.1 Der Entwurf des Prototypen

Im Entwurf des Prototypen wurden sämtliche Dimensionen, Materialien, Anordnungen und Produktionsschritte eingeplant, wie sie auch für die spätere Massenproduktion vorgesehen waren. Insbesondere wurde versucht alle Anforderungen an die mechanischen Toleranzen, das Gasflussschema und das Erdungsschema zu berücksichtigen.

Das Gasflussschema

Für das Zählgas $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ (75:10:15 Vol.-%) ist wegen des CF_4 -Anteils ein geschlossenes Gaskreislaufsystem für das Äußere Spurkammersystem von LHCb notwendig. Im Gegensatz zu einem offenen Gassystem ist ein geschlossenes anfällig gegen Verschmutzungen, weil der Schmutz im System akkumuliert wird. Das Volumen in den Driftkammermodulen soll getrennt werden in ein inneres Zählgasvolumen durch die Strawtubes und ein äußeres Gasvolumen, das die Strawtubes umgibt. Zum einen wird so das Zählgasvolumen gegen Verunreinigungen im Modul geschützt, zum anderen kann die Qualität des Zählgases getrennt vom umhüllenden Gas kontrolliert werden. Voraussetzung dafür ist eine gasundurchlässige Trennung von innerem und äußerem Gasvolumen.

Alle Strawtubes im Modul müssen gleichmäßig mit dem Zählgas durchflossen werden. Für beide Gasvolumen soll der Gasfluss ein Volumen pro 2 Stunden betragen, wodurch 90 % des Gases innerhalb zweier Stunden erneuert wird. Sowohl Driftkammermodul als auch Strawtubes müssen gasdicht sein und dürfen keine Lecks haben, damit das Gas nicht mit Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf, usw. verunreinigt wird. Solche Verunreinigungen haben starken Einfluss auf die Gasverstärkung, Elektroneneinfangrate und Driftgeschwindigkeit. Außerdem können sie Alterungseffekte verursachen [14].

Das Erdungsschema

Von den Modulen wird verlangt, dass sie einen geschlossenen Faradaykäfig um die Strawtubes bilden, damit hochfrequente Störsignale nicht einstreuen können. Des wei-

teren muss ein guter und stabiler Erdungskontakt zu den Strawtubes hergestellt werden, sowohl zur äußeren Aluminiumlage, als auch zur inneren Kathode. Eine Klebung kann keinen genügend guten elektrischen Kontakt zwischen den Lagen über die vorgesehene LHCb-Betriebsdauer von 10 Jahre gewährleisten.

End- und Mittelstücke

Von zentraler Bedeutung für den Bau sind die Mittel- und Endstücke, die sich an den Enden der Strawtubes befinden, wobei die Mittelstücke die Strawtubes in der Mitte des Moduls trennen (Abbildung 2.2). Beim Entwurf waren mehrere Anforderungen zu berücksichtigen, die die Mittel- und Endstücke erfüllen müssen. Sie sollen:

- das Zählgas gleichmäßig an alle Strawtubes verteilen,
- das innere vom äußeren Gasvolumen trennen,
- die Strawtubes gasdicht zum äußeren Volumen abschließen,
- elektrischen Kontakt zur inneren Lage des Strawtubes herstellen,
- den Anodendraht und die Strawtubes positionieren.

In oder an den End- und Mittelstücken müssen Lötstellen zum Festlöten der Anodendrahten mit eingeplant werden und von außerhalb der Kammer müssen die Anoden kontaktiert werden können.

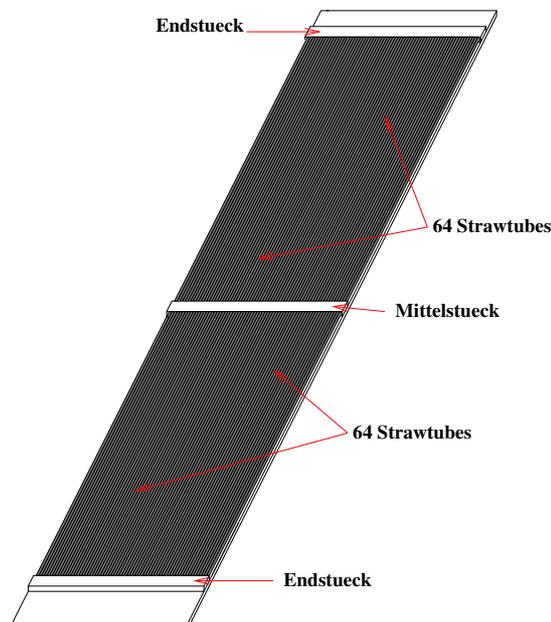


Abbildung 2.2: Skizze einer Modullage. An den Modulenden befinden sich die Endstücke, an die die Enden der Strawtubes befestigt sind. In der Mitte sind die Strawtubes durch die Mittelstücke geteilt. Ein Detektormodul wird aus zwei Modullagen zusammengesetzt.

Bei den End- und Mittelstücken handelt es sich um Gasverteilerboxen, die sich über die gesamte Modulbreite (ca. 34,5 cm) erstrecken. An einer Längsseite sind mit einem *Pitch*⁵ von 5,4 mm ca. 10 mm lange Röhrechen eingeklebt, auf die die Strawtubes gesteckt werden. Abbildung 2.3 zeigt eine Querschnittsskizze eines Endstücks. Anhand dieser Skizze wird der Aufbau eines Endstücks beschrieben.

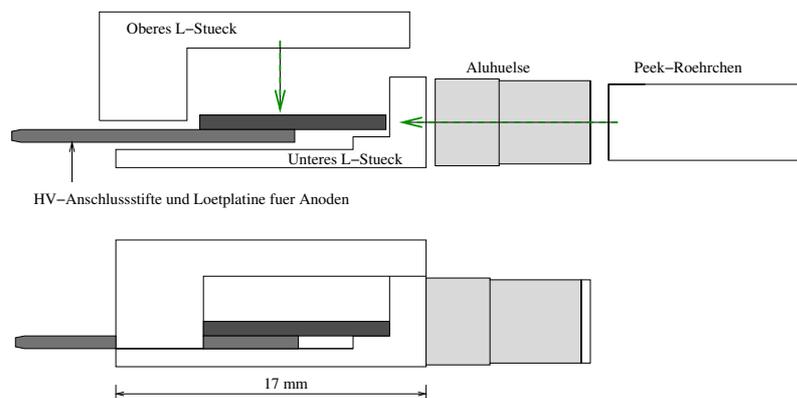


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau und Querschnittsskizze der Endstücke vom Prototypen. Zwei aufeinander geklebte, L-förmige Leisten bilden den Grundkörper dieser Gasverteilerboxen. In die untere L-Leiste werden nebeneinander 64 mit Aluminium umhüllte PEEK-Röhrchen eingeklebt, auf die später die Strawtubes aufgesteckt werden. In die Gasverteilerbox ist eine Platine mit 64 Lötstellen für die Anodendrähte eingeklebt. 64 an die Platine angelötete Anschlussstifte ermöglichen den Kontakt zu den einzelnen Anoden von außerhalb der Kammer.

Abbildung 2.4 zeigt ein offenes Endstück, auf eine Trageplatte geklebt. Teilweise sind schon Strawtubes auf das Endstück gestülpt. Über die Aluminiumhülsen entsteht ein elektrischer Kontakt zur inneren Lage der Strawtubes.

Nachdem alle Strawtubes aufgesteckt und verdrahtet sind, wird das Endstück mit der zweiten L-förmigen Leiste geschlossen. Abbildung 2.5 zeigt die geschlossene Gasverteilerbox. Durch die Bohrungen in der oberen Leiste werden Zählgas und das umhüllende Gas zugeführt, bzw. beim gegenüberliegenden Endstück abgeleitet. An die Endstücke werden Seitenwände aufgeklebt.

In Abbildung 2.6 ist ein offenes Mittelstück dargestellt. Das Mittelstück ist auf zwei Seiten mit jeweils 64 PEEK-Röhrchen bestückt. Darauf werden die Enden der Strawtubes gesteckt. Hier haben die PEEK-Röhrchen keine Aluminiumhülsen, da die inneren Lagen der Strawtubes nicht an beiden Enden elektrisch kontaktiert werden müssen. In dem Mittelstück ist eine Platine eingeklebt. Sie hat 128 Lötstellen für die Anodendrähte der 128 Strawtubes. Die Lötstellen sind gegen die Strawtubes leicht abgewinkelt. Bei gleich bleibender Länge der Lötstellen verkürzt sich dadurch der tote Bereich in der Modulmitte. Vor jeder Lötstelle sind kleine Stifte in die Platine eingesetzt, die die Anodendrähte umlenken.

⁵*Pitch*= Dimension der Strukturwiederholung

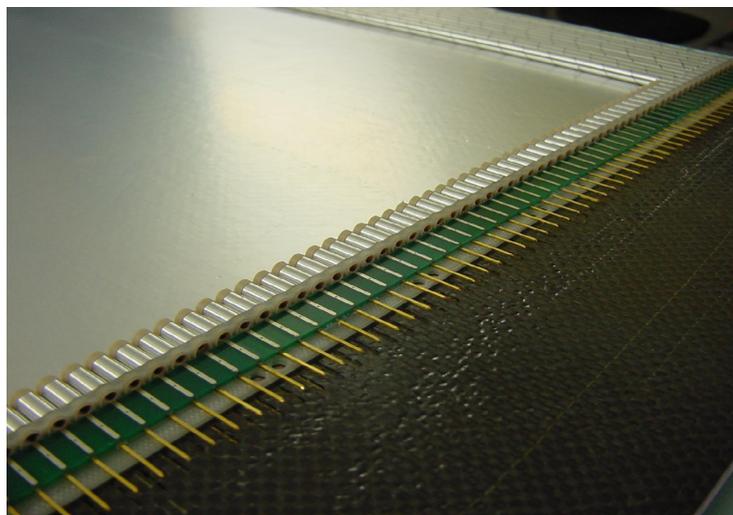


Abbildung 2.4: Ein offenes Endstück, voll bestückt mit allen Röhrchen, auf die die Strawtubes gesteckt werden sollen. Die Platine mit den Lötstellen für die Anodendrähte und den Kontaktstiften ist bereits eingeklebt.

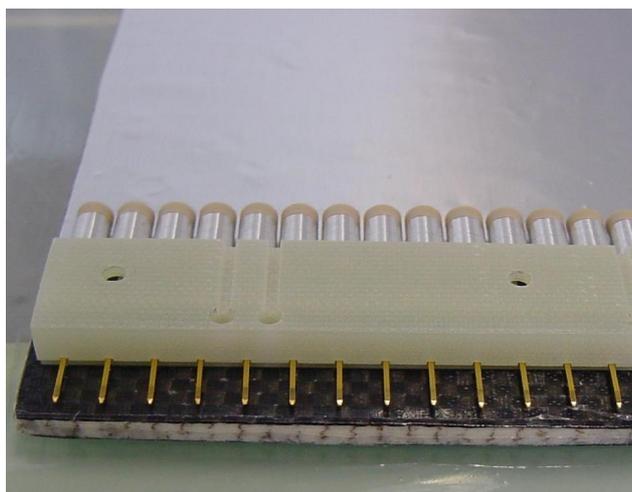


Abbildung 2.5: Die komplette Gasverteilerbox. Die Bohrungen links und rechts dienen der Zählgasversorgung der Strawtubes. Durch die Bohrungen weiter im Vordergrund wird das umhüllende Gas geleitet.

Sobald alle Strawtubes aufgesteckt und verdrahtet sind, wird das Mittelstück mit einem Deckel und zwei Seitenwände zugeklebt. Mit Ausnahme der Öffnungen zu den Strawtubes ist es dann gasdicht.

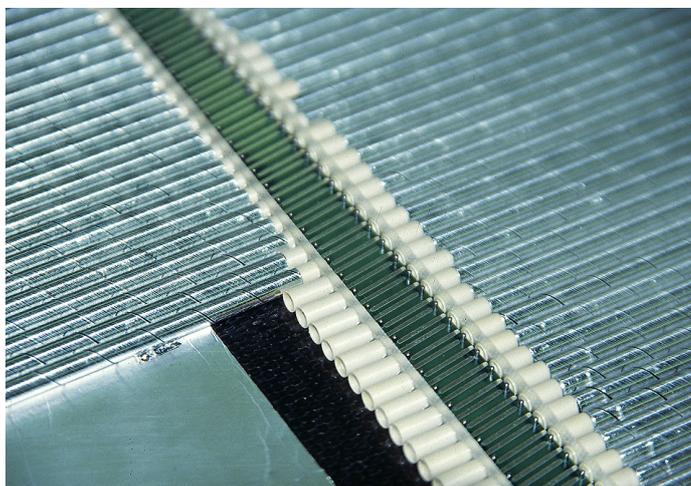


Abbildung 2.6: Das noch offene Mittelstück vom Prototyp. Von zwei Seiten werden die Strawtubes aufgesteckt. Sobald alle Strawtubes aufgesteckt und verdrahtet sind, wird das Mittelstück mit einem Deckel und zwei Seitenwände geschlossen.

Die Anodendrähte müssen möglichst genau in der Mitte der Strawtubes sein. Um sie zu zentrieren werden spiralförmige Drahtpositionierer, oder *Twister*, in die Peekröhrchen geklebt.

Twister zur Drahtpositionierung

Um den Anodendraht über die komplette Länge des Strawtubes in der Mitte zu halten, werden die Strawtubes an beiden Enden und dazwischen mit Twistern bestückt. Abbildung 2.7 zeigt einen 7 mm langen Twister, der in einen Strawtube eingebaut wird. An der Außenwand der Twister sind zwei Einkerbungen. Die Twister werden in Position gebracht und die Strawtubes werden mit einem speziellen Werkzeug in die Kerben gedrückt. Durch die äußere 25 μm dicke Aluminiumlage behält der Strawtube die Deformation und die Twister sitzen fest.

Der Durchmesser eines Twisters und der Innendurchmesser der Strawtubes sind gleich (5 mm). Wird ein Anodendraht durch ein Strawtube gefädelt, kann er nicht am Twister vorbei, sondern er windet sich entlang der Spirale durch den Twister.

Die Twister halten die Drähte mit einer Genauigkeit von 50 μm auf Position. Der Abstand zweier Twister beträgt bei den langen Modulen 80 cm. Unter Berücksichtigung der Gravitation und der elektrostatischen Kraft, ist bei einer Drahtspannung von 70 g die Auslenkung des Drahtes aus der Mitte bei horizontaler Lage maximal 60 μm . Die damit verbundene Änderung der elektrischen Feldstärke ist so gering, dass die Gasverstärkung um weniger als 1 % variiert [15].

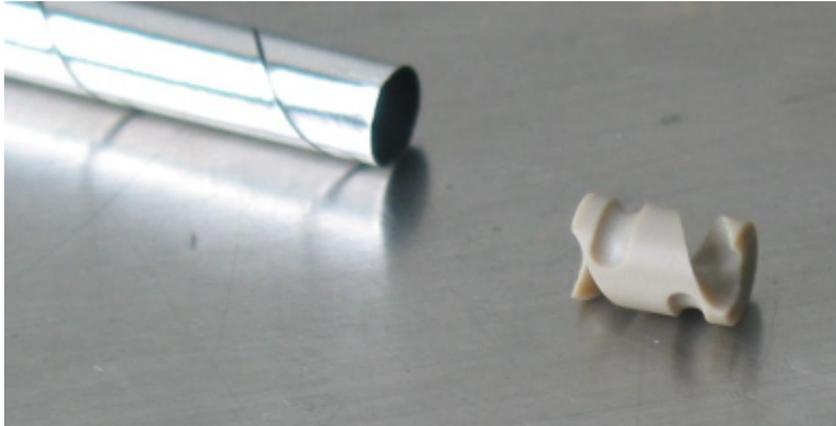


Abbildung 2.7: Mit Twistern wie diesen werden die Strawtubes bestückt. Sie halten den Anodendraht in der Mitte vom Strawtube. Ein Twister ist 7 mm lang.

Die Trageplatten

Die Platten, auf welche die Strawtubes, End- und Mittelstücke geklebt werden, sind 7 mm dick. Sie bestehen aus zwei Kohlefaserplatten (CFK), die jeweils $100 \mu\text{m}$ dick sind. Dazwischen ist als Kernmaterial eine Honigwabenstruktur (*Honeycomb*) aus Kapton eingeklebt. Dadurch werden diese Trageplatten trotz geringem Materialaufwand biegesteif. Wegen dem geringen Materialaufwand haben die Platten eine geringe Strahlungslänge von jeweils $0,11 \% X_0$.

2.2.2 Fertigung des Prototypen

Das Driftkammermodul besteht aus zwei Drahtlagen, bestückt mit jeweils 128 Strawtubes. Die Trageplatten der zwei Lagen sind verschieden lang, 305 cm und 320 cm. Die längere überragt das eigentliche Modul an beiden Seiten um 7,5 cm. Beide Platten sind 35,5 cm breit. Entlang der Ränder der Trageplatten ist die Honigwabenstruktur mit Klebstoff versiegelt. Dadurch haben die Platten ebene Kanten, die später als Klebeflächen für die Seitenwände notwendig sind.

An den Enden der Platten werden die Endstücke aufgeklebt. Zuvor werden aber noch Schrauben in die Trageplatten eingesetzt, die einen elektrischen Kontakt zu den Aluminiumhülsen der Endstücke und zu den Strawtubes von außerhalb der Kammer herstellen sollen. Abbildung 2.8 zeigt eine Skizze eines solchen Kontaktschraubchens. Sie werden im Abstand von 8 Strawtubes eingeklebt.

Die offenen Mittelstücke werden ungefähr 5 cm versetzt von der Mitte der Trageplatten festgeklebt. So bekommt jede Lage ein kurze und ein lange Hälfte. Die Flächen zwischen den End- und Mittelstücken sind mit Aluminiumfolie beklebt.

Die Strawtubes werden auf die erforderlichen Längen gekürzt, 154 cm, bzw. 144 cm. Alle Strawtubes werden mit jeweils zwei Twistern bestückt, so dass der Anodendraht etwa alle 50 cm in Position gehalten wird. Etappenweise werden 8 aneinander liegende Strawtubes auf die Trageplatten geklebt. Als Kleber wird Stycast 1266 verwendet. Die

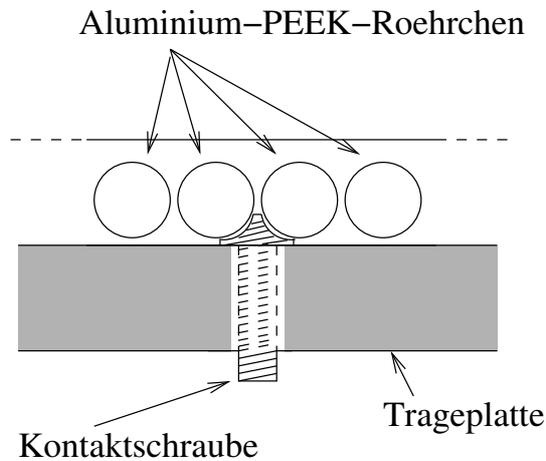


Abbildung 2.8: Querschnittsskizze durch die Trageplatte entlang eines Endstücks. In die Trageplatte ist eine Kontaktschraube eingesetzt, die von außerhalb der Kammer einen Kontakt zu den Aluminiumhülsen an den Endstücken herstellt. Eine solche Schraube wird nach jedem achten Aluminium-PEEK-Röhrchen in die Trageplatte eingeklebt.

Strawtubes sind so elastisch, dass sie ohne zu knicken auf die PEEK-Röhrchen der fest geklebten Mittel- und Endstücke gesteckt werden können. Bis der Kleber ausgehärtet ist, werden die 8 Strawtubes mit 6 Schablonen und mehreren Gewichten in Position gehalten⁶. Die Schablonen sind 10 cm lang und im Abstand von 17 cm an einer Leiste befestigt. Abbildung 2.9 zeigt die Schablonenleiste mit Gewichten beschwert auf frisch aufgeklebten Strawtubes.

Als zusätzliche Maßnahme um einen guten elektrischen Kontakt von den Strawtubes zum Massepotential herzustellen, wird jeder achte Strawtube in regelmäßigen Abständen mit der Aluminiumfolie der Trägerplatte mittels Ultraschall-Löttechnik verlötet (Abbildung 2.6). Dazu wird die Ultraschall-Lötstation *Solder Sonic SS-400* der Firma MBR Electronics [70] und spezielles Lötzinn *Ceralozer Al-200* verwendet. Nachdem eine Lage mit allen Strawtubes bestückt ist, beginnt die Verdrahtung. Der Anodendraht wird mit Stickstoff der Reinheit 5.0 durch Strawtubes gepustet und auf der Platine im Mittelstück verlötet. Am anderen Ende wird er über eine Umlenkrolle mit einem 60 g schweren Gewicht gespannt. Unter dieser mechanischen Spannung wird der Anodendraht auf die Platine am Endstück gelötet. Nachdem alle Strawtubes verdrahtet sind, werden die Mittel- und Endstücke verschlossen und mit Röhrchen für die Gasversorgung bestückt. Für das zusammengesetzte Modul ist in Abbildung 2.11 die Gaszufuhr von Zählgas und umhüllendem Gas skizziert.

Äquivalent zur ersten wird die zweite Modullage vorbereitet und bestückt. Vor der

⁶Bei einer Serienproduktion sollen Schablonen verwendet werden, mit denen alle 64 Strawtubes einer Lagenhälfte auf einmal eingeklebt werden können.

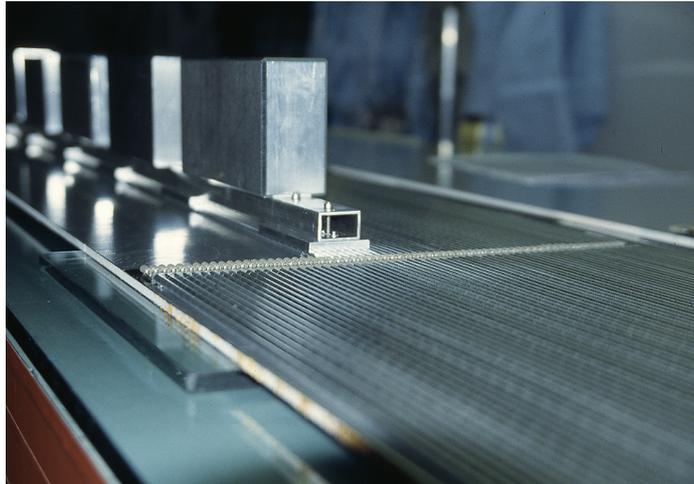


Abbildung 2.9: Aufkleben der Strawtubes auf eine Trageplatte. Immer 8 Strawtubes werden auf einmal aufgeklebt. Eine Schablonenleiste liegt mit Aluminiumblöcken beschwert auf den frisch aufgeklebten Strawtubes, damit sie positioniert bleiben bis der Kleber ausgehärtet ist.

Vereinigung beider Modullagen werden noch im Abstand von 30 cm Kupferlitzen auf die Aluminiumfolien entlang der Lagenränder gelötet. Für den Zusammenbau des Driftkammermoduls werden beide Lagen auf speziell angefertigten Tragevorrichtungen ausgerichtet. Mit einer Vakuumpumpe wird jede Trageplatte an 10 Stellen der ebenen Tragevorrichtung angesaugt und fixiert. Die Tragevorrichtungen werden mit den Modullagen dazwischen aufeinander gesetzt. Mit mehreren Gewinden kann der Abstand der Modullagen so eingestellt werden, dass jeweils die End- und Mittelstücke aufeinander liegen, sich berühren und zusammengeklebt werden können.

Um die Seitenwände anzubringen, wird das Modul mit kompletter Tragevorrichtung in Seitenlage gebracht. Die Seitenwände sind 1 mm dicke, einseitig aluminiumbeschichtete G10 Streifen. Im Abstand von 30 cm sind Löcher eingebohrt und vernietet, durch die die Kupferlitzen gefädelt werden. In Abbildung 2.10 sind Modul und Tragevorrichtung in Seitenlage dargestellt, zusammen mit vorbereiteter Seitenwand, die noch angeklebt werden muss. Die Kupferlitzen werden mit den vernieteten Löchern der Seitenwand verlötet und die Löcher mit Kleber gasdicht versiegelt. Durch die Kupferlitzen wird der elektrische Kontakt zwischen oberer und unterer Modullage und zu den Seitenwänden hergestellt. Dadurch bildet das Modul wie gefordert einen Faradaykäfig.

Nach dem Ankleben der Seitenwände ist das Modul fertig. Es kann aus der Tragevorrichtung genommen werden, mit den HV-Versorgungsplatinen und der Ausleseelektronik bestückt und an den Gasfluss angeschlossen werden.

2.2.3 Erste Tests und Erfahrungen mit dem Prototypen

Mit der Konstruktion des Prototypen gelang der erfolgreiche Bau eines realistischen Driftkammermoduls. Während der Produktion konnten viele Erfahrungen gesammelt werden. Es wurden aber auch Schwachpunkte im Prototyp festgestellt, die beim Ent-

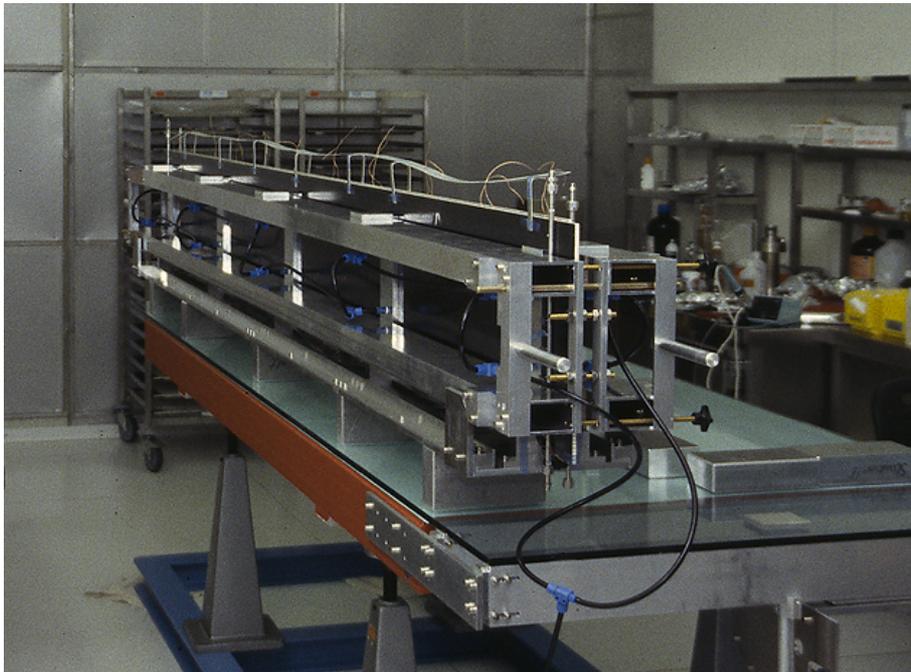


Abbildung 2.10: Das Modul mit kompletter Tragevorrichtung in seitlicher Lage. Die Seitenwand des Moduls ist noch nicht aufgeklebt. Die Kupferlitzen von den Modullagen sind durch die Löcher in der Seitenwand bereits durchgefädelt.

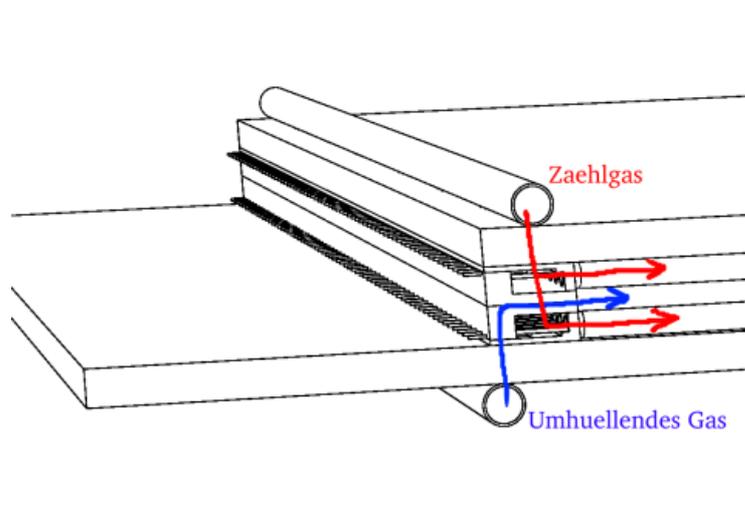


Abbildung 2.11: Skizzierter Gaszufluss am Modulende vom Prototypen. Am gegenüber liegenden Modulende strömen die Gase wieder nach draußen.

wurf nicht vorhersehbar waren.

Das Aufkleben der Strawtubes

Obwohl für das Aufkleben der Strawtubes Schablonen verwendet wurden, verlaufen sie nicht ausreichend parallel. Die Lücken zwischen zwei Strawtubes variieren erkennbar, teilweise um 1 mm. Es genügt offensichtlich nicht, alle 17 cm die Strawtubes über 10 cm in Position zu bringen. Falls die Strawtubes zu lange sind, oder innere Spannungen haben, biegen sie sich zwischen zwei Schablonen seitlich aus ihrer Sollposition. Um das zu verhindern, werden bei der Serienproduktion die Strawtubes über ihre komplette Länge mit einer Schablone positioniert.

Die Verdrahtung der Strawtubes

Für die Verdrahtung der Strawtubes wurde viel Zeit benötigt. Unter anderem lag es daran, dass sich der Anodendraht häufig an Twistern verfing. Zwei bereits festgeklebte Strawtubes mussten sogar ausgetauscht werden, weil die verknoteten Drähte sich nicht mehr aus den Strawtubes ziehen ließen. Durchschnittlich konnten zwei Personen etwa 12 Strawtubes pro Stunde verdrahten.

Am offenen Modul wurden direkt nach dem Verdrahten die mechanische Drahtspannung und die Hochspannungsfestigkeit der Strawtubes in Luft gemessen. Die Drahtspannung wurde über die Messung der Eigenfrequenz der Drähte bestimmt [16]. In Abbildung 2.12 sind die ermittelten Drahtspannungen aller 256 Anodendrähte histogrammiert. Alle ermittelten Werte liegen in einem akzeptablen Bereich.

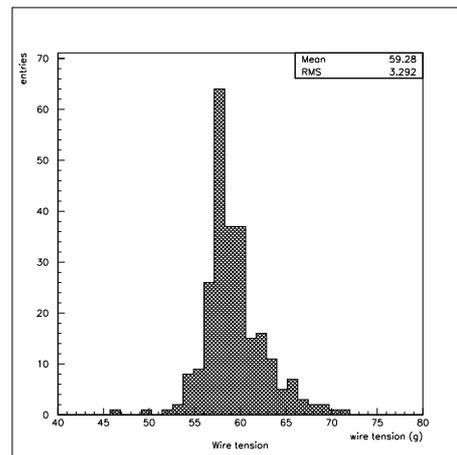


Abbildung 2.12: Die Drahtspannung aller 256 Anodendrähte histogrammiert. Alle Drähte wurden mit der gemessenen Drahtspannung akzeptiert. [19]

Für den Test der Hochspannungsfestigkeit in Luft wurden 1800 V an die Anoden angelegt. Als Kriterium, ob ein Draht akzeptiert wird, dient der Strom durch den Anodendraht. Er soll stabil sein und darf 100 nA nicht überschreiten. In Abbildung 2.13 sind die Ströme für alle 256 Anodendrähte histogrammiert. 9 Drähte mussten ausge-

tauscht werden. Die neu eingesetzten Drähte bestanden sowohl den HV-, als auch den Drahtspannungstest.

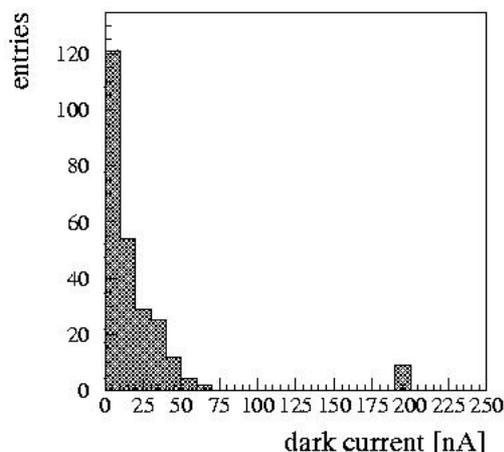


Abbildung 2.13: Die Anodenströme aller 256 Strawtubes beim Test der Hochspannungsfestigkeit in Luft am offenen Prototyp. 1800 V wurden an die Anoden angelegt. Die 9 Anodendrähte, durch die mehr als 100 nA flossen, wurden ausgetauscht. [19]

Das Erdungsschema

Für die elektrische Kontaktierung der Strawtubes untereinander und zum Masspotential waren zunächst rein mechanische Kontakte vorgesehen. Allerdings konnte so kein stabiler Erdungskontakt erreicht werden. Mit Ultraschalltechnik mussten die Strawtubes mit den Kontaktschraubchen und mit der Aluminiumfolie verlötet werden. Diese Arbeit ist zeitaufwendig. Sie muss sehr sorgfältig durchgeführt werden, um die Strawtubes beim Lötens nicht zu beschädigen. Die elektrische Verbindung der beiden Modullagen über die Kupferlitzen herzustellen, ist ebenfalls aufwändig und fehleranfällig. Diese Methoden sind für die Serienproduktion nicht gut geeignet.

Um elektrisches Rauschen beim Betrieb des Detektors klein zu halten, ist ein stabiler und breiter Erdungskontakt in die Kammer zu den Strawtubes und zum Faradaykäfig notwendig. Mit der Kontaktierung ausschließlich über acht Kontaktschraubchen an den Enden jeder Lage, ist das Driftkammermodul anfällig gegen elektrisches Rauschen.

Endstücke, Kleinteile, Twister

Inklusive der Twister besteht ein Endstück aus ca. 200 Einzelteilen, ein Mittelstück aus ca. 260 (die Platine, bestückt mit 128 Umlenkstiftchen, nicht mitgerechnet). Dazu kommen noch 512 Twister, die in die Strawtubes gesetzt werden. Alle diese Teilchen wurden in der hauseigenen mechanischen Werkstatt gefertigt. Für die Serienproduktion ist das nicht realisierbar, da die Kapazität der mechanischen Werkstatt nicht ausreicht. Um die Herstellung der Einzelteile an Firmen in Auftrag zu geben, muss eine alternative Produktionstechnik gefunden werden, da die Produktionskosten sonst zu hoch sind.

Bei der notwendigen Stückzahl ist die Produktion mit Spritzgusstechnik, statt durch mechanische Bearbeitung, deutlich kostengünstiger. Twister, wie sie im Prototyp eingesetzt wurden, können aber im Spritzgussverfahren nicht produziert werden. Daher wurden neue Drahtpositionierer entworfen.

Durch die große Anzahl an Klebungen und Fertigungsschritten, ist ein End- oder Mittelstück anfällig gegen Produktionsfehler. Besonders betrifft das die Gasdichtigkeit. In der Tat musste festgestellt werden, dass an vielen einzelnen Stellen der Mittel- und Endstücke Gaslecks vorhanden waren. Am Prototyp war es möglich, diese Gaslecks in mehreren Klebeschritten nach und nach abzudichten. Ein solcher zusätzlicher Zeit- und Arbeitsaufwand für ein einzelnes Modul kann aber in der Serienproduktion nicht aufgebracht werden (, jede Klebung muss mindestens zwölf Stunden aushärten).

Gasdichtigkeit

Bevor die beiden Modulhälften vereint wurden, wurde die Gasdichtigkeit des Zählgasvolumens innerhalb der Strawtubes, Mittel- und Endstücke getestet. Der Messaufbau ist in Abbildung 2.14 skizziert. Am Gaseingang wurde mit dem Flussmesser I, am Gasausgang mit Flussmesser II der Gasfluss gemessen. Der Differenzdruck im Zählgasvolumen gegen den Umgebungsdruck wurde zwischen Flussmesser I und Gaseingang gemessen. In Tabelle 2.2 sind die Daten verschiedener Messungen eingetragen. Bei

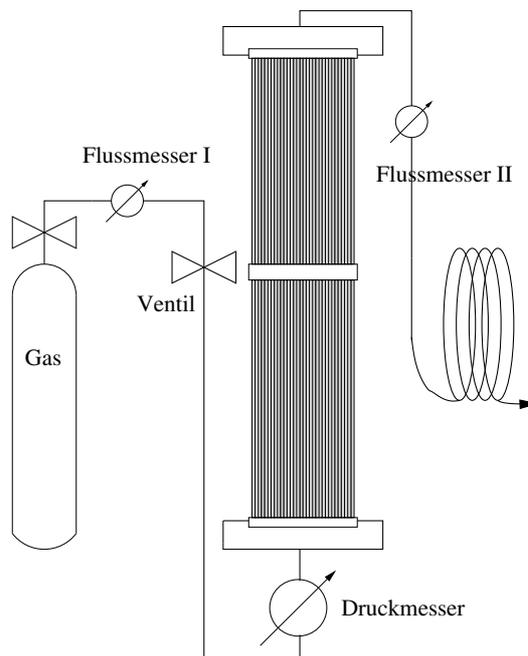


Abbildung 2.14: Skizzierter Aufbau für die Messung der Gasdichtigkeit der Gasvolumen vom Prototypen. Der Gasfluss wird am Gaseingang und am Ausgang gemessen. Zwischen dem ersten Flussmesser I und dem Gaseingang wird der Differenzdruck gegen den Umgebungsdruck gemessen.

der ersten Messung wurde von dem einströmenden Gas am Ausgang nichts mehr gemessen. Mit dem Leckdetektor 196 [71] wurden mehrere Gaslecks an den End- und

Mittelstücken gefunden. Der Flusswiderstand durch die Gaslecks war geringer, als durch den Flussmesser II.

In mehreren Iterationen konnten die großen Gaslecks abgedichtet werden, wobei die Zählgasvolumen der Modullagen trotzdem nicht gasdicht wurden. Stattdessen detektierte der Lecksucher viele kleine Gaslecks an den Strawtubes. In der Summe waren die 128 Strawtubes einer Modullage so gasdurchlässig wie ein Sieb. Für die Produktion der Driftkammermodulen für LHCb sind derart undichte Strawtubes untauglich.

Das Modul wurde fertiggestellt, ohne dass Zählgasvolumen und umhüllendes Volumen getrennt werden konnten. Es musste genügen, dass das komplette Modul gasdicht ist. Die in Abbildung 2.14 skizzierte Messung wurde für das gesamte Gasvolumen (umhüllendes und Zählgasvolumen) des Moduls wiederholt. Das gesamte Modul war gasundicht. Wiederum konnten einzelne Gaslecks gefunden und abgedichtet werden, ohne erkennbaren Fortschritt. Mit dem Leckdetektor wurde festgestellt, dass über die gesamte Modullänge Gas aus der äußeren CFK-Haut strömte. Wir vermuten, dass das Gas am Rand zwischen den Trageplatten und den Seitenwänden durch die Honigwabenstruktur entweichen konnte, wie in Abbildung 2.15 skizziert. War das der Fall, kann auf gleichem Weg Luft (N_2 , O_2 , H_2O) in das Modul diffundieren und das Zählgas verunreinigen.

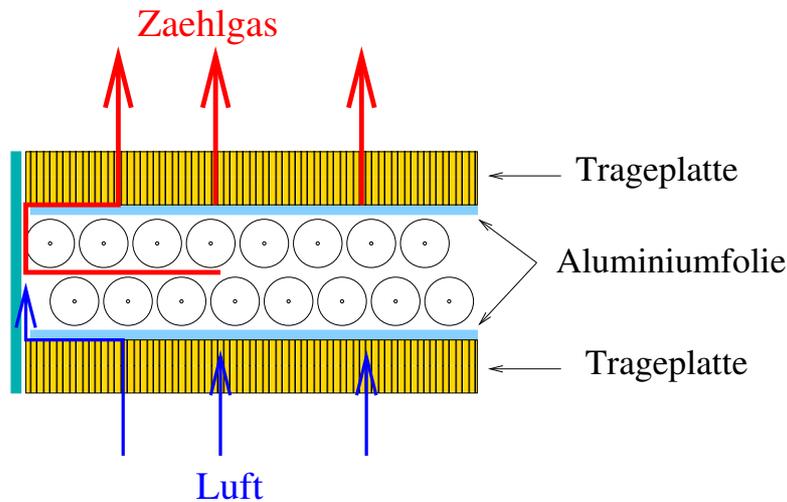


Abbildung 2.15: Die Skizze zeigt einen Weg, über den das Gas entweichen kann. Auf gleichem Weg kann Luft in das Modul diffundieren.

Die äußere CFK-Haut der Trageplatten wurde nachträglich mit einer $25 \mu\text{m}$ dicken Kaptonfolie überklebt. Dadurch wurde der Prototyp schließlich gasdicht (Tabelle 2.2). Bei einer weiteren Messung der Gasdichtigkeit verlor das geschlossene Driftkammermodul $0,4 \text{ mbar/min}$ bei einem anfänglichen Überdruck von $8,5 \text{ mbar}$.

Der erhöhte Anteil der gesamten Strahlenslänge X_0 durch den zusätzlichen Kleber und der Kaptonfolie fallen für den Prototypen nicht ins Gewicht, für das komplette Spurkammersystem müsste das zusätzliche Material aber berücksichtigt werden.

Messung Nr.	Flussmesser I _{in}	Flussmesser II _{out}	Überdruck im Gasvolumen
1	1072 ml/min	0,5 ml/min	2 mbar
2	263 ml/min	0,1 ml/min	0,5 mbar
3	967 ml/min	0,9 ml/min	8,5 mbar
4	392 ml/min	0,3 ml/min	0,3 mbar
5	44 ml/min	41 ml/min	9,7 mbar

Tabelle 2.2: Mit dem in Abbildung 2.14 skizzierten Messaufbau wurden die Gasflüsse am Gaseingang und -ausgang und der Überdruck im Gasvolumen gemessen.

- 1** Nur Zählgasvolumen direkt nach Verschließen der Mittel- und Endstücke.
- 2** wie **1**
- 3** Nur Zählgasvolumen nach Abdichten der Mittel- und Endstücke.
- 4** Gesamtes Gasvolumen direkt nach Fertigstellung des Driftkammermoduls.
- 5** Nach zusätzlichem Abdichten der Modulbox mit Kaptonfolie.

Fazit aus der Prototypenkonstruktion

Trotz der beschriebenen Schwierigkeiten konnte mit Erfolg ein realistisches Driftkammermodul produziert werden. Es konnte eine über 3 m lange, stabile Modulbox hergestellt werden. Für das Bestücken der Strawtubes mit Twister und das anschließende Verdrahten und Verlöten der Anoden wurden vielversprechende Produktionstechniken gefunden.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Prototypenkonstruktion war das Erkennen der Probleme, die bis zur Serienproduktion gelöst werden müssen. Folgende Erkenntnisse wurden gewonnen:

- Das Erdungsschema muss verbessert werden und ein stabiler Erdungskontakt zu den inneren und äußeren Lagen der Strawtubes gewährleistet sein.
- Die Produktion muss so vereinfacht werden, dass nach der Vereinigung der Modullagen auf Antrieb ein gasdichtes Modul entsteht. Dazu sollen nach Möglichkeit die Anzahl an Klebungen reduziert werden und die Klebeflächen verbessert werden.
- Die End- und Mittelstücke bestehen aus zu vielen Einzelteilen. Deswegen sind sie zeit- und kostenaufwändig herzustellen und anfällig gegen Fehler (z.B. Gaslecks).
- Die Drahtpositionierer müssen so umgeändert werden, dass sie kostengünstig in großer Stückzahl hergestellt werden können, z.B. im Spritzgussverfahren.
- Ein grundsätzliches Problem sind die Strawtubes, die nicht genügend gasdicht sind. Für sie mussten die Spezifikationen neu erstellt werden. Um Strawtubes innerhalb dieser Spezifikationen produzieren zu können, mussten zusammen mit dem Hersteller neue Produktionstechniken gefunden werden.

2.3 Spezifikation und Optimierung der Strawtubes

Über die Anforderungen an die Strawtubes wird ausführlich in [14] und [17] berichtet. Die geforderte Gasdichtigkeit der Strawtubes folgte aus der Notwendigkeit, umhüllendes und Zählgasvolumen zu trennen. Für eine genügend gute Trennung wird angenommen, dass innerhalb eines Gasaustausches nicht mehr als 5 % des Gasvolumens eines Strawtubes in das umhüllende Volumen entweichen darf. Daraus kann eine maximal zulässige Permeabilität für die Strawtubes errechnet werden.

Die Permeabilität ist definiert durch

$$P = \frac{V}{A} \cdot \frac{1}{\Delta p_0 \cdot \Delta t} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (2.1)$$

Dabei ist $\frac{V}{A}$ das Verhältnis vom Volumen V zur Oberfläche A des Körpers, dessen Permeabilität gemessen werden soll, Δp_0 der Differenzdruck zwischen den beiden Seiten der Oberfläche und ΔV das entweichende Gasvolumen in der Zeitspanne Δt .

Aus der Forderung $\frac{\Delta V}{V} = 0,05$ in $\Delta t = 7200$ s, ergibt sich für die Strawtubes die maximal zulässige Permeabilität $P = 8,7 \cdot 10^{-6} \frac{m}{bar \cdot s}$ [14]. Eine Sicherheitsspanne mit einbezogen, wird für die Permeabilität der Strawtubes ein oberes Limit gesetzt mit

$$P = 1,0 \cdot 10^{-6} \frac{m}{bar \cdot s} \quad (2.2)$$

Mit $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{p}$ kann Gleichung 2.2 in eine obere Leckrate der Strawtubes bei festem Überdruck Δp_0 umgewandelt werden. Dabei ist Δp der Druckabfall bei Absolutdruck p , wobei p als konstant 1000 mbar angenommen werden kann. Für den Radius r und die Länge l der Strawtubes gilt $r \ll l$. Damit ist $\frac{V}{A} \approx const$ für verschiedene Längen der Strawtubes.

Die maximal zugelassene Leckrate $R = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ für die Strawtubes ergibt sich somit zu

$$R \leq 0,5 \frac{mbar}{min} \quad , \text{ bei } \Delta p_0 = 10 \text{ mbar.} \quad (2.3)$$

Gasdichtigkeitstests verschiedener Strawtubes

Für den Prototypen wurden zweilagige Strawtubes verwendet. Die äußere Lage bestand aus 25 μm dicker Aluminiumfolie, die innere aus 40 μm dicker, leitfähiger KaptonXC-Folie. Nachdem festgestellt wurde, dass diese Strawtubes nicht gasdicht genug waren, um umhüllendes und Zählgasvolumen zu trennen, wurden an einzelnen Strawtubes Dichtigkeitstests durchgeführt. Es galt zu klären, ob die Strawtubes an sich undicht sind, oder erst beim Einbau beschädigt wurden.

Aus drei verschiedenen Produktionsreihen wurden 27 neue Strawtubes getestet. Die gemessenen Leckraten liegen alle zwischen $R = 14 \frac{mbar}{min}$ und $1 \frac{mbar}{min}$ bei $\Delta p_0 = 9$ mbar. Zwischen den Produktionsreihen gibt es keine deutlichen Unterschiede. Ein Strawtube wurde absichtlich geknickt und etwas eingedrückt, ohne Einfluss auf die Leckrate. Offensichtlich sind die Strawtubes produktionsbedingt nicht genügend gasdicht.

Beim Abziehen der Aluminiumlage von der Kaptonlage eines Strawtubes war zu erkennen, dass der Kleber zwischen den Lagen nicht gleichmäßig verteilt war. Insgesamt

erwies sich die Klebung von Aluminium auf KaptonXC als Schwachstelle der Strawtubes.

Es wurde eine Testreihe von Strawtubes hergestellt, die aus zwei KaptonXC-Folien gewickelt wurden. Zusätzlich wurden einige dreilagige Strawtubes produziert, bestehend aus zwei inneren, 40 μm dicken KaptonXC-Lagen und einer äußeren, 25 μm dicken Aluminiumlage. Es sollte geprüft werden, ob durch die Klebung von KaptonXC auf KaptonXC eine kleinere Permeabilität der Strawtubes erreicht werden kann. Einige 10 Strawtubes wurden getestet. Die gemessene Permeabilität war für alle $P \leq 1,0 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{bar} \cdot \text{s}}$.

Auf eine äußere Aluminiumschicht kann bei den Strawtubes nicht verzichtet werden. Sie verhindert das Einstreuen von Signalen und verringert das Übersprechen der Signale auf die benachbarten Strawtubes. Mit einer zusätzlichen KaptonXC-Lage und einer Aluminiumlage erhöht sich die Strahlungslänge der Strawtubes in einem Modul von 0,276 % X_0 auf 0,387 % X_0 [1]. Allerdings kann das durch die Verwendung dünnerer Folien ausgeglichen werden.

Für die Serienproduktion der Driftkammermodule konnten schließlich Strawtubes hergestellt werden, die alle Anforderungen erfüllen können. Die Strawtubes werden aus zwei Folien gewickelt. Die innere Lage besteht weiterhin aus einer 40 μm dicken Folie Kapton-160XC von DuPont [67]. Als äußere Lage wird ein Aluminium-KaptonXC-Laminat verwendet. Das Laminat wird von GTS [72] produziert. Es besteht aus einer 12,5 μm dicken Aluminiumfolie, aufgeklebt auf einer 25 μm dicken und leitfähigen Folie Kapton-100XC. Kapton-100XC unterscheidet sich vom Kapton-160XC in seiner Dicke und der elektrischen Leitfähigkeit. Der Oberflächenwiderstand von Kapton-100XC beträgt $10^{7 \pm 2} \Omega/\square$. Durch die elektrische Leitfähigkeit der Aluminium- und beider Kaptonfolien, soll ein elektrischer Kontakt von der Innen- zur Außenseite der Strawtubes hergestellt werden. In Abbildung 2.16 sind die Wandschichten eines Strawtubes schematisch dargestellt.

Herstellung der Strawtubes

Eine detailliertere Beschreibung der Produktion der Strawtubes ist in [17] zu finden. Die Strawtubes werden von der Firma Lamina [73] produziert. Zuerst werden die KaptonXC-Folie und das Aluminium-KaptonXC-Laminat in $9,5 \pm 0,1$ mm breite Streifen geschnitten. Anschließend wird Kleber auf die beiden Folien aufgetragen. Die Folien werden spiralförmig um einen Dorn zu Strawtubes gewickelt, wobei sich die Folien eine halbe Streifenbreite überdecken. Zwischen den Windungen einer Folie entsteht eine Lücke von 0,1 mm bis 0,3 mm. Noch vor den Folien für die Strawtubes werden zu deren Schutz eine Mylarfolie um den Dorn gewickelt. Auf der zum Dorn gerichteten Seite der Mylarfolie ist Stearin und ein flüssiges, auf Kohlenstoff basierendes Schmiermittel aufgetragen, damit sich die Strawtubes zusammen mit der Schutzfolie vom Dorn abziehen lassen. Die Mylarfolien können anschließend aus den Strawtubes entfernt werden. Die Strawtubes kommen nicht mit dem Schmiermittel in Berührung. Aus der ersten Testproduktion von 100 Strawtubes sind alle getesteten Exemplare gasdicht. Dabei spielt es keine Rolle, ob der verwendete Kleber zwischen den Lagen bei erhöhter oder bei Raumtemperatur ausgehärtet ist.

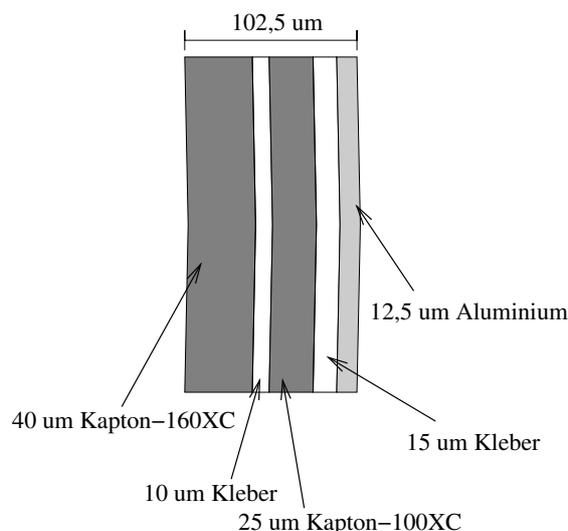


Abbildung 2.16: Aufbau der Wand eines Strawtubes schematisch dargestellt. Die Innenseite besteht aus KaptonXC, die Außenseite aus Aluminium. Insgesamt ist sie $102,5 \mu\text{m}$ dick.

Weitere Eigenschaften der Strawtubes

Trotz der elektrischen Leitfähigkeit aller Lagen, entsteht kein zuverlässiger elektrischer Kontakt zwischen der inneren und äußeren Lage. Die Klebeschicht zwischen Aluminium und KaptonXC im Laminat ist mit $15 \mu\text{m}$ Dicke eine zu gute Isolierschicht. Zusätzlich zur äußeren wird auch die innere Lage der Strawtubes direkt kontaktiert, um einen möglichst guten elektrischen Kontakt über die gesamte Laufzeit des LHCb-Experiments zu gewährleisten. Unter diesem Aspekt betrachtet, kann auf die elektrische Leitfähigkeit der Kaptonfolie im Laminat verzichtet werden. Das Kapton-100XC wurde darum im weiteren gegen deutlich preisgünstigeres, nicht leitfähiges Kapton ausgetauscht. Die Qualität der Klebung des Laminats und der Strawtubes änderte sich dadurch nicht. Die Strawtubes bleiben weiterhin gasdicht.

Die mechanischen Eigenschaften dieser Strawtubes unterscheiden sich von denen der zweilagigen Strawtubes aus Kapton-160XC und Aluminium. Durch die dünnere Aluminiumfolie und den größeren Anteil Kapton sind sie elastischer und knicken nicht so leicht wie die Strawtubes, die für den Prototypen verwendet wurden. Dadurch sind sie einfacher zu handhaben. Der Nachteil ist, dass Drahtpositionierer nicht in der Art wie beim Prototypen in den Strawtubes fixiert werden können. Die Strawtubes sind zu elastisch, um die eingedrückte Kerbform am Drahtpositionierer zu halten.

Dagegen ist ein weiterer Vorteil, dass im inneren Volumen der neuen Strawtubes kein Aluminium mehr freiliegt. Zwischen der $0,1 \text{ mm}$ bis $0,3 \text{ mm}$ breiten Lücke der inneren Kaptonwindungen kann das bei den älteren Strawtubes vorkommen, sofern der Kleber zwischen den Lagen nicht gleichmäßig auf dem Aluminium verteilt ist. Im Hinblick auf die Betriebsstabilität und Alterungseffekte soll aber die Präsenz von Aluminium im aktiven Zählgasvolumen vermieden werden.

2.4 Modulproduktion nach optimiertem Entwurf

Wie die Strawtubes wurden fast alle Modulkomponenten in einigen Iterationen optimiert. Das bisherige Konzept für die Mittel- und Endstücke wurde komplett ausgetauscht. Basierend auf den gewonnenen Erfahrungen beim Bau des 3m-Prototypen, wurden auch in der Konstruktion der Kammer einzelne Produktionsschritte ersetzt. Im folgenden Kapitel wird die Fertigung der 5 m langen Driftkammermodule im endgültigen Design beschrieben. Zuvor werden zwei speziell entworfene Vorrichtungen vorgestellt, die von zentraler Bedeutung für die Kammerproduktion sind.

2.4.1 Spezielle Vorrichtungen für die Kammerproduktion

Die wichtigsten Vorrichtungen zur Fertigung der Module sind die Tragevorrichtungen für die einzelnen Modullagen und das *Template*. Das Template ist eine Aluminiumschablone zur Positionierung der Strawtubes und zum Ausrichten der Trageplatten.

Die Tragevorrichtungen für die Modulkhälften

Im Physikalischen Institut Heidelberg wurden spezielle Vorrichtungen entwickelt und angefertigt, mit denen während der Produktion die einzelnen Modulkhälften getragen und zur Beibehaltung ihrer Ebenheit unterstützt werden. In Abbildung 2.17 sind zwei Tragevorrichtungen abgebildet, die für die Produktion eines 5 m langen Moduls notwendig sind.

Mit Hilfe der Tragevorrichtungen werden

- die Modulplatten in allen Dimensionen auf Position gehalten,
- die Modulplatten auf die ausgerichteten Strawtubes geklebt und
- die geschlossene Modulbox aus den zwei Hälften und zwei Seitenwänden zusammengeklebt.

Die Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einer 500 cm langen, 41,5 cm breiten und 22 cm hohen Box. Sie hat 1,5 cm dicken Wände mit innerer Honigwabenstruktur, die zusammengeklebt sind und an den Stirnseiten jeweils von einem aufgeklebten Aluminiumprofil zusammengehalten werden. Vier gleichmäßig über die Box verteilte äußere Aluminiumrahmen stabilisieren die Box zusätzlich. Auf der Unterseite der Vorrichtung sind an jeder Längsseite insgesamt vier Stützfüße befestigt, die pneumatisch gleichmäßig abgesenkt oder angehoben werden können. Auf der Unterseite befinden sich insgesamt 20 höhenverstellbare und arretierbare Saugköpfe. Eine Vakuumpumpe sorgt für Unterdruck, der die ausgerichtete Modulplatte an den Saugköpfen festhält. An den Stirnseiten der Vorrichtung sind jeweils zylindrische Tragegriffe an den Aluminiumprofilen befestigt. An ihnen kann eine Tragevorrichtung zusammen mit einer Modulkhälfte angehoben und gedreht werden. Die Biegesteifigkeit der Box ist so hoch, dass die von ihr in Position gehaltene Modulplatte ihre Ebenheit mit einer Genauigkeit von 100 μm behält und nicht durchbiegt.

Für alle drei Kammertypen (lang, kurz/breit, kurz/schmal) werden solche Tragevorrichtungen mit entsprechender Länge und Breite benötigt. Sämtliche Tragevorrichtungen, die für die komplette Driftkammerproduktion für das Äußere Spurkammersystem



Abbildung 2.17: Zwei Tragevorrichtungen für jeweils eine Modulhälfte (aufgelegt auf festem Unterbau). Die Modulplatte wird mit zwanzig höhenverstellbaren Saugern angesaugt. Die Saugköpfe sind auf der linken Vorrichtung zu sehen. Während der gesamten Produktionsdauer bleiben die Modulplatten auf Position, auch wenn die Tragevorrichtungen umgedreht werden, wie die rechts im Bild.

von LHCb zum Einsatz kommen, werden im Physikalischen Institut in Heidelberg hergestellt.

Die Aluminiumschablone (*Template*)

Die Aluminiumschablone, im Folgenden als *Template* bezeichnet, ist bei der Kammerproduktion von zentraler Bedeutung. Mit ihm werden die exakten Positionen der Strawtubes und die Ebenheit und Ausrichtung der Modulplatten festgelegt. Das *Template* ist eine 5 m lange und 50 cm breite Aluminiumplatte mit eingearbeiteten Furchen für die 128 Strawtubes einer Modullage über deren gesamte Länge. Die Furchen haben einen 50 μm größeren Radius als die Strawtubes und sind 1,55 mm tief, d.h. die Strawtubes liegen nicht ganz bis zur Hälfte darin. In regelmäßigen Abständen sind in ihnen Löcher eingearbeitet, durch die die Strawtubes fest in ihre Form gesaugt werden können. In Abbildung 2.18 ist das für die Serienproduktion vorbereitete *Template* dargestellt.

Mit Hilfe mehrerer Passbohrungen auf dem *Template* werden auch die Platinen in der Mitte und an den Enden einer Modullage exakt positioniert. Jede Abweichung der Sollpositionen der Furchen, Passbohrungen oder der Ebenheit auf dem *Template*, pflanzt sich später zu den Strawtubes, bzw. zur Modulplatte fort. Daher gelten für das *Template* die gleichen Toleranzen wie für das Modul selbst. Insbesondere wird für das *Template* eine Ebenheit mit maximaler Abweichung von 0,1 mm gefordert, um die geforderte Ebenheit der Strawtubes und der Modulplatte zu gewährleisten.



Abbildung 2.18: Das komplette Template. Es besteht aus zwei Aluminiumplatten, die fest verschraubt sind. Das Template ist exakt ausgerichtet auf einem stabilen Unterbau befestigt. Es wird während der gesamten Kammerproduktion nicht mehr bewegt. In die langen Furchen werden die Strawtubes eingelegt. In regelmäßigen Abständen werden die Strawtubes durch Löcher angesaugt, damit sie sich nicht aus den Furchen biegen. Mit Hilfe von Passbohrungen werden die HV-Platinen und die Modulplatten exakt positioniert.

Vor dem Beginn der Serienproduktion wird das Template auf einem stabilen Unterbau ausgerichtet, auf Ebenheit justiert und arretiert. Es wird während der gesamten Produktion nicht mehr bewegt und in regelmäßigen Abständen zur Kontrolle neu vermessen.

2.4.2 Die Produktion der Driftkammermodule

In Heidelberg werden ausschließlich 5 m lange Driftkammermodule für das Äußere Spurkammersystem für LHCb produziert. Im Folgenden werden die einzelnen Produktionsschritte für diese Module beschrieben.

Schritt 1: Ausrichten der Modulplatten

Die Modulplatten wurden für die Serienproduktion optimiert. Die 4930 mm langen und 339 mm breiten Platten sind 10 mm dick. Sie bestehen aus einem Kern aus Rohacell mit beidseitig aufgeklebten 80 μm dicken CFK-Häuten. Sie werden vom *Institute of Nuclear Physics* in Krakau hergestellt [74].

Rohacell ist ein Polymethacrylimid-Hartschaumstoff, der in ganzen Platten von Röhm Performance Plastics [75] vertrieben wird. Für die Modulplatten wird Rohacell 31 IG verwendet [18]. Der Vorteil von Trageplatten mit Rohacellkern gegenüber den Platten mit innerer Honigwabenstruktur ist deren geringe Gasdurchlässigkeit. Messungen von R.Ruschmann und J.Michalowski ergeben, dass mit Rohacell als Kernmaterial in den Platten ausreichend gasdichte Module produziert werden können ([16] und [19]). Sonst gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den relevanten Eigenschaften beider Platten.

An den beiden Enden der Modulplatten sind, statt Rohacell, Aluminiumeinlagen zwischen die CFK-Häute eingeklebt. Sie haben die gleiche Dicke wie der Rohacellkern und reichen über die ganze Breite 52 mm tief in die Platten hinein. Die Aluminiumeinlagen haben Passbohrungen zum Ausrichten der Modulplatten und der Platinen. Eine Aluminiumeinlage hat ein Rundloch, das gegenüberliegende ein Langloch. Im späteren LHCb-Experiment werden daran die kompletten Module an den Überrahmen im LHCb-Detektor befestigt. In den Aluminiumeinlagen sind außerdem Durchführungen eingearbeitet, durch die das Gas für das äußere Gasvolumen zu- bzw. abgeleitet wird. Auf einer Seite wird die Modulplatte über die komplette Oberfläche mit einem Laminat beschichtet. Es besteht aus 12,5 μm dickem Aluminium und 25 μm dickem Kapton, wobei die Kaptonseite auf die CFK-Haut geklebt wird. Diese Seite wird die Innenseite des Moduls, auf die die Strawtubes geklebt werden.

Auf die Seiten der Modulplatten werden über die gesamte Länge 25 μm dicke Aluminiumstreifen geklebt. Die Streifen werden um die Ober- und Unterkanten der Längsseiten geknickt. Wie in Abbildung 2.19 skizziert, wird der Streifen mit Ultraschalltechnik mit der Aluminiumfläche der Innenseite verlötet und an die Außenseite geklebt.

Als erster Produktionsschritt wird eine Modulplatte ausgerichtet. Sie wird mit dem Aluminium-Kapton-Laminat nach unten auf das Template gelegt. Mit Hilfe von Passbolzen und den Passbohrungen im Template und in der Platte, wird sie mit einer Ungenauigkeit von $\leq 100 \mu\text{m}$ positioniert. Mit einem angeschlossenen Vakuumsystem

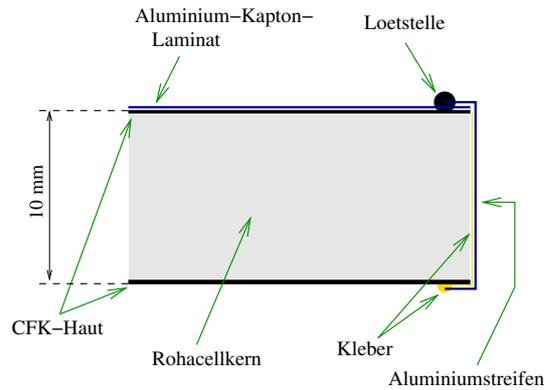


Abbildung 2.19: Skizzierter Querschnitt durch Modulplatte. Über die Kante der Platte (rechts) ist ein Aluminiumstreifen geklebt. Er wird auf der späteren Innenseite (oben) mit Ultraschalltechnik mit dem Aluminium-Kapton-Laminat verlötet.

wird sie an das Template gesaugt. Deren Ebenheit überträgt sich auf die Modulplatte. Eine Tragevorrichtung wird auf das Template gestellt (Skizze in Abbildung 2.20). Die 20 höhenverstellbaren Saugköpfe werden auf die eben ausgerichtete Modulplatte gesenkt und arretiert. Statt ans Template, wird die Platte dann mit dem Vakuumsystem an die Saugköpfe gesaugt. Die Tragevorrichtung wird zusammen mit der angesaugten Platte über die Stützfüße pneumatisch angehoben und kann dann vom Template genommen werden.

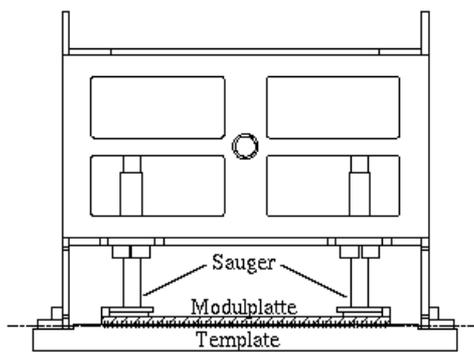


Abbildung 2.20: **Skizze links:** Die Modulplatte liegt justiert auf dem Template. Die Saugköpfe der aufgesetzten Tragevorrichtung werden auf die Platte gesenkt und arretiert. Mit einem angeschlossenen Vakuumsystem wird die Platte an die Tragevorrichtung gesaugt.

Bild rechts: Die Platte liegt auf der Tragevorrichtung. Sie bleibt auf ihr angesaugt, bis das Modul komplett zusammengebaut ist.

Schritt 2: Vorbereiten der Strawtubes und Bestücken des Templates

Bevor das Template bestückt wird, müssen die Strawtubes vorbereitet werden. Zuerst werden sie auf die richtige Länge geschnitten. So wie beim Strawtube in Abbildung 2.21 (links), wird an jeweils einem ihrer Enden ein Fähnchen ausgeschnitten, das dann beidseitig durch Ultraschall-Löten verzinnt wird. Im fertigen Modul dient es als Massenverbindung, sowohl zur Innen-, als auch zur Außenseite der Strawtubes.

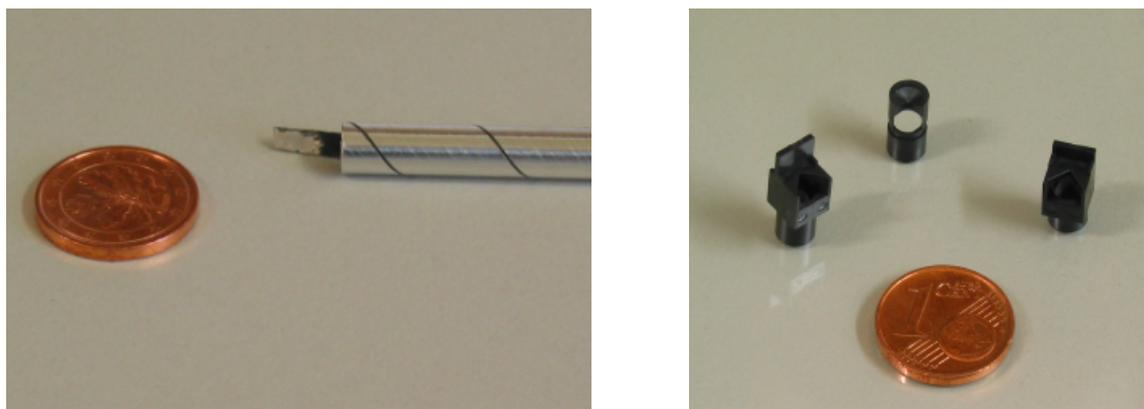


Abbildung 2.21: **Bild links:** An einem Ende der Strawtubes wird ein Fähnchen zugeschnitten und beidseitig verzinnt. Es dient zur Kontaktierung von Innen- und Außenseite der Strawtubes.

Bild rechts: Links das Endstück für das Ende mit Fähnchen, rechts das Endstück für das gegenüber liegende Ende der Strawtubes. In der Mitte steht ein Drahtpositionierer. Er ist 10 mm lang. Jeder Strawtube wird mit zwei solcher Drahtpositionierern bestückt.

Die Strawtubes werden mit zwei Drahtpositionierern und beidseitig mit je einem Endstück bestückt. Ungefähr alle 80 cm halten sie den Anodendraht im Zentrum der Strawtubes. In Abbildung 2.21 sind diese Kleinteile abgebildet. Sie bestehen aus Noryl N110 und werden im Spritzgussverfahren von Philips produziert [76].

Mit Lötkolben werden die Strawtubes an zwei gegenüberliegenden Punkten an die Drahtpositionierer gepresst und thermisch verformt. In der Skizze in Abbildung 2.22 ist das durch zwei Pfeile angedeutet. Außerdem veranschaulicht die Skizze, wie der Draht später in Position gehalten wird. Er verläuft durch zwei Scheiben mit entgegengesetzt orientierten V-förmigen Ausschnitten. Die Ausschnitte überlappen sich, so dass eine Öffnung von $50\ \mu\text{m}$ bleibt, durch die der $25\ \mu\text{m}$ dicke Draht geführt wird.

An den Enden wird das Template mit den Platinen bestückt, die für die HV- und Signaldurchführung zu den Anoden und für die Erdung der Strawtubes notwendig sind. Abbildung 2.23 zeigt die Vorder- und Rückseite einer Platine. An einer Seite haben die Platinen eine stufenförmige Einsparung, an die die Endstücke der Strawtubes gesetzt werden (Abbildung 2.24).

Etwas versetzt aus der Mitte vom Template, wo die Strawtubes und Anodendrähte unterbrochen werden, wird eine weitere Platine positioniert. Es ist eine passive Platine, an die von zwei Seiten die Strawtubes mit ihren Endstücken gesetzt und die Anoden-

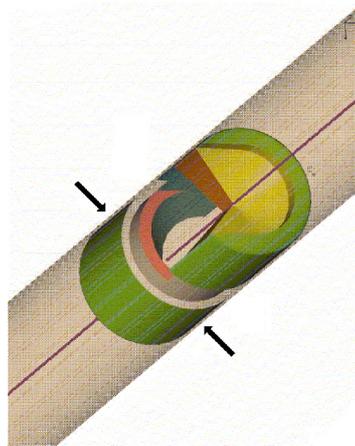


Abbildung 2.22: Skizze eines Drahtpositionierers im Strawtube. Die Pfeile unterhalb der Kerbe zeigen an, wo die Strawtubes durch thermische Verformung in die Drahtpositionierer eingedrückt werden.

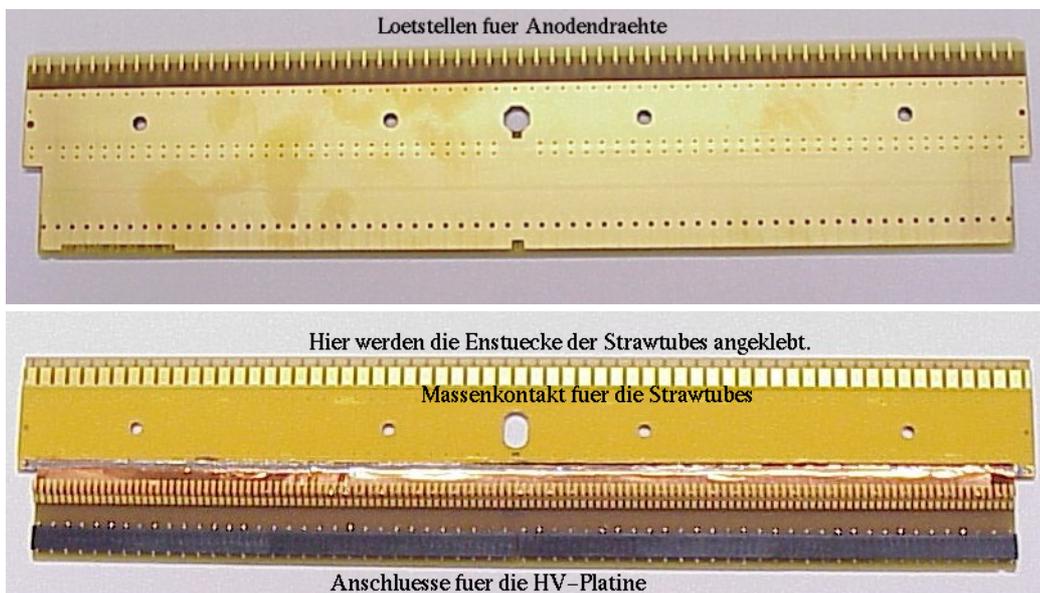


Abbildung 2.23: Vorder- und Rückseite einer HV-Durchführungsplatine. Auf die schwarzen SMD-Verbindungen (unten) wird beim fertigen Modul die HV-Versorgungsplatine aufgesteckt. An der gegenüberliegenden Seite werden die Enstücke der Strawtubes gesetzt, die Strawtubes an den Massekontakt und die Anodendrähte an die Lötstellen gelötet. Die Lötstellen für die Anodendrähte sind mit den SMD-Verbindungen durch die Platine kontaktiert.

drähte festgelötet werden. Sie ist mit 17 mm möglichst schmal, um den inaktiven Bereich im Modul zu minimieren.

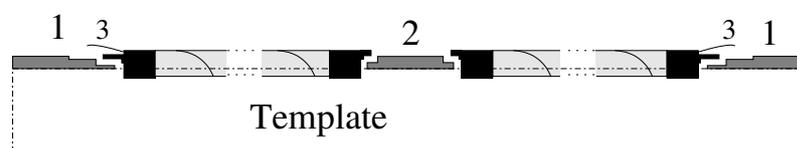


Abbildung 2.24: Längsschnittskizze durch das bestückte Template. Die HV-Durchführungsplatinen (1) und die Mittelplatine (2) sind auf dem Template positioniert. Die einzelnen Strawtubes werden in das Template eingelegt, wobei ihre Endstücke an die Stufen der Platinen gesetzt werden. Die Fähnchen der Strawtubes (3) werden an die Massenkontakte der HV-Durchführungsplatinen (1) gelötet.

Die Strawtubes werden einzeln in das Template gelegt und angesaugt. Damit die Strawtubes an den Enden genau in ihrer Sollposition liegen, wird eine Gegenschablone auf ihre Enden gelegt (Abbildung 2.25). An der HV-Durchführungsplatine werden die Fähnchen der Strawtubes auf einen gemeinsamen Kupferstreifen gelötet, der wiederum an die Massenkontakte der Platine gelötet wird. Der gelötete Kontakt und die Durchführung des Massenkontakts über die gesamte Breite der Platine nach außen, gewährleistet eine ausreichend gute und stabile Erdung der inneren und äußeren Lagen der Strawtubes.



Abbildung 2.25: Die Strawtubes werden ins Template gelegt und angesaugt. An ihren Enden werden sie mit aufgelegten Gegenschablonen zusätzlich in Position gehalten. Die Fähnchen der Strawtubes werden auf einen Kupferstreifen gelötet. Der Streifen wird an die Massenkontakte der HV-Durchführungsplatine gelötet.

Schritt 3: Aufkleben der Modulplatte auf die Strawtubes

Die Platinen, Strawtubes und Endstücke liegen mit den Seiten exakt auf einer Ebene, auf welche die Modulplatte geklebt wird. Auf die Aluminiumfläche der Modulplatte wird gleichmäßig Klebstoff aufgetragen. Als Kleber wird Araldit AY 103 mit Härter HY 991 verwendet. Wie in Abbildung 2.26 skizziert, wird die Tragevorrichtung zusammen mit der Modulplatte auf das bestückte Template gestellt. Die Platte liegt eben auf den Strawtubes, den Endstücken und den Platinen. Sie wird nicht bewegt bis der Kleber vollständig ausgehärtet ist.

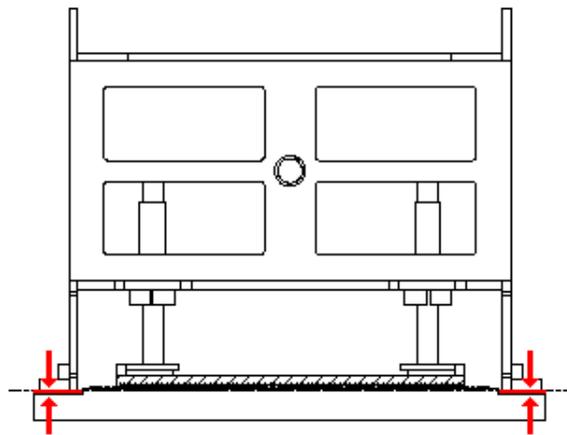


Abbildung 2.26: Die Skizze zeigt, wie die Modulplatte auf die Strawtubes geklebt wird. Die Aluminiumfläche der Platte ist mit Klebstoff bestrichen. Mit dieser Seite nach unten wird sie zusammen mit der Tragevorrichtung auf das bestückte Template gestellt. Unter den Füßen der Tragevorrichtung liegen Abstandshalter (rote Pfeile), deren Dicke genau der Höhe entspricht, die die Strawtubes aus dem Template ragen.

Schritt 4:

Zur Produktion der zweiten Modullage werden Schritt 1 bis 3 wiederholt.

Schritt 5: Bedrahten der Strawtubes

Die Tragevorrichtung wird zusammen mit der bestückten Modulplatte wieder vom Template gehoben und mit der Modulplatte nach oben abgestellt. In Abbildung 2.27 sind die Enden der Strawtubes an den Platinen zu sehen. Beim Verdrahten der Strawtubes wird der Anodendraht durch ein Ende gepustet und durch das entgegengesetzte Endstück gesaugt. Unter einer Spannung von 70 g wird der Anodendraht an die Platinen gelötet.

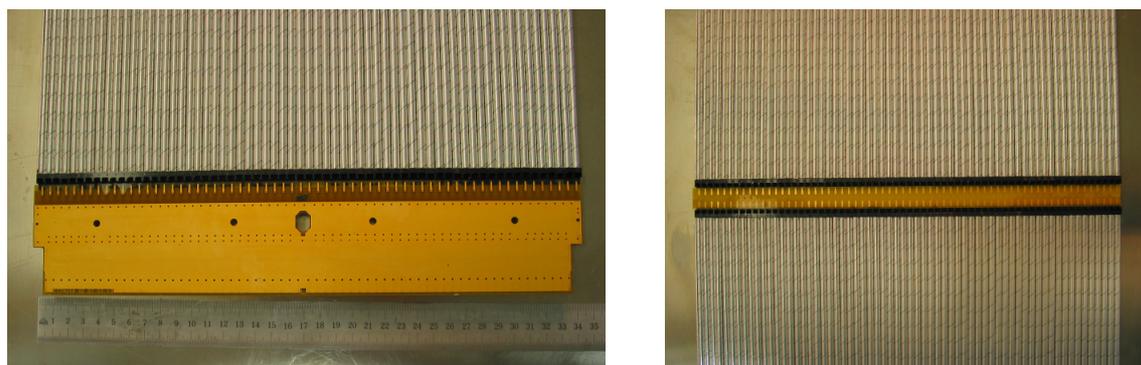


Abbildung 2.27: **Bild links:** Die Strawtubes an einer HV-Durchführungsplatine.

Bild rechts: Die Strawtubes an der mittleren Platine.

Auf den Kanten an ihren Enden wird ein Tropfen Klebstoff aufgetragen, wodurch die Verbindungen zwischen Strawtubes und Endstücken gasdicht versiegelt werden. Nachdem die Anodendrähte durch die Strawtubes gesaugt und gepustet sind, werden sie an den Lötstellen festgelötet.

Schritt 6: Kleben von Kleinteilen und Endblöcken

Nach den Tests der HV-Stabilität und den mechanischen Drahtspannungen werden an den Enden der Strawtubes Klebstofftropfen auf die Endstücke aufgetragen. Der flüssige Kleber zieht wegen seiner guten Kapillarität rundum zwischen die Endstücke und aufgesteckten Strawtubes, wodurch die Verbindungen gasdicht versiegelt werden.

An beiden Seiten der mittleren Platinen werden Seitenwände eingeklebt. Auf den Endstücken und den Wänden wird jeweils eine Kaptonfolie über die Platinen geklebt. Dadurch sind die Mittelstücke beider Modullagen geschlossen und nur über die Endstücke der Strawtubes gasdurchlässig.

An einer Modullage werden an beiden Enden Aluminiumblöcke auf die HV-Durchführungsplatinen geklebt. Abbildung 2.28 zeigt einen solchen Block. Sie dienen als Abstandhalter zwischen den beiden Modullagen und als Endblöcke für das Modul. Ein Block erstreckt sich über die komplette Breite der Platinen. An seinen Rändern ist je eine Durchführung, durch die später das Zählgas für die Strawtubes zu- und abgeleitet wird.

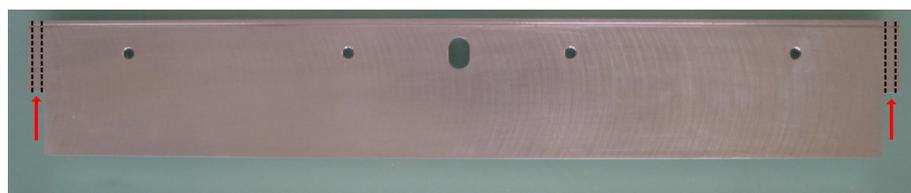


Abbildung 2.28: Zwischen die HV-Durchführungsplatinen beider Modullagen wird jeweils ein hier dargestellter Aluminiumblock geklebt. Entlang seiner Ränder hat er Durchführungen für das Zählgas (gestrichelte Linien mit roten Pfeilen markiert).

Schritt 7: Vereinigung beider Modullagen

Wie in der Skizze in Abbildung 2.29 dargestellt, werden die einander zugewandten Modullagen mit Hilfe der Tragevorrichtungen zusammengeklebt. An den HV-Durchführungs-

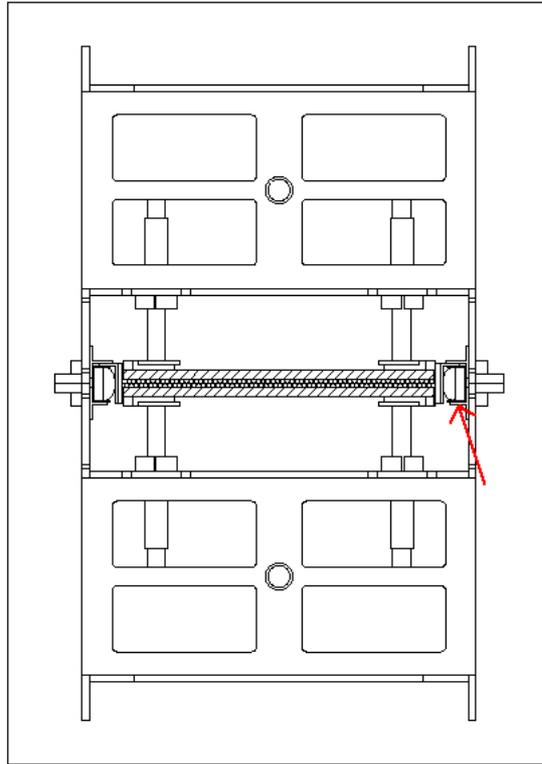


Abbildung 2.29: Die Skizze zeigt die Vereinigung zweier Modullagen zu einer Modulbox. An den Enden werden die Modullagen mit den Endstücken aufeinander geklebt und je ein Aluminiumblock wird zwischen die HV-Durchführungsplatten geklebt. Gleichzeitig werden die Seitenwände an das Modul geklebt. Jeweils in langen Schienen geführt (roter Pfeil), pressen aufgeblasene Gummischläuche die CFK-Streifen gleichmäßig an die Längsseiten vom Modul.

platten liegen die Endstücke der Strawtubes beider Lagen direkt aufeinander, wie in der Skizze in Abbildung 2.30 dargestellt ist. Sie werden zusammengeklebt. Zwischen dem Aluminiumblock und den Endstücken an beiden Rändern werden kleine Seitenwände eingeklebt. Mit Ausnahme der Durchführungen in den Aluminiumblöcken an beiden Modulenden, ist somit das innere Zählgasvolumen verschlossen.

Die Mittelplatten beider Modullagen liegen versetzt übereinander (Abbildung 2.30). Damit hat das Driftkammermodul nicht über beide Lagen an gleicher Stelle einen toten Bereich. Der tote Bereich erstreckt sich in einer Lage über 35 mm.

In einem Klebeschritt werden die beiden Modullagen aufeinander und die Seitenwände angeklebt. Die Seitenwand ist ein 5 m langer und 34 mm breiter Streifen. Er besteht aus einer 0,34 mm dicken CFK-Haut, der wie die Modulplatten einseitig mit einem Aluminium-Kapton-Laminat beklebt wird. Mit der Aluminiumschicht wird die Sei-

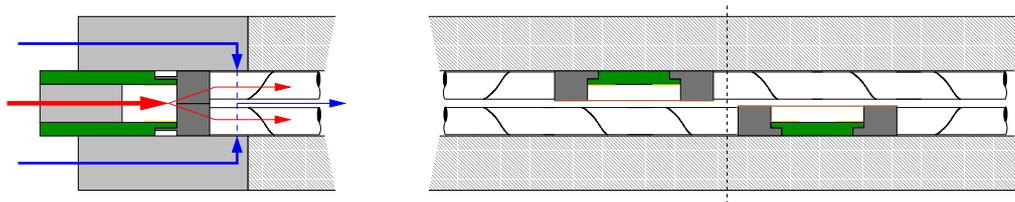


Abbildung 2.30: Längsschnittskizze durch das Driftkammermodul.

Links: Der Aluminiumblock ist zwischen die HV-Durchführungsplatinen (grün) geklebt. Die Endstücke sind aufeinander geklebt. Seitlich werden an den Block bis zu den Endstücken Wände geklebt. Die roten Pfeile symbolisieren die Gasverteilung des inneren Zählgasvolumens. Das Zählgas wird durch die Aluminiumblöcke rein, bzw. raus geleitet. Das die Strawtubes umhüllende Gas (blaue Pfeile) wird durch die Aluminumeinlagen in den Modulplatten rein- bzw. rausgeleitet.

Rechts: Die Mittelplatinen (grün) liegen versetzt aus der Kammermitte (gestrichelte Linie) und nicht übereinander. Die Platinen und Endstücke bilden zusammen mit zwei Seitenwänden und einer aufgeklebten Kaptonfolie (braun) je eine Box. Durch die Strawtubes fließt das Zählgas in die Box rein, bzw. aus ihr raus.

tenwand an die Aluminiumränder der Platten geklebt. Links und rechts entlang des Driftkammermoduls sind Schienen zwischen den Tragevorrichtungen angebracht, in denen jeweils ein aufblasbarer Gummischlauch geführt wird. Der aufgeblasene Schlauch presst den Seitenstreifen gleichmäßig an das Driftkammermodul (Abbildung 2.29). Nachdem der Klebstoff vollständig ausgehärtet ist, kann das komplette Modul aus den Tragevorrichtungen genommen werden. Die Seitenstreifen stehen an der Ober- und der Unterkante des Moduls jeweils um etwa 1 mm über. Alle 10 cm wird entlang der Kanten das Aluminium der Seitenwand mit dem Aluminiumrand der Modulplatten verlötet. Damit sind die Innenseiten beider Modullagen elektrisch kontaktiert. Zusammen mit den Seitenwänden bildet die Modulbox einen geschlossenen Faradaykäfig. Zuletzt müssen noch die Edelstahlleitungen für den Gasdurchfluss beider Gasvolumen in die Aluminiumblöcke und -einlagen geklebt werden. Danach ist das Driftkammermodul fertig.

Produktionsablauf

Für die Herstellung eines einzelnen Moduls ist eine Produktionsdauer von 12 Arbeitstagen eingeplant. Es ist vorgesehen, dass in Heidelberg zwei Module parall gefertigt werden, mit einem zeitlichen Versatz von 7 Arbeitstagen. Somit wird in der Serienproduktion nach einer Anlaufzeit von 12 Arbeitstagen alle 7 Arbeitstage ein Driftkammermodul fertiggestellt.

Während der gesamten Produktionsdauer müssen die einzelnen Modullagen von den Tragevorrichtungen gehalten werden. Das bedeutet, dass vier Tragevorrichtungen ständig im Einsatz sind. Das Template wird dagegen nur zeitweise benötigt. Für die Kammerproduktion in Heidelberg reicht ein einziges Template aus.

2.4.3 Strahlungslänge eines Driftkammermoduls

In Tabelle 2.3 sind die Strahlungslängen der wesentlichen Komponenten eines Driftkammermoduls eingetragen.

Komponente	Material	X/X_0 [%]
Trageplatte	2 x CFK-Haut	0,056
	Rohacell	0,071
	Laminat	0,027
	Kleber	0,025
	Total	0,179
Strawtube	2 x Laminat	0,054
	2 x KaptonXC	0,046
	Kleber	0,020
	Total	0,120
Kleber	geschätzt	0,1

Tabelle 2.3: Strahlungslänge der Komponenten eines Driftkammermoduls.

Ein komplettes Modul des Äußeren Spurkammersystems hat eine Strahlungslänge von 0,698 % X_0 .

2.5 Testproduktionen von Modulboxen

Vor der Serienproduktion wurden Modulboxen ohne Strawtubes und Platinen zusammengebaut, um die Produktionsweise, die Klebungen, die Gasdichtigkeit und die mechanischen Eigenschaften der Boxen zu testen.

2.5.1 3 m lange Modulbox

In [20] und [21] wird ausführlich über die Produktion und die durchgeführten Tests berichtet. Die Box besteht aus Modulplatten und Seitenwände, wie sie auch für die Serienproduktion verwendet werden. Sie ist 305 cm lang, 34 cm breit und 3,6 cm hoch. Eine Modulplatte überragt die Box an beiden Enden um 7,5 cm an Länge (Abbildung 2.31).

Die Klebung der Box ist stabil und gasdicht. Bei einem Überdruck von 8 mbar konnte über eine Zeitspanne von 15 Minuten kein Druckabfall in der Box festgestellt werden. Im LHCb-Experiment ist der Überdruck in einem Modul maximal 2 mbar.

Die Skizze in Abbildung 2.31 zeigt den Aufbau, mit dem die Durchbiegung der Modulbox gemessen wird. Die Box wird nur an den Enden von jeweils einer Auflage getragen. Der Abstand zwischen den Auflagen beträgt 292,5 cm. In Tabelle 2.4 ist eingetragen, um wie viele Millimeter sich das Modul in der Mitte durchbiegt, mit und ohne Zusatzgewichte. Die gemessenen Durchbiegungen stimmen mit den berechneten in [22] überein.

In Abbildung 2.32 ist ein spezielles Klimazelt dargestellt, in dem das Modul verschiedenen Umgebungsbedingungen ausgesetzt werden kann. Die relative Luftfeuchtigkeit

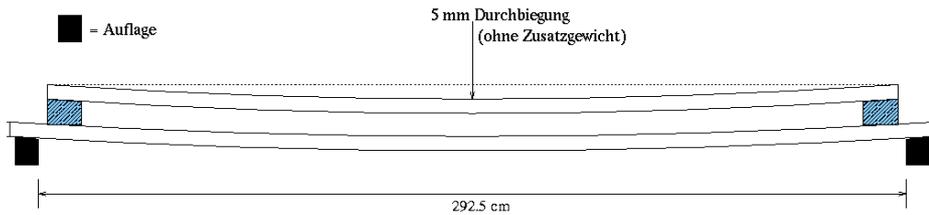


Abbildung 2.31: Skizze des Aufbaus zur Messung der Modulboxbiegung. Die Modulbox wird nur an den Enden von jeweils einer Auflage getragen. Dazwischen hängt sie 292,5 cm frei in der Luft. In der Mitte der Box wird ihre Biegung nach unten gemessen.

Lange Modul- Platte unten		Kurze Modul- Platte unten	
Gewicht [g]	Biegung [mm]	Gewicht [g]	Biegung [mm]
0	6	0	5
150	6,99	150	5,86
300	8	300	7,05
510	9,4	510	8,6

Tabelle 2.4: Die Durchbiegung in der Mitte der Modulbox. Sie liegt nur an den Enden auf. Zusätzliche Gewichte werden auf die Mitte der Box gelegt.

kann darin zwischen 5% und 60 % variiert, die Temperatur von 20°C auf 40 °C erhöht werden. Während das Modul flach im Klimazelt liegt, wird seine Formstabilität in Abhängigkeit der Temperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen. An seinen vier Ecken und in seiner Mitte wird gemessen, ob sich das Modul aufgrund entstehender innerer mechanischer Spannungen verformt oder verbiegt. In den Diagrammen in Abbildung 2.33 sind die Messdaten für die Modulmitte eingetragen. Die Deformationen an den Modulecken sind vernachlässigbar. Im LHCb-Experiment werden solche extremen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen bei weitem nicht erwartet. Mit hoher Sicherheit kann daher eine Deformation der Module kleiner als 2 mm angenommen werden. Die Module werden im Experiment an beiden Enden befestigt und in Richtung der Strahlachse so gut in Position gehalten, dass die Teilchenspur mit der geforderten Genauigkeit in z-Richtung gemessen werden kann.

2.5.2 5 m lange Modulbox

Das vorrangige Ziel bei der Herstellung einer 5 m langen Modulbox, war zu testen, ob die geforderte Ebenheit des Moduls erreicht werden kann. Die Box wurde mit den Tragevorrichtungen auf die gleiche Weise produziert, mit der auch die Driftkammermodule in der Serienproduktion hergestellt werden sollen. Es wurden die gleichen Modulplatten und Seitenwände wie in der Serienproduktion verwendet. Über die Modulboxproduktion und die durchgeführten Tests wird ausführlich in [23] berichtet. In Abbildung 2.34 ist eine Skizze der Modulbox dargestellt. Sie ist 5 m lang, 34 cm



Abbildung 2.32: Die Modulbox liegt flach im Klimazelt und wird darin extremen Änderungen der Umgebungsbedingungen ausgesetzt. An den vier Ecken und in der Modulmitte werden Biegungen und Verformungen des Moduls in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen.

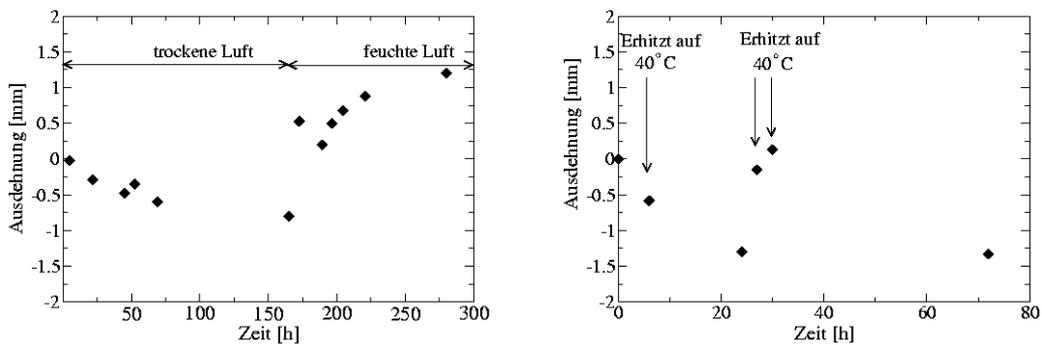


Abbildung 2.33: **Links:** Deformation der Modulmitte bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten. Nach 165 h wurde die relative Luftfeuchtigkeit von $\approx 5\%$ auf $\approx 60\%$ erhöht.

Rechts : Die Deformation bei verschiedenen Temperaturen. Die Temperatur wurde mehrmals von Raumtemperatur ($\approx 20^\circ\text{C}$) auf 40°C erhöht. [23]

breit und ca. 3 cm hoch und weder mit Strawtubes, noch mit Platinen bestückt. An beiden Enden wird sie von jeweils einem Aluminiumblock abgeschlossen. Jeweils ein zweiter, wenige Zentimeter eingerückter Aluminiumblock unterteilt das Volumen in zwei kleine Endvolumen (≈ 100 ml) und ein großes Innenvolumen (≈ 18 l). Durch die Aluminiumblöcke führen Gasleitungen in die jeweiligen Volumina.

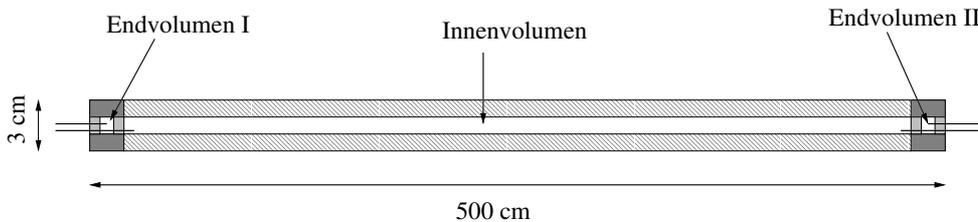


Abbildung 2.34: Skizze der 5 m langen Modulbox.

Mit den drei Gasvolumen wird getestet, ob im Modul gasdicht getrennte Volumina realisiert werden können. In Tabelle 2.5 sind die gemessenen Leckraten und die Permeabilität des jeweiligen Volumens eingetragen.

	Überdruck [mbar]	Leckrate [$\frac{mbar}{min}$]	Permeabilität [$\frac{m}{bar \cdot s}$]
Innenvolumen	3,3	0,06	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Endvolumen I	5,6	0,1	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Endvolumen II	7,4	0,16	$1,9 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 2.5: Die gemessene Leckrate und Permeabilität für die drei Volumina in der Modulbox.

Nicht nur die gesamte Modulbox, sondern auch die einzelnen Volumina sind ausreichend gasdicht. Falls in den Driftkammermodulen die Endblöcke der (gasdichten) Strawtubes gasdicht aneinander geklebt werden können, wären somit auch inneres Zählgasvolumen und umhüllendes Gasvolumen gasdicht getrennt.

Zur Messung der Biegesteifigkeit wird die Modulbox in der Horizontalen nur an ihren Enden aufgelegt und die Durchbiegung in ihrer Mitte gemessen. In Tabelle 2.6 ist eingetragen, wie viele mm die Box durchhängt, mit und ohne zusätzlich aufgelegtes Gewicht. Die gemessene Durchbiegung stimmt mit der von S.Hennenberger berechneten überein [77]. Die Messung bestätigt auch, dass die Driftkammermodule keine ausreichende Biegesteifigkeit haben, um sie ohne weitere Unterstützung in den LHCB-Detektor zu hängen. Daher werden sie im LHCB-Detektor mit beiden Enden an einem Rahmen befestigt, der so stabil gegen Scherkräfte ist, dass die Module ausreichend genau in Position bleiben.

Zur Messung ihrer Ebenheit, wird die Modulbox vertikal aufgehängt und der Abstand zwischen ihrer Oberfläche und einem zu ihr parallelen Laserstrahl bestimmt [24]. Die gemessenen Abstände aufgetragen über die Modullänge ergeben eine Gerade, falls die

Zusatzgewicht [g]	Durchbiegung [mm]
0	61,5
150	64,5
210	66,5
300	69
420	73
500	77,5

Tabelle 2.6: Die gemessene Durchbiegung in der Mitte der Modulbox. Sie liegt nur an den Enden auf.

Oberfläche eben ist. Für die Messungen am linken und am rechten Rand des Moduls sind im Diagramm aus Abbildung 2.35 die Abweichungen von der Gerade eingetragen. An beiden Seiten hat die Oberfläche eine ähnliche, von einer Ebene abweichende Form.

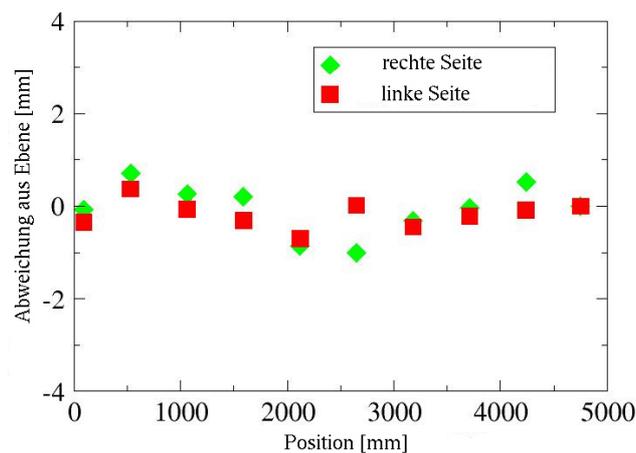


Abbildung 2.35: Im dargestellten Diagramm sind über die Modullänge die Abweichungen am linken und am rechten Rand der Moduloberfläche von einer ebenen Fläche eingetragen [25].

Das quadratische Mittel (RMS) der Abweichungen liegt bei ca. $300 \mu\text{m}$, und damit unter den maximal zulässigen $500 \mu\text{m}$. Die maximale Abweichung beträgt 1 mm . Die geforderte Ebenheit des Moduls konnte erreicht werden.

2.5.3 Fazit aus der Modulboxproduktion und den Testmessungen

Die Messungen mit den Modulboxen zeigen, dass

- die Modulplatten und Seitenwände gasdicht produziert werden können,
- die Klebungen mechanisch ausreichend stabil sind,
- eine ausgerichtete Modulplatte in der Tragevorrichtung ihre Ebenheit und Position ausreichend genau beibehält,
- Driftkammermodule mit genügend guter Ebenheit produziert werden können und
- die Module alle Spezifikationen für den Einsatz im Äußeren Spurkammersystem erfüllen.

Kapitel 3

Betriebseigenschaften von Strawtubes

Im folgenden Kapitel werden Ergebnisse von Messungen zu den Betriebseigenschaften von Strawtubes vorgestellt und zusammengefasst.

3.1 Gasverstärkung

Die *effektive Gasverstärkung* G_{eff} im Strawtube kann über die gemessene Teilchenrate und den Anodenstrom bestimmt werden, falls bekannt ist wie viele Elektronen n_p ein einfallendes Teilchen im Strawtube erzeugt. G_{eff} ist das Verhältnis n_a/n_p mit

$$n_a = \frac{I}{R \cdot e} \quad (3.1)$$

n_a = Anzahl der Elektronen am Anodendraht

I = Anodenstrom

R = Teilchenrate

e = Elementarladung.

G_{eff} unterscheidet von der tatsächlichen Gasverstärkung in Anodendrahtnähe. Wegen Rekombination und *Attachement* (Kapitel 1.7) erreichen nicht alle anfangs erzeugten Elektronen n_p die Anode. Die tatsächliche Gasverstärkung $G = n_a/(n_p - n_{loss})$ ist größer als G_{eff} . Allerdings ist G_{eff} die gängigere Kenngröße, da sie das Maß für die Signalladung ist, die ein Teilchen im Strawtube erzeugt.

In Abbildung 3.1 ist die gemessene effektive Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) über die Hochspannung aufgetragen. Für den Betrieb der Driftkammermodule im LHCb-Experiment ist eine Betriebsspannung von 1550 V vorgesehen [1]. G_{eff} ist dann ungefähr 40000. Der gewählte Arbeitspunkt ist ein Kompromis zwischen hoher Effizienz und Auflösung einerseits und Betriebssicherheit andererseits.

3.2 Ratenkapazität

Der Betrieb der Strawtubes ist für hohe Teilchenraten durch Raumladungseffekte limitiert. Mit zunehmender Rate steigt die Anzahl der Ionen in Anodendrahtnähe. Die

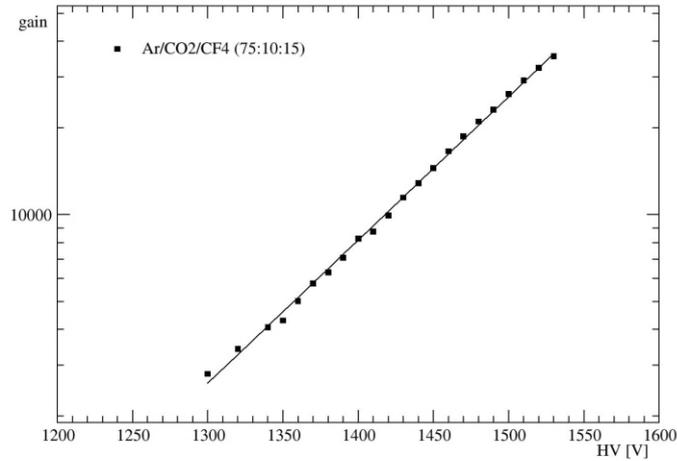


Abbildung 3.1: Die effektive Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) aufgetragen über die Betriebsspannung.

langsamen Ionen erzeugen eine Raumladung, die die elektrische Feldstärke und damit auch die Gasverstärkung am Anodendraht reduziert. Abbildung 3.2 zeigt zwei Röntgenenergiespektren in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) bei 1550 V Betriebsspannung. Das linke Spektrum wurde bei einer Rate von 3 kHz pro cm Strawtubelänge aufgenommen, das rechte bei einer Rate von 2000 kHz/cm. Das Maximum entspricht jeweils der Kupfer-K_α-Linie mit 9 keV (Kapitel 4.1). An der Lager der Maxima ist zu erkennen, dass die Gasverstärkung bei 2000 kHz/cm nur halb so hoch ist wie bei einer Rate von 3 kHz/cm.

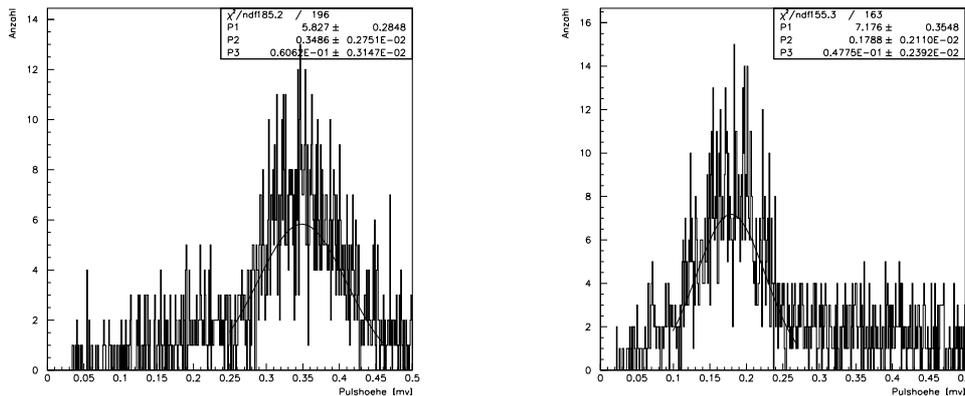


Abbildung 3.2: Röntgenspektren in Ar/CO₂/CF₄ bei 1550 V. **Links:** Aufgenommen bei niedriger Rate=3 kHz/cm. **Rechts:** Aufgenommen bei hoher Rate=2000 kHz/cm.

In Abbildung 3.3 ist die Gasverstärkung bei konstanter Betriebsspannung in Ar/CO₂/CF₄ als Funktion der Teilchenrate aufgetragen. Die Gasverstärkung wurde bei 0,3 kHz/cm

auf 1 normiert. Die theoretische Ratenabhängigkeit der Gasverstärkung folgt aus einem in [47] beschriebenen Model, das in Kapitel 6.2.2 erläutert wird.

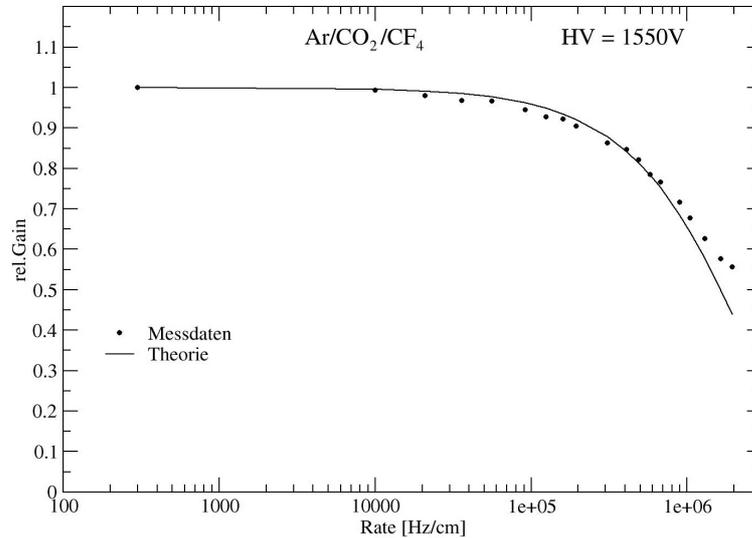


Abbildung 3.3: Die Gasverstärkung als Funktion der Rate/cm in Ar/CO₂/CF₄ bei konstanter HV=1550 V. Bei 300 Hz/cm wurde die Gasverstärkung auf 1 normiert.

Die 9 keV-Photonen erzeugen ungefähr 10mal mehr Elektronen in den Strawtubes, als ein minimal ionisierendes Teilchen (*MIP*) im LHCb-Experiment (Kapitel 4.2). Für MIPs wird daher eine 10fach höhere Ratenkapazität erwartet. Für das Äußere Spurkammersystem ist die maximal erwartete Rate minimal ionisierender Teilchen 125 kHz/cm¹. Bei dieser Rate ist der erwartete Verlust der Gasverstärkung nicht signifikant (< 1 %).

3.3 Crosstalk

Der *Crosstalk* in den Strawtubes wurde von J.Kessler im Rahmen seiner Diplomarbeit untersucht [24]. Die wesentlichen Ergebnisse sind hier zusammengefasst.

Das kapazitive und induktive Übersprechen der Signale von einem Kanal auf die umliegenden Kanäle wird *Crosstalk* genannt.

Analoger Crosstalk:

Spricht das Signal eines Ereignisses in Kanal X auf den Kanal X+1 über, wird der analoge Crosstalk als das Verhältnis der Signalamplituden $\frac{\text{Amplitude}_{X+1}}{\text{Amplitude}_X}$ in % angegeben.

Digitaler Crosstalk:

Der digitale Crosstalk ist von der Triggerschwelle abhängig, ab der ein Signal am Kanal registriert wird. Er ist definiert als das Verhältnis $\frac{\text{registrierte Crosstalk-Ereignisse in Kanal } X+1}{\text{registrierte Teilchenereignisse in Kanal } X}$. Der Zusammenhang zwischen analogem und digitalem Crosstalk soll in Abbildung 3.4

¹Mit dem Strawtuberadius $R = 5 \text{ mm}$ entspricht das 250 kHz·cm⁻².

veranschaulicht werden.

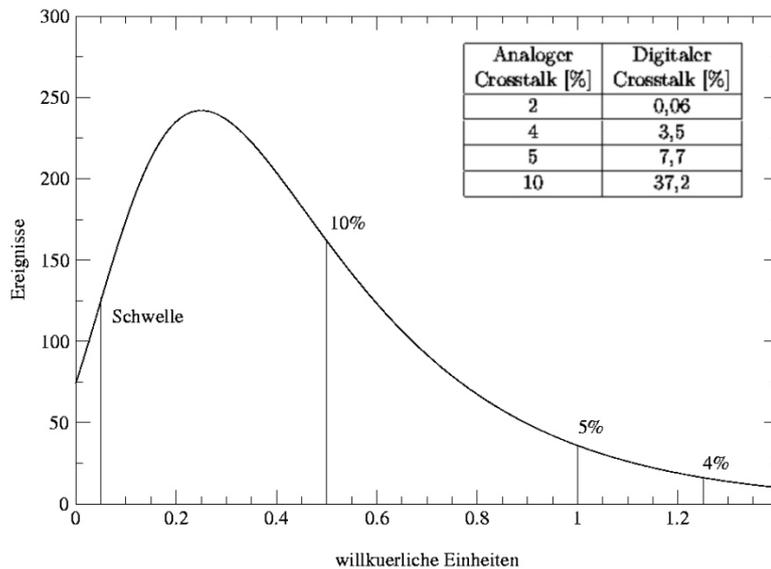


Abbildung 3.4: Die angenäherte Landauverteilung simuliert das Signalhöhenpektrum minimal ionisierender Teilchen. Die Signalhöhen, ab denen die Schwelle bei 10 %, 5% bzw. 4 % analogem Crosstalk überschritten werden, sind markiert. In der Tabelle ist der jeweils dazugehörige digitale Crosstalk eingetragen [24].

10 Strawtubes, bestehend aus zwei Lagen KaptonXC, und 5 Strawtubes, bestehend aus einer Aluminiumlage und einer KaptonXC-Lage, wurden unterschiedlich angeordnet. Der analoge Crosstalk wurde in beiden Typen von Strawtubes gemessen und verglichen. In Abbildung 3.5 sind die Querschnittsskizzen der verschiedenen angeordneten Strawtubes dargestellt. Der jeweils unten skizzierte Testaufbau entspricht dem Erdungsschema und der Anordnung der Strawtubes in den Driftkammermodulen des Äußeren Spurkammersystems. Darin ist der analoge Crosstalk zwischen benachbarten Aluminium-KaptonXC-Strawtubes 0,56 %. Zwischen benachbarten KaptonXC-Strawtubes ist er mehr als doppelt so hoch. Die Messungen zeigen, dass die für die Driftkammermodule gewählten Aluminium-KaptonXC-Strawtubes und das Erdungsschema den analogen Crosstalk wesentlich reduzieren.

3.4 Bereich um Drahtpositionierer

Am Drahtpositionierer im Strawtube findet keine Gasverstärkung statt. In diesem Bereich werden keine Teilchen detektiert. Die Betriebseigenschaften von Strawtubes mit eingesetzten Drahtpositionierern wurden untersucht. Die Drahtpositionierer bestehen aus Noryl N110 und wurden im Spritzgussverfahren hergestellt (Kapitel 2.4.2). Ein Strawtube wurde bis auf einen 27 mm langen Bereich um den Drahtpositionierer mit Blei abgedeckt und bei 1550 V mit Ar/CO₂/CF₄ betrieben. Dieser Bereich wurde der Länge nach von einem schmalen Röntgenstrahlbündel bestrahlt. Der Anodenstrom wurde nacheinander in Schritten von 0,25 mm entlang der Strawtubeachse gemessen.

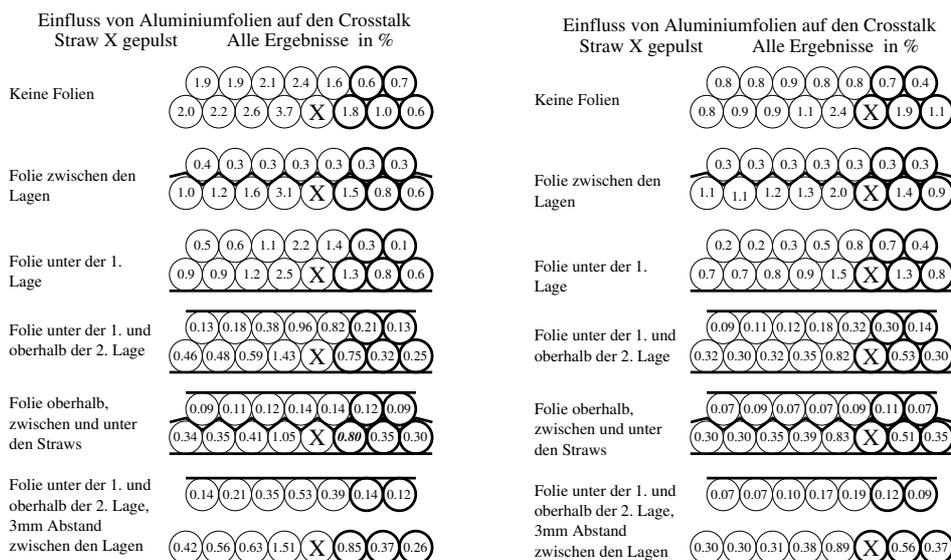


Abbildung 3.5: Die Querschnittsskizzen der verschiedenen Testaufbauten [24]. Die dick dargestellte Kreise entsprechen den Aluminium-KaptonXC-Strawtubes, die dünnen den KaptonXC-Strawtubes. Die Zahlen in den skizzierten Strawtubes geben den analogen Crosstalk an.

Links: Ein Testpuls wird auf den KaptonXC-Strawtube X gegeben.

Rechts: Ein Testpuls wird auf den Aluminium-KaptonXC-Strawtube X gegeben.

Er ist in Abbildung 3.6 als Funktion der Position längs des Strawtubes dargestellt. An den Kanten der Bleiabdeckung steigt der Strom steil an, bzw. fällt steil ab. Aus der Breite der steigenden bzw. fallenden Flanke kann die Breite des Strahlprofils berechnet werden. Sie ist $< 0,8$ mm.

Der inaktive Bereich im Strawtube ragt über den 10 mm langen Drahtpositionierer hinaus. In einem 14,5 mm langen Abschnitt war der Anodenstrom ≤ 90 % des durchschnittlichen Anodenstroms im Strawtube. Der Bereich mit dem Anodenstrom ≤ 50 % ist 12,5 mm lang.

Mehrere Strawtubes, mit und ohne Drahtpositionierer, wurden mit 1550 V betrieben und jeweils über 8 cm bestrahlt. Weder in den Strawtubes, noch an den Drahtpositionierern oder den Endstücken, wurden Aufladungseffekte beobachtet.

3.5 Betriebseigenschaften der Strawtubes im Prototypen

3.5.1 Betriebstests im Labor

Nach seiner Fertigstellung wurden die Betriebseigenschaften des 3 m langen Prototypen aus Kapitel 2.2 zunächst im Labor getestet.

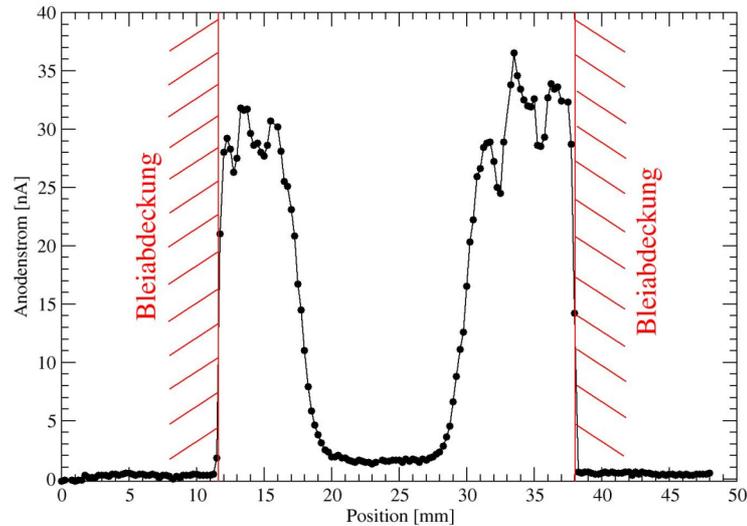


Abbildung 3.6: Anodenstrom entlang eines bestrahlten Strawtubes. Bis auf den ca. 26,5 mm langen Bereich um einen 10 mm langen Drahtpositionierer, war der Strawtube mit Blei abgedeckt.

Hochspannungsfestigkeit

Der Prototyp wurde mit Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) gespült. An Gruppen von jeweils 4 Strawtubes wurde die Hochspannung HV = 1700 V angelegt und der Dunkelstrom gemessen. Er war in jeder Gruppe ≤ 10 nA und stabil.

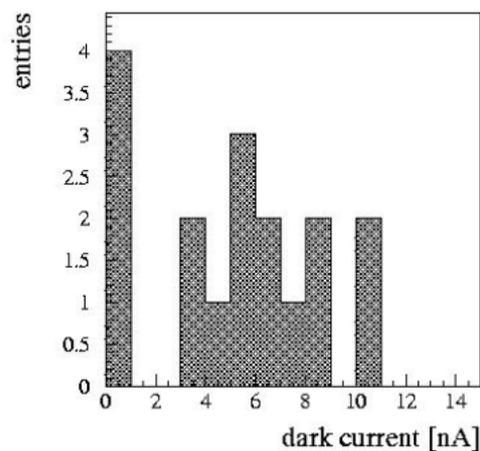


Abbildung 3.7: Dunkelströme in den Strawtubes des Prototypen. Sie wurden mit Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) gespült. An jeweils einer Gruppe von 4 Strawtubes wurde eine Spannung von 1700 V angelegt und der Dunkelstrom gemessen [19].

Dunkelpulse in den Strawtubes

Die 160 cm langen Strawtubes des Prototypen wurden mit Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) mit 1500 V betrieben. Pro Kanal und Sekunde wurde ein durch kosmische Strahlung erzeugtes Signal erwartet. Ohne weitere Bestrahlung wurden in allen Kanälen zusätzliche Dunkelpulse beobachtet. Diese Dunkelpulse unterscheiden sich von Signalen, die von γ -Strahlung, z.B. von einer ⁵⁵Fe-Quelle, oder von minimal ionisierenden Teilchen (MIPs) stammen. Sie sind bei HV = 1500 V größer als die Teilchensignale. D.h. sie enthalten mehr Ladung. Die Größe der Dunkelpulse ist nur schwach von der angelegten HV abhängig.

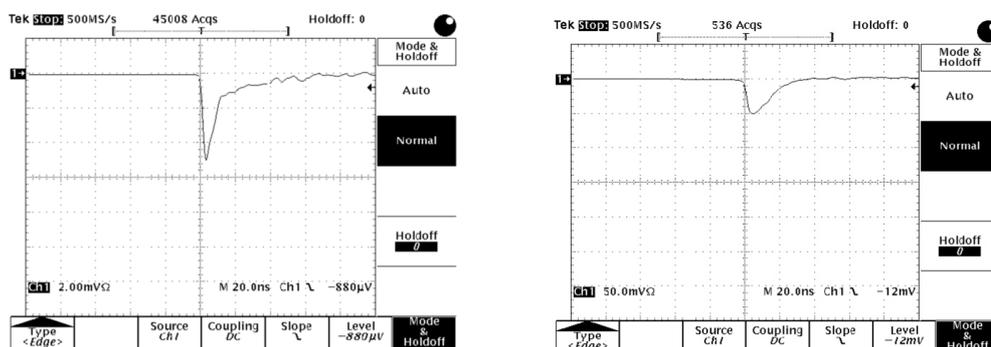


Abbildung 3.8: Signale aus einem Strawtube ohne Vorverstärker. Zählgas war Ar/CO₂/CF₄. **Links:** ⁵⁵Fe-Signal bei 1500 V. Die Signalamplitude ist 7 mV. **Rechts:** Dunkelpuls bei 1550 V. Die Signalamplitude ist 50 mV. [50]

In Abbildung 3.9 sind für 80 Strawtubes die Dunkelpulsraten histogrammiert. Sie lagen durchschnittlich bei 5,6 Hz.

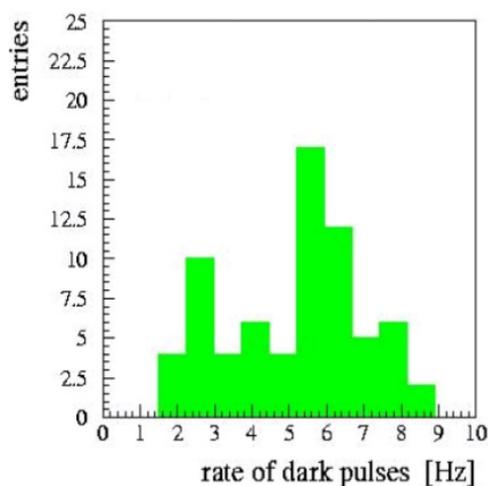


Abbildung 3.9: Die Dunkelpulsraten in 80 Strawtubes des Prototypen. Zählgas war Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%), HV war 1500 V [19].

Die hier beschriebenen Dunkelpulse wurden in verschiedenen Strawtubetypen beobachtet. Zur Drahtpositionierung waren alle Strawtubes wie im Prototypen mit *Twistern* aus PEEK an den Endstücken und z.T. zwischen den beiden Enden bestückt (Abbildung 2.7). Mit den optimierten Drahtpositionierern und Endstücken aus Noryl konnten in 2,5 m langen Strawtubes keine Dunkelpulse mit solchen großen Ladungen beobachtet werden. Offenbar verursachten die Twister aus PEEK die Dunkelpulse, die vermutlich durch Entladungen erzeugt wurden.

Gasverstärkung entlang der Strawtubes

In Abbildung 3.10 ist die relative Gasverstärkung (Kapitel 4.3.1) entlang zweier Strawtubes dargestellt. Die Lage der Drahtpositionierer ist jeweils am Abfall der Gasverstärkung an den Positionen 205, 250 und an den beiden Enden (Position 160, bzw. 300) zu erkennen. Außer an den Drahtpositionierern zeigt das obere Diagramm eine homogene Gasverstärkung entlang des Strawtubes. Die Abweichungen waren $\leq 5\%$. Im unteren Diagramm ist die Gasverstärkung an Position 220 um 8 % und an Position 285 um 13 % erhöht. Aus einem Vergleich mit Simulationen aus [15] folgt, dass der Draht um $300\ \mu\text{m}$ - $500\ \mu\text{m}$ von der Sollposition versetzt sein müsste um die erhöhte Gasverstärkung zu erklären. Es wird vermutet, dass ein solcher Versatz durch gekippte Twister im Strawtube zustande kam. Wie in Abbildung 3.11 skizziert, wurden die Strawtubes asymmetrisch an die Drahtpositionierer gedrückt, um sie zu fixieren (Kapitel 2.2). Dabei können die Twister etwas gekippt werden (Abbildung 3.11, rechts).

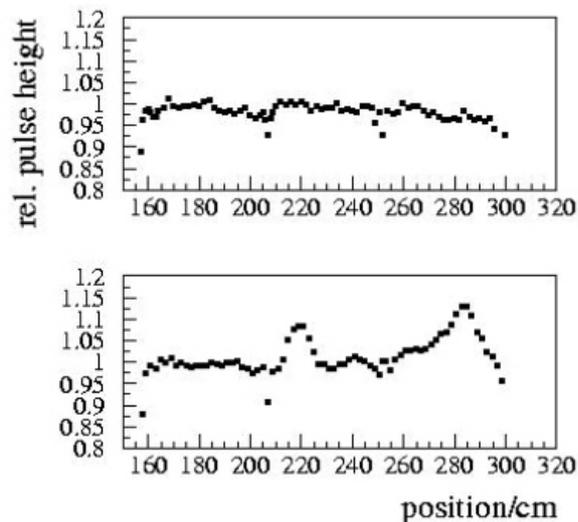


Abbildung 3.10: Relative Gasverstärkung entlang zweier Strawtubes. [19]

In der Zwischenzeit wurde das Fixieren der Drahtpositionierer optimiert. Die Strawtubes werden an zwei gegenüberliegenden Stellen in die Drahtpositionierer gedrückt, wodurch ein Kippen verhindert wird (Kapitel 2.4.2).

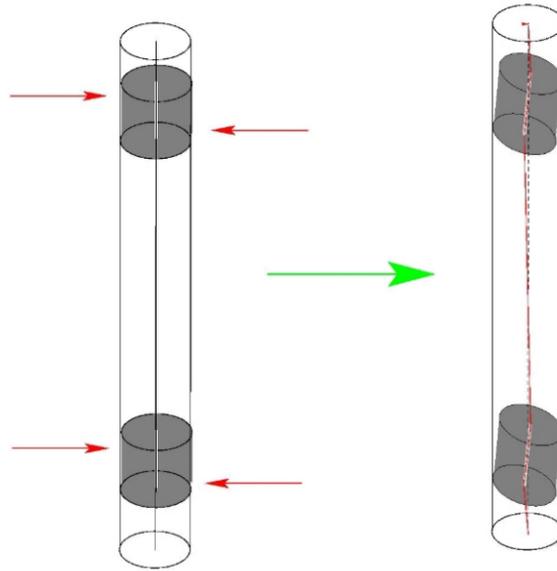


Abbildung 3.11: Skizze zweier Strawtubes des Prototypen mit dunkel dargestellten Drahtpositionierern. Zum Fixieren eines Drahtpositionierers wird ein Strawtube an zwei versetzt gegenüberliegenden Stellen eingedrückt (rote Pfeile). Wegen der Asymmetrie der Kräfte können die Drahtpositionierer kippen (rechts). [19]

3.5.2 Betriebstests im HERA-B-Experiment

Anfang des Jahres 2002 wurde der 3 m lange Prototyp in das HERA-B-Experiment am DESY² installiert. Von Anfang Mai 2002 bis Anfang März 2003 wurde er betrieben und ausgelesen, wann immer der HERA-B-Detektor Tagebetrieb hatte. Der Einbau und der Betrieb wurde größtenteils von D.Wiedner in enger Zusammenarbeit mit der HERA-B Inner Tracker Collaboration [51] koordiniert. Die Details zum Betriebstest (Einbau, Betriebsparameter, Betriebsverhalten, etc.) werden in seiner Dissertation beschrieben [53].

Der Prototyp wurde vor dem Myonendetektor [52] im kleinsten möglichen Abstand horizontal über dem Strahlrohr montiert. Die Strahlungsintensität an dieser Stelle entsprach in etwa $\frac{1}{5}$ der erwarteten maximalen Strahlungsintensität am Äußeren Spurkammersystem von LHCb. Der Anodenstrom im maximal bestrahlten Bereich war 4 nA pro 1 cm Anodenlänge. Die maximal angesammelte Ladung entsprach leider nur der an wenigen Tagen erwarteten Ladungsansammlung im LHCb-Experiment. Wir konnten daher keine Alterungseffekte untersuchen, aber das Betriebsverhalten bei Bestrahlung über die volle Detektorfläche testen.

Die 256 Strawtubes des Prototypen wurden in 4 HV-Gruppen mit jeweils 16 Strawtubes und in 4 HV-Gruppen mit jeweils 48 Strawtubes aufgeteilt. Bis auf eine Referenz-Gruppe mit 16 Strawtubes wurden alle Gruppen mit einer Spannung $HV = +1550$ V unter Bestrahlung betrieben. Zählgas war Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%), der Gasfluss

²Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg

$\cong 1$ Kammervolumen/h.

Beobachtete Effekte während des Betriebs unter Bestrahlung

Die Anodenströme jeder Gruppe wurden registriert. Abweichend vom stabilen Betrieb wurden in einzelnen Gruppen ab und zu ein Ansteigen im Strom beobachtet, ohne erkennbare Änderungen in den anderen HV-Gruppen oder der Strahlungsintensität. In Abbildung 3.12 ist im aufgezeichneten Strom für HV-Gruppe 1 (Ch 1) ein solches Ereignis zu erkennen. Der Strom wurde über die 48, jeweils 160 cm langen Strawtubes, gemittelt. Er stieg innerhalb von 2 Minuten von 3 nA/cm ($23 \mu\text{A}$ absolut) auf 9 nA/cm ($69 \mu\text{A}$ absolut). Anschließend fiel er exponentiell mit der Zeitkonstante $\tau = 4$ min auf 4 nA/cm ($31 \mu\text{A}$ absolut) ab. Insgesamt wurden 67 solcher Ereignisse

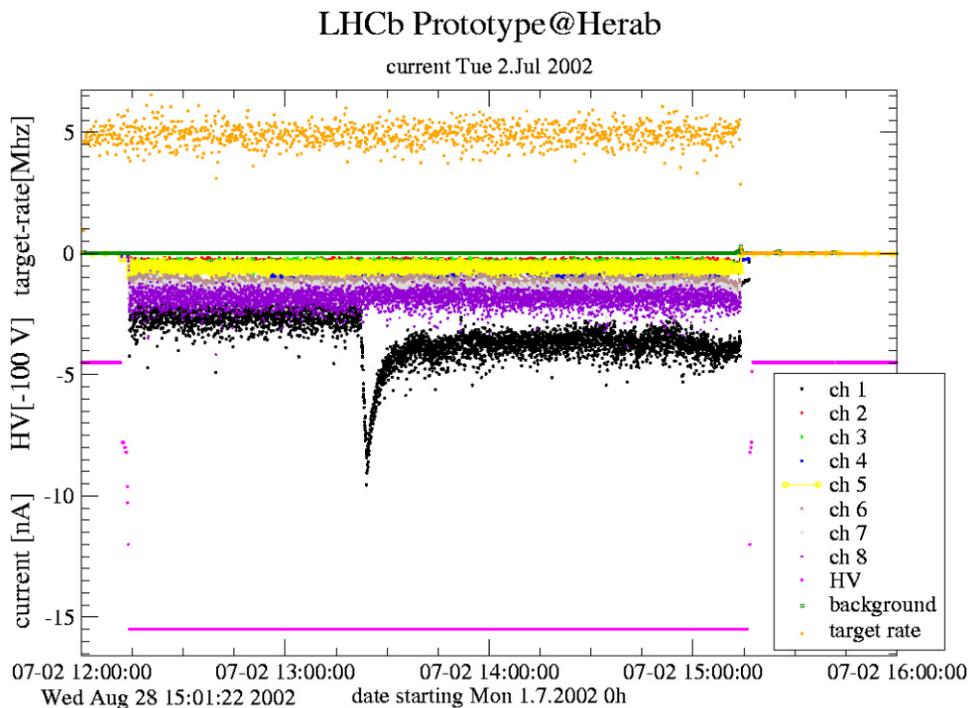


Abbildung 3.12: Wechselwirkungsrate im HERA-B-Experiment (target rate [MHz]), Betriebsspannung im Prototypen (HV [-100 V]) und die Anodenströme der einzelnen HV-Gruppen (ch 1 - ch 8 [nA]). In HV-Gruppe 1 (ch 1) war ein auffälliges Ereignis. [53]

in verschiedenen HV-Gruppen beobachtet. Nur bei dem aus Abbildung 3.12 ging der Strom nicht bis auf seinen ursprünglichen Wert zurück. Typisch für alle Ereignisse ist der schnelle Stromanstieg innerhalb weniger Minuten und der exponentielle Abfall, wobei τ bis zu 83 min betrug.

In Abbildung 3.13 sind die Häufigkeiten auffälliger Ereignisse gegen die angesammelte Ladung pro cm Anodendraht für drei HV-Gruppen aufgetragen. Offenbar gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen den Ereignissen und der angesammelten Ladung.

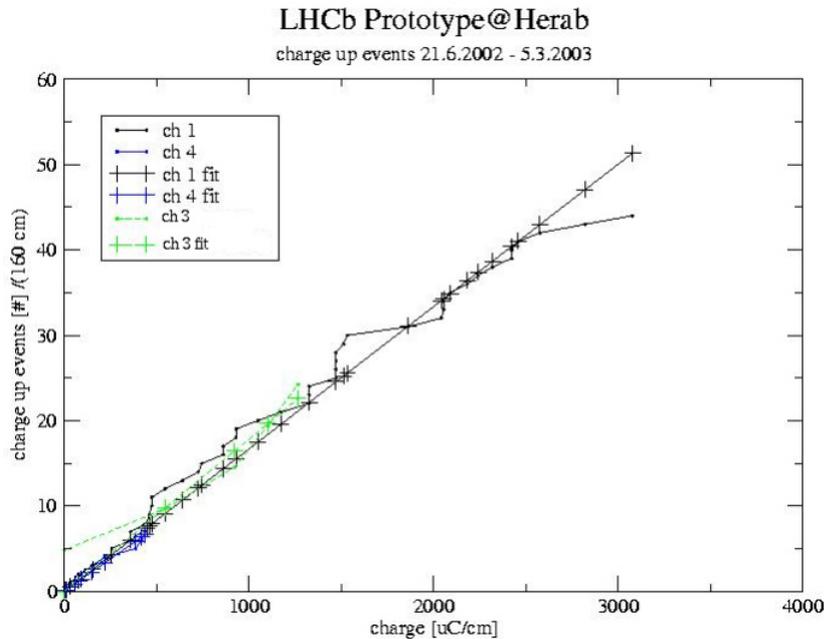


Abbildung 3.13: Die Häufigkeit auffälliger Ereignisse als Funktion der akkumulierten Ladung. HV-Gruppe ch1 (HV-Gruppe ch4) ist dem Strahlrohr am nächsten (weitesten entfernt). [53]

Ende Mai 2003 wurde der Prototyp aus HERA-B deinstalliert. Im Labor wurde er für drei Wochen ohne Bestrahlung mit gleicher Spannung, mit gleichem Zählgas, beim gleichem Gasfluss und mit dem selben Modul zur Stromauslese wie im HERA-B-Experiment betrieben. Es konnten keine auffällige Ereignisse in den aufgezeichneten Strömen beobachtet werden. Sie traten nur unter Bestrahlung in HERA-B auf.

3.6 Fazit aus den Betriebstests

Die Strawtubes können bei einer Gasverstärkung von 40000 bei der maximal erwarteten Teilchenrate in LHCb betrieben werden. Der Crosstalk zwischen den Strawtubes wurde durch deren äußere Aluminiumlagen und durch ein optimiertes Erdungsschema auf ein Minimum reduziert. Mit den optimierten Drahtpositionierern konnten die im Prototyp beobachteten Dunkelpulse eliminiert werden. Es wurden keine Aufladungseffekte beobachtet.

Die Strawtubes im Prototypen waren mit Twistern aus PEEK bestückt. Beim Betrieb im HERA-B-Experiment waren neben den Dunkelpulsen vereinzelt auffällige Ereignisse aufgetreten. Es ist unwahrscheinlich, dass es sich dabei um Maltereffekt (Kapitel 1.9), oder andere Alterungseffekte an den Kathoden handelt. Die Ereignisse wurden sowohl in stark, als auch schwach bestrahlten HV-Gruppen gesehen. Sie sind für sich nicht relevant für den Betrieb der Kammer. Es ist jedoch zu befürchten, dass sich dahinter Effekte verbergen, die im Laufe der Zeit zu Dauerentladungen führen könnten. Zwischen den Ereignissen und den Dunkelpulsen wird ein Zusammenhang vermutet.

Falls sie beide von gleichen Mechanismen ausgelöst worden sind, sollten die Ereignisse genau wie die Dunkelpulse in den optimierten Driftkammermodulen nicht auftreten. Ein Betriebstest mit einem optimierten Driftkammermodul wird im Spätsommer 2004 am DESY durchgeführt.

Kapitel 4

Untersuchung auf Anodenalterung

In der Röntgenanlage des Physikalischen Instituts konnten vor Ort Testmodule über mehrere Wochen in intensiver Röntgenstrahlung betrieben werden. Die Ziele dieser Testbetriebe waren, die in der Kammer verarbeiteten Materialien auf ihre Verwendbarkeit zu testen und Alterungseffekte vor allem an den Anodendrähten zu untersuchen.

4.1 Die Röntgenanlage

Die Hochenergiephysikgruppe des Physikalischen Instituts verfügt über einen eigenen Röntgenmessstand. Das Besondere an dem Röntgensystem FXT 160.000 von FeinFocus [26] ist seine offene Kathode. Die Röntgenröhre kann bis zu einer Beschleunigungsspannung von 100 kV und einem Röhrenstrom von 1 mA betrieben werden. Mit der verwendeten Kupferanode liegt die K_α -Linie bei 9 keV.

Die Röntgenröhre ist in einem mit Blei abgeschirmten Raum fest installiert. Vor der Röntgenröhre kann ein bis zu etwa 1,5 m langes Testmodul montiert werden. Die komplette Modulhalterung ist auf einem beweglichen Schlitten befestigt und der Abstand vom Modul zur Röntgenröhre kann zwischen 30 cm und etwa 2 m eingestellt werden. Durch zwei Schrittmotoren kann ein Testmodul in vertikaler und horizontaler Richtung senkrecht zur Strahlachse gefahren werden, wobei der maximale Fahrweg 50 cm beträgt. Die Steuereinheit des Röntgensystems befindet sich im benachbarten Raum. Von dort aus werden unter anderem auch das Modul betrieben, der Betrieb überwacht und die Schrittmotoren gesteuert.

4.2 Strahlungsbedingung im Vergleich zum LHCb-Experiment

Im LHCb-Experiment wird für das Äußere Spurkammersystem eine maximale Rate minimal ionisierender Teilchen (MIPs) von 125 kHz/cm Strawtubelänge erwartet¹. Mit dem Zählgas Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) erzeugt ein MIP entlang seiner Teilchenspur 30 bis 35 Elektronen im Strawtube [1] [46]. Bei der vorgesehenen Betriebsspannung von 1550 V ist die *effektive Gasverstärkung* 40000 (Kapitel 3.1). Daraus ergibt

¹Es wird eine *Occupancy* von 7 % angenommen (vgl. [1] und Kapitel 8.1).

sich ein erwarteter maximaler Strom von 25 nA pro cm Anodendraht. Die erwartete Ladungsansammlung nach 10 Jahren Betrieb im am intensivsten bestrahlten Bereich beträgt 2,5 C pro cm Anodenlänge.

Die 9 keV K_{α} -Photonen der Röntgenanlage erzeugen etwa 330 Primärelektronen im Strawtube, d.h. 10 mal mehr als MIPs. Die Testmodule werden mit Teilchenraten zwischen 150 kHz und 600 kHz pro cm Strawtubelänge bestrahlt. Der Strom an den Anoden liegt zwischen 270 nA/cm und 1100 nA/cm. Das entspricht einer 11- bis 45-fach beschleunigten Ladungsansammlung auf dem Anodendraht, verglichen zu LHCb. Im Gegensatz zum LHCb-Experiment, wo die Driftkammern großflächig und inhomogen bestrahlt werden, werden die Strawtubes in der Röntgenanlage nur über eine Länge von 4 cm bis 10 cm bestrahlt.

Die Strahlungsbedingungen in der Röntgenanlage unterscheiden sich wesentlich von denen im LHCb-Experiment. Die Betriebs- und Alterungstests hier können deshalb notwendige Tests in einer großflächigen, hadronischen Strahlungsumgebung nicht ersetzen.

4.3 Sensitivität auf Alterungseffekte

Vor den eigentlichen Betriebstests wurde überprüft, ob die vorgesehenen Messmethoden sensitiv auf Alterungseffekte sind. Dazu wurde ein erster Testlauf mit einem einfachen Modul gestartet, das bereits bei früheren Messungen von J.Kessler in der Röntgenanlage betrieben wurde [24]. Das Modul besteht aus acht Aluminium-KaptonXC-Strawtubes, die auf einer mit Aluminium beschichteten Platte aufgeklebt sind. Es ist mit einer aufgeklebten Mylarfolie gasdicht verhüllt. Während des Testbetriebs wurde es mit Zählgas gespült.

Um in möglichst kurzer Zeit deutliche Alterungseffekte im Modul zu provozieren, wurde der CO_2 -Anteil des Zählgases durch CH_4 (Methan) ersetzt, da bekannt ist, dass beim Einsatz von Kohlenwasserstoffen bei der Signalentstehung nahe der Anode Polymerisationsprozesse stattfinden. Die schwer löslichen Polymere lagern sich auf den Anoden ab, was zu einer Abnahme der Gasverstärkung führt. Nach genügend langer und intensiver Bestrahlung sollten Alterungseffekte erkennbar sein.

4.3.1 Messmethode

Von den acht Kanälen des Moduls waren vier Stück über eine Strawtubelänge von jeweils 6 cm für 18 Tage intensiver Röntgenstrahlung ausgesetzt. Die Anodenströme wurden während der Bestrahlung aufgezeichnet und die angesammelte Ladung auf den Anodendrähten ermittelt. Täglich wurde die Röntgenbestrahlung kurzzeitig unterbrochen, um Pulshöhenspektren mit einer ^{55}Fe -Quelle sowohl an einem bestrahlten als auch an einem unbestrahlten Kanal aufzunehmen. Das Verhältnis der mittleren Pulshöhen von bestrahltem zu unbestrahltem Kanal ergibt die relative Gasverstärkung. Sie ist unabhängig von Temperatur und Druck und bleibt konstant, falls keine Alterungseffekte auftreten.

4.3.2 Beobachtung

In Abbildung 4.1 ist der aufgezeichnete Stromverlauf der letzten 8 Betriebstage abgebildet. Die durch die täglichen Messungen bedingten kurzzeitigen Unterbrechungen sind dabei gut zu erkennen. Die Änderungen im Anodenstrom spiegeln den instabilen Verlauf des Röntgenröhrenstroms wieder, der sowohl über eine zusätzliche Ratenmessung als auch über die Röhrenstromanzeige des Röntgensystems gemessen wird.

Die Strahlintensität zu Beginn der Messung wurde so reguliert, dass sich am maximal bestrahlten Anodendraht gegenüber dem LHCb-Experiment eine 10-fach beschleunigte Ladungsansammlung ergab. Während einer 13 tägigen Bestrahlung wurden dort 300 mC/cm akkumuliert ($\cong 1,5$ Jahre LHCb-Betrieb). Es wurden keine signifikanten Änderungen in der Gasverstärkung beobachtet. Die Maxima der im bestrahlten und im unbestrahlten Bereich aufgenommenen Spektren lagen dicht beieinander (Abbildung 4.1 und 4.2: Position I). Im weiteren Verlauf wurde das Modul mit bis zur doppelten Intensität als zuvor bestrahlt. Nach einem Tag Bestrahlung unter diesen Konditionen, war eine drastische Abnahme der Gasverstärkung im Strawtube festzustellen (Position II). Nach einem weiteren Tag, wieder mit ursprünglicher Strahlintensität betrieben,

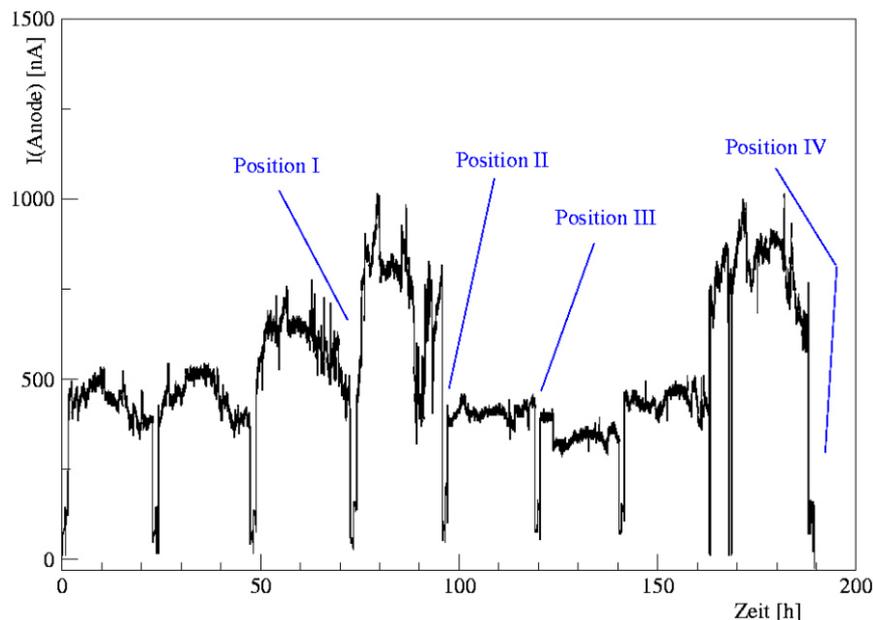


Abbildung 4.1: Der Anodenstrom während der Röntgenbestrahlung. Man erkennt deutlich die täglichen Unterbrechungen zur Aufnahme der Fe^{55} -Spektren.

konnte eine “Erholung” beobachtet werden. Die Gasverstärkung im bestrahlten Kanal nahm wieder fast bis zum Ausgangswert zu, wie in Abbildung 4.2 (Position III) zu sehen ist.

Ein weiteres Mal wurde das Modul für einen Tag mit erhöhter Intensität bestrahlt, um zu prüfen, ob die Abnahme der Gasverstärkung reproduzierbar sei. Der anschließende Vergleich der Spektren zeigte deutlich die Reproduzierbarkeit des Effekts (Position IV).

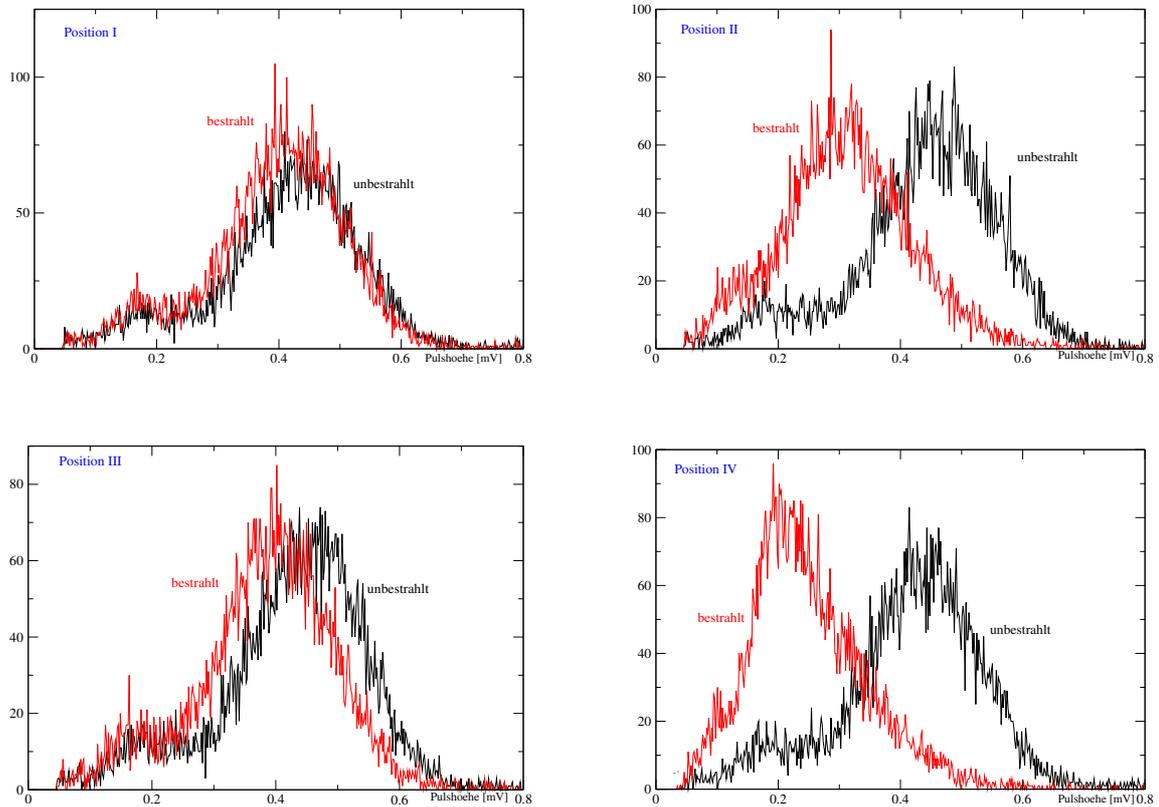


Abbildung 4.2: Die Pulshöhenspektren einer Fe^{55} -Quelle wurden jeweils an einem bestrahlten und einem unbestrahlten Strawtube aufgenommen. Von links oben nach rechts unten:

- Nach 13 tägiger Bestrahlung und 300 mC/cm angesammelter Ladung ($\cong 1,5$ Jahre LHCb-Betrieb) unterscheiden sich die Gasverstärkungen im bestrahlten und unbestrahlten Kanal nur gering um ca. 6 %.
- Ein Tag später, aber mit doppelter Intensität bestrahlt, war die Gasverstärkung im bestrahlten Bereich deutlich reduziert.
- Ein weiterer Tag wieder mit ursprünglicher Intensität in Betrieb, nahm die Gasverstärkung im bestrahlten Bereich wieder bis fast zum Ausgangswert zu.
- Nach einem weiteren Tag mit doppelter Strahlintensität betrieben, war die Gasverstärkung im bestrahlten Bereich erneut deutlich kleiner als im unbestrahlten.

4.3.3 Schlussfolgerung

Mit dem ersten Testlauf konnte gezeigt werden, dass die Messungen im Hochrate-messtand sensitiv auf Alterungseffekte sind. Bereits nach eintägiger sehr intensiver Bestrahlung konnte die erwartete Abnahme der Gasverstärkung beobachtet werden. Allerdings bleibt festzuhalten, dass Alterungseffekte nur unter bestimmten Bedingungen erkennbar wurden. Diese stellten sich nur zufällig aufgrund des schwankenden Stroms in der Röntgenröhre ein.

Offenbar kam es zu einer Überlagerung zweier Effekte: Polymerisation und Ätzprozesse. Erst ab einer bestimmten Strahlintensität überwog die Ablagerung von Polymeren am Anodendraht, was einen Verlust der Gasverstärkung zur Folge hatte. Bei niedriger Strahlintensität wurden die sich schwächer bildenden Ablagerungen vom Anodendraht abgeätzt und die Gasverstärkung nahm wieder zu. Ätzprozesse in bestrahlten und mit CF_4 -haltigen Gasen betriebenen Detektoren wurden in anderen Untersuchungen bereits beobachtet, ebenso das gemeinsame Auftreten von Polymerisation und Ätzprozessen in einem Kammermodul [27].

Der Testlauf bestätigt bereits früher gewonnene Erfahrungen: Alterungseffekte treten unter verschiedenen Betriebsparametern unterschiedlich stark auf, wobei die Parameter sehr vielfältig sind. Für die anstehenden Alterungstests bedeutet dies, dass möglichst alle Parameter, wie Temperatur, Druck, Wassergehalt, Teilchenrate, Anodenströme, Gasflüsse usw., kontrolliert werden müssen. Außerdem sollten die Betriebsbedingungen durch Änderung einzelner Parameter, wie zum Beispiel der Strahlintensität, variiert werden.

Alterungseffekte müssen nicht notwendigerweise eine Änderung der Gasverstärkung zur Folge haben. Ein Beispiel ist dieser Testlauf, in dem sich offenbar zwei Effekte zeitweise gegenseitig aufgehoben haben. Daher müssen zur endgültigen Prüfung die bestrahlten Detektorkomponenten nach einem Alterungstest optisch inspiziert und detailliert analysiert werden.

4.4 Alterungstest eines prototypähnlichen Testmoduls

Nachdem die Konstruktion unseres ersten Prototypen feststand, wurde mit dem Bau zweier kleiner Testmodule begonnen. Mit ihnen sollten verschiedene Tests durchgeführt werden, hauptsächlich um die Eignung der verarbeiteten Materialien zu validieren. Ein Testmodul wurde dafür in den Röntgenstand installiert und betrieben.

4.4.1 Beschreibung des Moduls

Bei der Konzeption der Testmodule musste beachtet werden, dass folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Alle Materialien, die für die Produktion des Prototypen benutzt wurden, müssen auch für die Testmodule verwendet werden.
- Es dürfen keine weiteren Materialien in den Testmodulen eingebaut werden.

- Es sollen gleiche Endstücke und Drahtpositionierer wie beim Prototypen verwendet werden.
- Die Testmodule sollen über getrennte innere und äußere Gasvolumen verfügen.
- Die Spannungsversorgung, Signalauslese und das Erdungsschema von Testmodul und Prototyp sollen identisch sein.
- Die Produktionsbedingungen müssen gleich denen des Prototypen sein (Fertigung im Reinraum, usw.).

Dagegen konnten die Testmodule gegenüber dem Prototypen in vielen Punkten deutlich vereinfacht werden:

- Die Testmodule bestehen jeweils aus nur einer Modullage.
- Sie verfügen nur über 16 Kanäle.
- Die Kanäle werden in der Mitte des Moduls nicht unterbrochen.
- Die Testmodule sind wesentlich kleiner als der Prototyp. Dadurch wird die Produktion wesentlich weniger aufwendig.

Ein Testmodul besteht aus 16 Aluminium-KaptonXC-Strawtubes. Sie sind jeweils 50 cm lang. 3,5 cm aus ihrer Mitte versetzt befindet sich jeweils ein Drahtpositionierer. Die Strawtubes sind auf einer aluminiumbeschichteten CFK-Platte mit innerer Wabenstruktur aufgeklebt. An beiden Enden sind die Strawtubes auf den Endhülsen der Gasverteilerbox aufgesteckt (Abbildung 4.3 und 2.5). Als Deckel dient eine weitere



Abbildung 4.3: Das offene Testmodul während der Produktion. Die Gasverteilerbox links ist noch offen. Man erkennt die Platine, an der die Anodendrähte festgelötet werden.

aluminiumbeschichtete CFK-Platte. An einem Ende überragt die 65 cm lange Deckplatte die Grundplatte. Auf dieser Fläche kann die HV-Versorgungsplatine und die Ausleseelektronik angebracht werden.

Wie beim Prototyp ist das Innenvolumen in einem Testmodul in ein inneres durch die Strawtubes und ein äußeres, die Strawtubes umhüllendes Gasvolumen aufgeteilt. Das gesamte Innenvolumen des Testmoduls beträgt 320 ml, wobei beide Volumen etwa gleich groß sind. Beide werden jeweils über zwei seitliche Zu- und Ausgänge mit dem Zählgas gespült (Abbildung 4.4). Wegen der undichten Strawtubes konnte keine Gasdichtigkeit zwischen innerem und äußerem Gasvolumen erreicht werden (Kapitel 2.2.3). Allerdings konnte die gesamte Testkammer gasdicht geschlossen werden. Bei einem Überdruck von 2,5 mbar im Modul konnte kein signifikanter Druckabfall gemessen werden (0,05 mbar nach 150 Sekunden).

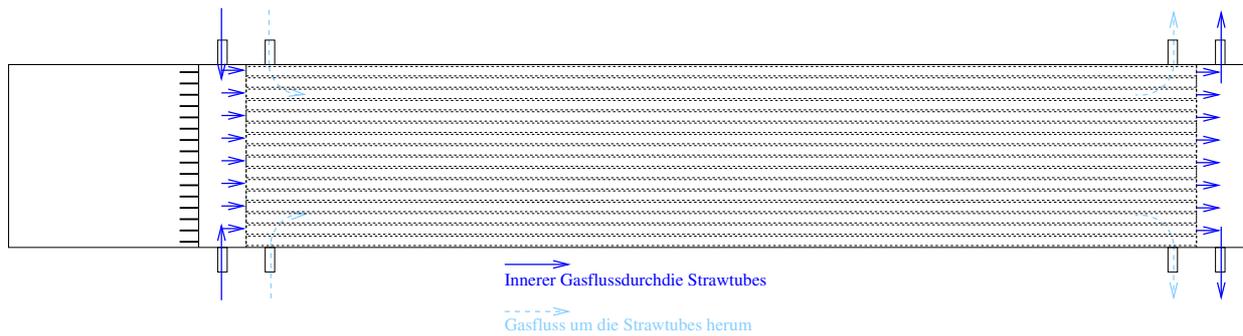


Abbildung 4.4: Skizze vom Testmodul mit den seitlichen Ein- und Ausgängen für das Zählgas. Das Innenvolumen der Kammer ist in ein inneres Gasvolumen durch die Strawtubes und ein äußeres geteilt.

4.4.2 Betrieb der Kammer im Teststand

Installation und Auslese der Kammer

Abbildung 4.5 zeigt den skizzierten Aufbau des Testmoduls in der Röntgenanlage. Das Modul ist senkrecht zur Strahlachse an die fahrbare Halterung montiert. Der Abstand zur Röntgenröhre beträgt 70 cm. Mit einem elektrischen Hubmagneten kann eine Bleiabdeckung vor das Austrittsfenster der Röntgenröhre gesenkt und gehoben werden. 15 cm vor dem Modul befindet sich ein Kollimator. Auf der Kollimatorplatte ist eine ⁵⁵Fe-Quelle befestigt mit Strahlrichtung zum Modul. Die Strawtubes sind bis auf 4 cm von der Röntgenstrahlung abgeschirmt.

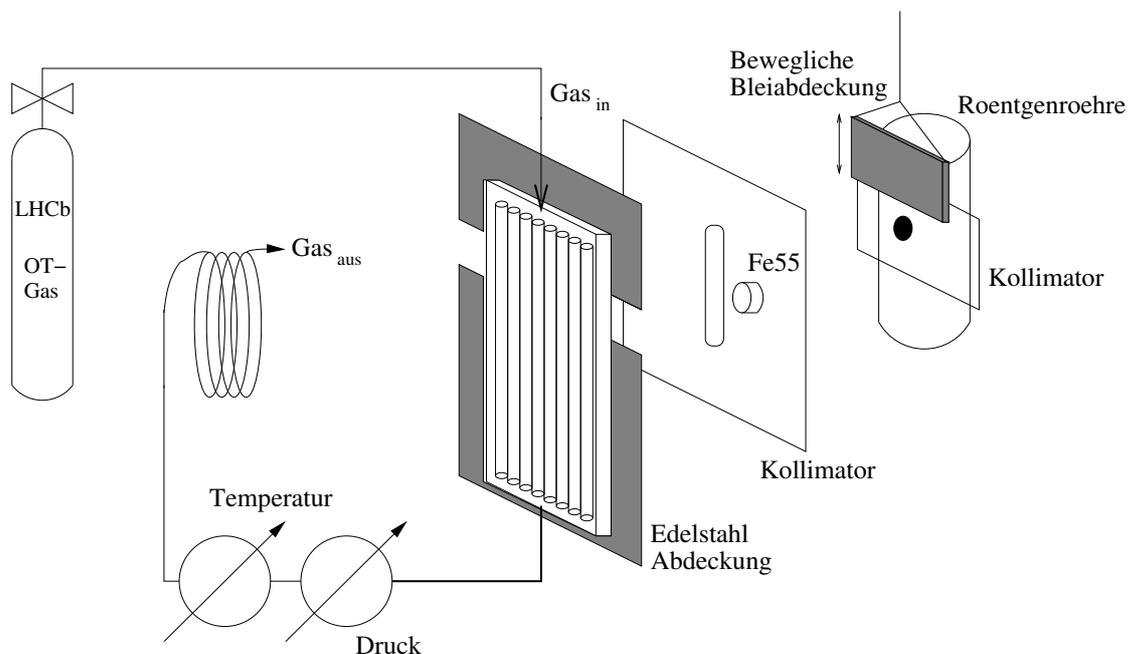


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Messaufbaus der Testkammer im Röntgenmessstand.

Das Modul ist an ein offenes, hochreines Gassystem aus Edelstahlkomponenten angeschlossen. Das Zählgas ist vorgemischtes $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ (75:10:15 Vol.-%). Das gesamte Innenvolumen des Moduls wird mit einem Gasfluss von 300 ml/h gespült, was in etwa einem Volumenaustausch pro Stunde entspricht. Zur Kontrolle der Umgebungsbedingungen werden während des Betriebs Druck und Temperatur registriert.

Am unteren Modulende befindet sich die Platine für die HV-Versorgung und Signalauskopplung. Bis auf einen werden alle Kanäle über einen gemeinsamen Kontakt mit der Hochspannung versorgt. Ein Kanal bekommt eine separate HV-Versorgung. Die Signale an den Anoden werden über Kondensatoren an die Vorverstärker VV50 [28] ausgekoppelt. Abbildung 4.6 zeigt das HV-Versorgungs- und Ausleseschema. Die VV50-Hauptplatine bietet nur für 12 Vorverstärker Platz. Daher werden vier Kanäle nicht ausgelesen. Ihre Koppelkondensatoren gehen direkt auf Masse.

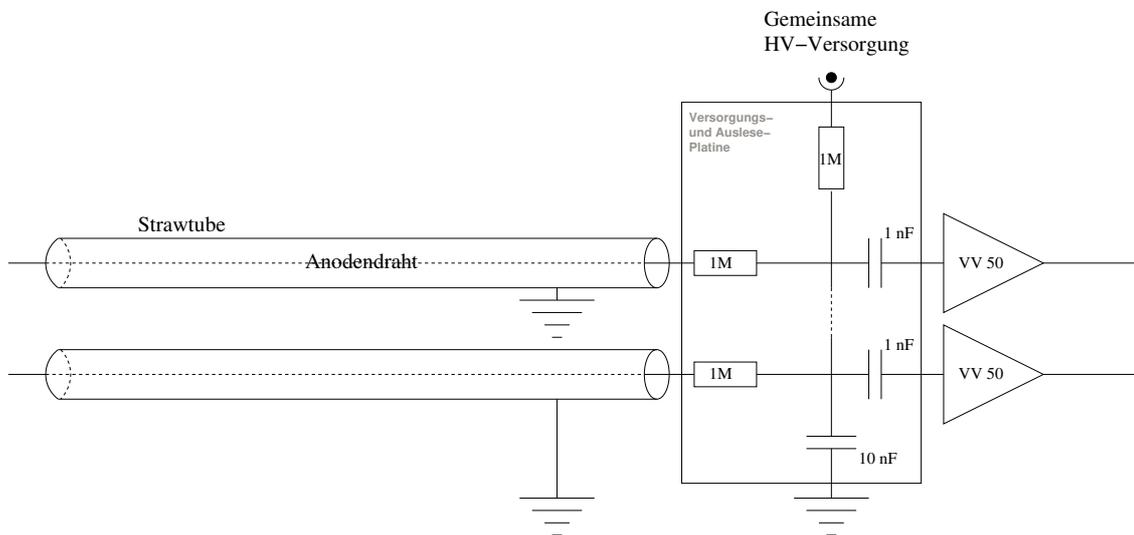


Abbildung 4.6: Schema der HV-Versorgung und Signalauslese der Kanäle.

Messmethode zur Untersuchung von Alterungseffekten

Ziel war es, die Testkammer im Röntgensystem zu betreiben, bis sich am maximal bestrahlten Anodendraht 2,5 C/cm an Ladung angesammelt hat, wie es für den maximal bestrahlten Bereich nach 10 LHCb-Betriebsjahren erwartet wird.

Für den Alterungstest wurde ein Kanal der Testkammer separat unter intensiver Röntgenstrahlung betrieben. Zur Bestimmung der am Anodendraht angesammelten Ladung wurde der Anodenstrom aufgezeichnet. Insgesamt wurde der Kanal über 4 cm bestrahlt. Mit Hilfe des gemessenen Strahlprofils in Abbildung 4.8 konnte aus dem aufgezeichneten Anodenstrom der Strom pro 1 cm Kanallänge umgerechnet werden. In Abbildung 4.7 ist der Strom pro 1 cm Strawtubelänge über einen Zeitraum von 35 h dargestellt. Mit Strömen von 150 nA/cm bis 350 nA/cm ergibt sich gegenüber LHCb eine 6- bis 14-fach beschleunigte Ladungsansammlung. Der mittlere Strom von 270 nA/cm führt zu einer 11-fachen Beschleunigung gegenüber dem erwarteten Strom von 25 nA/cm beim LHCb-Experiment.

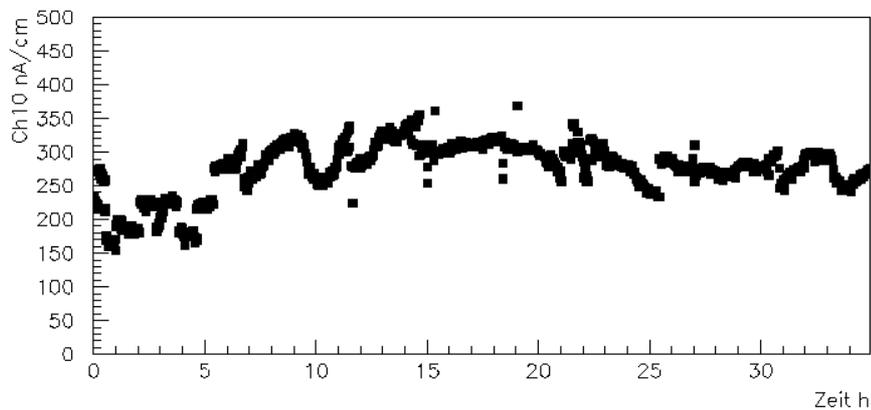


Abbildung 4.7: Der Anodenstrom im bestrahlten Kanal des Testmoduls über einen Zeitraum von 35 Stunden zu Beginn des Alterungstests. Der Strom pro 1 cm Strawtubelänge ist mit 270 nA/cm im Mittel 11 mal höher als der im LHCb-Experiment erwartete Anodenstrom.

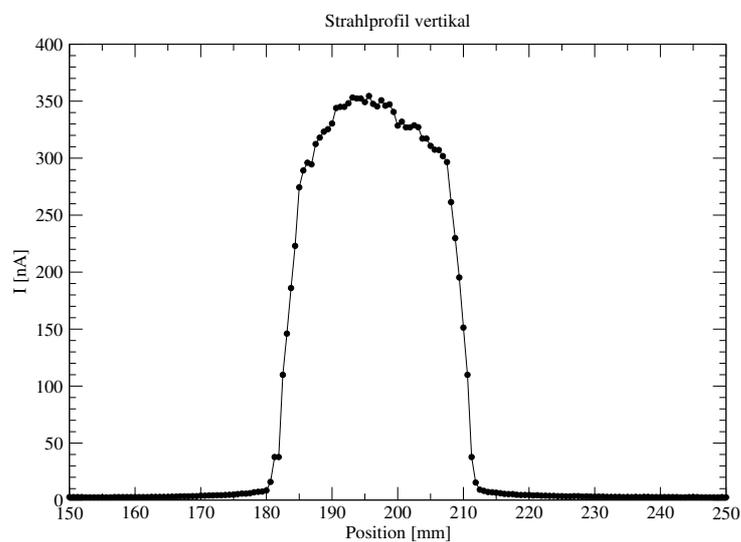


Abbildung 4.8: Das Strahlprofil der Röntgenröhre. Das vertikal orientierte Testmodul wurde senkrecht zum Strahl in der Horizontalen verfahren. Über den Anodenstrom eines Kanals konnte die Verteilung der Strahlintensität ermittelt werden.

Neben dem intensiv bestrahlten Strawtube waren auch die restlichen Kanäle in Betrieb. Sie waren allerdings vor der Röntgenstrahlung abgeschirmt und nur niedrigen Raten der γ -Strahlung der ^{55}Fe -Quelle ausgesetzt (\mathcal{O} 100Hz). In Strahlrichtung von links nach rechts gezählt, war Kanal 10 der intensiv bestrahlte. Als Referenzkanal wurde der äußere Kanal 1 gewählt.

In regelmäßigen Abständen wurde die Röntgenbestrahlung kurzzeitig unterbrochen, um sowohl im bestrahlten Kanal 10, als auch im Referenzkanal ^{55}Fe -Spektren aufzunehmen und aus dem Verhältnis der mittleren Pulshöhen die relative Gasverstärkung zu ermitteln. Sie ist druck- und temperaturunabhängig und bleibt konstant, solange in den Kanälen keine Alterungseffekte auftreten.

Weitere Hinweise auf aufgetretene Alterungseffekte können z.B. erhöhte Dunkelströme sein. Falls Dunkelströme vorhanden sind, werden sie während der Bestrahlungspausen erkannt.

Ergebnisse der ersten Bestrahlung

Für diesen Alterungstest wurde das Testmodul für 98 Tage unter intensiver Bestrahlung in der Röntgenanlage betrieben. Im maximal bestrahlten Bereich konnte eine Ladung von 2,8 C/cm angesammelt werden, das entspricht mehr als 11 LHCb-Betriebsjahren. In Abbildung 4.9 sind die mittleren Pulshöhen der ^{55}Fe -Spektren als Funktion der angesammelten Ladung aufgetragen, sowohl für den bestrahlten als auch für den Referenzkanal. Die Schwankungen der Pulshöhen sind gleichbedeutend mit Variationen in der Gasverstärkung. Sie verlaufen parallel in beiden Kanälen und stammen von Schwankungen äußerer Parameter, wie z.B. Temperatur.

Nach etwa 2,4 C/cm steigt die Gasverstärkung in beiden Kanälen sprunghaft an. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Betriebsspannung erhöht, um die Gasverstärkung von 40.000 auf 70.000 zu steigern. Es war die Absicht, das Testmodul gegen Ende der Alterungsmessung unter geänderten Bedingungen zu betreiben, um es dabei auf abweichende, bis dahin nicht aufgetretene Effekte zu untersuchen. Nach weiteren 0,3 C/cm wurde die Betriebsspannung wieder auf den Ausgangswert eingestellt.

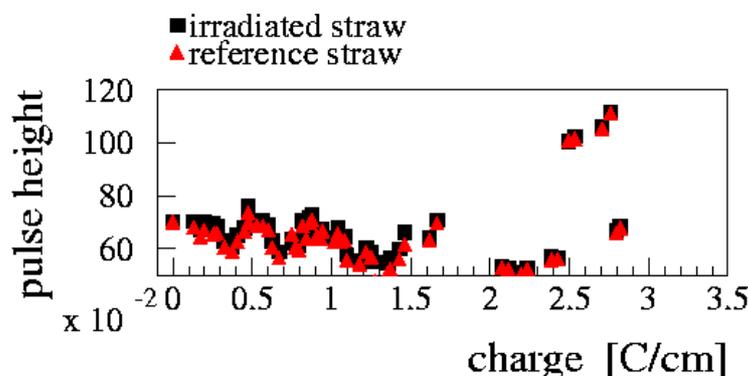


Abbildung 4.9: Die mittleren Pulshöhen der Fe^{55} -Spektren im bestrahlten und im Referenzkanal, aufgetragen über die angesammelte Ladung.

In Abbildung 4.10 ist das Verhältnis der Gasverstärkungen im bestrahlten und im Re-

ferenzkanal als Funktion der angesammelten Ladung aufgetragen. Während der ersten 0,25 C/cm steigt die relative Gasverstärkung zunächst kontinuierlich um 6% an. Von einzelnen Schwankungen abgesehen fällt sie im weiteren Verlauf ab. Es konnte nicht geklärt werden, warum die Messwerte bei 0,7 C/cm und um 1,4 C/cm so stark aus der Reihe abweichen.

Die im Diagramm gestrichelt eingezeichnete Gerade ist mit dem Analyseprogramm PAW [29] an die Datenpunkte angepasst worden. Aus der Geradensteigung kann der *Invariante Alterungsparameter* $R = -1/Q \cdot \Delta A/A$ berechnet werden [7]. Q ist dabei die Ladung pro cm Anodenlänge und A die Gasverstärkung. Für die vorliegende Messung ergibt sich ein Verlust der Gasverstärkung von 1% pro C/cm angesammelter Ladung.

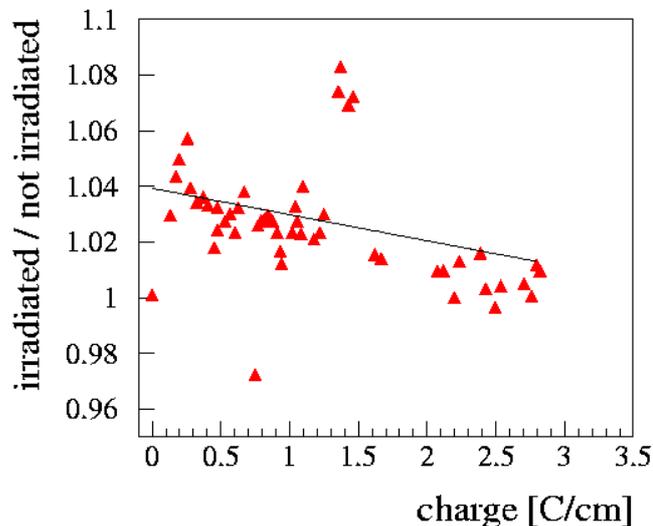


Abbildung 4.10: Die relative Gasverstärkung im bestrahlten Strawtube aufgetragen über die angesammelte Ladung. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Gasverstärkungen im bestrahlten und Referenzkanal. Die zusätzlich dargestellte Gerade wurde mit dem Analyseprogramm Paw an die Datenpunkte angepasst. Aus ihrer Steigung ergibt sich ein Gasverstärkungsverlust von 1% pro 1 C/cm für den bestrahlten Kanal.

Um weitere Aussagen über eventuell aufgetretene Alterungseffekte machen zu können, wurde das Testmodul geöffnet, um den bestrahlten Draht weiter zu analysieren. Zuvor wurde es aber noch für weitere Testmessungen verwendet, ohne jedoch die zuerst bestrahlte Region weiter zu bestrahlen.

4.4.3 Anodendrahtanalyse der bestrahlten Region

Nach weiteren Testmessungen wurde die Kammer schließlich und endgültig geöffnet und der bestrahlte Anodendraht inspiziert. Die Drahtoberfläche wurde mit mehreren

Methoden untersucht.

Inspektion mit bloßem Auge und mit Lichtmikroskop

Neben der Inspektion mit bloßem Auge wurde der Draht auch mit einem Mikroskop untersucht. Dabei konnte in beiden Fällen eine Verfärbung der bestrahlten Stelle gegenüber einer unbestrahlten Region festgestellt werden. Allerdings ergab die Inspektion mit dem Mikroskop keinen Aufschluss darüber, woher diese Verfärbung stammen könnte.

Inspektion mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM)

Wir bekamen die Gelegenheit an der TFH Wildau [30] einzelne, 3 cm lange Drahtabschnitte mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) zu untersuchen. Dieses Mikroskop liefert Abbildungen von leitfähigen Oberflächen mit hoher Plastizität, Raumtiefe und einer Auflösung von ≤ 10 nm. Mit dem REM können Vertiefungen (z.B. Beschädigungen) und Erhöhungen (z.B. Ablagerungen) auf der Drahtoberfläche erkannt werden.

Analyse durch energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS)

Das REM bietet als zusätzliche Analysefunktion die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDS). Nach der Stoßanregung der Präparatome durch den rasterartigen Beschuss mit Elektronen, werden charakteristische Röntgenquanten von den Präparatomen emittiert. Mit einem zusätzlichen Detektor wird das Röntgenspektrum aufgenommen und daraus die einzelnen Elemente auf der Drahtoberfläche bestimmt. Die Beschleunigungsspannung für die Elektronen kann bei dem verwendeten REM zwischen 5 kV und 20 kV eingestellt werden. Leichtere Elemente als Kohlenstoff, wie z.B. Wasserstoff, können mit der Röntgenspektroskopie nicht nachgewiesen werden.

Abbildung 4.11 zeigt einen Anodendrahtabschnitt eines unbestrahlten Kanals unter dem Rasterelektronenmikroskop. Er zeigt keinen Unterschied zu einem neuen Draht direkt von der Rolle.

Abbildung 4.12 zeigt den bestrahlten Abschnitt des Anodendrahtes. Auf der gesamten, etwa 3 cm langen Probe des Drahts sind dunkle Stellen zu sehen. Dabei handelt es sich um Kohlenstoff, der sich auf der Drahtoberfläche abgelagert hat. Weitere Alterungseffekte am Anodendraht wurden nicht gefunden. Insbesondere gab es keinen Hinweis, dass die Drahtoberfläche angegriffen wurde.

4.4.4 Fazit der ersten Alterungsmessung

Beim Betrieb des Testmoduls unter intensiver Röntgenbestrahlung konnte eine leichte Abnahme der Gasverstärkung im bestrahlten Strahlrohr festgestellt werden. Der Rückgang von 1% pro 1 C/cm liegt dabei in einem tolerierbaren Rahmen. In einzelnen Messungen schwankte die relative Gasverstärkung um +8% und -3% vom Anfangswert. Die Ursache dafür ist nicht verstanden. Die Zunahme der Gasverstärkung im bestrahlten Kanal zu Beginn der Messung kann ein Hinweis auf Alterungseffekte sein. Um weitere Aussagen über Alterungseffekte treffen zu können, wurde der bestrahlte

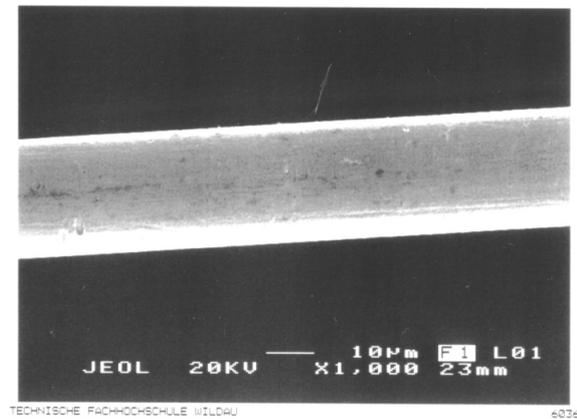


Abbildung 4.11: Ein unbestrahlter Anodendraht des Testmoduls unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Der Draht weist keine Defekte auf.

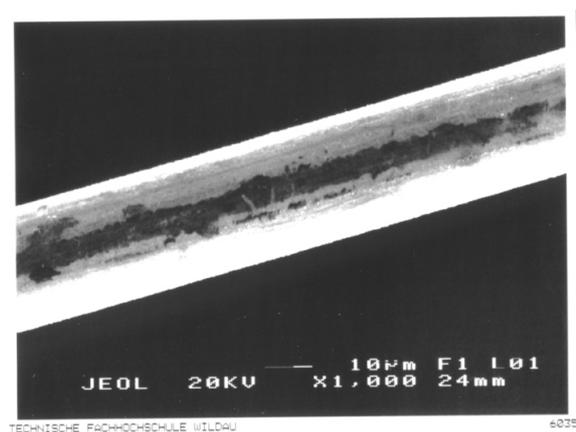


Abbildung 4.12: Der bestrahlte Anodendraht unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Nach 2,8 C/cm angesammelter Ladung sind auf dem Draht entlang des bestrahlten Bereichs dunkle Stellen zu erkennen.

Draht aus der Testkammer entfernt, inspiziert und analysiert. Es wurden Ablagerungen von Kohlenstoff auf dem bestrahlten Bereich des Drahtes nachgewiesen. Da es über den gesamten Draht keine signifikante Änderung der Gasverstärkung gab, kann ausgeschlossen werden, dass sich eine isolierende Schicht auf dem Draht abgelagert hat. Zudem konnte kein Hinweis gefunden werden, dass der Draht angegriffen wurde. Insgesamt wurden bei diesem Test keine Alterungseffekte beobachtet, die den Betrieb der Driftkammermodulen im LHCb-Experiment gefährden würden. Es darf aber nicht ausgeschlossen werden, dass solche Effekte bei großflächiger und hadronischer Bestrahlung auftreten.

Es gab keinen Hinweis auf Verunreinigungen des Zählgases durch das Gassystem oder durch ausgasende Materialien. Es ist dennoch möglich, dass kleine Mengen an Verunreinigungen vorhanden waren, die bei großflächiger Bestrahlung im LHCb-Experiment verheerende Auswirkungen auf den Kammerbetrieb haben könnten. Für die weiteren Alterungstests mit dieser Kammer wurden größere Mengen einzelner Materialien in den Zählgasfluss gebracht, um die eventuelle Verunreinigung des Gases zu verstärken. Bei entsprechend starker Verunreinigung des Zählgases sollten auch beim Kammerbetrieb in der Röntgenanlage signifikante Effekte auftreten.

Kapitel 5

Materialtests im Röntgenmessstand

Für die Driftkammermodule dürfen ausschließlich nicht ausgasende Materialien eingesetzt werden. Außerdem muss auch genau kontrolliert sein, mit welchen Materialien die Einzelteile während der Produktion in Berührung kommen. Verunreinigungen von Kammerkomponenten, z.B. durch silikonhaltige Schmiermittel, können starke Alterungseffekte verursachen, die den Betrieb der Kammer gefährden. Für den Tauglichkeitstest einzelner Materialien wurde das Gassystem um einen Materialbehälter erweitert. Er wurde mit den zu testenden Materialien gefüllt, die so mit dem Zählgas in Berührung kommen.

5.1 Erweiterter Aufbau des Teststandes

In Abbildung 5.1 ist der erweiterte Aufbau skizziert. Der Materialbehälter ist ein

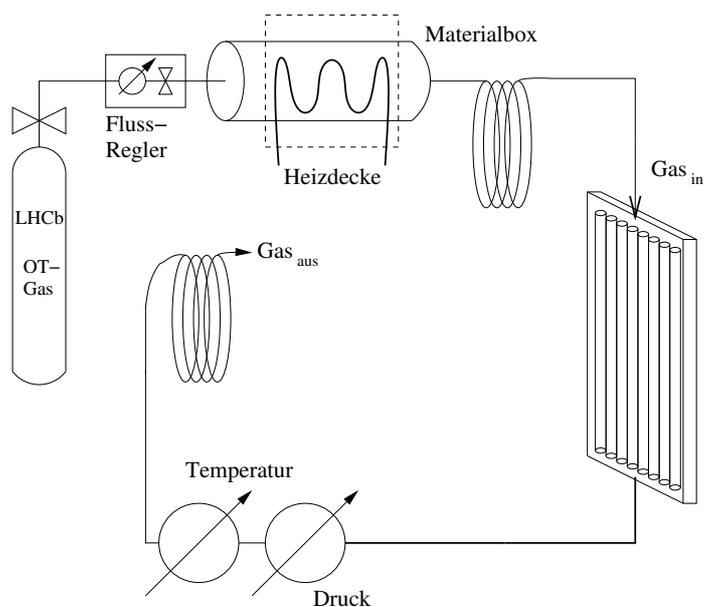


Abbildung 5.1: Das Gassystem mit dem eingebauten Materialbehälter. Er ist zwischen dem Flussregler und dem Gaseinlass des Moduls installiert und kann geheizt werden.

wieder verschließbarer Edelstahlzylinder mit einem Innenvolumen von etwa 160 ml. Er ist zwischen dem Gasflussregler und dem Gaseingang des Testmoduls installiert. Mit einer elektrischen Heizdecke kann er auf maximal 80 °C aufgeheizt werden. Das Heizen der Materialien beschleunigt bzw. verstärkt eventuelle Ausgasungsprozesse. Damit sich das Zählgas wieder auf Zimmertemperatur abkühlen kann, bevor es die Testkammer erreicht, wurde die Edelstahlgasleitung zwischen Behälter und Modul um 7 m verlängert. Bei einem Gasfluss von 300 ml/h (\cong ein Kammervolumen pro Stunde) benötigt das Zählgas für diese Leitungsstrecke 10 Minuten.

5.2 Alterungsmessung mit Materialbehälter

Von acht betriebenen Strawtubes wurden vier bestrahlt. Die Hochspannungsversorgung wurde in zwei HV-Gruppen aufgeteilt, jeweils eine für die vier bestrahlten und eine für die vier unbestrahlten Kanäle (Abbildung 5.2). Die Anodenströme der beiden Gruppen wurden getrennt registriert.

Die Röntgenbestrahlung wurde in regelmäßigen Abständen unterbrochen, um ^{55}Fe -Spektren sowohl an den bestrahlten, als auch an den unbestrahlten Kanälen aufzunehmen. In Abbildung 5.2 ist eine Skizze der Testkammer dargestellt. Die Spektren wurden jeweils an den Positionen I, II und III aufgenommen. Die Kanäle der HV-Gruppe 1 waren während der Röntgenbestrahlung mit einer Bleiplatte abgedeckt. Die Kanäle der HV-Gruppe 2 wurden in Position II maximal bestrahlt. Position I liegt 5 cm über Position II. Position III befindet sich 10 cm darunter. Die Spektren wurden an mehreren Positionen aufgenommen, um eventuelle lokale Änderungen der Gasverstärkung auch an weniger intensiv bestrahlten Stellen erkennen zu können.

5.2.1 Testmessung mit leerem Materialbehälter

Vor den Ausgasungstests spezieller Materialien, wurde ein Testlauf mit leerem Materialbehälter durchgeführt, um

1. bei den späteren Materialtests eventuelle Verunreinigungen des Gassystems als Ursache auftretender Effekte ausschließen zu können und
2. Auswirkungen durch die Erwärmung des Materialbehälters und des Zählgases auf den Detektorbetrieb zu untersuchen.

In Abbildung 5.3 ist das horizontale Röntgenstrahlprofil dargestellt. Mit der gemessenen maximalen Teilchenrate pro cm Strawtubelänge im am intensivsten bestrahlten Kanal 10 und der bekannten Gasverstärkung bei 1550 V Betriebsspannung wurde die akkumulierte Ladungsmenge pro cm Anodendrahtlänge berechnet. Die Strawtubes von HV-Gruppe 2 wurden für 5 Tage über 4 cm bestrahlt. Dabei wurden an Kanal 10 ungefähr 150 mC/cm angesammelt, was 0,6 LHCb-Betriebsjahren entspricht.

Vor und nach der Bestrahlung wurden an den bestrahlten Strawtubes die relativen Gasverstärkungen gemessen, bezogen auf die mittlere Gasverstärkung in den unbestrahlten Strawtubes. Sie sind in Tabelle 5.1 angegeben. Die relativen Änderungen der Gasverstärkung lagen bei maximal 2,8 %, wobei kein stetiger Anstieg oder Abfall festzustellen war.

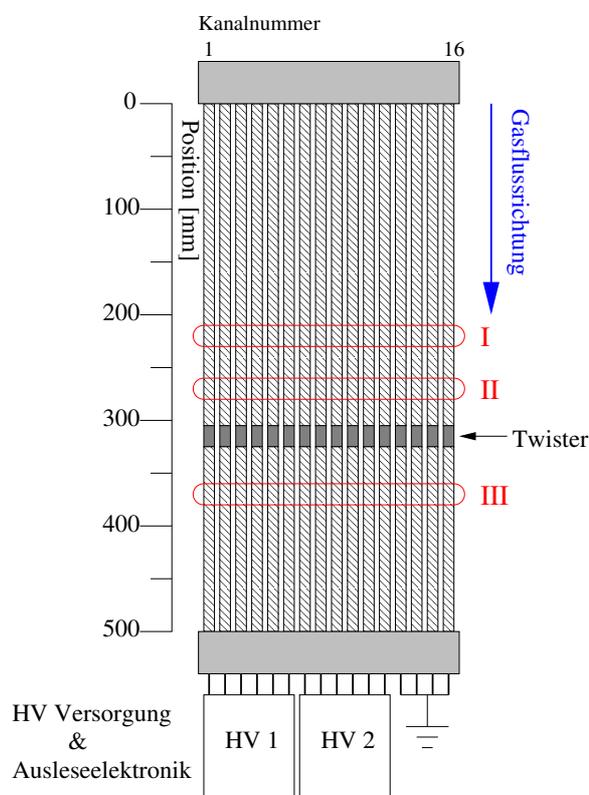


Abbildung 5.2: Skizze der Testkammer. Die linke Skala definiert die Positionen entlang der Strawtubes. I, II und III kennzeichnen die Positionen entlang der acht betriebenen Straws, an denen die ^{55}Fe -Spektren aufgenommen wurden.

	Kanal 7			Kanal 9			Kanal 10			Kanal 11		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
a	100,3	98,5	97,4	91	88,9	91,2	100,6	98	95,4	98	96,2	94,7
b	100,9	97,9	97,5	90,9	88,6	89,8	99,9	96,6	96,7	97,7	96,4	95,3
c	98,6	97,9	98,4	90,2	90,3	92,6	99,1	97,6	97,1	97,8	96	

Tabelle 5.1: Die relative Gasverstärkung [%] in den vier bestrahlten Straws an drei Positionen (I - III), bezogen auf die mittlere Gasverstärkung in den unbestrahlten Strawtubes. Eingetragen sind die gemessenen Werte: a) vor der Bestrahlung der Kammer, b) 24 Stunden später, ohne Bestrahlung, c) nach der Bestrahlung (150 mC/cm in Kanal 10).

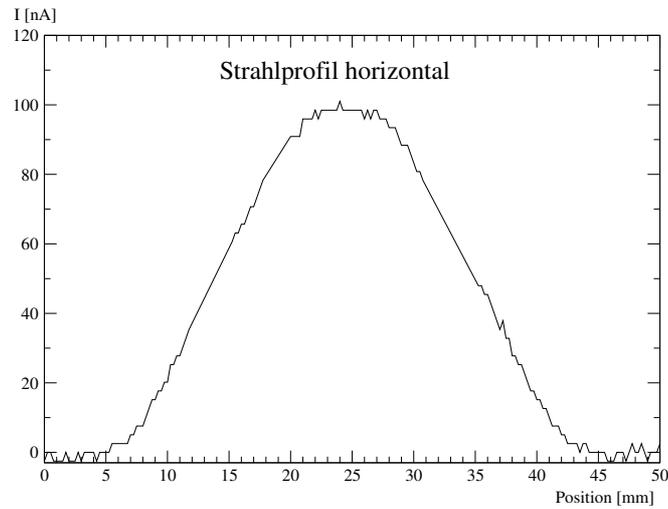


Abbildung 5.3: Strahlprofil an der Testkammer. Die Kammer wurde entlang der horizontalen Achse senkrecht zum Röntgenstrahl verfahren. Der Anodenstrom eines Kanals ist als Funktion der Position des Kanals aufgetragen. Mit ihm lässt sich die Verteilung der Strahlintensität ermitteln.

Während der Bestrahlung wurde der Materialbehälter auf 350°K erwärmt. In Abbildung 5.4 ist oben der Temperaturverlauf am Behälter als Funktion der Zeit dargestellt. In der Mitte ist das Verhältnis Strom/Rate als Funktion der Zeit aufgetragen (Strom/Rate \propto Gasverstärkung). Etwa 3,5 Stunden nach Heizbeginn war der Materialbehälter auf eine konstante Temperatur (ca. 350 °K) erwärmt. In dieser Zeit änderte sich die Gasverstärkung nicht signifikant. Erst mehr als 30 Minuten später war ein Absinken der Gasverstärkung zu erkennen. Zu dieser Zeit hatte die Temperatur bereits einen konstanten Wert angenommen. Ursache für das Absinken der Gasverstärkung war offensichtlich der zeitlich parallel ansteigende Umgebungsdruck (Abbildung 5.4). Das Resultat dieses Testlaufs war, dass die Installation des Materialbehälters und dessen Erwärmung keine Auswirkungen auf den Kammerbetrieb haben. Es wurden keine Alterungseffekte beobachtet. Damit konnten die eigentlichen Ausgasungstests beginnen.

5.2.2 Alterungstest mit Schutzfolien der Strawtubes

Bei der Produktion der Strawtubes werden Schutzfolien mit aufgetragenem Schmiermittel eingesetzt (Kapitel 2.3). Schmiermittel enthalten oft Silizium. Dieses kann in sauerstoffhaltigem Zählgas zu Polymerisation führen und darf deshalb weder im Gassystem noch im Gasvolumen der Driftkammermodule vorkommen[4]. Das Schmiermittel kommt im fehlerfreien Produktionsablauf nicht mit den Strawtubes in Berührung. Eine potentielle Quelle für Verschmutzungen von Strawtubes stellt es trotzdem dar. Der Materialbehälter wurde mit Schutzfolien und aufgetragenem Schmiermittel gefüllt, um

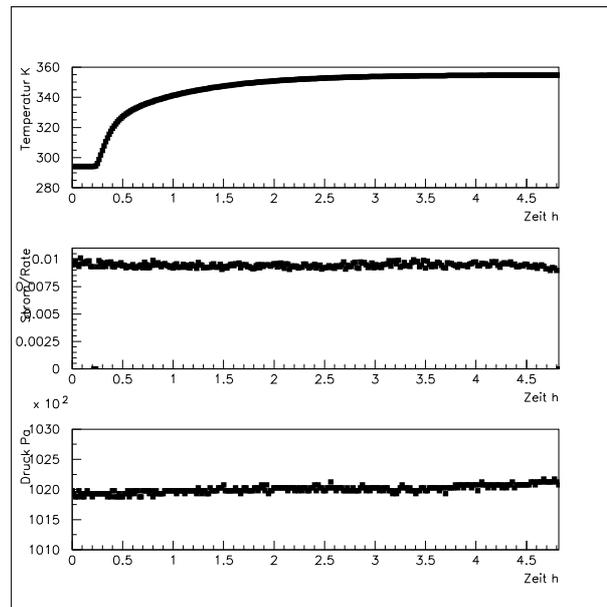


Abbildung 5.4: Oben: Temperatur [K] am Materialbehälter als Funktion der Zeit. Mitte: Der zeitliche Verlauf von Strom/Rate \propto Gasverstärkung. Unten: Der zeitliche Verlauf des Umgebungsdruckes.

die Ausgaseigenschaften zu testen. Die Gesamtfläche der Folien im 160 ml großen Innenvolumen der Box betrug ca. 900 cm².

Mit der Schutzfolie im Gassystem wurde die Kammer vorerst unter gleichen Bedingungen wie im vorangegangenen Testlauf bestrahlt. Im weiteren Verlauf wurden die Betriebsbedingungen mehrmals geändert.

In Kanal 10 wurden gegenüber LHCb 13-fach beschleunigt 200 mC/cm angesammelt (\cong 1 Jahr LHCb-Betrieb). Die benachbarten Kanäle 9 und 11 wurden weniger intensiv bestrahlt, dementsprechend wurden hier 175 mC/cm angesammelt. Der vierte Kanal der HV-Gruppe 2 war zum Teil von der Bleiabschirmung verdeckt und wurde kaum bestrahlt.

Nach einigen Modifikationen am Teststand wurden z.T. andere Strawtubes mit insgesamt höherer Intensität bestrahlt. Die jeweils bestrahlte Strawtubelänge wurde auf 6 cm erhöht. Die Ladungsansammlung in Kanal 10 war gegenüber dem LHCb-Betrieb um das 17-fache beschleunigt. Die Strahlungsintensität an den Strawtubes war relativ zu Kanal 10:

160 % für Kanal 8,
100 % für Kanal 10,
70 % für Kanal 11,
46 % für Kanal 12.

Die Kammer wurde bestrahlt, bis sich im Kanal 10 weitere 230 mC/cm angesammelt hatten.

Für den weiteren Alterungstest wurde die Betriebsspannung der Strawtubes auf 1600 V

erhöht. Damit erhöht sich die Gasverstärkung in den Strawtubes um 66 %. Die Ladungsansammlung in Kanal 10 war gegenüber LHCb um das 29fache beschleunigt. Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht der angesammelten Ladung in allen Kanälen für die verschiedenen Betriebsbedingungen.

	Kanal 8		Kanal 9		Kanal 10		Kanal 11		Kanal 12	
	BF	mC/cm	BF	mC/cm	BF	mC/cm	BF	mC/cm	BF	mC/cm
a	-	-	11	130	13	150	11	130	-	-
b	-	-	11	175	13	200	11	175	-	-
c	27	370	-	-	17	230	12	160	8	105
d	45	2100	-	-	29	1130	20	930	13	610
Σ		2470		305		1710		1395		715

Tabelle 5.2: Übersichtstabelle der bestrahlten Kanäle. Eingetragen ist die angesammelte Ladung [mC/cm] bei den verschiedenen Betriebsbedingungen. BF=Beschleunigungsfaktor der Ladungsansammlung. a) Phase I: Testlauf mit leerem Materialbehälter, b) Phase II: Strawfolie im Behälter, sonst wie Testlauf, c) Phase III: erhöhte Strahlungsintensität, bestrahlte Strawtubelänge auf 6 cm erhöht, d) Phase IV: erhöhte Gasverstärkung. In der unteren Zeile ist die Summe der angesammelten Ladungen in den bestrahlten Kanälen eingetragen.

Während der Alterungstests wurden mit ^{55}Fe -Spektren die relativen Gasverstärkungen in den bestrahlten Strawtubes ermittelt, bezogen auf die mittlere Gasverstärkung in den unbestrahlten Strawtubes. In Tabelle 5.3 sind die relativen Gasverstärkungen jeweils in der maximal bestrahlten Position II und in den schwächer bestrahlten Positionen I und III eingetragen. Die Gasverstärkungen im bestrahlten Bereich schwanken

	Kanal 8			Kanal 10			Kanal 11			Kanal 12		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
a	92,0	90,0	92,4	99,6	98,8	98,1	100,3	98,8	98,1	93,9	93,8	92,5
b	90,9	88,3	89,5	99,1	96,1	95,6	101,0	97,5	93,3	89,9	88,8	85,4
c	90,7	90,0	85,8	100,3	98,6	97,5	100,1	97,8	96,9	88,6	87,6	85,7
d	92,2	89,4	88,0	99,2	99,8	95,8	104,0	98,8	96,8	96,2	91,9	89,1
e	89,6	86,8	88,0	96,8	96,8	94,1	100,0	97,3	94,8	91,7	90,1	89,0
f	92,4	88,7	89,4	-	-	-	101,4	99,1	94,9	90,0	88,0	87,3

Tabelle 5.3: Die relativen Gasverstärkungen [%] in den bestrahlten Strawtubes. An Position II sind die Kanäle maximal bestrahlt. a) Nach 580 mC/cm in Kanal 10, b) nach 760 mC/cm, c) nach 1070 mC/cm, d) nach 1370 mC/cm. e) Nach 1700 mC/cm riss der Anodendraht in Kanal 10. f) Die restlichen Kanäle waren weiter in Betrieb, bis in Kanal 11 zusätzlich 140 mC/cm angesammelt waren.

während der Bestrahlung um wenige Prozent. Hinweise auf Alterungseffekte waren

nicht zu sehen.

Nach 1,7 C/cm Ladungsansammlung riss der Anodendraht von Kanal 10 im bestrahlten Bereich ohne vorige Anzeichen. Weder auffallende Schwankungen in der Gasverstärkung, noch Unregelmäßigkeiten im Anodenstrom wurden beobachtet. In Abbildung 5.5 ist das Verhältnis Strom/Rate (\propto Gasverstärkung) als Funktion der Zeit für Kanal 10 aufgetragen. Bis zur Zerstörung des Drahtes ist keine Veränderung der Gasverstärkung zu erkennen.

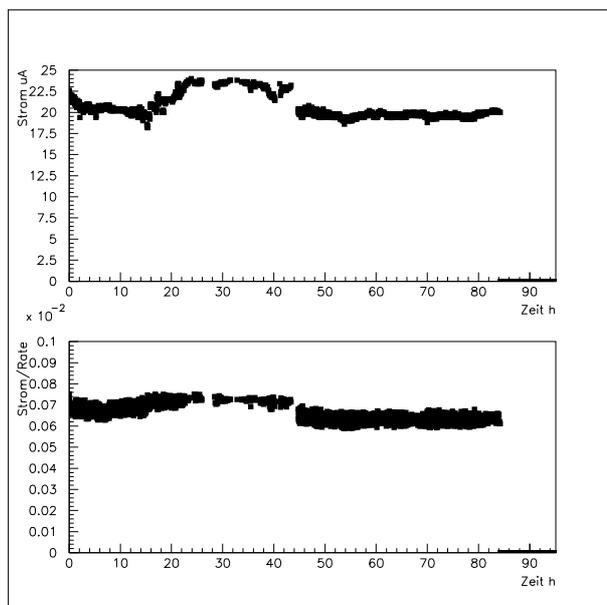


Abbildung 5.5: Oben: Der Anodenstrom an HV-Gruppe 2 als Funktion der Zeit. Unten: Strom/Rate als Funktion der Zeit für Kanal 10. Zur 84. Stunde dieses Zeitausschnitts riss der Anodendraht.

Um nach der Ursache des Drahtreißen zu forschen und nach weiteren Alterungsprozessen zu suchen wurde die Testkammer zerlegt und die Anodendrähte inspiziert.

5.3 Inspektion der Anodendrähte

Der Anodendraht in Kanal 10 war im bestrahlten Bereich gerissen. Aber auch an den anderen bestrahlten Bereichen waren bereits mit bloßem Auge Hinweise auf Alterungseffekte zu sehen. Dort erschienen die Drähte dunkel bis schwarz statt golden.

Mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) und der Röntgenspektroskopie (EDS) wurden die Drähte weiter analysiert. Abbildung 5.6 zeigt einen bestrahlten Drahtabschnitt von Kanal 8 mit dem REM betrachtet. Die Drahtoberfläche wurde stark angegriffen. Abbildung 5.7 zeigt den selben Drahtabschnitt weiter vergrößert. Die EDS-Analyse über den abgebildeten Bereich ergab, dass fast keine Goldschicht mehr vorhanden war. Es ist anzunehmen, dass bei weiterem Betrieb unter Bestrahlung auch dieser Anodendraht gerissen wäre.

Abbildung 5.8 zeigt einen weiteren bestrahlten Drahtabschnitt aus Kanal 8. Darauf ist eine schwarze Stelle zu erkennen, die denen auf dem Drahtabschnitt aus Abbildung 5.6

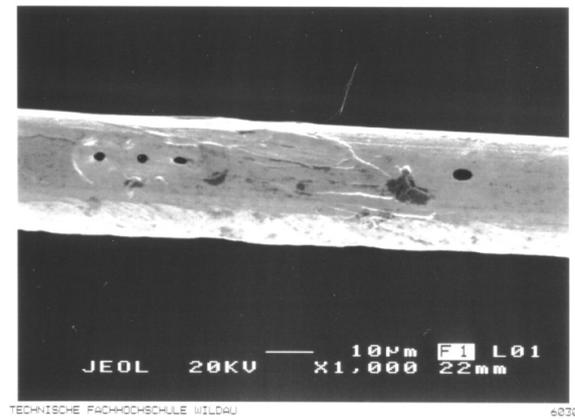


Abbildung 5.6: Bestrahlter Anodendrahtabschnitt von Kanal 8 unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Die Goldschicht an der Drahtoberfläche ist stark angegriffen.

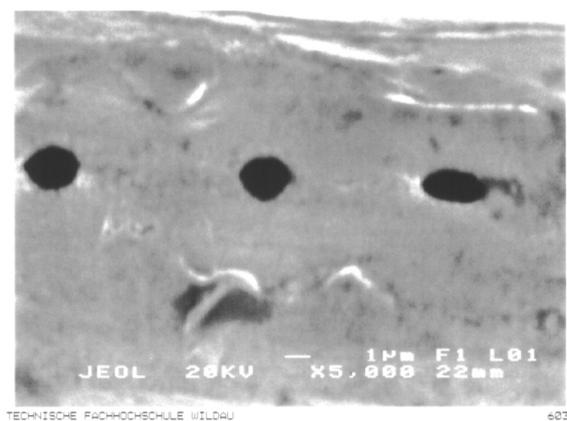


Abbildung 5.7: Vergrößerter Ausschnitt von Abb. 5.6.

ähnelt. Am unteren Rand der schwarzen Stelle ist eine Innenkante zu erkennen. In ihrem Zentrum wurde ein erhöhter Anteil Wolfram nachgewiesen. Offenbar ist die Stelle eine Vertiefung in der Drahtoberfläche.

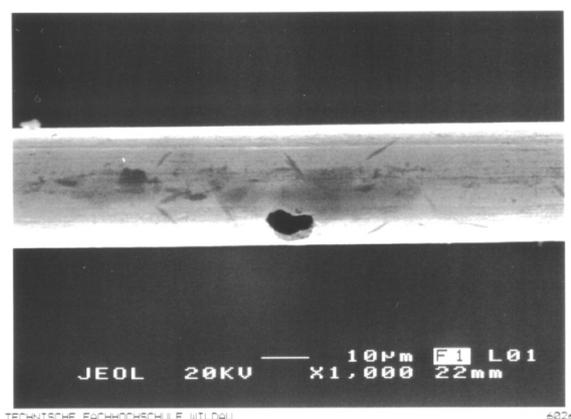


Abbildung 5.8: Bestrahlter Drahtabschnitt von Kanal 8. Die schwarze Stelle ist eine Vertiefung auf der beschädigten Drahtoberfläche.

Neben der Vertiefung sind dunkle Bereiche auf dem Draht zu erkennen. Solche Bereiche sind auch an anderen Stellen zu sehen. In Abbildung 5.9 ist ein unbestrahlter Drahtabschnitt von Kanal 8 dargestellt. Er ist ungefähr 10 cm in Gasflussrichtung vom bestrahlten Bereich entfernt. Auf dem Draht sind dunkle Streifen. Mit der EDS-Analyse konnte nachgewiesen werden, dass sich Kohlenstoff abgelagert.

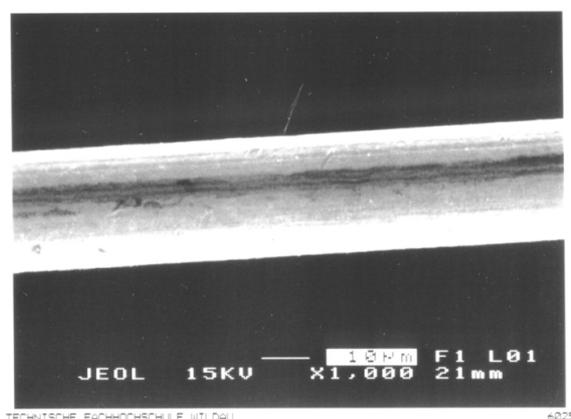


Abbildung 5.9: Unbestrahlter Drahtabschnitt von Kanal 8. Auf dem Draht wurden kohlenstoffhaltige Ablagerungen gefunden.

5.4 Fazit des Alterungstests

Während der Bestrahlung gab es keine Änderungen im Betriebsverhalten, die auf Alterungseffekte hingewiesen hätten. Der Anodendraht von Kanal 10 riss ohne vorige

Anzeichen. Die Inspektion der Drähte mit dem REM und die EDS-Analyse zeigte, dass die Drahtoberflächen vermutlich durch Ätzprozesse im bestrahlten Bereich beschädigt und z.T. zerstört wurden.

Im Gegensatz zu den Drähten der nicht betriebenen Referenzkanäle (Abbildung 4.11), wurden auf den Drähten der bestrahlten Strawtubes sogar außerhalb der bestrahlten Region Alterungseffekte erkannt. Es bildeten sich kohlenstoffhaltige Ablagerungen auf den Drähten.

Auf den Drähten wurden neben Gold und Wolfram nur Elemente nachgewiesen, die im Zählgas vorkommen. Es gibt keinerlei Hinweise, dass das Zählgas durch Ausgasungen der Schutzfolien verunreinigt wurde.

Auch bei anderen Alterungstests, die von verschiedenen Arbeitsgruppen der Hochenergiephysik durchgeführt wurden, konnten in CF_4 -haltigen Zählgasen Ätzprozesse an Anodendrähten beobachtet werden. Außerdem wird ein Zusammenhang zwischen Wassergehalt im Zählgas und den Ätzprozessen vermutet. Um die Ursache für die Ätzprozesse in unserer Testkammer zu erforschen, wurden in der Röntgenanlage systematische Alterungstests bei CF_4 -haltigen und -freien Zählgasen mit variierendem Wassergehalt gestartet.

Kapitel 6

Einfluss des Wassergehalts auf Ätzprozesse am Anodendraht

6.1 Motivation für die weiteren Alterungstests

Gerissener Draht bei eigenen Alterungstests

Nach Alterungstests mit unserer ersten Testkammer ist einer von vier bestrahlten Anodendrähten zerstört worden. Ein weiterer Draht war stark beschädigt. Die Frage ist: Woher stammen die Beschädigungen? Und wichtiger noch: Wie kann verhindert werden, dass solche zerstörerische Effekte im LHCb-Experiment auftreten?

Einerseits dürfen Ausgasungen und Verunreinigungen durch die Strawschutzfolien im Gassystem nicht als Ursache ausgeschlossen werden (Kapitel 5.3 und 5.4). Andererseits wurden auch in Alterungstests für andere Experimente der Hochenergiephysik bei Verwendung von CF_4 -haltigen Zählgasen Anzeichen von Goldätzen an Anodendrähten gefunden [8], [5].

Alterungstests für ATLAS TRT

Für den ATLAS TRT (TRT = *transition radiation tracker*) werden auch Strawtubes und, als Anode, $30\ \mu\text{m}$ starke goldbeschichtete Wolframdrähte verwendet. Nach Alterungstests bei Röntgenbestrahlung mit dem Zählgas $\text{Xe}/\text{CF}_4/\text{CO}_2$ (70:20:10) wurden auf den Drahtoberflächen Beschädigungen der Goldschicht und Ablagerungen von Wolfram und Wolframoxid gefunden. Bei Tests mit kontrolliertem Wassergehalt traten die Effekte unterhalb 0,1 % (1000 ppm) H_2O nicht auf [9]. Aus den Beobachtungen der Tests wird unter anderem gefolgert:

- Beim Aufbrechen von CF_4 gebildete Radikale¹ und H_2O , das zusammen mit F-Flusssäure HF bildet, beschädigen die Goldbeschichtung.
- Ohne Wasser im Zählgas werden die Anodendrähte im TRT nicht beeinträchtigt.
- Beschädigungen treten erst ab einer gewissen Wasserkonzentration im Zählgas auf.

¹Radikale = Atome oder Moleküle mit einem oder mehreren ungepaarten Valenzelektronen

Alterungstests für HERA-b OT

Für das Äußere Spurkammersystem von HERA-B kommen *Honeycomb* Kammern zum Einsatz. Statt aus runden Röhrchen, bestehen die einzelnen Driftzellen aus Hexagone, die wie Honigwaben (= *honey comb*) in mehreren Lagen aneinander liegen. Der Innendurchmesser des Hexagons beträgt 5,1 mm . Als Anode dient ein goldbeschichteter Wolframdraht mit 25 μm Durchmesser. Als Zählgas wird Ar/CO₂/CF₄ in dem Mischungsverhältnis 65:5:30 verwendet.

Es wurden Alterungstests unter Röntgenbestrahlung mit trockenem Zählgas durchgeführt, wobei der Wassergehalt unter 100 ppm lag. Dabei sind Anodendrähte im Zentrum der bestrahlten Fläche nach bereits 0,3 C/cm angesammelter Ladung gerissen [10]. Der Effekt wurde mit ATLAS-Strawtubes reproduziert [5]. Bei der Inspektion der Drähte konnten auf den bestrahlten Oberflächen starke Beschädigungen gefunden werden. Zum Teil war die Goldschicht komplett zerstört und das Wolfram lag frei. An anderen Stellen wurden Ablagerungen auf dem Draht gefunden, meistens Wolfram, aber auch Sauerstoff, Kohlenstoff und Fluor.

Bei höherem Wassergehalt von 350 ppm bis 750 ppm sind keine Drähte gerissen. Bis zu einem Wassergehalt von 500 ppm konnten auch keine anderen Alterungseffekte gefunden werden, die den Betrieb der Kammern beeinträchtigen.

Nach den Untersuchungen war die Schlussfolgerung:

- Freie Fluorradikale verursachen das Ätzen der Anodendrähte,
- Nach Zusatz von Wasser werden die Fluorradikalen in gasförmiges HF gebunden \Rightarrow kein Drahtätzen,
- Ab einem Wassergehalt von 500 ppm beeinträchtigt Flusssäure (HF gelöst in Wasser) die Eigenschaften des Kammermaterials.

Schwerpunkte für weitere Alterungstests

CF₄ ist der vermutliche Verursacher für das Drahtätzen, auch in unserem Alterungstest. Im Gasverstärkungsprozess nahe am Anodendraht haben die Elektronen genügend Energie um CF₄ zu dissoziieren. Freie Radikale können produziert werden, z.B.:



Die Fluorradikale können die Drähte angreifen [10].

Ist Wasserstoff vorhanden, bildet sich HF, das in Wasser gelöst die stark ätzende Flusssäure bildet. Es wird vermutet, dass es bei genügend hoher Konzentration sogar goldbeschichtete Drähte zerstört, zumindest wenn die Goldbeschichtung Risse hat oder verkratzt ist [9].

Die Alterungstests sollen zum einen beantworten, ob das CF₄ für die Zerstörung der Anodendrähte verantwortlich ist, und zum anderen wie der Wassergehalt im Zählgas das Drahtätzen beeinflusst. Darum wurde beschlossen, die Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) und mit (CF₄-freiem) Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) parallel unter gleichen Bedingungen durchzuführen. Außerdem werden nacheinander Testläufe mit unterschiedlicher, kontrollierter Feuchtigkeit im Zählgas gestartet. Der Wassergehalt wird jeweils reguliert auf:

- Sehr trocken (<50 ppm), weil es hier zu Drahtätzen bei Alterungstests für den HERA-B OT kam,
- 500 ppm, da hier kein weiteres Drahtätzen beobachtet wurde,
- 3500 ppm, weil man ab dieser Feuchtigkeit bei Alterungstests für den ATLAS TRT Hinweise auf Drahtätzen fand.

6.2 Betriebseigenschaften bei verschieden feuchten Zählgasen

Ziel dieser systematischer Alterungstests war es, den Einfluss des Wassergehalts im Zählgas auf Ätzprozesse am Anodendraht zu untersuchen. Zusätzlich ermöglichte die Testreihe aber auch den Einfluss der Wassermenge im Zählgas auf die Betriebseigenschaften der Strawtubes zu studieren. Speziell der Einfluss auf die Gasverstärkung, die Ratenkapazität und auf die Dunkelrate und -ströme wurde untersucht.

6.2.1 Der Einfluss des Wassergehalts auf die Gasverstärkung

Eine umfangreiche Studie der Betriebseigenschaften der Strawtubes mit verschiedenen Zählgaskompositionen wurde von R.Ruschmann im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt [16]. Unter anderem wurden auch die Eigenschaften von trockenem Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) und Ar/CO₂ (70:30) untersucht.

Für die Bestimmung der *effektiven Gasverstärkung* (Kapitel 3.1) wurde ein einzelner Strawtube mit einer ⁵⁵Fe-Quelle bestrahlt und die Ereignisrate sowie der Anodenstrom gemessen. Die effektive Gasverstärkung ergibt sich zu

$$G_{eff} = \frac{I}{R \cdot n_p \cdot e} \quad (6.2)$$

I gemessener Anodenstrom,

R gemessene Rate,

n_p Anzahl Primärelektronen,

e Elementarladung.

Abbildung 6.1 zeigt die in [16] gemessene effektive Gasverstärkung in trockenem Ar/CO₂/CF₄ als Funktion der Betriebsspannung. Dabei wurde angenommen, dass die 5,9 keV-Photonen der ⁵⁵Fe-Quelle ungefähr 220 Primärelektronen erzeugen². Unter gleicher Annahme wurde die effektive Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ mit 5000 ppm Wasser bei verschiedener Hochspannung ermittelt. Die Werte sind im Diagramm in Abbildung 6.1 zusätzlich eingetragen. Als Ergebnis dieser Messung kann festgehalten werden, dass bis zu einem Anteil von 5000 ppm (0,5 %) der Wassergehalt in

²Mit den in [41] angegebenen Energien, die für die Erzeugung eines e⁻-Ionen-Paares aufzuwenden sind, erhält man für Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) $n_p \approx 190$ und für Ar/CO₂ (70:30) $n_p \approx 210$.

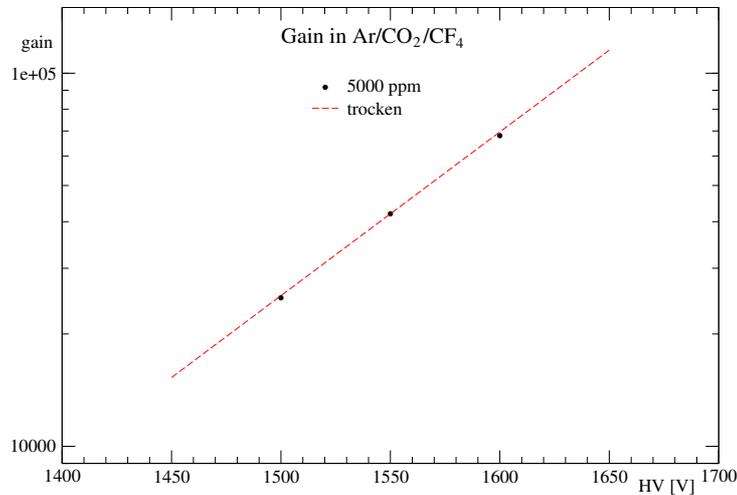


Abbildung 6.1: Die Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15). Eingetragen sind die im feuchten Zählgas gemessenen Werte und (gestrichelt) der Verlauf der Gasverstärkung im trockenen Zählgas nach [16].

Ar/CO₂/CF₄ keinen Einfluss auf die Gasverstärkung hat.

Für die Signalauslese der Strawtubes wurde der ladungsempfindliche, integrierende Vorverstärker VV50-2 [28] verwendet. Die Amplitude seines Ausgangssignals ist über weite Bereiche proportional zur Signalladung am Anodendraht. Für verschiedene Hochspannungen wurde mit dem VV50-2 die mittlere Pulshöhe des ⁵⁵Fe-Spektrums in Ar/CO₂/CF₄ und Ar/CO₂ gemessen, jeweils mit 3500 ppm, 500 ppm und < 50 ppm Wassergehalt. Die bei 1500 V in Ar/CO₂/CF₄ gemessene mittlere Pulshöhe wurde auf die Verstärkung $G_{eff}=25000$ normiert (Abbildung 6.1). Mit diesem Normierungsfaktor wurden dann aus allen gemessenen mittleren Pulshöhen die weiteren Gasverstärkungen berechnet. Im Diagramm in Abbildung 6.2 sind die Gasverstärkungen über die am Strawtube anliegende Hochspannung eingetragen. Wie erwartet ist die Gasverstärkung bei gleicher Versorgungsspannung in Ar/CO₂/CF₄ niedriger als in Ar/CO₂. Grund dafür ist das größere *Attachement* (Elektronenanlagerung) durch den CF₄-Anteil. Es gehen mehr Primärelektronen verloren als in Ar/CO₂.

Weder für Ar/CO₂/CF₄ noch für Ar/CO₂ konnte ein signifikanter Einfluss des Wassergehalts auf die Gasverstärkung festgestellt werden.

6.2.2 Der Einfluss des Wassergehalts auf die Ratenkapazität

Bei Wasseranteilen von jeweils < 50 ppm, 500 ppm und 3500 ppm, wurde in Ar/CO₂/CF₄ und Ar/CO₂ die Gasverstärkung in Abhängigkeit der Ereignisrate im Strawtube gemessen. Die Betriebsspannungen waren 1550 V für Ar/CO₂/CF₄ und 1510 V für

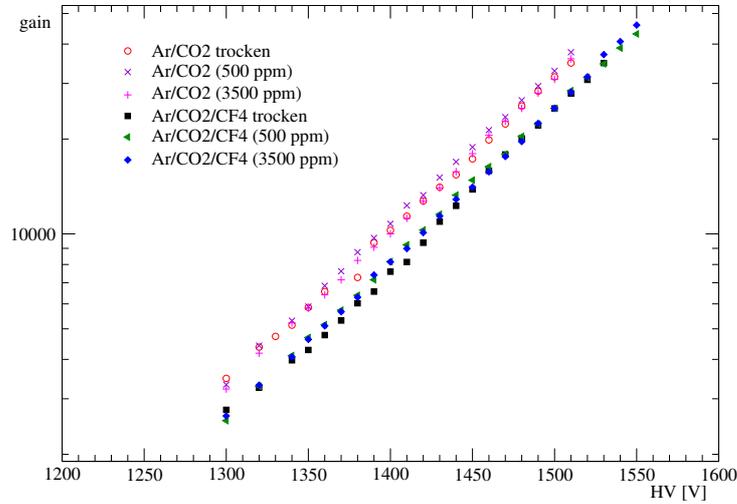


Abbildung 6.2: Die Gasverstärkung über die anliegende Hochspannung aufgetragen, für Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) und Ar/CO₂ (70:30) bei unterschiedlichem Wassergehalt.

Ar/CO₂. Die effektive Gasverstärkung war bei niedriger Rate in beiden Zählgasen ungefähr 40000. Die Abbildungen 6.3 und 6.4 zeigen die Gasverstärkung als Funktion der Ereignisrate pro cm Strawtubellänge³. Die Gasverstärkung wurde jeweils auf den bei der niedrigsten Rate gemessenen Wert normiert.

Der theoretisch erwartete Verlauf der Gasverstärkung in Abbildung 6.3 und 6.4 folgt aus einem in [47] beschriebenen Modell. Nach [48] ergibt sich ein ratenabhängiger effektiver Spannungsabfall

$$\Delta V = \frac{R^3 Q \ln \frac{R}{R_a}}{4\pi\epsilon_0\mu V_0} \cdot Rate \quad (6.3)$$

Dabei sind V_0 die angelegte Spannung, Q die mittlere Signalladung pro Ereignis, R der Radius vom Strawtube, R_a der Drahradius und μ die Ionenmobilität.

In [16] wurden für Ar/CO₂/CF₄ und Ar/CO₂ die Gasverstärkungen als Funktion der Hochspannung gemessen und die Gasverstärkungskurven mit Gleichung 6.4 gefittet.

$$G_I(V) = A_0 e^{A_1 V_0} \quad (6.4)$$

G_I ist die gefittete Gasverstärkung. Mit den Fitparametern A_0 und A_1 und Gleichung 6.3 folgt ein ratenabhängiger Gasverstärkungsverlust

$$\Delta G = A_0 e^{A_1(V_0 - \Delta V)} \quad (6.5)$$

³Mit dem Strawtuberadius $R = 5$ mm ist die Rate pro cm Strawtubellänge die Hälfte des Teilchenflusses pro cm².

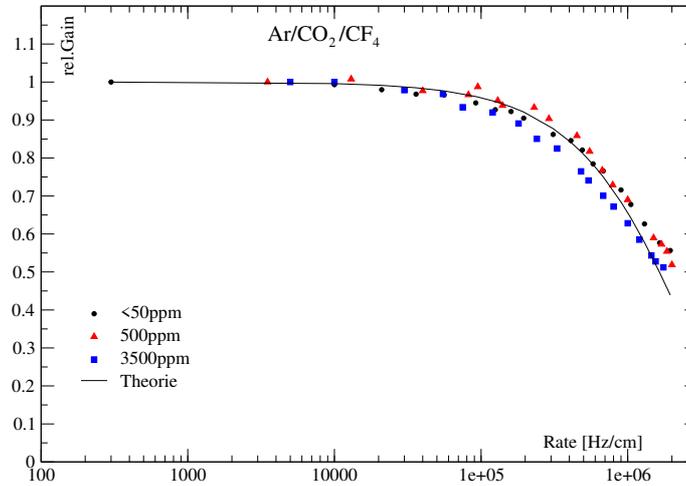


Abbildung 6.3: Gasverstärkung in Abhängigkeit der Rate/cm in verschieden feuchtem Ar/CO₂/CF₄ bei konstanter Versorgungsspannung $U=1550$ V. Der jeweilige Wassergehalt im Gas ist in ppm angegeben.

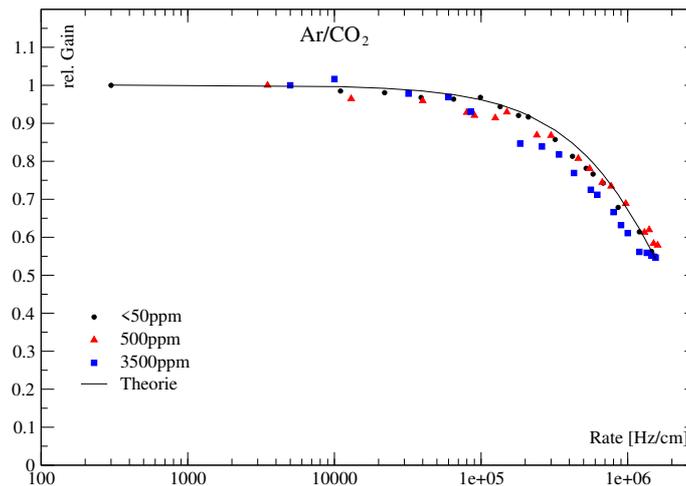


Abbildung 6.4: Gasverstärkung in Abhängigkeit der Rate/cm in verschieden feuchtem Ar/CO₂ bei konstanter Versorgungsspannung $U=1510$ V. Der jeweilige Wassergehalt im Gas ist in ppm angegeben.

Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ratenkapazitäten in den Zählgasen mit <50 ppm und 500 ppm Wasser. Bei 3500 ppm Wasser ist die Ratenkapazität in beiden Zählgasen niedriger. Eine mögliche Ursache ist eine mit steigendem Wassergehalt abnehmende Ionenmobilität.

Insgesamt ändert sich das Verhalten der Strawtubes bezüglich der Ratenkapazität nicht in dem Maße, dass der Betrieb im LHCb-Experiment gefährdet wäre. Bei einer erwarteten Maximalrate an minimal ionisierenden Teilchen (*MIPs*) von 125 kHz/cm sinkt die Gasverstärkung um <1 % (Kapitel 3.2).

6.2.3 Der Einfluss des Wassergehalts auf Dunkelpulse und Ströme

Unabhängig von Gasmischung und Wassergehalt konnten keine Dunkelpulse registriert werden, die in ihrer Ereignisrate und Signalform von Kosmischer- und Umgebungsstrahlung abwichen. Es waren auch keine Dunkelströme zu erkennen.

6.3 Alterungstests bei verschiedenen feuchten Zählgasen

Um den Einfluss des Wassers in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) auf die Ätzprozesse am Anodendraht zu untersuchen, wurden Alterungstests mit < 50 ppm, 500 ppm und 3500 ppm Wassergehalt durchgeführt. Parallel dazu liefen Tests mit Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) bei jeweils gleichem Wassergehalt, um den Einfluss vom CF₄-Anteil zu studieren. Die Betriebsbedingungen sollten dabei möglichst gleich sein. Speziell für diese Alterungstests wurde ein neues Testmodul produziert.

6.3.1 Das Doppelkammermodul für die Alterungstests

In Abbildung 6.5 ist das Testmodul dargestellt. Es besteht aus zwei separaten, gasdichten Kammern, die unabhängig voneinander betrieben werden können. Es ermöglicht, die Alterungstests mit zwei Gasmischungen parallel durchzuführen. Das Modul besteht ausschließlich aus Materialien, die nicht oder nicht nachweisbar ausgasen. Die Materialien im Gasvolumen sind:

- Peek und Ultem für die Endstücke,
- PCBs aus Epoxidharzglasfasergewebe G10,
- Aluminium,
- Strawtubes aus Aluminium/Kapton/KaptonXC,
- Epoxikleber Araldit AY103 mit Härter HY991,
- Lötzinn⁴ und Anodendraht wie in den Kammern für das LHCb-Experiment.

In beiden Modulhälften sind sieben Strawtubes. Sie sind jeweils 35 cm lang und haben keine Drahtpositionierer eingesetzt. Die Maße einer Kammer sind 390 mm × 41 mm ×

⁴Fluitin L-Sn60Pb DIN1707 F-SW32 PIN8516 Sn60 806659

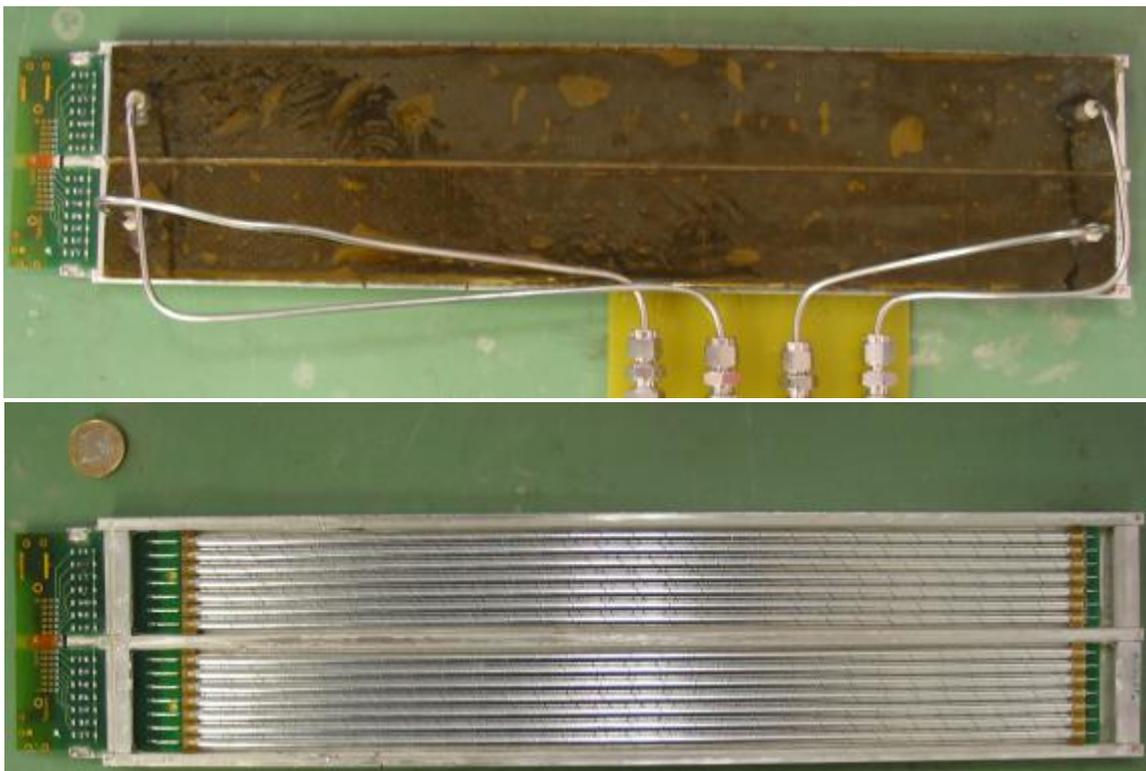


Abbildung 6.5: Das Testmodul für die Alterungstests. **Oben:** Das komplette Modul mit Gasanschlüssen. **Unten:** Das geöffnete Modul. Hier sind die separaten Kammern zu erkennen.

6 mm (Länge \times Breite \times Höhe). Eine Kammer hat ein Innenvolumen von ungefähr 96 ml. Es ist nicht in zwei Gasvolumen aufgeteilt. Die Gaszufuhr und -ableitung befinden sich unmittelbar vor bzw. hinter den Strawtubes (Abb. 6.5), um einen gleichmäßigen Gasfluss zu erreichen.

6.3.2 Aufbau des Teststandes

Die Doppelkammer wurde in die Röntgenanlage (Kapitel 4.1) installiert. Eine Skizze des Aufbaus und des modifizierten Gassystems ist in Abbildung 6.6 dargestellt. Beide

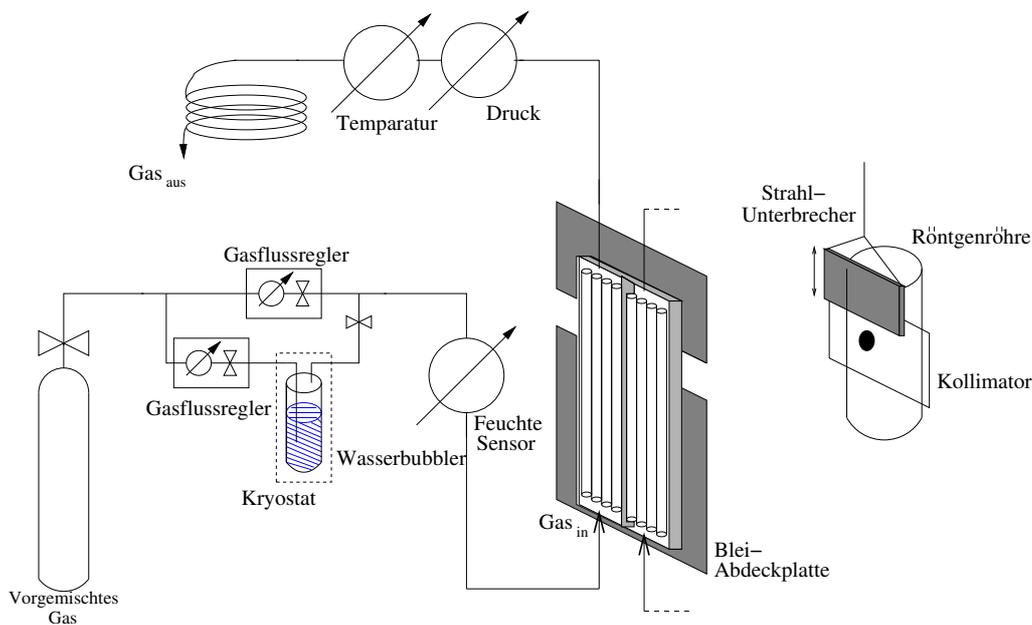


Abbildung 6.6: Skizze des Aufbaus und des Gassystems der Doppelkammer im Röntgenmessstand. Es ist nur das Gassystem für eine Modulhälfte dargestellt, für die zweite Kammer existiert ein identisches. Eine Kammer wurde mit Ar/CO_2 , die andere mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ betrieben. Der Gasfluss betrug jeweils 2 Vol/h.

Kammern des Moduls wurden jeweils an ein eigenes Gassystem angeschlossen. Um den Zählgasen Wasser beizumengen, wurden die Gassysteme jeweils um eine Parallelleitung mit integriertem Wasserbubblor aus Edelstahl erweitert. Der jeweilige Wassergehalt wurde mit Feuchtesensoren M35 von Panametrics [49] gemessen und mit den Gasflussreglern für das trockene und das feuchte Gas reguliert. Der resultierende Gasfluss war in etwa 200 ml/h. Das entspricht 2 Kammervolumen pro Stunde.

6.3.3 Betriebsbedingungen während der Alterungstests

Die Alterungstests wurden in drei Läufen durchgeführt. Die Tests mit jeweils gleichem Wassergehalt liefen für Ar/CO_2 und $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ parallel. Alle Strawtubes konnten separat mit Hochspannung versorgt und getrennt ausgelesen werden (Signal und Anodenstrom). In einem Testlauf wurden jeweils 2 Strawtubes pro Modulhälfte betrieben

und über eine Länge von 4 cm bestrahlt. Kein Strawtube wurde für mehr als einen Alterungstest verwendet. In Abbildung 6.7 sind die Strawtubes der beiden Modulhälften dargestellt und die bestrahlten Regionen gekennzeichnet. Bis auf die bestrahlten

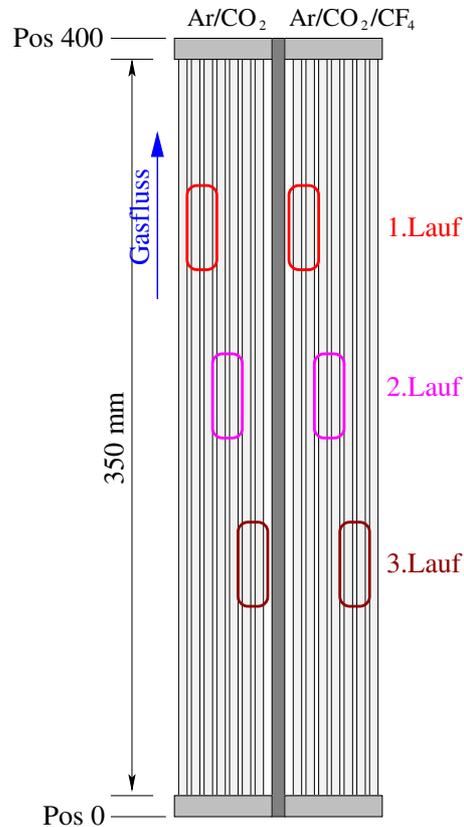


Abbildung 6.7: Die bestrahlten Stellen während der drei Alterungstestläufe. Pro Testlauf und Modulhälfte wurden je zwei Strawtubes über eine Länge von 4 cm bestrahlt. Kein Strawtube wurde in zwei Läufen bestrahlt. Jede Kammer besitzt einen unbestrahlten Referenzkanal.

Regionen wurde das Modul mit einer Bleiplatte abgedeckt.

Abbildung 6.8 zeigt das Röntgenstrahlprofil links in vertikaler und rechts in horizontaler Richtung. Das Modul wurde so ausgerichtet, dass die Strahlintensität über den bestrahlten Bereich und für alle vier Strawtubes möglichst gleich ist.

Die Versorgungsspannung für die mit Ar/CO₂/CF₄ betriebenen Strawtubes lag bei 1550 V. Für Ar/CO₂ lag die Spannung bei 1510 V. Damit war die effektive Gasverstärkung in beiden Zählgasen ≈ 40000 [16]. Die Strahlintensität lag bei 500-600 kHz/cm. Bei dieser Bestrahlungsrate sank die effektive Gasverstärkung in den Strawtubes aufgrund von Raumladungseffekten auf ungefähr 28000 (Abb. 6.3 und 6.4). In Tabelle 6.1 sind die relevanten Betriebsparameter und die an den Drähten angesammelten Ladungsmengen eingetragen.

Die Alterungstests dauerten jeweils 25 bis 26 Tage. An den Anodendrähten der bestrahlten Strawtubes wurden dabei jeweils $(2,0 \pm 0,3)$ C/cm angesammelt. Nach 10 Jahren LHCb-Betrieb werden im maximal bestrahlten Bereich des Äußeren Spurkammersystems 2,5 C/cm erwartet.

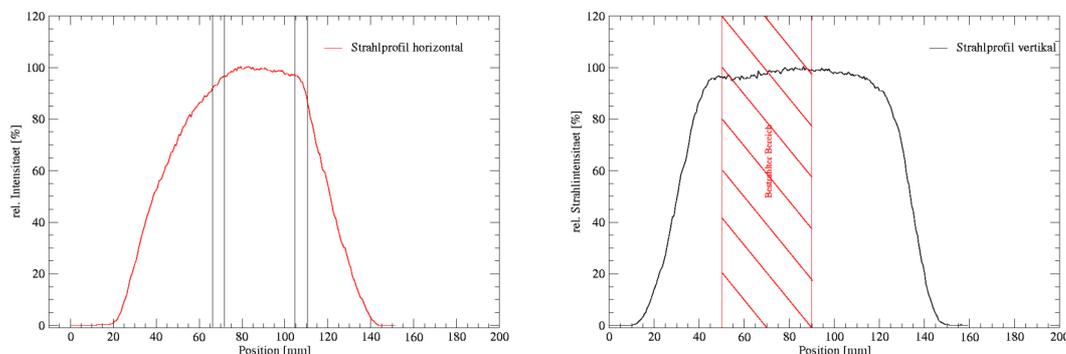


Abbildung 6.8: Das Strahlprofil über die Doppelkammer. **Links:** Horizontales Strahlprofil. Die Positionen der vier bestrahlten Anodendrähte sind eingezeichnet. **Rechts:** Vertikales Strahlprofil. Der bestrahlte Bereich ist schraffiert eingezeichnet.

	trocken				500 ppm				3500 ppm			
	Ar/CO ₂		Ar/CO ₂ /CF ₄		Ar/CO ₂		Ar/CO ₂ /CF ₄		Ar/CO ₂		Ar/CO ₂ /CF ₄	
Kanal	2a	3a	1b	2b	4a	5a	3b	4b	6a	7a	5b	6b
Gasfluss	2 Vol/h				3,5 Vol/h				2 Vol/h			
HV	1510		1550		1510		1550		1510		1550	
Gain	28000											
kHz/cm	500	500	530	490	520	550	600	510	500	520	550	490
nA/cm	800	800	850	780	830	880	960	820	800	830	880	780
C/cm	1,7	1,8	2,2	1,8	1,7	1,8	2,3	1,7	1,8	1,9	2,3	1,7
Beschl.	32	32	34	32	32	34	38	32	32	32	34	32

Tabelle 6.1: Die Betriebsparameter der bestrahlten Strawtubes. Die effektive Gasverstärkung (*gain*) war in allen Strawtubes wegen der hohen Bestrahlungsrate von 40000 auf ungefähr 28000 gesunken. Beschl: Gegenüber dem LHCb-Experiment beschleunigte Ladungsansammlung am Anodendraht.

Während des zweiten Testlaufs musste der Gasfluss von 200 ml/h auf 350 ml/h (\cong von 2 Vol/h auf 3.5 Vol/h) erhöht werden, um einen stabilen Wasseranteil von 500 ppm im Zählgas erreichen zu können. Weitere Änderungen von Betriebsparametern waren nicht notwendig.

6.3.4 Alterungstests mit Ar/CO₂ bei unterschiedlichem Wassergehalt

Trockenes Ar/CO₂

Der Wassergehalt im trockenen Ar/CO₂ lag unter 50 ppm. Mit dem trockenen Zählgas wurden zwei benachbarte Strawtubes unter Röntgenbestrahlung 25 Tage betrieben. Die Röntgenbestrahlung wurde regelmäßig unterbrochen um ⁵⁵Fe-Spektren an den bestrahlten Kanälen und an unbestrahlten Referenzkanälen aufzunehmen. Damit wurde die Gasverstärkung in den bestrahlten Kanälen relativ zu den Referenzkanälen gemessen. Die relative Gasverstärkung ist nicht von Temperatur und Umgebungsdruck abhängig. In Abbildung 6.9 sind die relativen Gasverstärkungen in den bestrahlten Strawtubes über die angesammelten Ladungen aufgetragen. Eine signifikante Änderung der Gasverstärkung wurde nicht festgestellt.

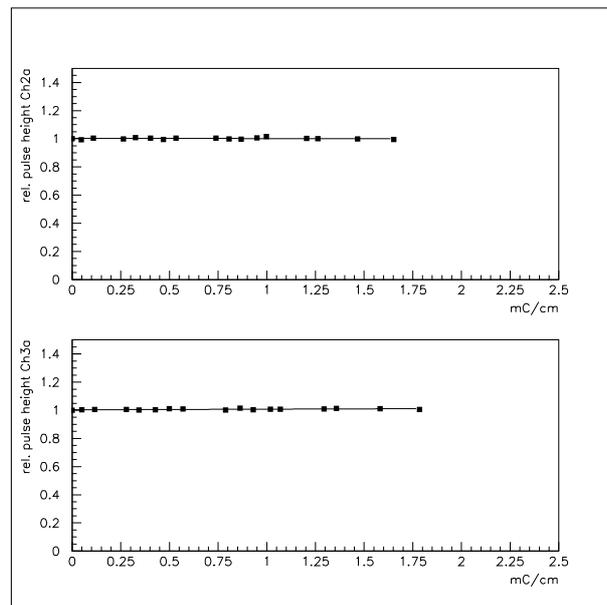


Abbildung 6.9: Die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes aufgetragen über die angesammelte Ladung. Das Zählgas war trockenes Ar/CO₂. In beiden Kanälen ist keine signifikante Änderung der Gasverstärkung relativ zu den Referenzkanälen zu erkennen.

Vor und nach der Bestrahlung wurden die relativen Gasverstärkungen mit Hilfe einer ⁵⁵Fe-Quelle mit 2-mm²-Kollimator entlang der bestrahlten Strawtubes gemessen (Abbildung 6.10). Durch den kleinen Öffnungswinkel des Kollimators könnten selbst lokal stark begrenzte Änderungen in der Gasverstärkung erkannt werden. Es waren

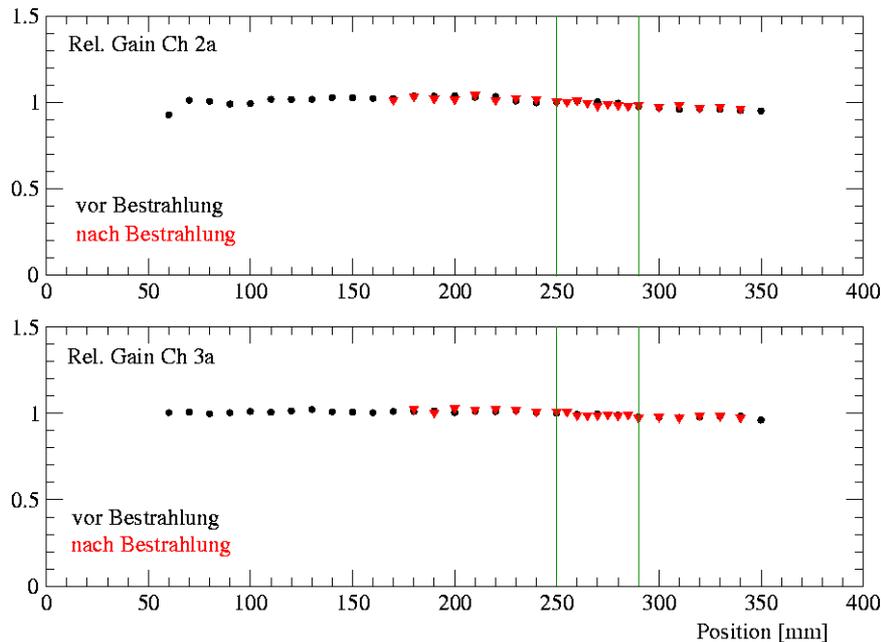


Abbildung 6.10: Die relative Gasverstärkung entlang der bestrahlten Strawtubes in trockenem Ar/CO₂, vor und nach der Bestrahlung. Die bestrahlte Region entlang der Kanäle erstreckt sich über 4 cm von Position 250 bis 290 und ist durch die Linien markiert.

allerdings an keiner Stelle welche zu erkennen.

Die spätere optische Inspektion, der bestrahlten Drähte und Strawtubes lieferten keinen Hinweis auf eventuelle Alterungseffekte. Es konnten keine Unterschiede zwischen bestrahlter und unbestrahlter Region und zu neuen Drähten, bzw. Strawtubes erkannt werden. Zur weiteren Analyse wurden die Drähte mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Abbildung 6.11 zeigt einen Abschnitt des bestrahlten Bereichs in Kanal 3a (Abb. 6.10 unten). Im Gegensatz zu einem neuen Draht (Abb. 4.11) sind dunkle Flecken auf der Drahtoberfläche zu erkennen. Diese Flecken sind an allen untersuchten Stellen über die gesamte Länge der Drähte zu sehen, sogar im Referenzkanal (Abbildung 6.12), der niemals unter Bestrahlung betrieben wurde.

Durch die energiedispersive Spektralanalyse (EDS) wurde Kohlenstoff in den dunklen Flecken nachgewiesen. Es ist nicht bekannt, ob die kohlenstoffhaltigen Ablagerungen bei irgendeinem der Alterungstests oder beim Aufschneiden der kohlenstoffhaltigen Strawtubes entstanden. Weitere Alterungseffekte bei Betrieb mit trockenem Ar/CO₂ konnten nicht festgestellt werden. Es wurden keine Änderungen im Betriebsverhalten der Strawtubes erkannt.

Ar/CO₂ mit 500 ppm Wassergehalt

Für den Alterungstest mit 500 ppm Wasser im Ar/CO₂ wurden zwei Strawtubes verwendet, die bis dahin nicht unter Bestrahlung betrieben wurden. Sie wurden über die Dauer von 26 Tagen intensiver Röntgenstrahlung ausgesetzt, unter annähernd gleichen

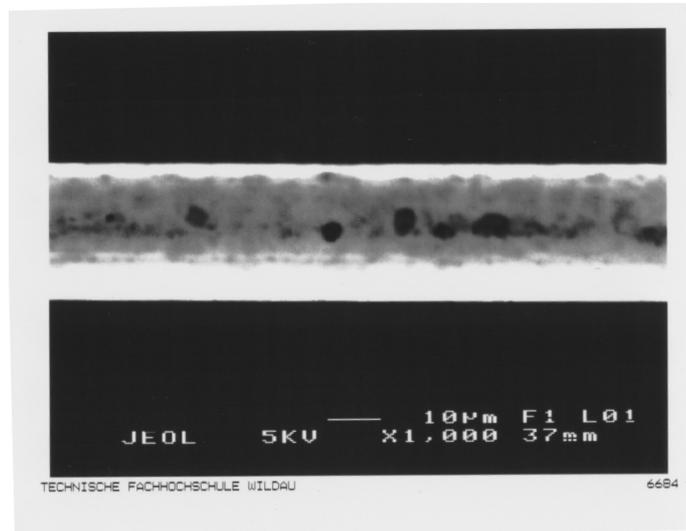


Abbildung 6.11: Bestrahlte Stelle eines Anodendrahtes betrieben in trockenem Ar/CO₂. Auf der Drahtoberfläche sind mit dem REM dunkle Flecken zu erkennen. Durch EDS-Analyse wurde Kohlenstoff in den Flecken nachgewiesen.

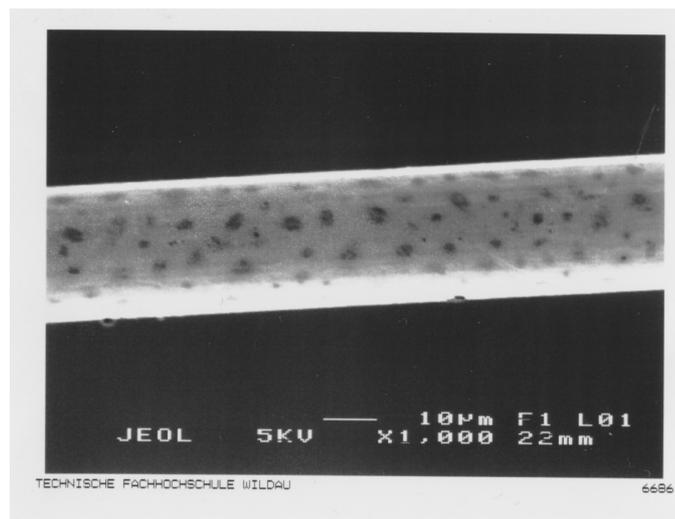


Abbildung 6.12: Der Referenzdraht unter dem REM betrachtet. Auch auf seiner Oberfläche sind dunkle, kohlenstoffhaltige Flecken.

Bedingungen wie die Strawtubes im ersten Lauf. Das gleiche Messprogramm wie im ersten Lauf wurde durchgeführt. In Abbildung 6.13 ist der Verlauf der relativen Gasverstärkung über die angesammelte Ladung in den Strawtubes dargestellt. In Kanal 4a (Abb. 6.13 oben) sank die Gasverstärkung um 1,4 % pro 1 C/cm angesammelter Ladung. Im Kanal 5a sank die Gasverstärkung nicht signifikant.

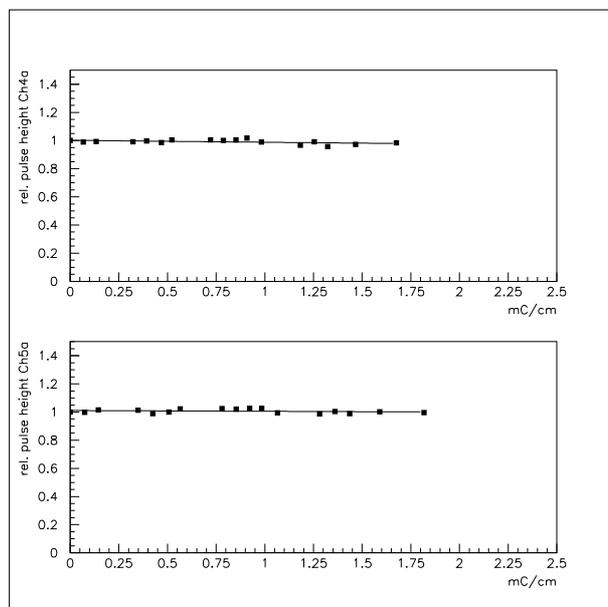


Abbildung 6.13: Die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung. Das Zählgas war Ar/CO₂ mit 500 ppm Wasser. **Oben:** Im Kanal 4a sank die Gasverstärkung um 2 % nach 1,7 C/cm angesammelter Ladung. **Unten:** In Kanal 5a gab es keine signifikante Änderung.

Auch bei diesem Alterungstest wurde die relative Gasverstärkung entlang der Strawtubes gemessen. In Abbildung 6.14 ist sie für Kanal 4a (oben) und Kanal 5a (unten) dargestellt. Darin entspricht Position 0 dem unteren, Position 400 dem oberen Ende der vertikal aufgehängten Doppelkammer. Die Gasflussrichtung war von unten nach oben durch die Kammern.

In beiden Kanälen veränderte sich die Gasverstärkung an einzelnen, stark begrenzten Stellen. Auffällig ist der parallele Verlauf der Gasverstärkung in beiden Strawtubes. Das ist ein starker Hinweis, dass die beobachteten Alterungseffekte nicht von lokalen Parametern abhängen, wie z.B. Defekte oder Verschmutzungen am Anodendraht.

Am unteren Rand der bestrahlten Region (Position 170-180) sank die Gasverstärkung um 10 % im Kanal 4a, bzw. um 12 % im Kanal 5a. Im unbestrahlten Bereich zwischen Position 110 und 130 nahm die Gasverstärkung in beiden Strawtubes um 6 % (Kanal 4a), bzw. 8 % (Kanal 5a) ab. Oberhalb des bestrahlten Bereichs an Position 220-250 ist die Gasverstärkung bis zu 5 % angestiegen.

Bei der optischen Inspektion war der bestrahlte Bereich als verdunkelter Drahtabschnitt zu erkennen. Auf der Kaptonkathode der Strawtubes war die Oberfläche in der

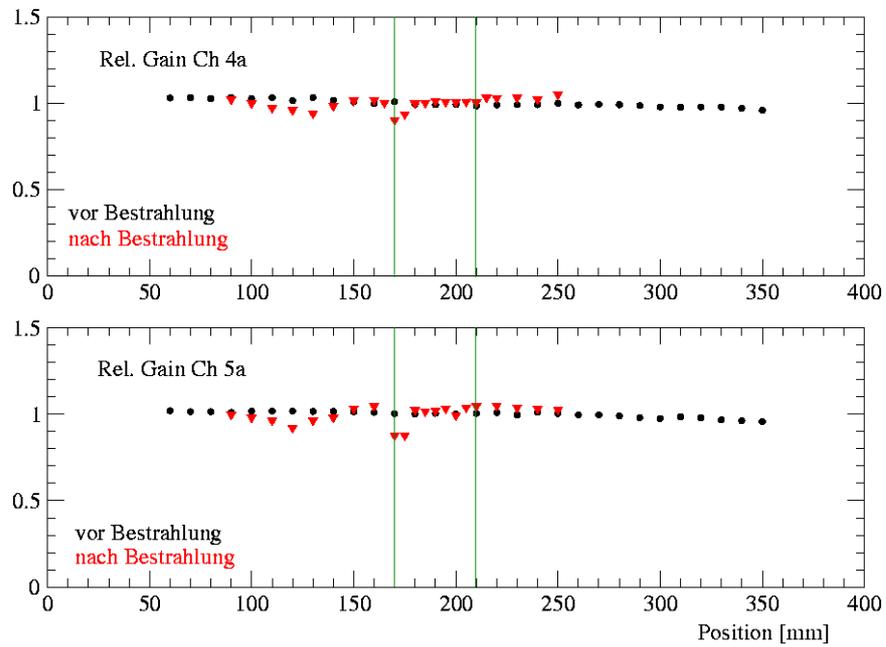


Abbildung 6.14: Die relative Gasverstärkung entlang der bestrahlten Strawtubes bei 500 ppm Wasser in Ar/CO_2 , vor und nach der Bestrahlung. Die bestrahlte Region entlang der Kanäle erstreckt sich über 4 cm von Position 170 bis 210 und ist durch die Linien markiert. Position 0 entspricht dem unteren, Position 400 dem oberen Ende des Moduls. Die Gasflussrichtung war in Richtung Position 400.

bestrahlten Region ermattet. Allerdings konnten weder mit dem Licht- noch mit dem Rasterelektronenmikroskop Effekte auf den Kathodenoberflächen entdeckt werden. Abbildung 6.15 zeigt den bestrahlten Bereich vom Anodendraht aus Kanal 5a, aufgenommen mit dem REM. Außer den dunklen Flecken wurden *Whiskers* entdeckt (senkrecht abstehende härchenartige Gebilde). Mit der EDS-Analyse wurden Kohlenstoff und Sauerstoff auf der Drahtoberfläche nachgewiesen. Es wird ein Zusammenhang zwischen dem Gasverstärkungsverlust und den kohlen- und sauerstoffhaltigen Ablagerungen im bestrahlten Bereich vermutet.

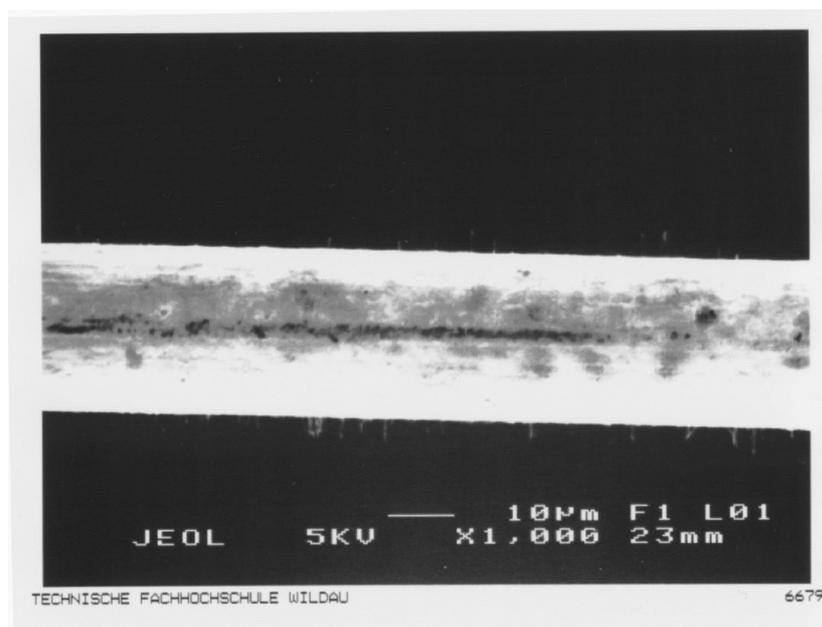


Abbildung 6.15: Bestrahlte Stelle vom Anodendraht aus Kanal 5a (betrieben in Ar/CO₂ mit 500 ppm Wasser) mit dem REM betrachtet. Neben den dunklen Flecken, die auf allen Drähten dieser Kammer zu beobachten sind, wurden auch *Whiskers* gefunden. Auf der Drahtoberfläche wurden Kohlen- und Sauerstoff nachgewiesen.

Abbildung 6.16 zeigt einen unbestrahlten Drahtabschnitt von Kanal 5a. Neben den kohlenstoffhaltigen dunklen Flecken wurden keine Unterschiede zu einem neuen Draht festgestellt. Auch nicht um Position 120, wo eine lokale Abnahme der Gasverstärkung beobachtet wurde. Es konnte weder eine Ursache für die Abnahme der Gasverstärkung in diesem Bereich, noch der Grund für die Zunahme oberhalb des bestrahlten Bereichs gefunden werden. Eine mögliche Ursache sind Schwankungen von Betriebsparametern der Vorverstärker VV50.

Ar/CO₂ mit 3500 ppm Wassergehalt

Zwei bis dahin unbestrahlte Strawtubes wurden mit 3500 ppm Wasser im Zählgas Ar/CO₂ betrieben und 26 Tage intensiv bestrahlt. Die Strahlungsbedingungen entsprachen denen aus den zwei vorangegangenen Alterungstests. In Abbildung 6.17 ist

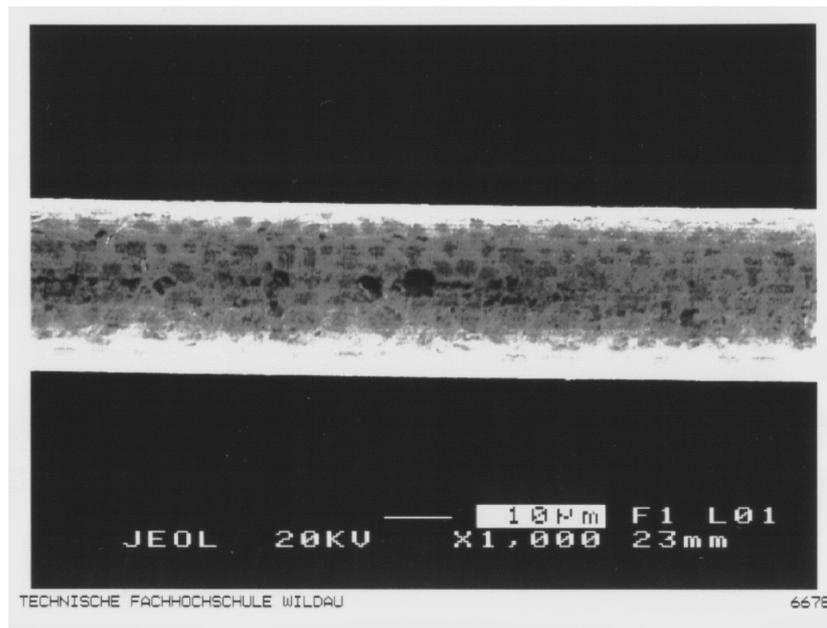


Abbildung 6.16: Unbestrahlte Stelle vom Anodendraht aus Kanal 5a (betrieben in Ar/CO₂ mit 500 ppm Wasser) mit dem REM betrachtet. Wie auf allen Drähten der Kammer befinden sich dunkle, kohlenstoffhaltige Flecken auf den Drahtoberflächen.

die Gasverstärkung in den Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung aufgetragen. In beiden Kanälen nahm die Gasverstärkung ab. In Kanal 6a (Abb. 6.17 oben) sank die Gasverstärkung um 10,6 % pro 1 C/cm angesammelter Ladung, in Kanal 7a (unten) um 9,5 % pro 1 C/cm.

Die relativen Gasverstärkungen entlang der beiden Strawtubes, vor und nach der Bestrahlung, sind in Abbildung 6.18 eingetragen. Im bestrahlten Bereich beider Kanäle wurde eine signifikante Abnahme der Gasverstärkung beobachtet. Im Kanal 6a (Abb. 6.18 oben) sank sie an Position 90 um 27 % und an Position 95 von Kanal 7a (unten) um 18 %. Unterhalb der bestrahlten Region an Position 70 in Kanal 7a sank die Gasverstärkung um 20 %.

Bei der optischen Inspektion war der gesamte bestrahlte Bereich beider Anodendrähte mit bloßem Auge als schwarzer Drahtabschnitt deutlich zu erkennen. An den unbestrahlten Drahtabschnitten waren keine Alterungseffekte erkennbar, auch nicht mit dem Lichtmikroskop. An den Kathoden konnten keine Alterungseffekte festgestellt werden.

Abbildung 6.19 zeigt die bestrahlten Drahtabschnitte von Kanal 6a und Kanal 7a. Auf beiden Drähten bildeten sich *Whiskers* und Ablagerungen. Zusätzlich erkennt man eine abgelagerte Schicht auf dem Draht. In Kanal 6a ist der Drahtradius um 2 bis 5 % angewachsen. Durch EDS-Analyse wurden Kohlenstoff und Sauerstoff auf den Drähten nachgewiesen.

Abbildung 6.20 zeigt einen unbestrahlten Drahtabschnitt von Kanal 7a. In dem Fleckenmuster wurde Kohlenstoff nachgewiesen. Für die Abnahme der Gasverstärkung in Position 70 von Kanal 7a konnte keine Ursache gefunden werden.

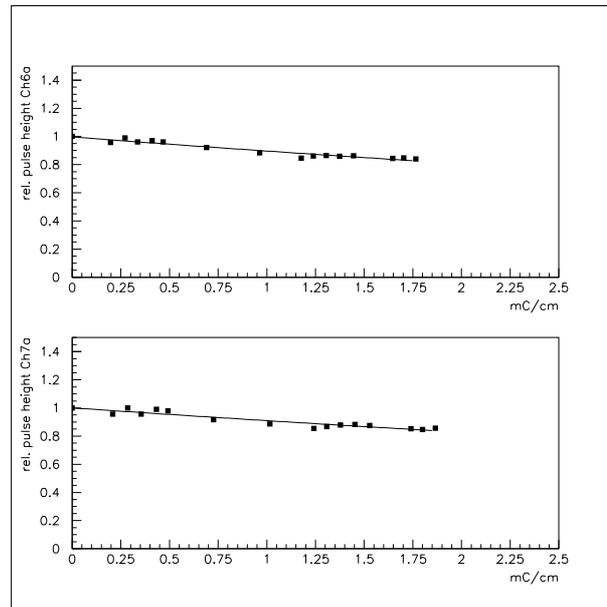


Abbildung 6.17: Die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes, aufgetragen über die angesammelte Ladung. Zählgas war Ar/CO₂ mit 3500 ppm Wasser. Im Kanal 6a (oben) sinkt die Gasverstärkung um 10,6 %, im Kanal 7a um 9,5 % pro 1 C/cm angesammelter Ladung.

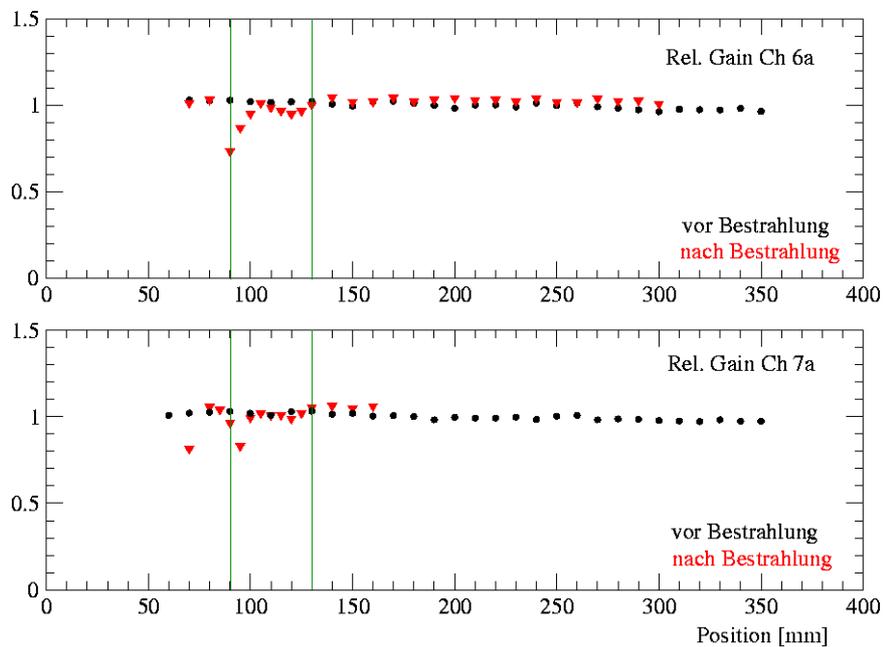


Abbildung 6.18: Die relative Gasverstärkung entlang der bestrahlten Strawtubes bei 3500 ppm Wasser in Ar/CO₂, vor und nach der Bestrahlung. Die bestrahlte Region entlang der Kanäle erstreckt sich über 4 cm von Position 90 bis 130 und ist durch die Linien markiert. Position 0 entspricht dem unteren, Position 400 dem oberen Ende des Moduls. Die Gasflussrichtung war in Richtung Position 400.

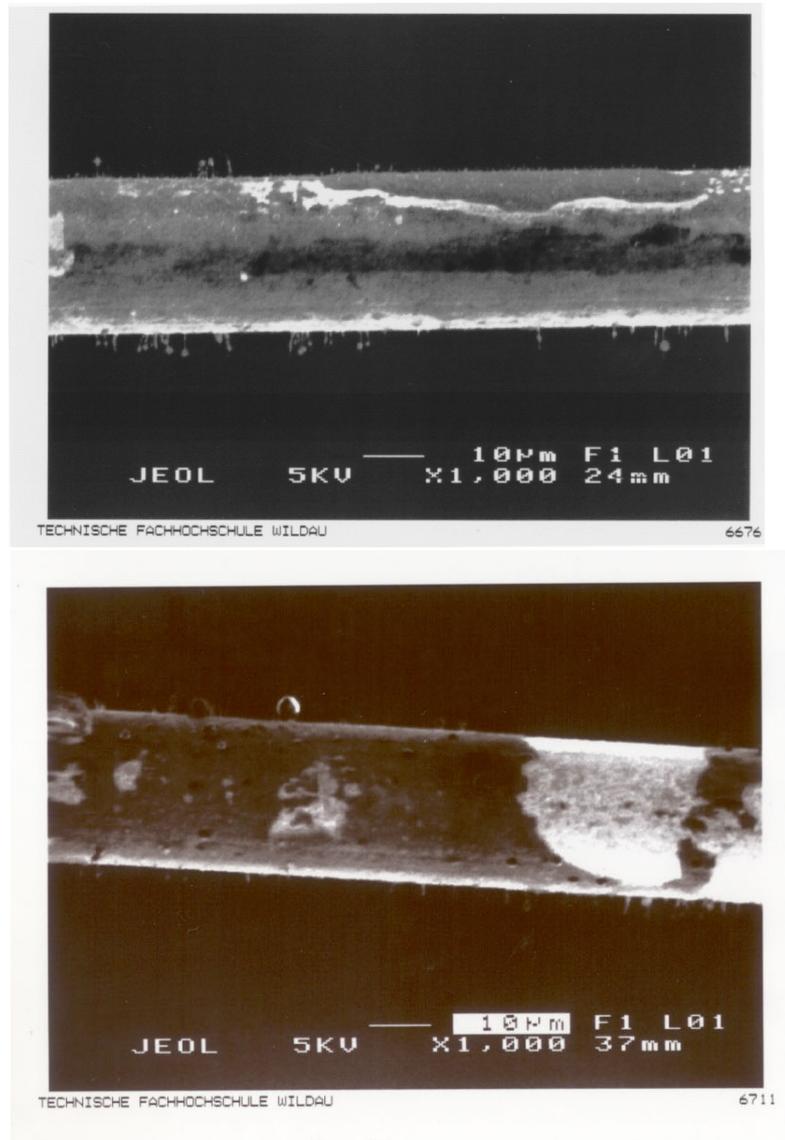


Abbildung 6.19: Bestrahlte Stellen der Anodendrähte aus Kanal 6a (oben) und Kanal 7a (unten), betrieben in Ar/CO₂ mit 3500 ppm Wasser. An den Drahtoberflächen haben sich *Whiskers* und Ablagerungen gebildet. Es wurden Kohlen- und Sauerstoff nachgewiesen.

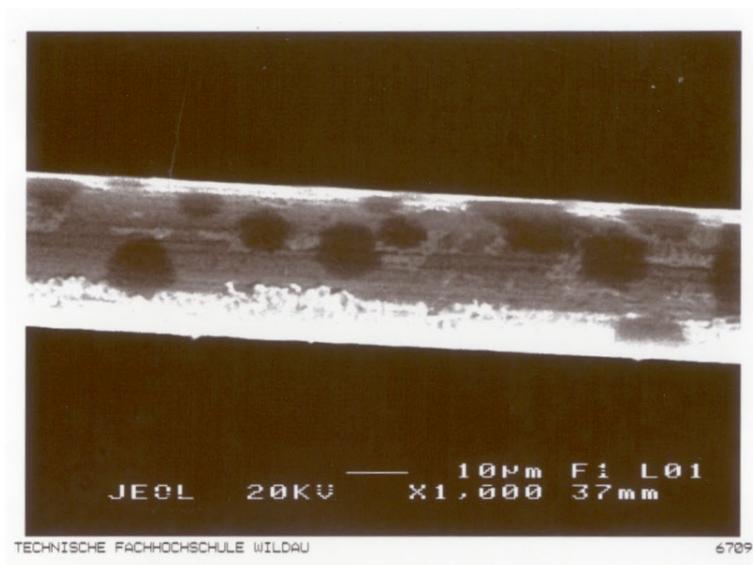


Abbildung 6.20: Unbestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 7a, betrieben in Ar/CO₂ mit 3500 ppm Wasser.

Ergebnisse der Alterungstests mit Ar/CO₂

In Tabelle 6.2 ist die maximale Abnahme der Gasverstärkung während des jeweiligen Alterungstests eingetragen. Offensichtlich korreliert die Stärke der Alterungseffekte mit der Wassermenge im Zählgas. Im ersten Testlauf mit trockenem Ar/CO₂ konnten bei einer Ladungsansammlung von 1,8 C pro 1 cm Drahtlänge keine Verhaltensänderungen im Betrieb der Kammer festgestellt werden. Erst nach der Zugabe von Wasser ins Zählgas sank die Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes, um so stärker, je höher der Wasseranteil war. Bei der Inspektion der Drähte konnte festgestellt werden, dass sich in den bestrahlten Regionen um so stärker Ablagerungen und *Whiskers* bildeten, je mehr Wasser dem Zählgas beigemischt wurde. Ähnliche Alterungseffekte wurden bereits bei früheren Alterungsmessungen mit *GEM-MSGCs*⁵ in feuchtem Ar/CO₂ beobachtet [12] [34].

Beim Betrieb der Kammer mit trockenem Ar/CO₂ wurde eine Ladungsmenge von 1,8 C/cm angesammelt (\cong 7,5 Jahre LHCb). Es wurden keine betriebsstörenden Alterungseffekte nachgewiesen. Unabhängig vom Wassergehalt im Ar/CO₂ konnten keine Hinweise gefunden werden, dass der Anodendraht angegriffen wurde.

6.3.5 Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄ bei unterschiedlichem Wassergehalt

Trockenes Ar/CO₂/CF₄

Der Wassergehalt im trockenen Ar/CO₂/CF₄ lag unter 50 ppm. Zwei Strawtubes wurden 25 Tage unter intensiver Röntgenbestrahlung betrieben. Während der Bestrahlung wurden in unterschiedlichen Zeitabständen die relativen Gasverstärkungen in den

⁵Gas Electron Multiplier - Micro Strip Gas Chamber

Wasseranteil	< 50 ppm	500 ppm	3500 ppm
$Q_{\text{akkumuliert}}$ [C/cm]	1,8	1,8	1,9
ΔG [%]	0	12	27

Tabelle 6.2: Übersichtstabelle zu den Alterungstests mit Ar/CO₂. $Q_{\text{akkumuliert}}$ ist die maximal angesammelte Ladung pro 1 cm Drahtlänge. ΔG ist der maximale Verlust der Gasverstärkung in %.

Strawtubes gemessen. Sie sind in Abbildung 6.21 als Funktion der angesammelten Ladung aufgetragen. Nach 1,8 C/cm, bzw. 2,2 C/cm angesammelter Ladung war im bestrahlten Bereich keine Änderung der Gasverstärkung zu erkennen.

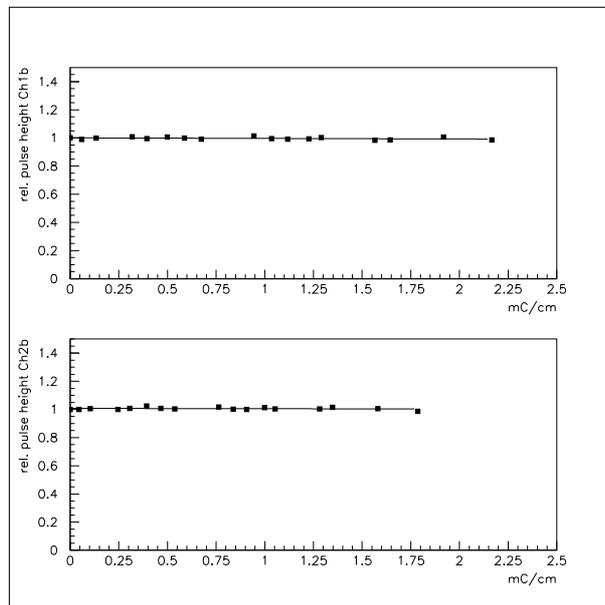


Abbildung 6.21: Die relative Gasverstärkung in den Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung. Zählgas war trockenes Ar/CO₂/CF₄. Es gab keine signifikante Änderung der Gasverstärkung.

Vor Beginn und nach Beendigung des Testlaufs wurden die relativen Gasverstärkungen entlang der bestrahlten Strawtubes gemessen. Abbildung 6.22 zeigt sie jeweils entlang Kanal 1b und entlang Kanal 2b. Im bestrahlten Bereich und darunter blieb die Gasverstärkung unverändert. Jeweils am Gasausgang der Strawtubes fiel sie um 25 % (Kanal 1b, Position 350), bzw. um 13 % (Kanal 2b, Position 340).

Bei der optischen Inspektion war der bestrahlte Bereich auf beiden Anodendrahten als verdunkelter Abschnitt zu erkennen. Dagegen waren an den weiteren Drahtabschnitten keine Veränderungen zu beobachten. Auch nicht an den Positionen, wo ein Verlust der Gasverstärkung gemessen wurde.

Für die weitere Analyse wurden einzelne Drahtabschnitte unter dem REM inspiziert. Abbildung 6.23 zeigt einen Drahtabschnitt aus dem bestrahlten Bereich. Entlang der Drahtoberfläche sind ein durchgehender Streifen und einzelne schwarze Flecken zu er-

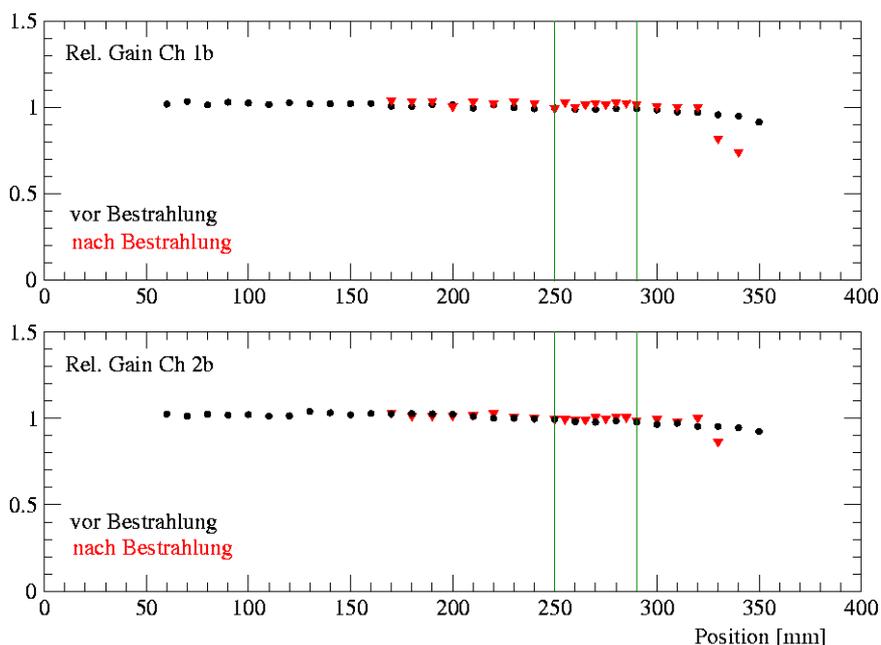


Abbildung 6.22: Die relative Gasverstärkung entlang der bestrahlten Strawtubes in trockenem Ar/CO₂/CF₄. Die grünen Linien markieren den bestrahlten Bereich (Position 250 bis 290).

kennen, in denen durch EDS-Analyse Kohlenstoff nachgewiesen wurde. Darüber hinaus wurden keine Hinweise auf Alterungseffekte oder Beschädigungen am bestrahlten Draht gefunden.



Abbildung 6.23: Bestrahlter Drahtabschnitt betrieben in trockenem Ar/CO₂/CF₄. Entlang der bestrahlten Region erkennt man schwarze Flecken, in denen Kohlenstoff nachgewiesen wurde.

Abbildung 6.24 zeigt einen unbestrahlten Abschnitt vom Anodendraht aus Kanal 1b.

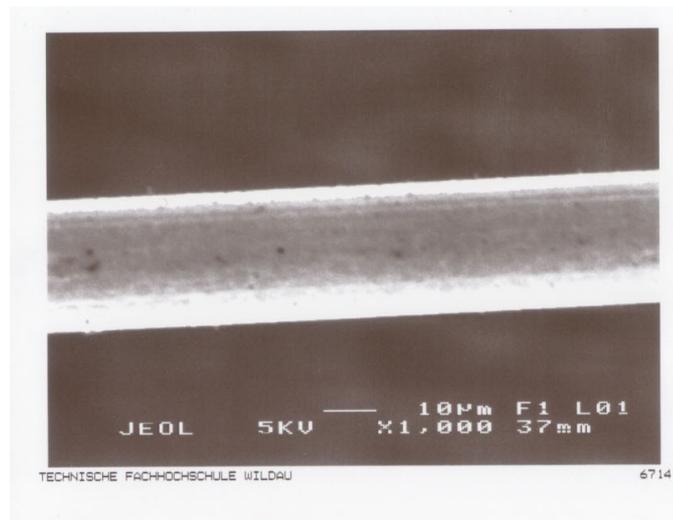


Abbildung 6.24: Ein unbestrahlter Drahtabschnitt (Kanal 1b, Position 320) betrieben in trockenem $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$. Es ist kein Unterschied zu einem neuen Draht erkennbar.

Es wurde kein Unterschied zu einem neuen Draht festgestellt (vgl. Abb. 4.11).

In Abbildung 6.25 ist der Drahtabschnitt aus Kanal 1b dargestellt, an dem die Gasverstärkung um 25 % abnahm. Bei der Inspektion mit dem REM traten Aufladungseffekte auf, die ein starkes Indiz für eine isolierende Schicht auf dem Draht sind. Der Drahtabschnitt erschien insgesamt dunkler als ein neuer Draht und es konnte ein Nachleuchten der betrachteten Stelle beobachtet werden.

Mit der EDS-Analyse wurden Kohlenstoff und Sauerstoff auf dem Drahtabschnitt nachgewiesen. Es wird angenommen, dass sie zusammen mit Wasserstoff die isolierenden Schichten bildeten, wobei Wasserstoff durch die EDS-Analyse nicht nachweisbar ist. Durch die isolierende Schicht auf dem Draht kann der beobachtete Gasverstärkungsverlust erklärt werden.

$\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 500 ppm Wassergehalt

Der Wassergehalt im Zählgas $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ wurde auf 500 ppm erhöht. Zwei weitere Strawtubes wurden für 26 Tage über 4 cm bestrahlt. Abbildung 6.26 zeigt die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung. Die Steigungen der an die Messdaten angepassten Geraden entsprechen einer Zunahme der Gasverstärkung von 2 % pro 1 C/cm in Kanal 3b, bzw. 1 % pro 1 C/cm in Kanal 4b. Es ist allerdings kein starker Effekt.

In beiden Kanälen wurde die relative Gasverstärkung entlang der Strawtubes vor und nach dem Testlauf gemessen. In Abbildung 6.27 ist sie für die beiden bestrahlten Strawtubes dargestellt. Die Gasverstärkung fiel jeweils unterhalb der bestrahlten Region signifikant ab, in Kanal 3b um 40 % und in Kanal 4b um 30 %. Im bestrahlten Bereich und darüber liegt die Gasverstärkung nach der Bestrahlung in beiden Kanälen höher als vor dem Alterungstest (bis zu 10 %).

Bei der optischen Inspektion waren an keiner Stelle der Anodendrähte Alterungseffekte

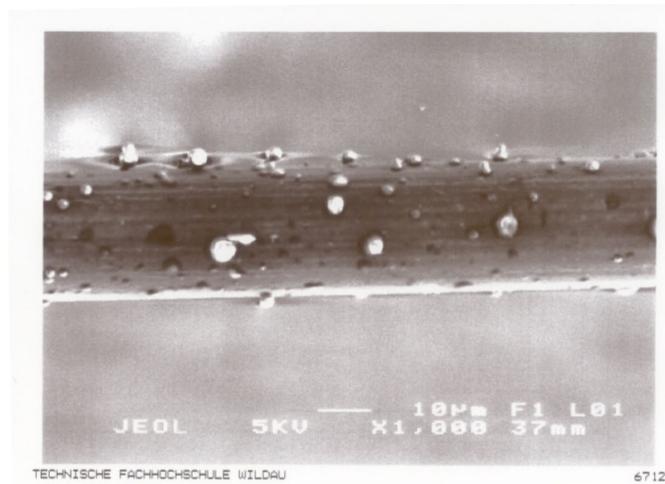


Abbildung 6.25: Unbestrahlter Drahtabschnitt (Kanal 1b, Position 340) betrieben in trockenem Ar/CO₂/CF₄. Auf dem Draht bildete sich eine isolierende Schicht, die Kohlenstoff und Sauerstoff enthält.

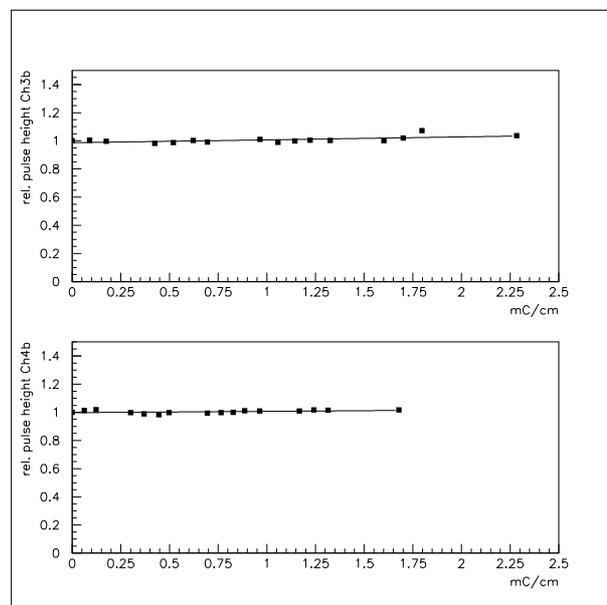


Abbildung 6.26: Die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes aufgetragen über die angesammelte Ladung. Das Zählgas war Ar/CO₂/CF₄ mit 500ppm Wasser. Es gab keine signifikante Änderung.

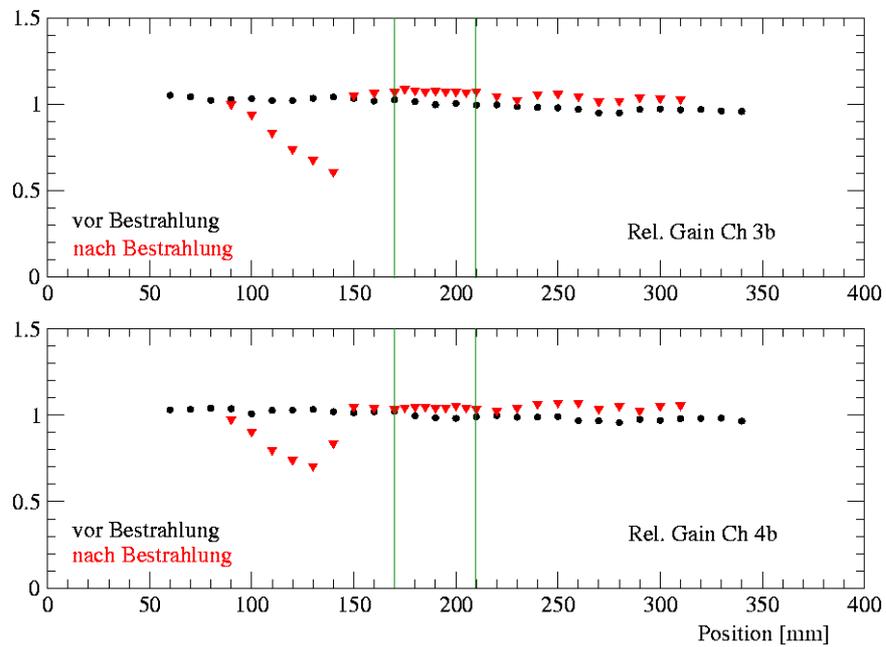


Abbildung 6.27: Die relative Gasverstärkung entlang Kanal 3b und entlang Kanal 4b in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 500 ppm Wasser. Die grünen Linien markieren den bestrahlten Bereich (Position 170 bis 210). Die Gasflussrichtung war in Richtung Position 400. Unterhalb der bestrahlten Region sank die Gasverstärkung um 40 % (Kanal 3b, oben), bzw. um 30 % (Kanal 4b, unten).

sichtbar, weder mit bloßem Auge, noch mit dem Lichtmikroskop.

Einzelne Drahtabschnitte wurden unter dem REM inspiziert und analysiert. Abbildung 6.28 zeigt einen bestrahlten Drahtabschnitt. Auf der Drahtoberfläche sind dunkle, kohlenstoffhaltige Flecken zu erkennen.

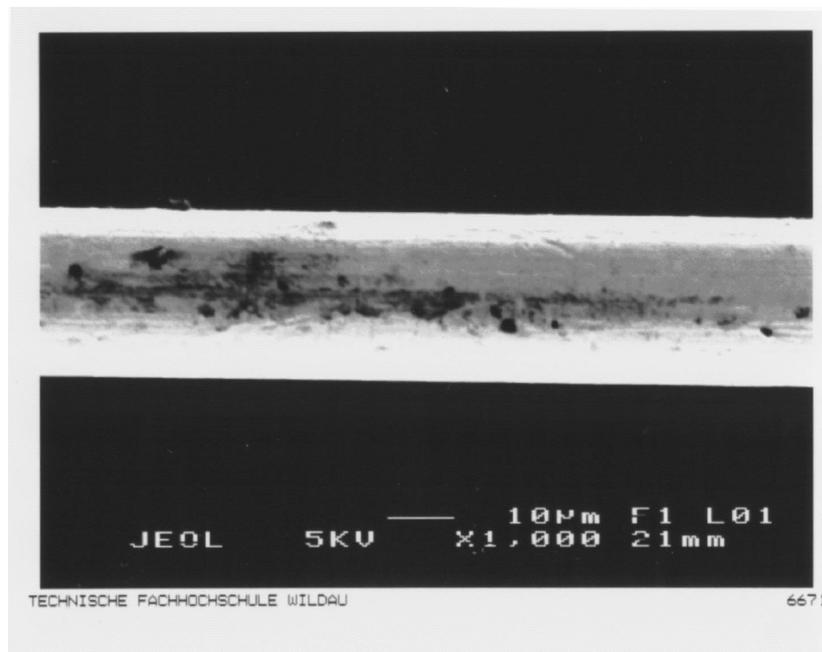


Abbildung 6.28: Bestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 4b, betrieben in Ar/CO₂/CF₄ mit 500 ppm Wasser. Auf dem Draht sind schwarze, kohlenstoffhaltige Flecken.

Abbildung 6.29 zeigt einen unbestrahlten Drahtabschnitt von Kanal 3b, an dem die Gasverstärkung um 40 % abnahm (Position 140). Beim inspizieren mit dem REM wurden die gleichen Aufladungseffekte beobachtet wie am Drahtabschnitt aus Abbildung 6.25. Durch EDS-Analyse konnten erneut Kohlenstoff und Sauerstoff nachgewiesen werden. Auch hier hat sich vermutlich eine isolierende Schicht gebildet. Eine weitere plausible Ursache für den hohen Gasverstärkungsverlust konnte nicht gefunden werden.

Ar/CO₂/CF₄ mit 3500 ppm Wassergehalt

Der Wassergehalt in Ar/CO₂/CF₄ wurde weiter auf 3500 ppm erhöht und zwei weitere Strawtubes über eine Länge von jeweils 4 cm bestrahlt. In Abbildung 6.30 ist die Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung aufgetragen. Aus den Steigungen der angepassten Geraden folgt eine Abnahme der Gasverstärkung um 3 % pro 1 C/cm, bzw. um 6 % pro 1 C/cm.

In Abbildung 6.31 ist die relative Gasverstärkung entlang der Strawtubes vor und nach der Bestrahlung dargestellt. Zwischen Position 140 und 200 konnte die Gasverstärkung nicht gemessen werden, weil dort die Kammer von Gasleitungen verdeckt war. Es wurde keine signifikante Änderung der Gasverstärkung beobachtet.

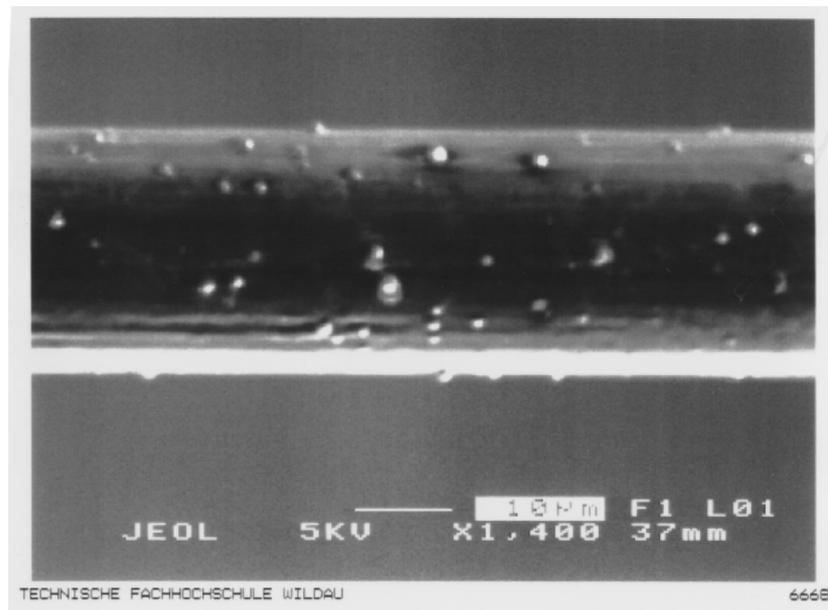


Abbildung 6.29: Unbestrahlte Stelle vom Anodendraht aus Kanal 3b (Position 140), betrieben in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 500 ppm Wasser. Mit hoher Wahrscheinlichkeit bildete sich eine isolierende Schicht auf dem Draht. Sie enthält Kohlenstoff, Sauerstoff und vermutlich auch Wasserstoff.

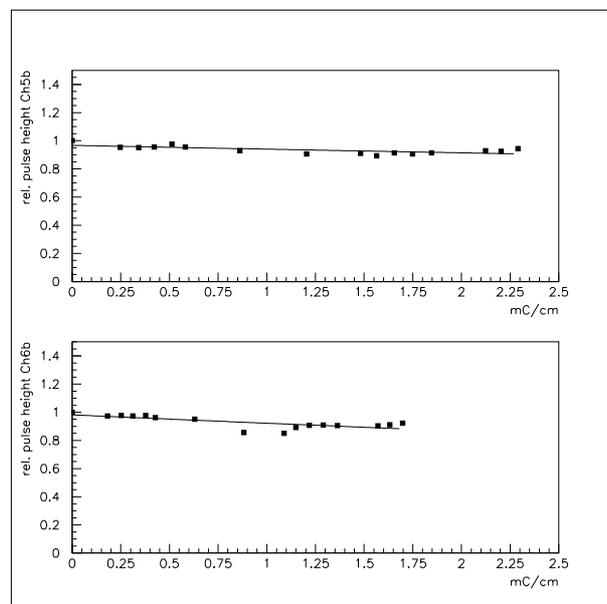


Abbildung 6.30: Die relative Gasverstärkung in den bestrahlten Strawtubes als Funktion der angesammelten Ladung. Das Zählgas war $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 3500 ppm Wasser. Im Kanal 5b (oben) sank die Gasverstärkung um 3 % pro 1 C/cm, im Kanal 6b um 6 % pro 1 C/cm.

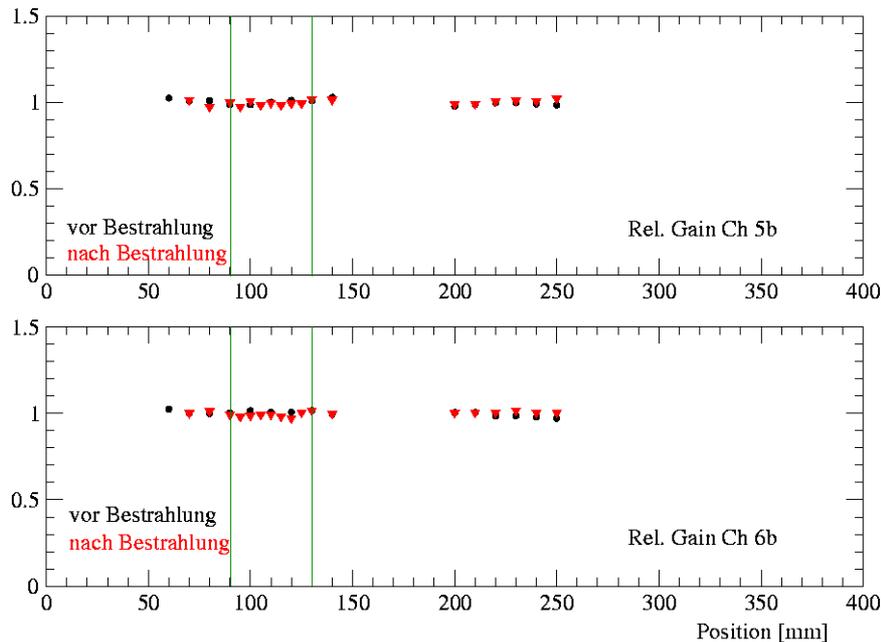


Abbildung 6.31: Die relative Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ mit 3500 ppm Wasser, entlang Kanal 5b (oben) und Kanal 6b (unten). Die grünen Linien markieren den bestrahlten Bereich (Position 90 bis 130).

Bei der optischen Inspektion war die bestrahlte Region in beiden Drähten deutlich als verdunkelter Abschnitt zu erkennen.

Die bestrahlten Drahtabschnitte wurden mit dem REM analysiert. Der Großteil der untersuchten Stellen zeigte bis auf kohlenstoffhaltige, dunkle Flecken keine weiteren Alterungseffekte. Auf dem bestrahlten Drahtabschnitt aus Kanal 6b in Abbildung 6.32 bildeten sich darüber hinaus tropfenförmige Strukturen. Sie enthalten Sauerstoff und Kohlenstoff.

Abbildung 6.33 zeigt einen bestrahlten Drahtabschnitt aus Kanal 5b. Auf dem Draht ist außer den dunklen Flecken ein länglicher, schwarzer Streifen zu sehen. Unter dem REM waren im Streifen z.T. Vertiefungen in der Drahtoberfläche zu erkennen. Durch EDS-Analyse wurde in einer Vertiefung ein erhöhter Wolframanteil nachgewiesen. Offensichtlich wurde die Goldschicht des Drahtes beschädigt.

Ergebnisse der Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄

Nach den drei Testläufen mit Ar/CO₂/CF₄ bei unterschiedlichem Wassergehalt wurden eine Reihe unvorhergesehener Alterungseffekte beobachtet, während bei früheren Tests beobachtete Effekte zumindest nicht im erwarteten Maße auftraten [10].

Bei den Alterungstests mit < 50 ppm und mit 500 ppm Wasseranteil im Zählgas glichen sich die Effekte:

- Auf den bestrahlten Drahtabschnitten hat sich Kohlenstoff abgelagert.
- Eine Abnahme der Gasverstärkung oder sonstige Änderungen im Betrieb wurden in den bestrahlten Bereichen nicht festgestellt.
- An manchen Drahtabschnitten außerhalb des bestrahlten Bereichs wurde ein signi-

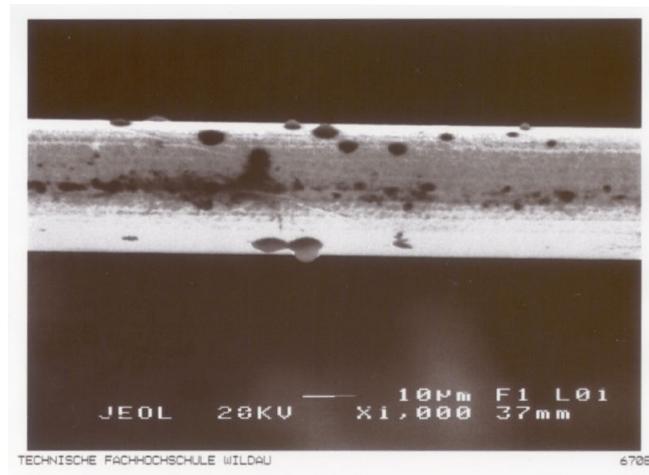


Abbildung 6.32: Bestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 6b, betrieben in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 3500 ppm Wasser. Auf dem Draht sind vereinzelt schwarze Flecken, bzw. tropfenförmige Ablagerungen zu finden. Darin wurden Sauerstoff und Kohlenstoff nachgewiesen.



Abbildung 6.33: Bestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 5b, betrieben in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ mit 3500 ppm Wasser. In den schwarzen Streifen waren z.T. Vertiefungen in der Oberfläche zu erkennen. Darin wurde ein erhöhter Wolframanteil nachgewiesen.

fikanter Rückgang der Gasverstärkung gemessen. Die Analyse mit dem REM ergab, dass sich an den betreffenden Stellen isolierende Schichten gebildet haben.

Nach dem Alterungstest mit 3500 ppm Wasser im Ar/CO₂/CF₄ wurden keine isolierenden Schichten gefunden. An den bestrahlten Stellen hat sich Kohlenstoff auf der Drahtoberfläche abgelagert. An einem bestrahlten Drahtabschnitt wurden starke Indizien gefunden, dass der Draht angegriffen und die Oberfläche angeätzt wurde.

6.3.6 Vergleich der beobachteten Alterungsphänomene in Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄

In der Plasmachemie wird CF₄ als ätzendes Additiv verwendet [33]. Beim Gasverstärkungsprozess im Strawtube herrschen nahe dem Anodendraht Bedingungen, die mit denen in der Plasmachemie vergleichbar sind [2]. Ablagerungen, die auf Anoden von Gasdetektoren entstanden, können bei Betrieb mit CF₄-haltigem Gas unter Bestrahlung wieder abgeätzt werden [4]. Auf diese Weise können Alterungseffekte durch die Verwendung von CF₄ sogar abgeschwächt werden. Auch nach unseren Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) waren die bestrahlten Drahtabschnitte zum Großteil frei von Ablagerungen.

Nach dem Alterungstest in trockenem Ar/CO₂/CF₄ gab es keine Anzeichen auf Drahtätzen. Im Ar/CO₂/CF₄ mit 3500 ppm Wasser wurden dagegen starke Indizien für Drahtätzen gefunden.

Außerhalb der bestrahlten Bereiche bildeten sich isolierende Schichten auf den Anodendrahten, sowohl in trockenem als auch in feuchtem Zählgas mit 500 ppm Wasser. Die Gasverstärkung sank dort teilweise um 40 %. Dieser unkontrollierbare Effekt könnte auch global in den Driftkammermodulen im LHCb-Experiment auftreten. Die 5 m langen Module werden dort nicht homogen bestrahlt. Die Strahlintensität nimmt in erster Näherung um r^{-2} ab, wobei r der Abstand zum Strahlrohr ist. Mit Ar/CO₂/CF₄ als Zählgas besteht die Gefahr, dass beim Betrieb der Driftkammermodulen im LHCb-Experiment stellenweise isolierende Schichten auf den Anodendrahten gebildet werden.

Mit trockenem Ar/CO₂ (< 50 ppm H₂O) konnten in diesem Test keine Alterungseffekte beobachtet werden, die den Betrieb des Moduls im LHCb-Experiment gefährden. Auf den Drähten bildeten sich Ablagerungen von Kohlenstoff, die keinen Einfluss auf den Betrieb hatten.

Bei 500 ppm Wassergehalt nahm die Gasverstärkung im bestrahlten Bereich nach der angesammelten Ladung von 1,8 C/cm signifikant ab. Es bildeten sich Ablagerungen und *Whiskers*. Bei 3500 ppm Wassergehalt traten die Effekte stärker auf, aber auch nur im bestrahlten Bereich. Hier sank die Gasverstärkung um 40 %. Ablagerungen und *Whiskers* wie sie hier beobachtet wurden, sind häufig eine Form von Polymerisation [7]. Ihre Entstehung korreliert offensichtlich mit dem Wassergehalt. Bei früheren Alterungsstudien mit Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) mit 3000 ppm Wasser konnten ähnliche Effekte beobachtet werden [12] [34].

Sollen die Driftkammermodule mit Ar/CO₂ betrieben werden, ist also darauf zu achten, dass kein Wasser (< 50 ppm) in die Kammern gelangt. Das Gassystem des Äußeren Spurkammersystems muss diese Anforderung erfüllen. Sofern die Kammern die Spezi-

fikationen erfüllen bleibt das Zählgas trocken (Kapitel 2.3 und [17]).

Das Fazit dieser Alterungstests lautet: Der Betrieb der Kammern mit Ar/CO₂/CF₄ ist riskant und führt zu unkontrollierbaren, globalen Effekten. Bezogen auf das Alterungsverhalten ist trockenes Ar/CO₂ das geeignetere Zählgas für den Betrieb der Driftkammermodule im LHCb-Experiment. Der Einfluss auf die Physik, den der Tausch des Zählgases mit sich bringt, wurde bei dieser Bewertung nicht mit einbezogen.

Kapitel 7

Betriebstest mit endgültigen Materialien

Für die Betriebs- und Alterungstests, über die bisher berichtet wurde, standen noch nicht alle Einzelteile, hergestellt aus ihrem endgültigen Material oder in ihrem endgültigen Design, zur Verfügung. Speziell die endgültigen Drahtpositionierer und Endstücke waren bei den ersten Tests noch nicht entworfen oder produziert. Nachdem das Moduldesign feststand und alle Einzelteile verfügbar waren, wurde ein neues Testmodul angefertigt. Ziel war es, dieses Testmodul unter intensiver und möglichst großflächiger Röntgenbestrahlung zu betreiben und die verwendeten Einzelteile und Materialien zu validieren.

7.1 Betriebstests mit den zwei Zählgasen Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄

Für diese Tests wurde erneut ein Testmodul mit zwei getrennten Kammern hergestellt, um sie parallel mit jeweils reinem und trockenem Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ betreiben zu können. Das Langzeitverhalten des Moduls und auftretende Alterungseffekte wurden für beide Zählgase untersucht. Es sollte weiterhin untersucht werden, welches Zählgas hinsichtlich Betriebsstabilität und Alterung für die Operation der Driftkammermodule im LHCb-Experiment geeignet, bzw. ungeeignet ist.

7.1.1 Das Doppelkammermodul für die Betriebstests

Das Doppelkammermodul wurde auf die gleiche Weise wie das erste Doppelkammermodul aus Kapitel 6 produziert. Je eine Kammer auf einer Modulhälfte besitzt wieder 7 Kanäle. Sie sind 47 cm lang. Jeweils 4 Strawtubes in einer Modulhälfte wurden mit Drahtpositionierern bestückt. Sowohl die Drahtpositionierer, als auch die Endstücke sind nach endgültigem Design im Spritzgussverfahren aus dem Material Noryl hergestellt worden (Abbildung 2.21 in Kapitel 2.4.2). In Abbildung 7.1 sind die Drahtpositionierer in der Modulskeizze eingezeichnet. Sie wurden durch thermische Verformung in den Strawtubes fixiert. Die weiteren Strawtubes besitzen keine Drahtpositionierer. Sie werden nicht benötigt, da der mit 60 g gespannte und 47 cm lange Anodendraht um

weniger als $10 \mu\text{m}$ durchhängt. Ziel war es das Langzeitverhalten und die Alterungseffekte von Strawtubes mit und ohne Drahtpositionierer im Vergleich zu untersuchen. Wie im endgültigen Design besitzen die Strawtubes an einem Ende verzinnte Fähn-

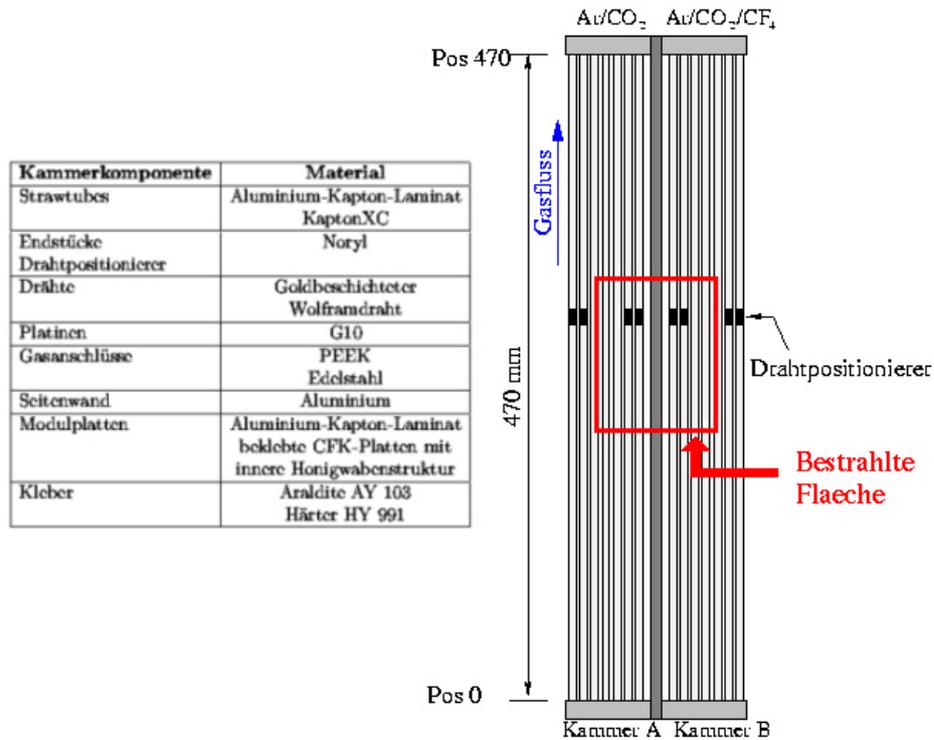


Abbildung 7.1: Skizze vom zweiten Doppelkammermodul. Es besteht aus zwei getrennten Kammern (Kammer A und Kammer B). Die Strawtubes im Modul sind 470 mm lang. 4 Strawtubes pro Kammer besitzen bei Position 280 mm einen Drahtpositionierer. Eine Kammer hat ein Volumen von $V \approx 140 \text{ ml}$.

chen zur direkten Kontaktierung der Innen- und Außenseiten. Die Fähnchen wurden an einen gemeinsamen Kupferstreifen gelötet, der mit dem Massenkontakt der HV-Platine verlötet wurde. Die Strawtubes sind aus KaptonXC-Folie und Aluminium-KaptonXC-Laminat gewickelt. Alle anderen Materialien und Einzelteile (Kapitel 6) bleiben unverändert.

7.1.2 Betrieb unter Röntgenbestrahlung

Nach Tests der Gasdichtigkeit beider Kammern und der mechanischen Drahtspannung wurde das Doppelkammermodul in den Röntgenmessstand installiert. Gasfluss, Temperatur, Umgebungsdruck und der jeweilige Wassergehalt an den Gasaugängen beider Kammern wurden registriert. In Abbildung 7.2 ist der Aufbau skizziert.

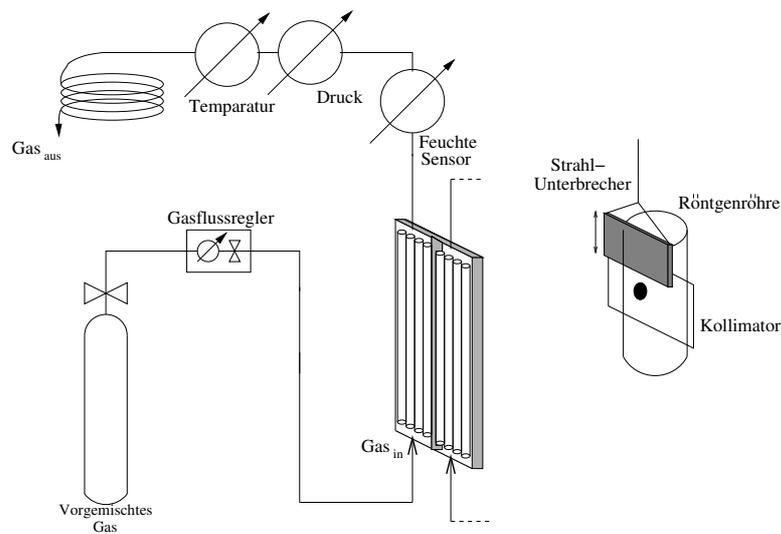


Abbildung 7.2: Skizze vom Aufbau und dem Gassystem der zweiten Doppelkammer im Röntgenmessstand.

Betriebsbedingungen

Der Gasfluss beider Kammern lag bei 200 ml/h, was in etwa 1,4 Kammervolumen pro Stunde entspricht. Die Betriebsspannung der mit Ar/CO₂ (70:30 Vol.-%) gespülten Kammer lag bei 1510 V, die mit Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) gespülte Kammer wurde mit 1550 V betrieben. Bis zu einer Röntgenstrahlungsrate von 10 kHz lag damit die Gasverstärkung in den Strawtubes beider Kammern in etwa bei 40000 [16].

Im Vergleich zu den bisherigen Betriebs- und Alterungstests wurde der Abstand zwischen Röntgenröhre und Doppelkammermodul vergrößert, um das Modul großflächiger bestrahlen zu können. In Abbildung 7.3 ist das Röntgenstrahlprofil in vertikaler und horizontaler Richtung dargestellt. Pro Kammer wurden 4 Strawtubes unter Bestrahlung betrieben, jeweils zwei mit und zwei ohne Drahtpositionierer, wobei die Drahtpositionierer im bestrahlten Bereich lagen. Am gemessenen vertikalen Strahlprofil ist zu erkennen, dass für jeden einzelnen Strawtube die Intensität der Röntgenstrahlung über eine Länge von 10 cm nahezu gleichverteilt war ($\pm 5\%$).

In Tabelle 7.1 sind die Betriebsparameter für alle bestrahlten Kanäle zusammengefasst. Im Strahlmaximum lagen die Anodenströme zwischen 700 nA/cm und 1000 nA/cm, die Raten zwischen 400 kHz/cm und 550 kHz/cm. Aufgrund der hohen Raten wurde die Gasverstärkung auf 28000 reduziert. Der Wassergehalt war in beiden Zählgasen < 50 ppm.

Betrieb mit Ar/CO₂

Das Modul wurde 13 Tage bestrahlt. In regelmäßigen Abständen wurde die intensive Bestrahlung kurzzeitig unterbrochen, um an den bestrahlten Strawtubes und an Referenzkanälen ⁵⁵Fe-Spektren aufzunehmen. Damit wurde die Gasverstärkung in den bestrahlten Kanälen gemessen. In Abbildung 7.4 sind die relativen Gasverstärkungen

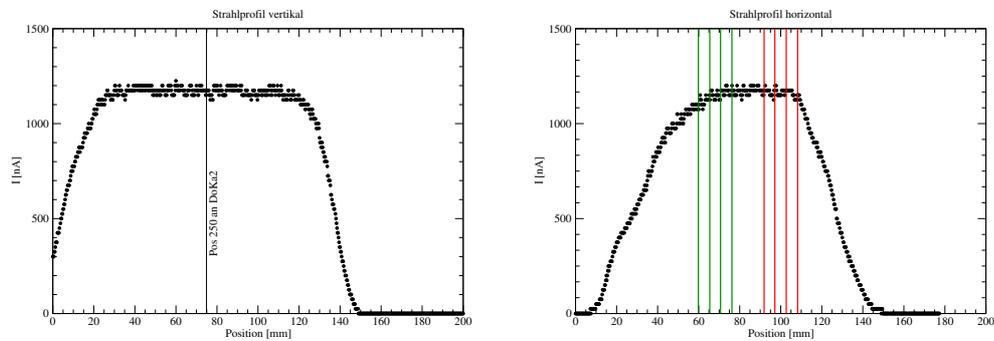


Abbildung 7.3: Das Strahlprofil in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Verteilung der gemessenen Anodenströme an verschiedenen Positionen eines Kanals relativ zur Röntgenröhre, entspricht der Intensitätsverteilung des Röntgenstrahls am Doppelkammermodul. Im Diagramm rechts sind die Positionen der Anodendrähte eingezeichnet, die während der Bestrahlung betrieben wurden: Jeweils 4 in Ar/CO₂ (grün) und in Ar/CO₂/CF₄ (rot).

	Ar/CO ₂				Ar/CO ₂ /CF ₄			
Kanal	4a	5a	6a	7a	1b	2b	3b	4b
Drahtpositionierer	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein
HV	1510 V				1550 V			
mC/cm	(770)	(770)	770	810	850	600	(680)	(600)
Beschl.	40	40	40	45	50	40	40	40

Tabelle 7.1: Die Betriebsparameter für die bestrahlten Strawtubes des zweiten Doppelkammermoduls. Für die Kanäle 4a, 5a, 3b und 4b wurden die angesammelten Ladungen abgeschätzt, basierend auf den gemessenen Ladungsansammlungen in den anderen Kanälen.

über die angesammelten Ladungen in den mit Ar/CO₂ betriebenen Kanälen aufgetragen. In Kanal 4a, 5a und 7a streuen die Messdaten mit $\pm 5\%$ um die anfangs gemessene Gasverstärkung, in Kanal 6a mit $\pm 10\%$. Mit Ar/CO₂ als Zählgas wurde keine signifikante Änderung in der Gasverstärkung gemessen.

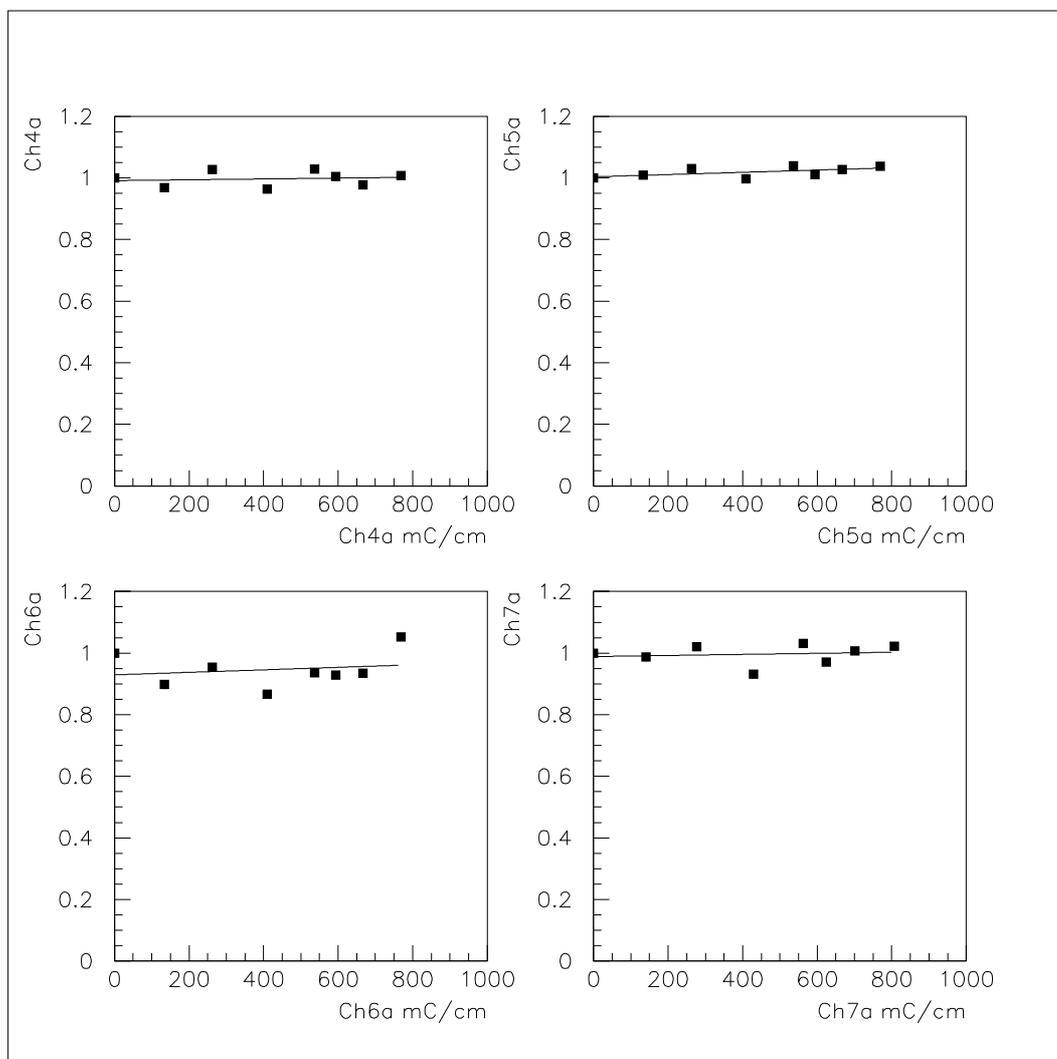


Abbildung 7.4: Die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen in den Kanälen 4a, 5a (ohne Drahtpositionieren) und 6a, 7a (mit Drahtpositionieren). Die Gasverstärkung wurde jeweils an Position 250 gemessen (Abbildung 7.1). Zählgas war Ar/CO₂.

Die Bestrahlung des Doppelkammermoduls wurde abgebrochen, nachdem in der parallel betriebenen Modulhälfte zwei Anodendrähte gerissen waren.

Betrieb mit Ar/CO₂/CF₄

In der mit Ar/CO₂/CF₄ betriebenen Kammer des Moduls wurden signifikante Änderungen der Gasverstärkung in den bestrahlten Kanälen gemessen. In Abbildung 7.5 sind die relativen Gasverstärkungen über die angesammelten Ladungen aufgetragen

für die mit Drahtpositionierern bestückten und bestrahlten Kanäle. Gemessen wurde jeweils an Position 250 (Abbildung 7.1). In dem am intensivsten bestrahlten Kanal 1b ist die Gasverstärkung nach 600 mC/cm auf 80 % gesunken, nach weiteren 250 mC/cm ist sie wieder leicht angestiegen auf etwa 83 % des Anfangswertes. Kanal 2b wurde weniger intensiv bestrahlt und hatte daher in gleicher Zeit weniger Ladung angesammelt. Nach 12 Tagen Bestrahlung und einer angesammelten Ladung von 600 mC/cm ist der Anodendraht im bestrahlten Bereich gerissen. Nach 475 mC/cm war die Gasverstärkung auf unter 70% gesunken. Bevor der Anodendraht gerissen war, stieg sie wieder auf 80 % des Anfangswertes.

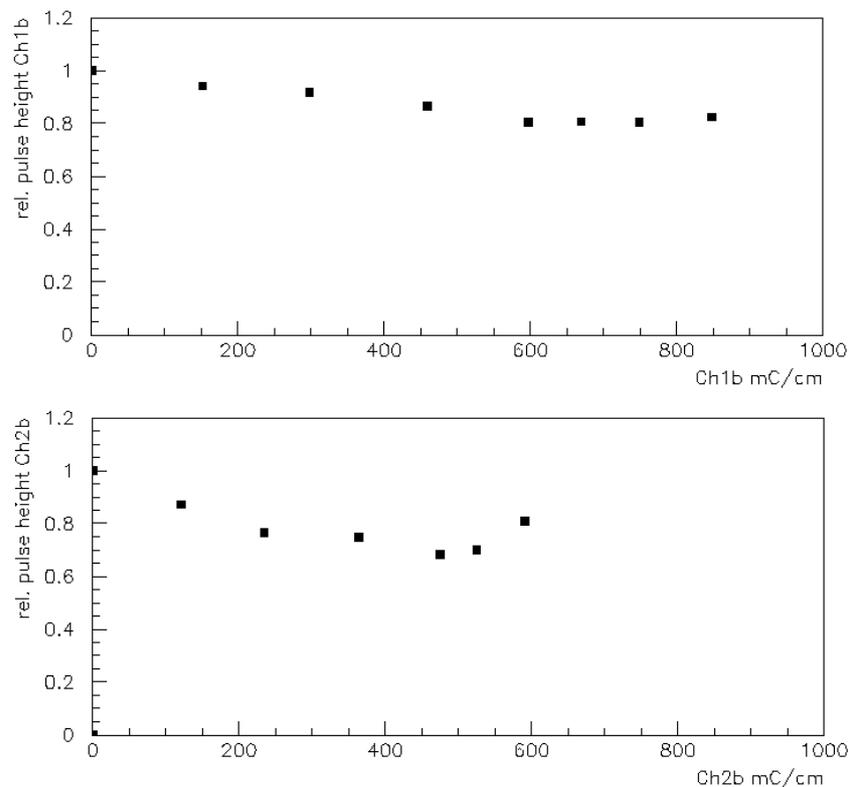


Abbildung 7.5: Die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen in den mit Drahtpositionierern bestückten Kanälen 1b und 2b (jeweils in Position 250). Zählgas war Ar/CO₂/CF₄. In Kanal 2b riss der Anodendraht nach etwa 600 mC/cm.

In Abbildung 7.6 sind die relativen Gasverstärkungen über die angesammelten Ladungen für die Kanäle ohne Drahtpositionierern aufgetragen. In Kanal 3b ist die Gasverstärkung nach 475 mC/cm auf 53 % gesunken. Nach 590 mC/cm angesammelter Ladung stieg sie von 55 % auf fast 90 % der anfänglichen Gasverstärkung nach 680 mC/cm. In Kanal 4b ist wie in Kanal 2b nach 12-tägiger Bestrahlung und etwa 600 mC/cm angesammelter Ladung der Anodendraht im bestrahlten Bereich gerissen. Bis zu einer Ladungsansammlung von 525 mC/cm ist die Gasverstärkung auf fast 50 % gesunken. Bevor der Draht riss, stieg sie wieder auf etwa 63 % des Anfangswertes.

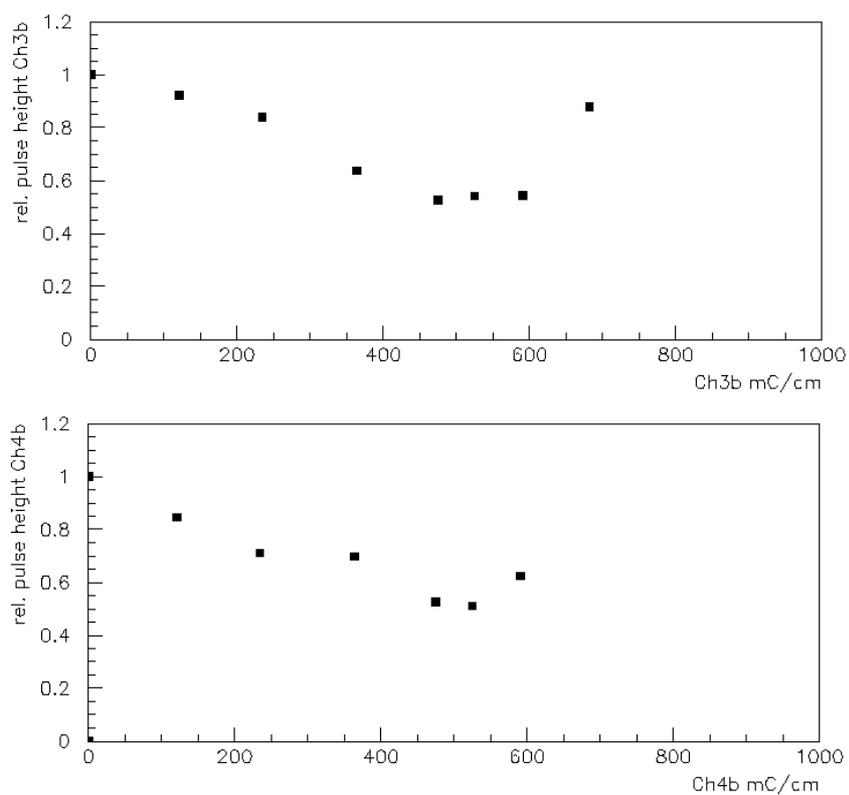


Abbildung 7.6: Die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen in den Kanälen 3b und 4b ohne Drahtpositionierern (jeweils in Position 250). Zählgas war Ar/CO₂/CF₄. In Kanal 4b riss der Anodendraht nach etwa 600 mC/cm.

Die Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen die relativen Gasverstärkungen entlang der Drähte von den bestrahlten Kanälen vor, während und, so fern der Kanal noch intakt war, nach der Bestrahlung.

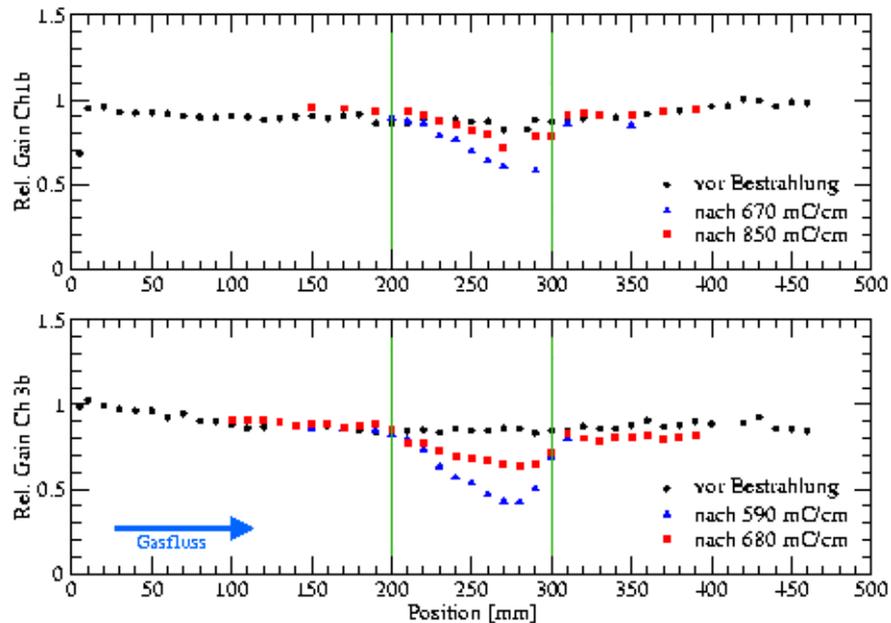


Abbildung 7.7: Die relativen Gasverstärkungen entlang den Kanälen 1b und 3b. Sie sank im bestrahlten Bereich auf 60 % in Kanal 1b, bzw. auf 45 % in Kanal 3b. Die beiden Linien begrenzen den Bereich, in dem die Kanäle mit 90 % der maximalen Intensität bestrahlt wurden.

7.1.3 Untersuchung der bestrahlten Kanäle

Beide Kammern des Doppelkammermoduls wurden geöffnet. Die Strawtubes wurden aufgeschnitten, so dass die Anodendrähte freilagen. Mit bloßem Auge war zu erkennen, dass die Anodendrähte der mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ betriebenen Kanäle im bestrahlten Bereich geschwärzt waren. An den mit Ar/CO_2 betriebenen Drähten konnten keine Unterschiede zu einem neuen Draht gesehen werden. Die Abbildung 7.9 zeigt Aufnahmen von bestrahlten Anodendrähten unter dem Lichtmikroskop. Auf allen vier Anodendrähten der mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ betriebenen Strawtubes bildeten sich starke Ablagerungen im bestrahlten Bereich. Zum Teil hatte die abgelagerte Schicht auf dem Draht Risse, durch die die eigentliche Drahtoberfläche zu erkennen war.

Die Endstücke und Drahtpositionierer wurden unter dem Lichtmikroskop untersucht. Es konnten keine Beschädigungen oder Unterschiede zu neuwertigen erkannt werden.

Einzelne Drahtabschnitte wurden mit dem REM (Kapitel 4.4.3) untersucht und analysiert. In Abbildung 7.10 sind zwei Aufnahmen von bestrahlten Anodendrähten dargestellt. Die rechte Aufnahme zeigt den gerissenen Draht aus Kanal 4b. In beiden Aufnahmen ist eine rissige, abgelagerte Schicht auf dem jeweiligen Draht zu erkennen. An der gerissenen Stelle liegt der Draht von Kanal 4b frei. Die abgelagerte Schicht

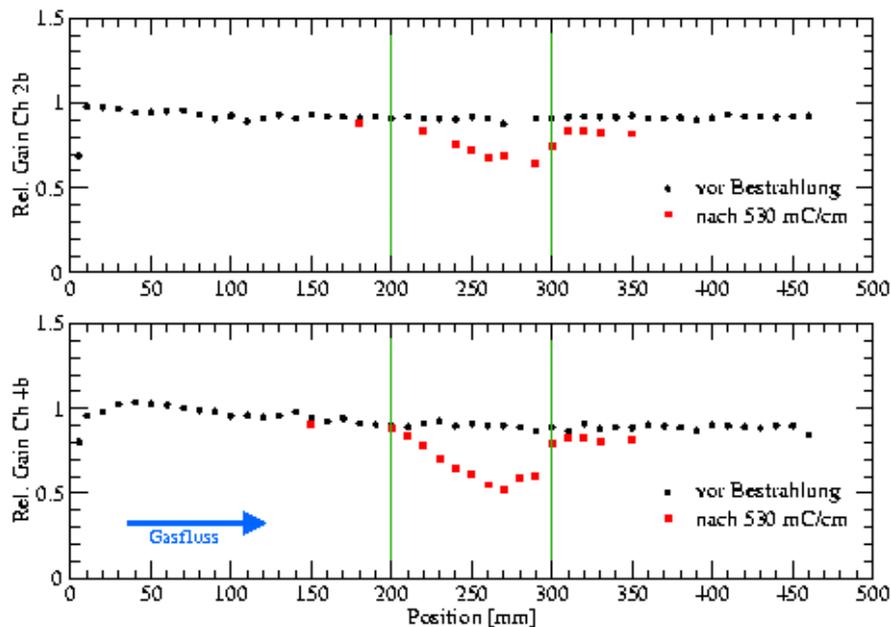


Abbildung 7.8: Die relativen Gasverstärkungen entlang den Kanälen 2b und 4b. Sie sank im bestrahlten Bereich auf 65 % in Kanal 2b, bzw. auf 50 % in Kanal 4b. Die beiden Linien begrenzen den Bereich, in dem die Kanäle mit 90 % der maximalen Intensität bestrahlt wurden.

beginnt etwa $50 \mu\text{m}$ nach der Rissstelle. Durch EDS-Analyse (Kapitel 4.4.3) wurde Sauerstoff und Kohlenstoff in der Ablagerung detektiert. Unter der rissigen, abgelagerten Schicht war teilweise das Gold der Drahtoberfläche zu erkennen. Auf den beiden anderen Anodendrähten der in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ betriebenen Strawtubes wurden Ablagerungen gleicher Art in den bestrahlten Bereichen entdeckt.

Abbildung 7.11 zeigt einen Drahtabschnitt aus Kanal 5b. Dieser Kanal wurde auch mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ gespült, aber nicht unter Bestrahlung betrieben. In den dunkel erscheinenden Stellen wurde durch EDS Kohlenstoff nachgewiesen.

In Abbildung 7.12 ist eine mit dem REM gemachte Aufnahme eines bestrahlten Drahtabschnitts aus Kanal 5a dargestellt. Dieser Kanal wurde mit Ar/CO_2 unter Bestrahlung betrieben. Dabei wurde am Anodendraht eine maximale Ladung von 770 mC/cm angesammelt. Auf der Drahtoberfläche sind vereinzelte dunkle Punkte zu erkennen. Mit EDS konnten sie als kohlenstoffhaltige Ablagerungen identifiziert werden. Weitere Unterschiede zu einem neuen Draht konnten nicht gefunden werden.

7.1.4 Fazit aus diesem Betriebstest

Sowohl im Verlauf der relativen Gasverstärkungen über die angesammelten Ladungen in den bestrahlten Kanälen, als auch in Abbildung 7.7 ist zu erkennen, dass die Gasverstärkung zuerst abnahm, nach weiterer Bestrahlung jedoch wieder anstieg. Ähnliches wurde während des Testbetriebs einer Kammer beobachtet, die mit $\text{Ar}/\text{CH}_4/\text{CF}_4$ betrieben wurde, um Alterungseffekte zu provozieren (Kapitel 4.3). Dort traten entgegenwirkende Effekte auf (Polymerisation \leftrightarrow Ätzen), die unterschiedlich stark von

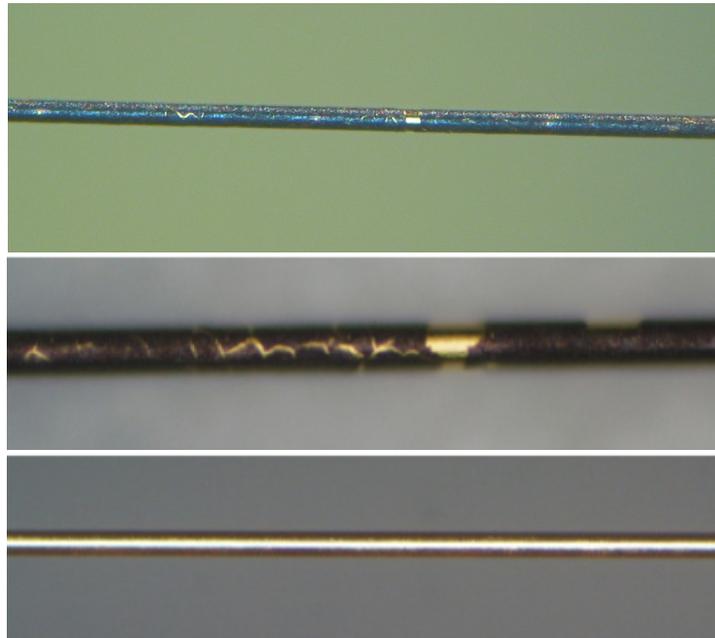


Abbildung 7.9: Bestrahlte Stellen von Anodendrähten unter dem Lichtmikroskop betrachtet. **Oben:** Draht aus Kanal 3b (mit Drahtpositionierer), betrieben in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$. **Mitte:** Draht aus Kanal 4b (ohne Drahtpositionierer), betrieben in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$. Der Draht riss während des Betriebs. **Unten:** Draht aus Kanal 5a (in Ar/CO_2 betrieben). An ihm sind keine Unterschiede zu einem neuen Draht zu sehen.

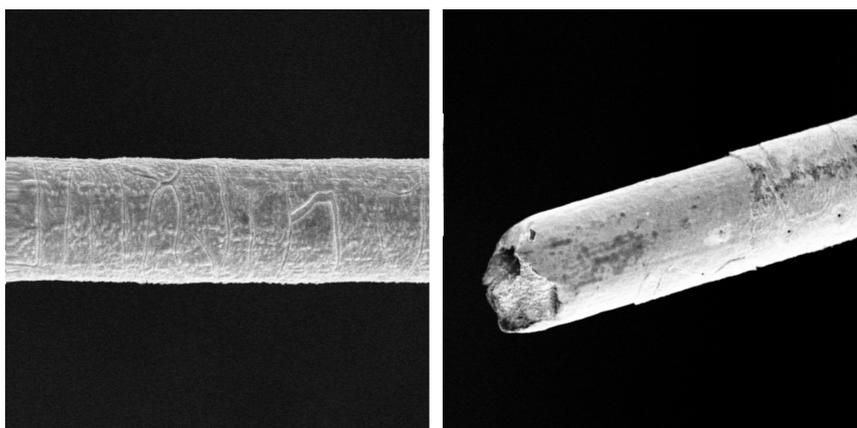


Abbildung 7.10: REM-Aufnahmen bestrahlter Anodendrähte aus der mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ betriebenen Kammer. Links ist ein Ausschnitt des Drahtes aus Kanal 3b zu sehen. Rechts ist der gerissene Draht aus Kanal 4b gezeigt.

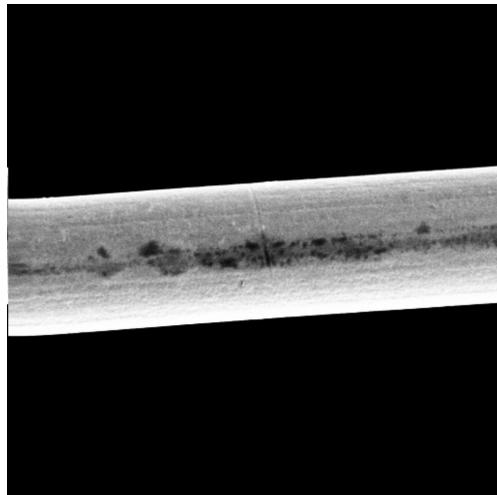


Abbildung 7.11: REM-Aufnahmen vom Anodendraht aus Kanal 5b. Das Zählgas war Ar/CO₂/CF₄. Der Kanal wurde nicht unter Bestrahlung betrieben.

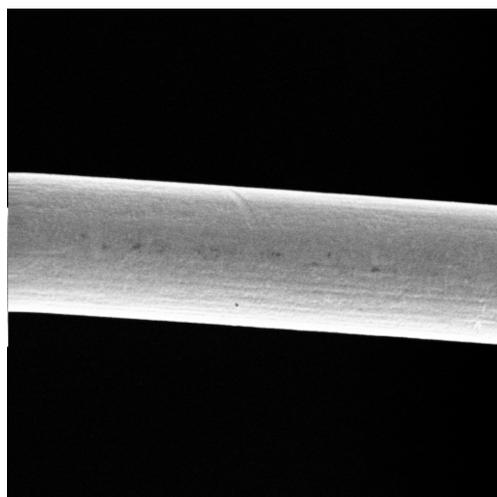


Abbildung 7.12: REM-Aufnahmen vom Anodendraht aus Kanal 5a. Das Zählgas war Ar/CO₂. Der Kanal wurde unter Bestrahlung betrieben. Im Maximum wurden pro cm Drahtlänge an der Anode 770 mC angesammelt.

verschiedenen Parametern abhängen, so dass abhängig von der Strahlintensität die Gasverstärkung rapide abnahm, bzw. wieder zunahm.

Die Ablagerungen, die sich während der Betriebstests auf den Drähten gebildet haben, sind die wahrscheinliche Ursache für den Verlust der Gasverstärkung. Ätzprozesse lösten vermutlich zuerst die Ablagerung und griffen dann die Anodendrähte an, weshalb kurz vor der Zerstörung der Drähte die Gasverstärkung wieder anstieg.

Im Unterschied zu bisher durchgeführten Alterungs- und Betriebstests, wurden hier Strawtubes bestrahlt, die mit Endstücken und Drahtpositionierern aus Noryl bestückt waren. Die erste Vermutung war daher, dass mit dem CF_4 -haltigen Zählgas und unter Bestrahlung das Noryl angegriffen wurde (von Fluorradikalen oder Flusssäure). Dagegen spricht aber, dass in den beiden Kanälen ohne Drahtpositionierern die Gasverstärkung stärker abnahm, als in den intensiver bestrahlten Strawtubes mit Drahtpositionierern. (Die Ursache dafür ist nicht verstanden.) Außerdem konnten an den Kleinteilen aus Noryl keine Beschädigungen oder Veränderungen festgestellt werden.

Als weiterer Unterschied zu bisherigen Tests wurde das zweite Doppelkammermodul über eine größere Fläche bestrahlt. Statt über 4 cm wurden die Strawtubes hier über mehr als 10 cm Länge bestrahlt. Eine Abhängigkeit von Alterungseffekten und bestrahlter Fläche konnte bereits bei früheren Betriebs- und Alterungstests verschiedener, mit Zählgas betriebener Teilchendetektoren beobachtet werden [32].

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Kammer während der Produktion verunreinigt wurde und die Verunreinigungen Alterungseffekte verursachten. Dagegen spricht jedoch, dass die Kammern des Doppelkammermoduls parallel produziert wurden. Eine nachträgliche Verunreinigung kann ausgeschlossen werden, da beide Gassysteme mit installiertem Doppelkammermodul auf Gasdichtigkeit getestet wurden und gasdicht waren.

Trotz sorgfältiger Auswahl und reinlicher Montur aller Einzelteile, kann auch eine Verunreinigung des Gassystems nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Beobachtungen bei den weiteren Betriebstests sprechen jedoch dagegen (siehe folgender Abschnitt).

Festzuhalten bleibt, dass bei zwei parallel durchgeführten Alterungstests, unter fast gleichen Bedingungen, beim Betrieb mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ in allen bestrahlten Strawtubes deutliche Alterungseffekte auftraten und zwei von vier bestrahlten Anodendrähte gerissen sind. Sie hielten bis zu einer angesammelten Ladung von etwa 600 mC/cm. Dies entspricht der erwarteten maximalen Ladungsansammlung in einem Driftkammermodul während drei Jahren Betrieb im LHCb-Experiment. In der mit Ar/CO_2 betriebenen Kammer konnten dagegen keine signifikanten Alterungseffekte festgestellt werden.

7.2 Weitere Betriebstests mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ und neuem Doppelkammermodul

Für die weiteren Betriebstests wurde ein drittes Doppelkammermodul (Doppelkammer 3) produziert, identisch zum zweiten (Doppelkammer 2, Abbildung 7.1). Es wurden parallel zwei Testläufe mit dem Zählgas $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ durchgeführt. Es sollte die Reproduzierbarkeit der Alterungseffekte und ihre Abhängigkeit von der Größe der

bestrahlten Fläche untersucht werden.

7.2.1 Die Betriebsbedingungen und das Langzeitverhalten

Betriebsbedingungen

Beide Kammern des Doppelkammermoduls wurden mit Ar/CO₂/CF₄ bei einem Gasfluss von 1,4 Kammervolumen pro Stunde betrieben. Kammer B wurde unter gleich intensiver Röntgenstrahlung und mit den gleichen Parametern betrieben, wie die mit Ar/CO₂/CF₄ betriebene Kammer von Doppelkammer 2 (Kapitel 7.1.2). Kammer A wurde zum Großteil mit Bleiplatten abgedeckt, so dass 2 Strawtubes über eine Länge von jeweils 8 cm bestrahlt wurden und 2 Strawtubes über eine Länge von jeweils 4 cm. Damit sollte die Abhängigkeit von Alterungseffekten und bestrahlter Fläche untersucht werden. In Tabelle 7.2 sind die Betriebsparameter für die bestrahlten Strawtubes aufgelistet. Im Strahlmaximum lagen die Anodenströme zwischen 800 nA/cm und 1000 nA/cm, die Raten zwischen 500 kHz/cm und 570 kHz/cm.

Die beiden Gassysteme für das Doppelkammermodul wurden gegeneinander ausgetauscht. Falls Verunreinigungen im Gassystem die Alterungseffekte in Kammer B von Doppelkammer 2 verursacht hatten, war davon auszugehen, dass ähnliche Alterungseffekte in Kammer A von Doppelkammer 3 auftreten würden. Die bei diesem Betriebstest gemachten Beobachtungen zeigen jedoch keine Anzeichen von Verunreinigungen im Gassystem.

	Kammer A				Kammer B			
	Ar/CO ₂ /CF ₄							
HV	1550 V							
Kanal	4a	5a	6a	7a	1b	2b	3b	4b
Drahtpositionierer	nein	nein	ja	ja	ja	ja	nein	nein
bestrahlte Länge	4 cm	4 cm	8 cm	8 cm	keine Bleiabdeckung, min. 10 cm			
mC/cm	(1090)	(1090)	1090	1040	1100	970	(450)	(650)
Beschl.	45	45	45	45	50	40	40	40

Tabelle 7.2: Die Betriebsparameter für die bestrahlten Strawtubes des dritten Doppelkammermoduls. Für die Kanäle 4a, 5a, 3b und 4b wurden die angesammelten Ladungen abgeschätzt, basierend auf den gemessenen Ladungsansammlungen in den anderen Kanälen. In Kanal 3b riss der Anodendraht nach 450 mC/cm, in Kanal 4b nach 650 mC/cm.

Das Verhalten von Doppelkammer 3 im Betrieb

Die Diagramme in Abbildung 7.13 zeigen den Verlauf der Gasverstärkungen über die angesammelten Ladungen in den bestrahlten Kanälen aus Kammer A. Weder in den Kanälen 4a und 5a, die über eine Länge von 4 cm bestrahlt wurden, noch in den

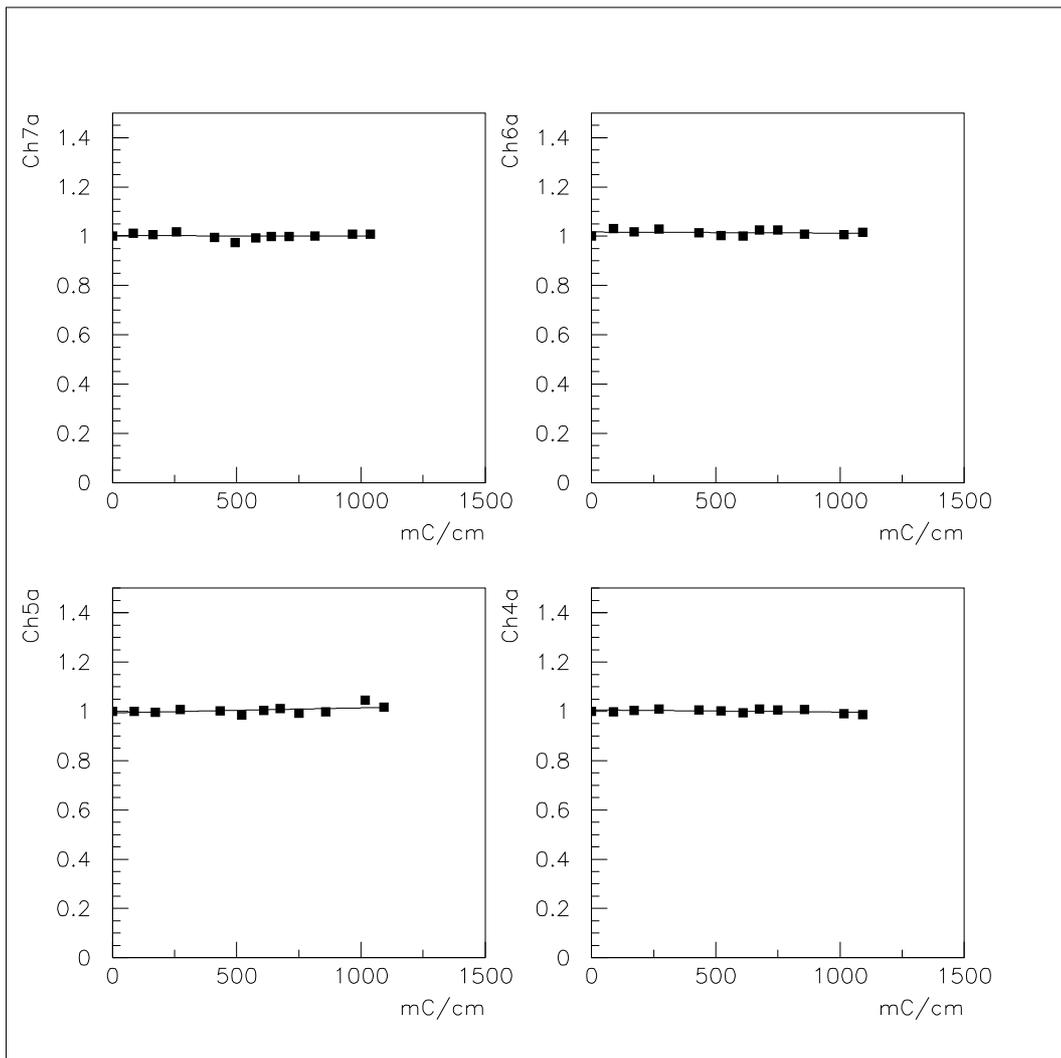


Abbildung 7.13: Die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen in den Kanälen 4a, 5a (jeweils 4 cm bestrahlt), 6a und 7a (jeweils 8 cm bestrahlt). Die Gasverstärkung wurde jeweils an Position 240 gemessen (Abbildung 7.1).

Kanälen 6a und 7a sind signifikante Änderungen der Gasverstärkung zu erkennen. Die Diagramme in Abbildung 7.14 zeigen die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen für die bestrahlten Kanäle aus Kammer B. In Kanal 3b riss der Anodendraht nach 450 mC/cm angesammelter Ladung. Bis dahin konnten keine Änderungen der Gasverstärkung beobachtet werden. Der Anodendraht aus Kanal 4b riss nach 650 mC/cm angesammelter Ladung. Im Gegensatz zu Kanal 3b, konnte hier eine Änderung der Gasverstärkung beobachtet werden. Sie ist auf 90 % gesunken und stieg wieder auf 95 %, bevor der Draht riss. In den Kanälen 1b und 2b sank die Gasverstärkung leicht. Die angepassten Geraden entsprechen einem Abfall von 2,6 % (Kanal 1b), bzw. 4,6 % nach 1 C/cm angesammelter Ladung.

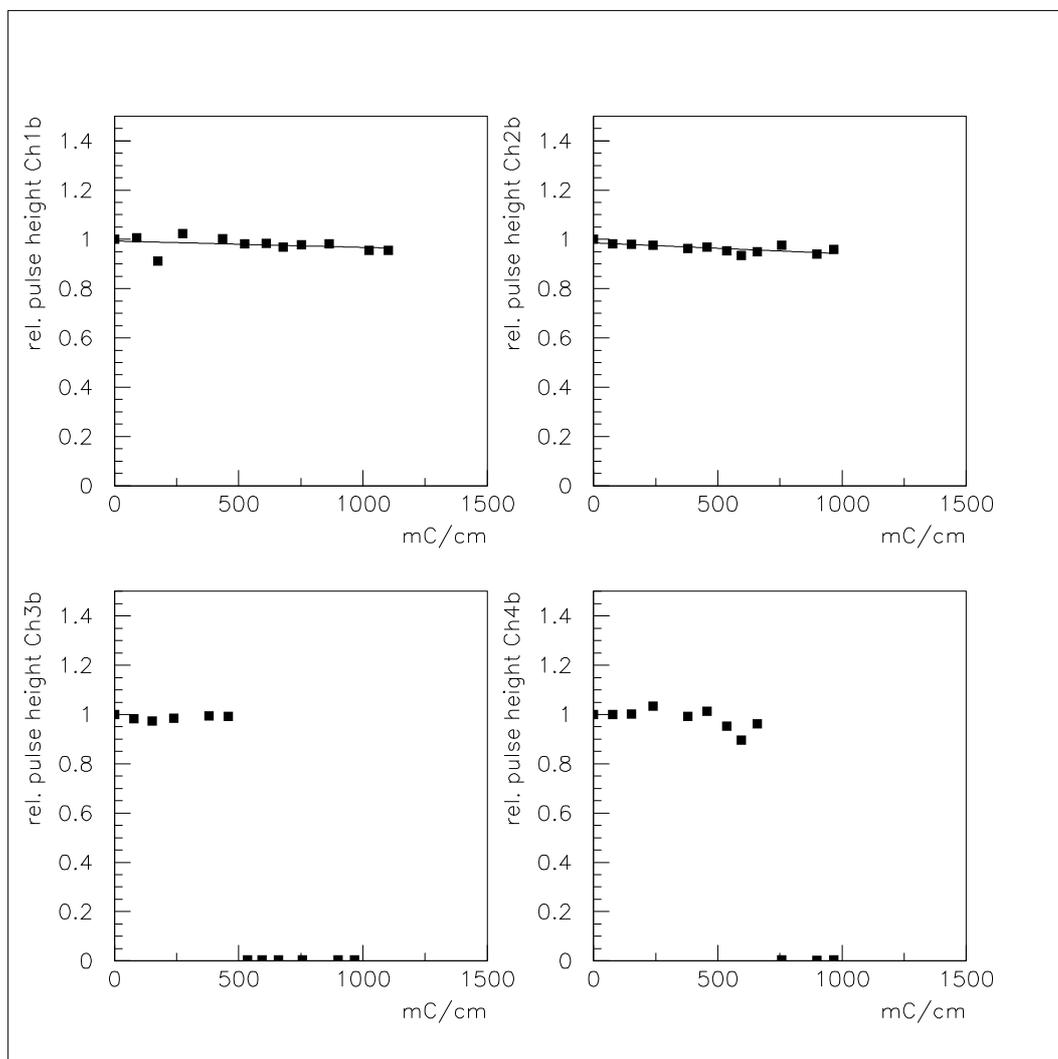


Abbildung 7.14: Die relativen Gasverstärkungen aufgetragen über die angesammelten Ladungen in den Kanälen 1b bis 4b. In Kanal 3b riss der Anodendraht nach 450 mC/cm, in Kanal 4b nach 650 mC/cm, jeweils im bestrahlten Bereich. Die Gasverstärkung wurde jeweils an Position 240 gemessen.

Sofern sie noch intakt waren, wurden für alle Kanäle die Gasverstärkungen vor und nach der Bestrahlung entlang der Strawtubes gemessen. In den Kanälen 4a und 5a konnte an keiner Stelle ein signifikanter Unterschied vor und nach der Bestrahlung erkannt werden (Abbildung 7.15).

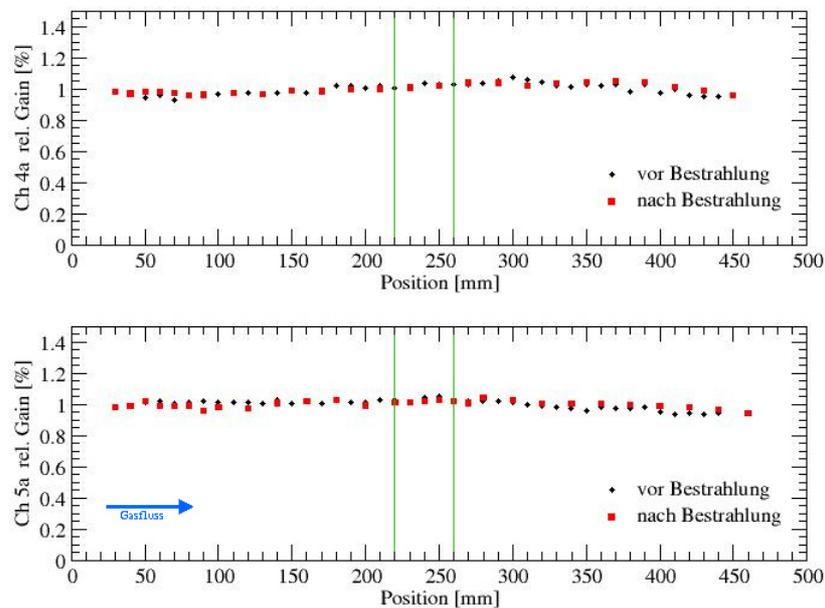


Abbildung 7.15: Die relativen Gasverstärkungen entlang der Kanäle 4a und 5a vor und nach der Bestrahlung (1090 mC/cm). Der bestrahlte Bereich lag zwischen den beiden Linien.

In Abbildung 7.16 sind die Gasverstärkungen vor und nach der Bestrahlung entlang der Kanäle 6a und 7a aufgetragen. Am unteren Ende Richtung Gaseinlass der Kammer wurde in beiden Kanälen ein Absinken der Gasverstärkung auf 73 %, bzw. 65 % gemessen. In Kanal 6a sank sie auch an Position 300 (1 cm oberhalb des Drahtpositionierers) auf 63 %. Im Vergleich zu den Messungen an Doppelkammer 2, war hier ein Absinken der Gasverstärkung über kürzere Abschnitte zu sehen (1 cm bis 2 cm).

In Abbildung 7.17 sind die Gasverstärkungen vor und nach der Bestrahlung entlang der Kanäle 1b und 2b aufgetragen. Wie in den Kanälen 6a und 7a konnte auch hier in Richtung Gaseinlass ein Rückgang der Gasverstärkung gemessen werden, allerdings über einen längeren Abschnitt. Sie sank jeweils auf etwa 60 %. In beiden Kanälen wurde 1 cm oberhalb des Drahtpositionierers nach der Bestrahlung eine um etwa 10 % niedrigere Gasverstärkung gemessen als vor der Bestrahlung.

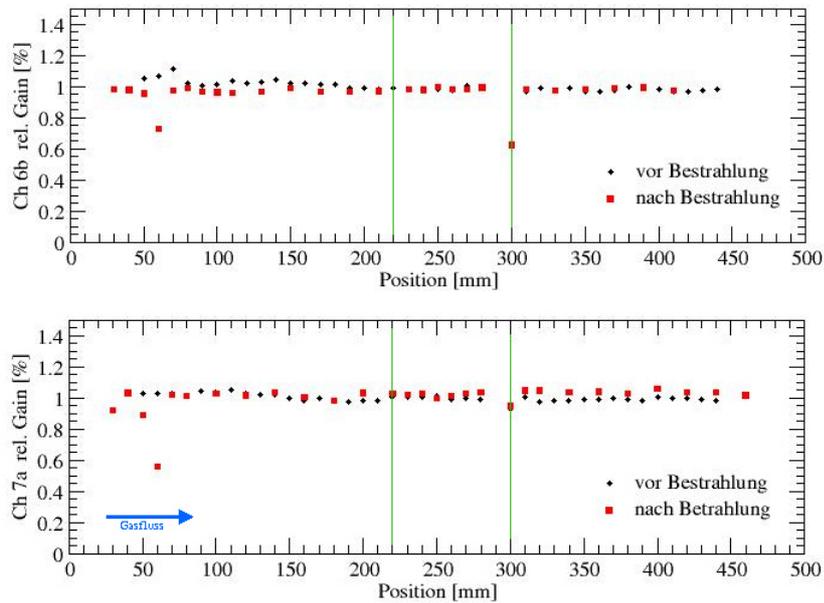


Abbildung 7.16: Die relativen Gasverstärkungen entlang der Kanäle 6a und 7a vor und nach der Bestrahlung (1090 mC/cm bzw. 1040 mC/cm).

7.2.2 Untersuchung der bestrahlten Kanäle

Nach der Bestrahlung wurden beide Kammern der Doppelkammer 2 geöffnet und die Anodendrähte freigelegt. Mit bloßem Auge waren Verfärbungen des Drahtes im bestrahlten Bereich zu sehen. Selbst unter dem Lichtmikroskop war aber nicht zu erkennen, ob die Goldoberfläche angegriffen wurde, oder ob sich auf ihr Ablagerungen bildeten. So starke Ablagerungen wie auf manchen Drähten der Doppelkammer 2 wurden auf keinem Draht der Doppelkammer 3 gefunden. Abbildung 7.18 zeigt einen bestrahlten Bereich des Anodendrahtes von Kanal 3b mit dem Lichtmikroskop betrachtet.

Mit dem REM und durch EDS wurden bestrahlte und unbestrahlte Drahtabschnitte analysiert. In Abbildung 7.19 sind Aufnahmen von bestrahlten Drahtabschnitten aus den Kanälen 5a, 7a und 1b dargestellt. Durch EDS wurden in den dunklen Flecken auf den Drahtoberflächen außer Gold auch Kohlenstoff nachgewiesen. Das war charakteristisch für alle bestrahlten Drahtabschnitte. Auf dem Draht aus Kanal 7a wurden außerdem an einzelnen Stellen Sauerstoff und ein erhöhter Wolframanteil detektiert. Abbildung 7.20 zeigt eine gerissene Stelle des Anodendrahtes aus Kanal 3b. Ungefähr 50 μm von der gerissenen Stelle entfernt wurde durch EDS neben Gold auch Kohlenstoff, Sauerstoff und Wolfram nachgewiesen. Direkt neben der gerissenen Stelle von Kanal 4b wurden ebenfalls C und O, aber kein Wolfram gefunden.

In Abbildung 7.21 ist ein unbestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 2b dargestellt. An dieser Stelle wurde nach der Bestrahlung eine um 40 % niedrigere Gasverstärkung

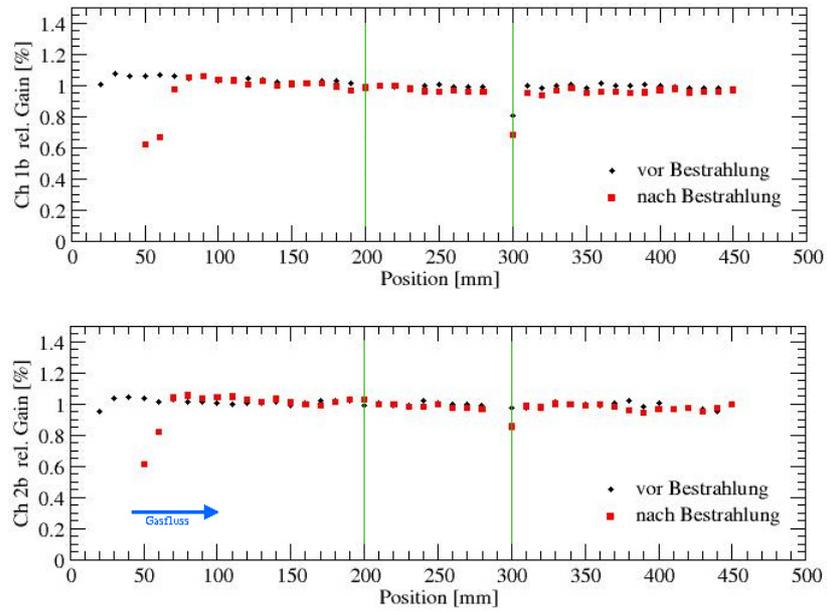


Abbildung 7.17: Die relativen Gasverstärkungen entlang der Kanäle 1b und 2b vor und nach der Bestrahlung (1100 mC/cm bzw. 970 mC/cm). Die beiden Linien begrenzen den Bereich, in dem die Kanäle mit 90 % der maximalen Intensität bestrahlt wurden.



Abbildung 7.18: Bestrahlter Bereich des Anodendrahtes aus Kanal 3b. Die Verfärbungen auf der Drahtoberfläche sind charakteristisch für die bestrahlten Anodendrähte aus Doppelkammer 3.

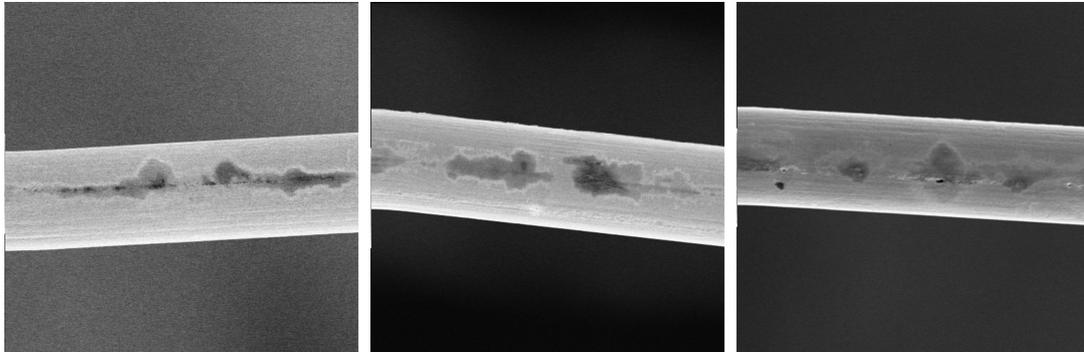


Abbildung 7.19: Bestrahlte Drahtabschnitte aus Kanal 5a (links), 7a (mitte) und 1b (rechts) mit dem REM betrachtet.

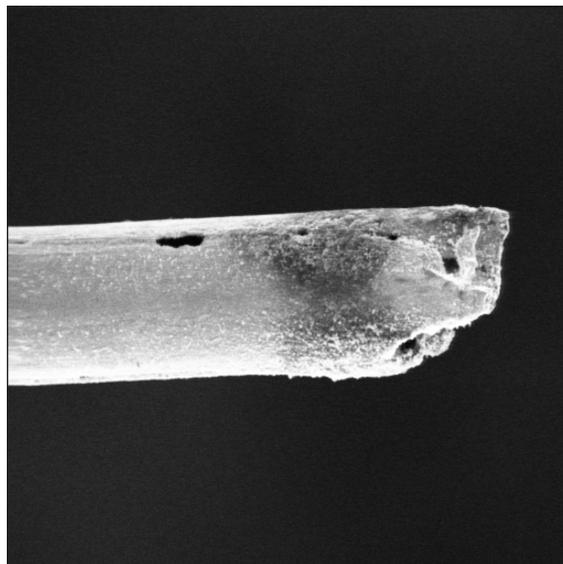


Abbildung 7.20: Gerissener Draht aus Kanal 3b mit dem REM betrachtet.

gemessen, als vor der Bestrahlung. Bei der Betrachtung mit dem REM traten Aufladungseffekte auf, die auf die Bildung einer isolierenden Schicht auf dem Draht hinweisen (Kapitel 6.3.5). Durch EDS konnten auf der Drahtoberfläche neben Gold auch Kohlen- und Sauerstoff nachgewiesen werden. Auch in den Kanälen 6a, 7a und 1b wurden die Drahtabschnitte analysiert, an denen nach der Bestrahlung die Gasverstärkung reduziert war. Auch dort traten die gleichen Aufladungseffekte auf und Kohlen- und Sauerstoff wurden gefunden.

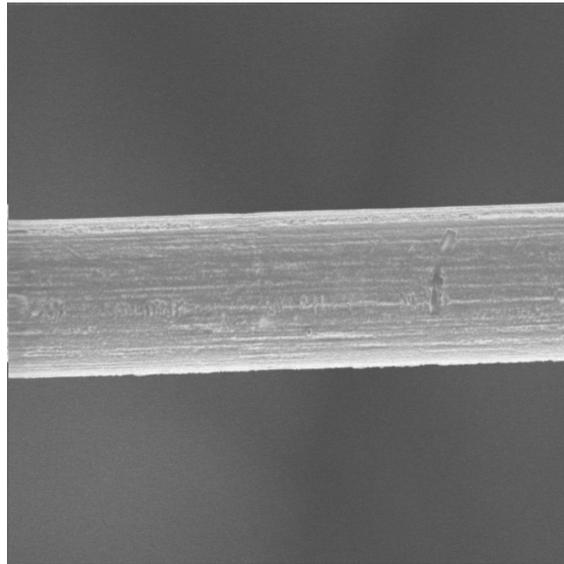


Abbildung 7.21: Unbestrahlter Drahtabschnitt aus Kanal 2b (Position 60). Beim Betrachten mit dem REM traten Aufladungseffekte auf, die auf die Bildung einer isolierenden Schicht hinweisen.

7.2.3 Fazit aus den Betriebstests

Das wesentliche Resultat dieser Betriebstests war, dass wiederum zwei Anodendrähte im bestrahlten Bereich gerissen sind. Wie die weitere Analyse ergab, waren die aufgetretenen Alterungseffekte anderer Art als bei den Betriebstests mit der Doppelkammer 2. Die massiven Ablagerungen auf dem Draht bildeten sich diesmal nicht.

Die bei diesem Betriebstest gemachten Beobachtungen deuten auf eine Abhängigkeit der Alterungseffekte von der Größe der bestrahlten Fläche hin. Je größer der bestrahlte Bereich eines Kanals war, desto größere und mehr Stellen wurden gefunden, an denen die Gasverstärkung deutlich abnahm (Abbildungen 7.15 bis 7.17). Auch die Höhe des Gasverstärkungsverlustes nahm mit der Größe der bestrahlten Fläche zu. In zwei von den insgesamt vier großflächige bestrahlten Kanälen sind zudem die Anodendrähte gerissen.

Neben zwei gerissenen Drähten deutet auch die Analyse der bestrahlten Drahtabschnitten darauf hin, dass die Drahtoberflächen angegriffen wurden. Mit dem REM betrachtet waren auf den Drähten nicht nur dunkle Flecken, sondern auch Vertiefungen zu erkennen. Besonders deutlich war dies im Fall des Drahtes von Kanal 5a. Auf den

Aufnahmen in Abbildung 7.19 sind Vertiefungen leider nicht von schwarzen Flecken zu unterscheiden. Auch die nachgewiesenen Spuren von Wolfram auf der Drahtoberfläche in Kanal 7a sind ein Hinweis darauf, dass der Draht angegriffen wurde.

Die bei diesem Betriebstest beobachteten Alterungseffekte gleichen in hohem Maße solchen aus früheren Betriebs- und Alterungstests (Kapitel 5.3 und 6.3.5). Insbesondere konnte bereits bei früheren Tests mit Ar/CO₂/CF₄ festgestellt werden, dass sich außerhalb der bestrahlten Bereiche isolierende Schichten auf den Drähten bildeten. Die gemachten Beobachtungen bestätigen die Abhängigkeit der Alterungseffekte von der Größe der bestrahlten Fläche. So massive Ablagerungen auf den Anodendrähten wie in Doppelkammer 2 wurden nach diesem Betriebstest nicht gefunden.

Kapitel 8

Vergleich zwischen den Zählgasen Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Betriebs- und Alterungstests mit den Zählgasen Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ durchgeführt. In diesem Kapitel werden ihre Eigenschaften, das Betriebsverhalten und die Ergebnisse der Alterungstests verglichen und der Einfluss des verwendeten Zählgases auf das LHCb-Experiment diskutiert. Gemeinsam mit den bekannten Fakten bilden die gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage für die Bewertung, ob die Zählgase für den Betrieb des Äußeren Spurkammersystems von LHCb tauglich sind.

8.1 Die Zählgase und die Betriebseigenschaften im Vergleich

Die Gasverstärkung

Unter Bestrahlung durch eine ⁵⁵Fe-Quelle wurde die *effektive Gasverstärkung* (Kapitel 3.1) mit dem gemessenen Anodenstrom und der gemessenen Ereignisrate nach Gleichung 6.2 für Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ berechnet. Nach [41] erzeugen die 5,9 keV-Photonen der ⁵⁵Fe-Quelle ungefähr 190 Primärelektronen in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) und 210 in Ar/CO₂ (70:30). In Abbildung 8.1 sind die effektiven Gasverstärkungen über die Betriebsspannungen der Strawtubes in beiden Zählgasen aufgetragen. Wie erwartet, ist die effektive Gasverstärkung bei gleicher Betriebsspannung in Ar/CO₂/CF₄ aufgrund des größeren Attachment-Koeffizienten kleiner als in Ar/CO₂. Der Verlust von Primärelektronen durch Elektronenanlagerung muss durch höhere Betriebsspannung (\Rightarrow höhere Gasverstärkung am Anodendraht) ausgeglichen werden.

Die Ratenkapazität

Bei gleicher effektiven Gasverstärkung zeigen die Messungen aus Kapitel 6.2.2 keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ratekapazitäten in den beiden Zählgasen.

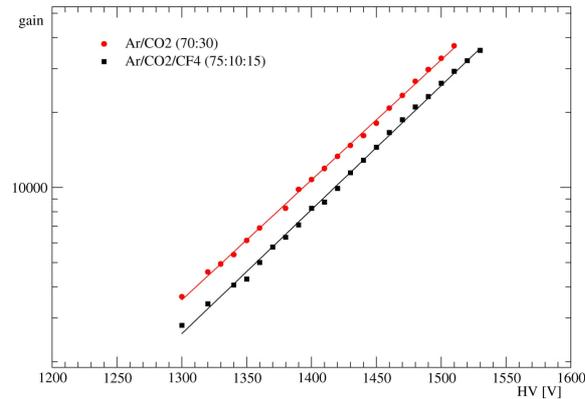


Abbildung 8.1: Die effektive Gasverstärkung in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) und Ar/CO₂ (70:30) aufgetragen über die Betriebsspannung.

Plateaumessungen mit ⁵⁵Fe- und ¹⁰⁶Ru-Quelle

Im Rahmen seiner Diplomarbeit hat R.Ruschmann die Plateaukurven für verschiedene Zählgasgemischungen gemessen [16]. In Tabelle 8.1 sind die Betriebsspannungen von Plateauanfang und -ende eingetragen. Im Plateaubereich ist die Zählrate der Strawtubes unabhängig von der angelegten Spannung. Der Plateauanfang hängt von der

Gasmischung Ar:CO ₂ :CF ₄ [%]	⁵⁵ Fe Plateau [V]	¹⁰⁶ Ru Plateau [V]	Streamer Limit [V]	Energieaufl. (FWHM) [%]
75:10:15	1340-1640	1540-1760	1760	35,7
70:30:0	1320-1620	1540-1750	1750	24,7

Tabelle 8.1: Betriebseigenschaften mit den beiden Zählgasen im Vergleich [16].

Triggerschwelle für ein Signal ab. Daher war die Schwelle bei allen Messungen gleich eingestellt. Das ⁵⁵Fe-Plateau beginnt in Ar/CO₂/CF₄ bei höherer Spannung, aber etwa bei der gleichen effektiven Gasverstärkung wie in Ar/CO₂.

Mit dem β -Strahler ¹⁰⁶Ru wurden die Plateaus für MIPs gemessen. Es beginnt und endet für beide Zählgase bei etwa denselben Spannungen. Die Enden der ¹⁰⁶Ru-Plateaus wurden durch das Streamer-Limit bestimmt. Das Streamer-Limit ist die Spannung, bei der sich selbstlöschende *Streamer* mit einer Häufigkeit von 10⁻⁴ im Strawtube bilden. Der geringe Unterschied der Plateaus in den beiden Gasmischungen ist für das LHCb-Experiment unwesentlich.

Die Streamerhäufigkeiten

R.Ruschmann hat für verschiedene Gasmischungen die Streamerhäufigkeiten unter Bestrahlung mit einer ⁵⁵Fe-Quelle gemessen (Abbildung 8.2). Das Streamer-Limit wurde mit der Streamerhäufigkeit von 10⁻⁴ definiert (Tabelle 8.1). Für Ar/CO₂ (70:30) liegt

das Streamerlimit bei niedriger Betriebsspannung, aber bei höherer Gasverstärkung als in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15). Der gemessene Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

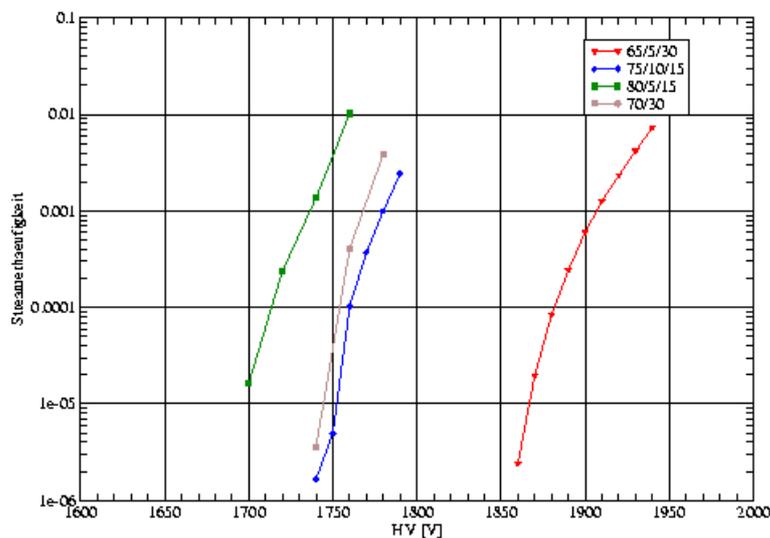


Abbildung 8.2: Streamerhäufigkeiten bei unterschiedlichen Gaszusammensetzungen [16].

Die Energieauflösung

Abbildung 8.3 zeigt ⁵⁵Fe-Spektren in den beiden Zählgasen bei etwa der gleichen effektiven Gasverstärkung. Wegen dem höheren Attachment (Kapitel 1.7) durch den

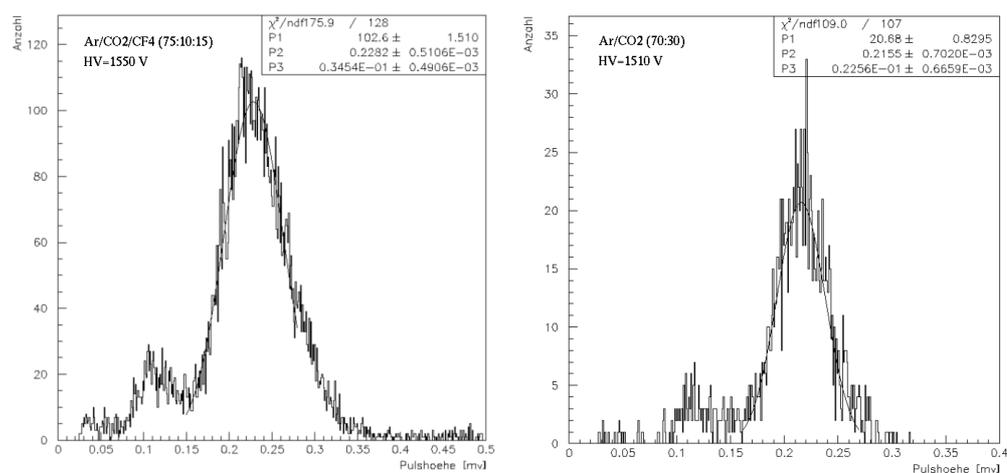


Abbildung 8.3: ⁵⁵Fe-Spektren in Ar/CO₂/CF₄ und Ar/CO₂ jeweils bei einer effektiven Gasverstärkung von ungefähr 40000.

CF_4 -Anteil ist die Energieauflösung in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ schlechter als in Ar/CO_2 (Tabelle 8.1).

Die Driftzeitspektren

Die Driftzeitspektren in den Strawtubes für beide Zählgase wurden in einem aus drei doppelagigen Testkammern bestehenden Messstand für kosmische Myonen aufgenommen. Die Messungen wurden von T.Haas im Rahmen ihrer Diplom- und anschließender Doktorarbeit durchgeführt [24]. In Abbildung 8.4 sind Driftzeitspektren bei einer effektiven Gasverstärkung von ungefähr 40000 dargestellt. Durch den CF_4 -Anteil ist

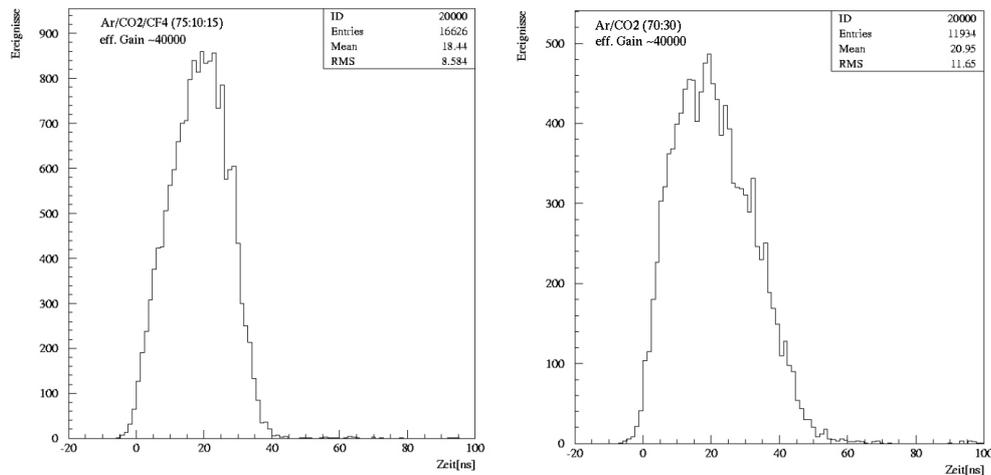


Abbildung 8.4: Driftzeitspektren in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ und Ar/CO_2 jeweils bei einer effektiven Gasverstärkung von ungefähr 40000 [24].

die Driftzeit im Strawtube mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ kürzer als in Ar/CO_2 . 95 % der Signale liegen in einem Driftzeitintervall von etwa 32 ns, bzw. 42 ns. Die ansteigende Flanke im Spektrum ist mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ weniger steil als mit Ar/CO_2 . Die Ursache ist der höhere Verlust von Primärelektronen durch das höhere Attachment.

Wegen der höheren maximalen Driftzeit in Ar/CO_2 können die Teilchensignale im LHCb-Experiment erst nach 75 ns ($\cong 3$ LHC *bunch crossings*¹) aus den Driftkammermodulen gelesen werden, statt nach 50ns ($\cong 2$ LHC *bunch crossings*).

Räumliche Auflösung und Effizienz

Es wird erwartet, dass das mit dem CF_4 -Anteil ansteigende Attachment die räumliche Auflösung im Strawtube beeinflusst. Der mögliche Verlust der Elektronen, die in kürzester Distanz zum Draht erzeugt werden, verschlechtert die räumliche Auflösung. Im Jahr 2000 wurde von der LHCb OT-Gruppe von NIKHEF [43] am PS Beschleuniger am CERN mit kleinen Prototypen ein Strahltest durchgeführt [1] [42]. In Abbildung 8.5 sind die dort gemessenen räumlichen Auflösungen und Effizienzen in $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$

¹ *bunch crossing* = Kollision der Teilchenpakete

(75:10:15) und Ar/CO₂ (80:20) dargestellt. Bei jeweils 95 % Effizienz ist die räumliche Auflösung in Ar/CO₂/CF₄ wie erwartet schlechter als in Ar/CO₂.

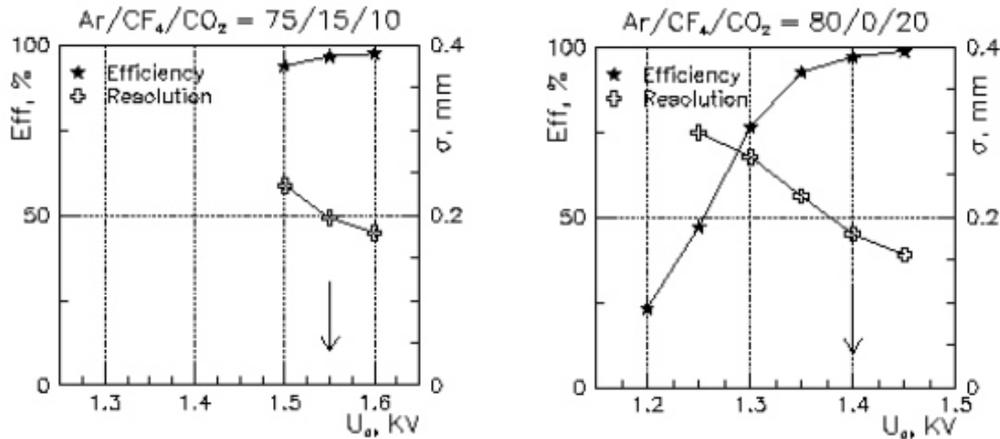


Abbildung 8.5: Räumliche Auflösung und Effizienz in Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15) und Ar/CO₂ (80:20) [42]. Die Pfeile markieren jeweils den Arbeitspunkt bei dem die Effizienz 95 % erreicht.

Um die Driftkammermodule mit gleicher Effizienz zu betreiben, muss mit steigendem CF₄-Anteil die Betriebsspannung erhöht werden, um den Verlust durch Elektronenlagerung mit einer höheren Gasverstärkung am Anodendraht auszugleichen. Der dynamische Bereich für die Signale wird dabei breiter und der Anteil großer Signale steigt. Ein steigender Anteil großer Signale erhöht den digitalen Crosstalk (Kapitel 3.3).

Folgen für das LHCb-Experiment

Mit der Reoptimierung des LHCb-Detektors seit dem *Outer Tracker Technical Design Report* [1] fielen vier Spurkammerstationen weg, von denen sich drei im Magneten befanden [44]. Mit den Stationen im Magneten war die Forderung nach einem schnellen Zählgas von noch höherer Bedeutung, da die Driftgeschwindigkeit im Magnetfeld abnimmt. Beim Strahltest am PS Beschleuniger am CERN im Jahre 2000 wurde für Ar/CO₂/CF₄ (75:10:15 Vol.-%) ein Anstieg der Driftzeitspektren von 32,5 ns (B = 0 T) auf 40,9 ns (B = 1,37 T) gemessen [1] [42]. Der LHCb-Magnet hat im Maximum eine Feldstärke von 1,1 T.

Aber auch ohne die Spurkammerstationen im Magneten sind mit dem langsameren Zählgas Ar/CO₂ drei *bunch crossings* (75 ns) notwendig statt zwei (50 ns) um die Signale der Driftkammermodule auszulesen. Damit erhöht sich im wesentlichen die Occupancy, mit der die Anzahl falsch rekonstruierter Spuren ansteigt, während die Effizienz der Spurerkennung fällt [45].

Durch die Einsparung von Detektormaterial und durch ein neues, dünneres Strahlrohr beim reoptimierten LHCb-Detektor wird bei einem Ereignis die Anzahl der Sekundärteilchen und die Anzahl der *Hits* verringert. An der in Strahlrichtung ersten Station im Magneten wurde ursprünglich eine maximale Occupancy von 15 % erwartet

[1]. An der Station ST1 des optimierten Detektors liegt die erwartete maximale Occupancy bei 5,9 % (ursprünglich 6,6 %) [45].

Ein erneuter Anstieg der Occupancy verschlechtert zwar die Spurrekonstruktion, kann aber toleriert werden, da die maximale Occupancy nicht so hoch wie ursprünglich erwartet wird. Die Verschlechterung der Effizienz der Spurerkennung und die steigende Anzahl falsch rekonstruierter Spuren wird zumindest teilweise durch die bessere räumliche Auflösung in Ar/CO₂ gegenüber Ar/CO₂/CF₄ ausgeglichen.

8.2 Bewertung der Betriebs- und Alterungstests

8.2.1 Alterungstests in der Röntgenanlage

Bei all unseren Tests traten zum Teil unterschiedliche Alterungseffekte auf, die nicht in ein gemeinsames Bild passen. Im Folgenden werden mögliche Ursachen für die Alterungsprozesse diskutiert.

Kammermaterialien

Während dem Alterungstest, bei dem zum erstmalig Strawtubes mit eingebauten Drahtpositionierern aus Noryl bestrahlt wurden, bildeten sich kohlenstoff- und sauerstoffhaltige Ablagerungen auf den bestrahlten Anoden. Die Gasverstärkung sank dort z.T. um 50 %. Die erste Vermutung war, dass die Norylkleinteile in den bestrahlten Strawtubes die Alterungseffekte verursachten. Möglicherweise wurde Noryl unter Bestrahlung in CF₄-haltigem Zählgas angegriffen.

Dagegen spricht aber, dass im selben Test die gleichen Alterungseffekte in den bestrahlten Strawtubes ohne Drahtpositionierer auftraten. Außerdem konnten an den Norylkleinteilen keine Beschädigungen oder Veränderungen festgestellt werden.

Es ist unwahrscheinlich, dass Kammermaterialien die Alterungseffekte verursachten. Alle verwendeten Materialien und Kleber wurden auf ihre Ausgaseigenschaften und Strahlenhärte getestet [1], [4]. Darüber hinaus wurden alle Kammerkomponenten gereinigt und die Kammern im Reinraum produziert (Kapitel 2.1.2). Wenn die Kammermaterialien schuld wären sollte man auch mit trockenem Ar/CO₂ Effekte beobachten können.

Bestrahlte Strawtubelänge

In vielen Studien wurde festgestellt, dass Alterungseffekte von der bestrahlten Fläche abhängen, z.B. [31] und [32]. Bei unseren Alterungstests wurden Strawtubes über 4 cm bis 10 cm bestrahlt. Beim parallelen Betrieb mehrerer Strawtubes mit Ar/CO₂/CF₄ und Bestrahlungen über 4 cm, 8 cm und 10 cm, wurden mit zunehmend bestrahlter Strawtubelänge stärkere Alterungseffekte beobachtet. Die Bildung isolierender Schichten außerhalb des bestrahlten Bereichs nahm zu.

Von den 5 Strawtubes, deren Anodendrähte während der Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄ gerissen sind, wurden einer über 6 cm und 4 über 10 cm bestrahlt. Insgesamt wurden 9 Strawtubes über 4 cm, 4 Strawtubes über 6 cm, 2 Strawtubes über 8 cm und

8 Strawtubes über 10 cm bestrahlt (Tabelle 8.2). Die bestrahlte Strawtubelänge hat

Anzahl Drähte	Bestrahlte Länge [cm]	Gerissene Drähte
9	4	-
4	6	1
2	8	-
8	10	4
Total 23		5

Tabelle 8.2: Bestrahlte Drähte in Ar/CO₂/CF₄ und wie viel davon gerissen sind.

einen Einfluss auf die Alterungsprozesse und scheinbar auch auf das Drahtätzen.

Verunreinigungen im Gassystem

Manche der Effekte, die bei den Alterungstests der Testkammern auftraten, haben Ähnlichkeit mit Alterungsphänomenen, die bei anderen Tests von Verunreinigungen im Gassystem verursacht wurden, insbesondere von Silizium.

Einiges spricht jedoch gegen eine Verunreinigung des Gassystems. Während eine Doppelkammer parallel mit Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ betrieben wurde, traten nach kurzer Bestrahlungsdauer (0,7 C/cm) bei Ar/CO₂/CF₄ Alterungseffekte auf, wogegen die andere Modulhälfte unbeeinträchtigt blieb. Bei einer Verunreinigung des Gassystems wären in Ar/CO₂ erkennbare Effekte zu erwarten gewesen. Allerdings bildeten sich in Ar/CO₂/CF₄ Ablagerungen im bestrahlten Bereich, trotz der oft beobachteten Eigenschaft von CF₄-haltigen Gasen, Polymerisation zu unterdrücken [39].

Nach gegenseitigem Austausch der Gassysteme und mit neuer, in Ar/CO₂/CF₄ betriebener Doppelkammer, traten erneut Alterungseffekte auf.

An allen untersuchten Drähten fanden wir keine Hinweise auf Verunreinigungen des Gassystems. Speziell Silizium, das mit der Röntgenspektralanalyse nachweisbar ist [5] [9], wurde in keiner der Ablagerungen gefunden. Eine Verunreinigung des Gassystems der Testkammern ist daher nicht sehr wahrscheinlich.

Sowohl Kammer als auch Gassystem wurde mehrmals erfolgreich auf Gasdichtigkeit geprüft. Daher schließen wir auch eine Verunreinigung durch O₂ und N₂ aus.

Mögliche Ursachen für gerissene Anodendrähte

Während der Alterungstests mit Ar/CO₂/CF₄ sind 5 Anodendrähte im bestrahlten Bereich gerissen. An weiteren bestrahlten Drähten wurden Hinweise gefunden, dass der Draht angegriffen wurde.

Es ist unwahrscheinlich, dass die Drähte durch Entladungen oder Überschläge beschädigt wurden. Hinweise auf solche Effekte wären im aufgezeichneten Anodenstrom zu beobachten gewesen.

An keinen der neuen oder unbestrahlten Drahtabschnitten, die mit dem Licht- oder Rasterelektronenmikroskop untersucht wurden, konnten Defekte erkannt werden. Die

Beschädigungen am Draht entstanden während der Bestrahlung.

Die vermutete Ursache für das Drahtreißen sind Ätzprozesse am Draht, hervorgerufen durch plasma-chemische Prozesse mit CF₄ im Gasverstärkungsprozess (Kapitel 6.1).

- In der Plasmachemie dient CF₄ als ätzendes Additiv ([33] und [3]).
- Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Alterungstests wurden bestrahlte Drähte angegriffen, sowohl im trockenen als auch im feuchten Ar/CO₂/CF₄ (0,35 % Wasser).
- Bei den parallel durchgeführten Alterungstests mit Ar/CO₂ wurden keine Drähte angegriffen.
- Aus Alterungsstudien für den ATLAS TRT ist bekannt, dass CF₄-haltige Gasgemischungen mit >0,1 % Wasser im Gasverstärkungsprozess stark ätzende Produkte (HF) bilden, die goldbeschichtete Drähte angreifen können [9].
- Bei Alterungsstudien für das Äußere Spurkammersystem von HERA-B rissen die Anodendrähte in trockenem Ar/CO₂/CF₄. Es wird vermutet, dass atomares Fluor die Drähte angreift [10].

Das alles spricht dafür, dass CF₄ im Gasverstärkungsprozess das Drahtreißen verursacht.

Mögliche Ursachen für die isolierende Schichten

Während des Betriebs der Testkammern in der Röntgenanlage bildeten sich außerhalb der bestrahlten Region isolierende Schichten auf dem Anodendraht, sowohl in trockenem als auch in feuchtem Ar/CO₂/CF₄ (500 ppm Wasser). Damit verbunden war ein Verlust der Gasverstärkung um bis zu 40 %. Die Ablagerungen entstanden mit hoher Wahrscheinlichkeit im Gasverstärkungsprozess. Mit der Röntgenspektroanalyse konnten Kohlenstoff und Sauerstoff nachgewiesen werden. Vermutlich enthalten die Ablagerungen auch Wasserstoff. Die Röntgenspektroanalyse ist allerdings auf Wasserstoff nicht sensitiv.

Eine mögliche Erklärung für die Schichtbildung ist die Erzeugung langlebiger, flüchtiger Verbindungen im Gasverstärkungsprozess, die sich an den Anoden anlagern. Im bestrahlten Bereich können Ätzprozesse die Bildung isolierender Schichten verhindern. Im LHCb-Experiment werden die 5 m langen Driftkammermodule über die gesamte Fläche bestrahlt. Die Bestrahlung ist aber inhomogen. Die Strahlintensität ist in erster Näherung mit r^{-2} vom Abstand r zum Strahlrohr abhängig. Es ist möglich, dass dieser unkontrollierbare Effekt auch global in den Äußeren Spurkammern im LHCb-Experiment auftritt und sich in manchen Bereichen isolierende Schichten auf den Anodendrähnen ablagern.

Mögliche Ursachen für die Ablagerungen in Ar/CO₂

Bei allen Tests mit trockenem Ar/CO₂ konnten keine Alterungseffekte beobachtet werden, die den Betrieb der Driftkammermodule gefährden. Erst durch die Zugabe von Wasser traten mit zunehmender Feuchtigkeit verstärkt Alterungsphänomene auf. Es

bildeten sich ausschließlich im bestrahlten Bereich *Whiskers* (senkrecht abstehende härchenartige Gebilde) und Ablagerungen von Kohlen- und Sauerstoff auf den Anoden.

Bei Alterungsuntersuchungen für den Mikrostreifen-Gasdetektor *MSGC* des Inneren Spurkammersystems von HERA-B konnten im Betrieb mit Ar/CO₂ und 0,3 % Wasser ähnliche Phänomene beobachtet werden. Es gab Ablagerungen auf den Anodenstreifen und in der Ebene der Elektrodenstruktur entwickelten sich Wucherungen von den Anoden zu den Kathoden [12] [34].

Für die *Monitored Drift Tubes* (MDT) des Myonsystems von ATLAS wurden Alterungstests mit Ar/CO₂ (93:7 Vol-%) und 600 ppm Wasser durchgeführt. Nach einer Ladungsansammlung von 2 C/cm am Anodendraht wurden im Betrieb keine Hinweise auf Alterungseffekte gefunden [32]. Dennoch ist das zusätzliche Wasser im Ar/CO₂ die vermutete Ursache für die Alterungseffekte bei unseren Betriebstests. In den *Whiskers* und in den Ablagerungen auf den Drähten wurden ausschließlich Elemente nachgewiesen, die auch im Zählgas enthalten waren.

8.2.2 Alterungseffekte in anderen Detektorsystemen mit CF₄-haltigen Zählgasen

MWPC und Tripple-GEM Detektoren für das Myonensystem von LHCb

Als Zählgas für die Vieldrahtproportionalkammern (*MWPC*) und die Triple-GEM Detektoren des Myonensystems von LHCb ist Ar/CO₂/CF₄ vorgesehen. Bei Alterungstests von Triple-GEM Detektoren sank die Gasverstärkung um 10 % nach 0,15 C/cm² (\cong 1 Jahre LHCb für den Myondetektor). Bei der anschließenden Inspektion wurde festgestellt, dass an den GEM-Folien sowohl die kupfernen Elektrodenstrukturen, als auch die Kaptonfolien geätzt waren, wodurch die elektrische Feldkonfiguration in der Kammer verändert wurde. Die Alterungseffekte traten allerdings nur unter starker Bestrahlung auf, wenn das Verhältnis von Anodenstrom zum Gasfluss wesentlich höher war, als im LHCb-Experiment vorgesehen. Es wird vermutet, dass mit diesem Verhältnis die Menge an dissoziiertem Fluor in der Kammer ansteigt, welches die Kammermaterialien angreift [85].

Nach Alterungstests mit den MWPCs war zu erkennen, dass Kammermaterial (FR4) und Komponenten des Gassystems (Glasoberfläche des Gasflussmessers) angegriffen wurden. Der CF₄-Anteil wird als Verursacher für die Ätzprozesse vermutet. Bei geringerem CF₄-Anteil waren die Prozesse schwächer.

Auf den Drähten von bestrahlten MWPCs wurden Hinweise auf Alterungseffekte gefunden [37].

Zur Zeit werden mögliche Konsequenzen aus den beobachteten Alterungseffekte diskutiert.

Der ATLAS TRT

Bei Alterungstests für den *Transition Radiation Tracker* (TRT) von ATLAS verursachte der CF₄-Anteil im Zählgas Schäden in den Strawtubes. Unter Bestrahlung wurden gläserne Verbindungsstücke für die Anodendrähte in den Strawtubes durch Ätzprozesse

se zerstört [38]. Da die Glasteile unverzichtbar und nicht durch andere Materialien ersetzbar sind, wird das bisher verwendete Zählgas durch CF₄-freies Gas ersetzt.

8.3 Fazit und Ausblick auf anstehende Untersuchungen

Eine der (wenigen) Konstanten bei Alterungstests von Gasdetektoren ist das Auftreten unvorhergesehener Effekte. Die verschiedenen Alterungsphänomene hängen von vielen Parametern ab, die vermutlich selbst dann nicht zu kontrollieren wären, falls sie alle bekannt sein würden.

Besonders für die kommenden LHC-Experimenten ist es absolut notwendig das Langzeitverhalten der Detektoren unter Bestrahlung zu testen. Sie müssen die speziellen Anforderungen in der hohen Umgebungsstrahlung erfüllen können. Außerdem muss ein sicherer Betrieb über die gesamte Dauer des Experiments gewährleistet werden können. Alle erkennbaren Gefahren für den Betrieb der Detektoren müssen möglichst entfernt werden.

Die Ergebnisse unserer Alterungstests in der Röntgenanlage ergeben, dass mit einem CF₄-Anteil im Zählgas das Betriebsverhalten der Driftkammermodule unberechenbar ist und die Kammern zerstört werden können. Daher sollen die Driftkammermodule des Äußeren Spurkammersystems von LHCb mit Ar/CO₂ betrieben werden.

Durch den Verzicht auf das teure CF₄ kann das Äußere Spurkammersystem mit einem offenen Gassystem betrieben werden, in dem sich keine Verunreinigungen ansammeln können. In trockenem Ar/CO₂ gab es keine erkennbaren Alterungseffekte. Allerdings stellt Ar/CO₂ hohe Ansprüche an die Reinheit des Gassystems. Verunreinigungen im Zählgas, wie Silizium aus Schmiermitteln oder Dichtungen im Gassystem, können Polymerisationsprozesse verursachen. Daher müssen alle Komponenten des Gassystems und der Driftkammermodule sorgfältig ausgesucht und getestet werden.

In Kapitel 8.1 sind die Betriebseigenschaften für Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ beschrieben. Der bedeutendste Einfluss auf die Betriebseigenschaft der Strawtubes durch den Verzicht auf den CF₄-Anteil ist die Reduzierung der Driftgeschwindigkeit im Zählgas. Die Erkennung eines Teilchensignals innerhalb der ursprünglich vorgesehenen zwei *bunch crossings* (50 ns) ist wegen der längeren Driftzeit der Elektronen im Strawtube nicht möglich. Der für die Ausleseelektronik vorgesehene OTIS-Chip (Einleitung) ermöglicht die Auslese sowohl innerhalb zweier, als auch dreier *bunch crossings*, weshalb die längere Auslesezeit kein prinzipielles Problem ist. Der Einfluss auf die Physik beim LHCb-Experiment wird von der Kollaboration im Detail untersucht. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass die Nachteile eher gering sind.

Die Serienproduktion der Driftkammermodule für das Äußere Spurkammersystem hat begonnen und die ersten Module sind produziert. Im Spätsommer 2004 sollen am DESY Betriebstests mit einem 5 m langen Driftkammermodul durchgeführt werden. Dabei sollen die Betriebseigenschaften und die Ausleseelektronik getestet werden. Zusätzlich müssen aber auch weitere Alterungstests mit Ar/CO₂ durchgeführt werden. Ideal wären Alterungstests in einer Umgebungsstrahlung, die ähnlich ist zu der im LHCb-Experiment erwarteten. Allerdings gibt es zur Zeit nicht die Möglichkeiten für

Strahlentests in einer solchen Umgebung.

Die zunächst anstehenden Alterungstests sind daher zum einen die Bestrahlung kleiner Prototypen mit 21 MeV Protonen am Beschleuniger vom MPI für Kernphysik in Heidelberg [40]. Zum anderen soll eine Testkammer über eine möglichst große Fläche ($\approx 250 \text{ cm}^2$) in der Röntgenanlage bestrahlt werden, bis zu einer Ladungsansammlung von mindestens 2,5 C/cm. Sobald die Komponenten für das Gassystem des Äußeren Spurkammersystems feststehen, werden weitere Alterungstests notwendig mit Driftkammermodulen in einem Gassystem, das all diese Komponenten enthält.

Mit den Tests soll bestätigt werden, dass wir Driftkammermodule produzieren können, die mit Ar/CO₂ als Zählgas im LHCb-Experiment über die gesamte Laufzeit sicher betrieben werden können.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Unitaritätsdreiecke der CKM-Matrix	3
1.2	Winkelkorrelation der produzierten B-Mesonen	5
1.3	Seitenansicht des LHCb-Detektors	6
1.4	Ereignissimulation im LHCb-Detektor	8
1.5	Das Spurkammersystem	9
1.6	Schematischer Aufbau eines Driftkammermoduls	10
1.7	Anordnung der Driftkammermodule	11
1.8	Funktionsprinzip eines Proportionalzählers	11
1.9	Die Ausleseelektronik	13
1.10	Driftgeschwindigkeit in Ar/CF ₄	15
2.1	Gewickeltes Driftröhrchen	20
2.2	Skizze einer Modullage	24
2.3	Querschnittsskizze der Endstücke	25
2.4	Offene Endstückleiste vom Prototyp	26
2.5	Geschlossene Endstückleiste	26
2.6	Das Mittelstück vom Prototyp	27
2.7	Drahtpositionierer für den Prototyp	28
2.8	Skizze einer Kontaktschraube	29
2.9	Festkleben der Strawtubes vom Prototypen	30
2.10	Vereinigung zweier Lagen zum Modul	31
2.11	Gasversorgung beim Prototypen	31
2.12	Drahtspannung der Anoden im Prototyp	32
2.13	Anodenströme beim HV-Test am offenen Prototypen	33
2.14	Aufbau für Messung der Gasdichtigkeit des Prototypen	34
2.15	Undichtigkeit im kompletten Prototyp	35
2.16	Aufbau eines Strawtubes	39
2.17	Tragevorrichtungen für die Modullagen	41
2.18	Das Template für die Serienproduktion	42
2.19	Querschnitt durch Modulplatte	44
2.20	Positionieren der Trageplatte	44
2.21	Vorbereitung der Strawtubes	45
2.22	Skizze eines Drahtpositionierers	46
2.23	HV-Durchführungsplatine	46
2.24	Längsschnittsskizze vom Template	47
2.25	HV-Durchführungsplatine mit angelöteten Strawtubes	47

2.26	Modulplatte wird auf Strawtubes geklebt	48
2.27	Modullage mit Strawtubes	49
2.28	Aluminium-Endblock	49
2.29	Vereinigung zweier Modullagen	50
2.30	Längsschnitt durch das Driftkammermodul	51
2.31	Messung der Modulkrümmung	53
2.32	Modulbox im Klimazelt	54
2.33	Deformation der Modulbox	54
2.34	5 m lange Modulbox	55
2.35	Ebenheit der 5 m lange Modulbox	56
3.1	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄	60
3.2	Röntgenspektren mit Ar/CO ₂ /CF ₄	60
3.3	Ratenkapazität in Ar/CO ₂ /CF ₄	61
3.4	Analoger und digitaler Crosstalk	62
3.5	Analoger Crosstalk der Strawtubes	63
3.6	Inaktiver Bereich um Drahtpositionierer	64
3.7	HV-Stabilität der Strawtubes im Prototypen	64
3.8	⁵⁵ Fe-Signale und Dunkelpulse aus Strawtubes	65
3.9	Dunkelpulsrate in den Strawtubes des Prototypen	65
3.10	Gasverstärkung entlang zweier Strawtubes	66
3.11	Gekippter Drahtpositionierer im Strawtube	67
3.12	Ströme im Prototypen in HERA-B	68
3.13	Ereignisse gegen angesammelte Ladung	69
4.1	Anodenstrom während der Röntgenbestrahlung	73
4.2	Pulsöhenspektren einer Fe ⁵⁵ -Quelle	74
4.3	Testmodul während der Produktion	76
4.4	Gasfluss im Testmodul	77
4.5	Testmodul im Röntgenmessstand	77
4.6	Ausleseschema des Testmoduls	78
4.7	Anodenstrom im bestrahlten Testmodul	79
4.8	Strahlprofil der Röntgenröhre	79
4.9	Pulshöhen im bestrahlten und unbestrahlten Kanal	80
4.10	Die Änderung der Gasverstärkung über die angesammelte Ladung	81
4.11	Unbestrahlter Anodendraht des Testmoduls	83
4.12	Bestrahlter Anodendraht des Testmoduls	83
5.1	Das Gassystem erweitert mit Materialbehälter	85
5.2	Skizze zum Alterungstest der Testkammer	87
5.3	Horizontales Strahlprofil	88
5.4	Erwärmung des Materialbehälters und Verlauf der Gasverstärkung	89
5.5	Stromverlauf und Gasverstärkung in Kanal 10	91
5.6	Beschädigter Anodendraht Kanal 8	92
5.7	Freiliegendes Wolfram auf Anode von Kanal 8	92
5.8	Vertiefung auf dem Draht in Kanal 8	93
5.9	Unbestrahlter Drahtabschnitt in Kanal 8	93

6.1	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄ mit 5000 ppm Wasser	98
6.2	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄ und Ar/CO ₂	99
6.3	Ratenkapazität in feuchtem Ar/CO ₂ /CF ₄	100
6.4	Ratenkapazität in feuchtem Ar/CO ₂	100
6.5	Doppelkammer für Alterungstests	102
6.6	Aufbau der Doppelkammer im Messstand	103
6.7	Position der bestrahlten Regionen der Doppelkammer	104
6.8	Strahlprofil über Doppelkammer	105
6.9	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ trocken)	106
6.10	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ trocken)	107
6.11	Bestrahlter Draht unter dem REM (Ar/CO ₂ trocken)	108
6.12	Referenzdraht unter dem REM	108
6.13	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ 500 ppm Wasser)	109
6.14	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ 500 ppm Wasser) . .	110
6.15	Bestrahlter Drahtabschnitt unter dem REM (Ar/CO ₂ 500 ppm Wasser)	111
6.16	Unbestrahlter Drahtabschnitt unter dem REM (Ar/CO ₂ 500 ppm Wasser)	112
6.17	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ 3500 ppm Wasser)	113
6.18	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ 3500 ppm Wasser) . .	113
6.19	Bestrahlte Drahtabschnitte unter dem REM (Ar/CO ₂ 3500 ppm Wasser)	114
6.20	Unbestrahlte Drahtabschnitte unter dem REM (Ar/CO ₂ 3500 ppm Was- ser)	115
6.21	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ /CF ₄ trocken)	116
6.22	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ /CF ₄ trocken)	117
6.23	Bestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ trocken)	117
6.24	Unbestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ trocken)	118
6.25	Drahtabschnitt mit Belag (Ar/CO ₂ /CF ₄ trocken)	119
6.26	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ /CF ₄ 500 ppm Wasser)	119
6.27	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ /CF ₄ 500 ppm Wasser)	120
6.28	Bestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ 500 ppm Wasser)	121
6.29	Unbestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ 500 ppm Wasser)	122
6.30	Gasverstärkung über Ladung (Ar/CO ₂ /CF ₄ 3500 ppm Wasser)	122
6.31	Gasverstärkung entlang der Strawtubes (Ar/CO ₂ /CF ₄ 3500 ppm Wasser)	123
6.32	Bestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ 3500 ppm Wasser)	124
6.33	Bestrahlter Drahtabschnitt (Ar/CO ₂ /CF ₄ 3500 ppm Wasser)	124
7.1	Skizze vom zweiten Doppelkammermodul	128
7.2	Testaufbau mit dem zweiten Doppelkammermodul	129
7.3	Strahlprofil am 2. Doppelkammermodul	130
7.4	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ gespülten Kanälen der 2. Doppelkammer .	131
7.5	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄ gespülten Kanälen mit Drahtpositio- nieren	132
7.6	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄ gespülten Kanälen ohne Drahtpositio- nieren	133
7.7	Gasverstärkung entlang Kanal 1b und 3b der 2. Doppelkammer	134
7.8	Gasverstärkung entlang Kanal 2b und 4b der 2. Doppelkammer	135
7.9	Bestrahlte Anodendrähte der 2. Doppelkammer	136

7.10	Bestrahlte Drähte der 2. Doppelkammer (Ar/CO ₂ /CF ₄)	136
7.11	Drahtabschnitt von Kanal 5b der 2. Doppelkammer (Ar/CO ₂ /CF ₄) . . .	137
7.12	Drahtabschnitt von Kanal 5a der 2. Doppelkammer (Ar/CO ₂)	137
7.13	Gasverstärkung in Doppelkammer 3A	140
7.14	Gasverstärkung in Doppelkammer 3B	141
7.15	Gasverstärkung entlang Kanal 4a und 5a in Doppelkammer 3A	142
7.16	Gasverstärkung entlang Kanal 6a und 7a in Doppelkammer 3A	143
7.17	Gasverstärkung entlang Kanal 1b und 2b in Doppelkammer 3B	144
7.18	Bestrahlter Anodendraht von Kanal 3b aus Doppelkammer 3	144
7.19	Drahtabschnitt von Kanal 5a, 7a und 1b aus Doppelkammer 3	145
7.20	Gerissener Draht von Kanal 3b aus Doppelkammer 3	145
7.21	Unbestrahlter Draht von Kanal 2b aus Doppelkammer 3	146
8.1	Gasverstärkung in Ar/CO ₂ /CF ₄ und Ar/CO ₂	150
8.2	Streamerhäufigkeiten in verschiedenen Gasen	151
8.3	⁵⁵ Fe-Spektren in Ar/CO ₂ /CF ₄ und Ar/CO ₂	151
8.4	Driftzeitspektren in Ar/CO ₂ /CF ₄ und Ar/CO ₂	152
8.5	Räumliche Auflösung und Effizienz in verschiedenen Gasen	153

Tabellenverzeichnis

1.1	Zerfallskanäle bei LHCb	4
2.1	Härtungsbedingungen für Araldit AY 103 mit HY 991	22
2.2	Gasdichtigkeit vom Prototyp	36
2.3	Strahlungslänge eines Driftkammermoduls	52
2.4	Modulkrümmung	53
2.5	Gasdichtigkeit der 5 m Modulbox	55
2.6	Biegefestigkeit der 5 m Modulbox	56
5.1	Relative Gasverstärkung in bestrahlten Straws	87
5.2	Übersichtstabelle der bestrahlten Kanäle	90
5.3	Relative Gasverstärkung während des Ausgastests	90
6.1	Betriebsparameter während der Alterungstests	105
6.2	Alterungstests mit Ar/CO ₂	116
7.1	Betriebsparameter des 2. Doppelkammermoduls	130
7.2	Betriebsparameter des 3. Doppelkammermoduls	139
8.1	Betriebseigenschaften im Vergleich	150
8.2	Bestrahlte Drähte in Ar/CO ₂ /CF ₄	155

Literaturverzeichnis

- [1] LHCb Collaboration, P.R.Barbossa Marinho *et al.*:
Outer Tracker Technical Design Report
CERN-LHCC/2001-24
- [2] J.Va'vra:
Review of Wire Chamber Aging
Nuclear Instruments and Methods **A252** (1986) 547
- [3] J.Va'vra:
Physics and Chemistry of Aging - Early Developments
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 1
- [4] M.Capeans:
Aging and Materials: Lessons for Detectors and Gas Systems
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 73
- [5] A.Schreiner:
Aging Studies of Drift Chambers of the HERA-B Outer Tracker Using CF₄-based Gases
Dissertation, Berlin, 2001
- [6] D.W.Hess:
Proc. Workshop on Radiation Damage to Wire Chambers
LBL, Jan.1986, LBL-21170
- [7] J.Kadyk:
Wire Chamber Aging
Nuclear Instruments and Methods **A300** (1991) 436
- [8] A.Romaniouk:
Choice of Materials for the Construction of the TRT
ATL-INDET-98-211
- [9] T.Akesson *et al.*:
Aging Studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 166
- [10] A.Schreiner:
Humidity Dependence of Anode Corrosion in HERA-B Outer Tracker Chambers

Operated with Ar/CO₂/CF₄
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 146

- [11] F.Guarino *et al.*:
Outgassing Studies of Materials for the TRT Construction
ATL-INDET-99-011
- [12] M.Hildebrandt:
Entwicklung und Bau der Detektoren für das Innere Spurkammersystem bei HERA-B
Dissertation, Heidelberg, 2001
- [13] <http://www.kremer-pigmente.de/97980.htm>
- [14] S.Bachmann:
Specifications for the Drift Gas Quality of the Outer Tracking System
LHCb Note 2002-031
- [15] P.Cwetanski *et al.*:
Studies of Wire Offset Effects on Gas Gain in the ATLAS TRT straw chamber
ATL-INDET-2000-016
- [16] R.Ruschmann:
Entwicklung und Untersuchung von Straw Tubes für den LHCb Detektor
Diplomarbeit, Heidelberg, 2002
- [17] S.Bachmann:
Specifications, Production and Quality Control for the Straw Tubes of the Outer Tracking System
<http://pi1.physi.uni-heidelberg.de/physi/lhcb/InternalNotes/Straws.pdf>
- [18] Performance Plastics: Rohacell
<http://www.roehm.de/de/performanceplastics.html>
- [19] S.Bachmann:
Experiences from Construction and Test of a 3m Prototype
Vortrag während OT-Meeting in Heidelberg, Februar 2002
- [20] S.Bachmann *et al.*:
Mechanical Properties of the Module Boxes used for the LHCb Outer Tracking System
LHCb Note 2002-046
- [21] S.Bachmann *et al.*:
Mechanical Tests of a Module Box Prototype
<http://pi1.physi.uni-heidelberg.de/physi/lhcb/PanelTests.php>
- [22] H.Schuijlenburg:
Vortrag während OT-Meeting in Heidelberg, Februar 2002

- [23] S.Bachmann *et al.*:
Construction of Module Boxes for the Outer Tracker in LHCb
<http://pi1.physi.uni-heidelberg.de/physi/lhcb/InternalNotes.php>
- [24] T.Haas:
Bau und Inbetriebnahme eines Teststandes zur Untersuchung von Straw-Kammern mittels kosmischer Myonen
Diplomarbeit, Heidelberg, 2003
- [24] J.Kessler:
Entwicklung von Straw-Detektoren für den Einsatz im Experiment LHCb
Diplomarbeit, Heidelberg, 2001
- [25] S.Bachmann *et al.*:
Developments for the Outer Tracking System of the LHCb Experiment
Nuclear Instruments and Methods **A518** (2008) 59
- [26] Fein Focus Röntgensystem GmbH
Im Bahlbrink 11-13, 30827 Garbsen
- [27] H.Albrecht *et al.*:
Aging Studies for the Large Honeycomb Drift Tube System of the Outer Tracker of HERA-B
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 155
- [28] Vorverstärker VV-50
Entwickelt von R.Rusnyak,
Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg
- [29] Application Software Group, Computing and Networks Division, CERN Geneva, Switzerland
PAW: Physics Analysis Workstation
- [30] Technische Fachhochschule Wildau
Bahnhofstraße, 15745 Wildau <http://www.tfh-wildau.de>
- [31] T.Hott:
Ageing Problems of the Inner Tracker of HERA-B – an Example for New Detectors and New Effects
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 242
- [32] S.Kircher *et al.*:
Parameter of MDT Ageing and Reanimation
ATL-MUON-2001-012
- [33] H.Yasuda:
New Insights into Aging Phenomena from Plasma Chemistry
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 15

- [34] M.Hildebrandt:
Aging Tests with GEM-MSGCs
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 255
- [35] F.Sauli:
The Gas Electron Multiplier
CERN-PPE-96-177
- [36] G.Bencivenni *et al.*:
A Tripple-GEM Detector with Pad Readout for the Inner Region of the First LHCb Muon Station
LHCb-Muon-2001-051
- [37] Präsentationen am Ageing Workshop am CERN
09.Februar 2004, CERN, Geneve, Switzerland
- [38] T.Akesson *et al.*:
Some Aspects of the TRT Operation in Extremely High Radiation Environment
Preprint submitted to Elsevier Science
- [39] M.Hohlmann *et al.*:
Proceedings of the International Workshop on Aging Phenomena in Gaseous Detectors
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003)
- [40] Max-Planck-Institut für Kernphysik
Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg
- [41] A.Sharma, R.Veenhof:
Properties of some gas mixtures used in tracking detectors
<http://consult.cern.ch/writeup/garfield/examples/gas/trans2000.html>
- [42] I.Gouz *et al.*:
Beam Tests of LHCb Outer Tracker Prototypes in 2000
LHCb-2001-011
- [43] The National Institute for Nuclear Physics and High Energy Physics
1098 SJ Amsterdam, The Netherlands
- [44] LHCb Collaboration:
Reoptimized Detector Design and Performance
LHCb TDR 9, CERN/LHCC 2003-030
- [45] R.Hierck:
Optimisation of the LHCb Detector
Dissertation, Amsterdam, 2003
- [46] F.Sauli:
Principles of Operation of Multiwire Proportional and drift Chambers
CERN-77-09

- [47] W.Riegler:
High Accuracy Wire Chambers
Nuclear Instruments and Methods **A494** (2002) 173
- [48] E.Mathieson:
Induced Charge Distributions in Proportional Detectors
<http://www.inst.bnl.gov/publications/Mathieson.html>
- [49] Panametrics GmbH Mess- und Prüftechnik
65719 Hofheim
- [50] S.Bachmann:
Production Scenario for Heidelberg
Vortrag während OT-Meeting in Kraków, Polska, April 2002
- [51] HERA-B Inner Tracker Collaboration:
<http://www-hera-b.desy.de/subgroup/itr/>
- [52] HERA-B Collaboration:
Subdetector Discriptions
<http://www-hera-b.desy.de/general/publications/description/welcome.html>
- [53] D.Wiedner:
Dissertation in Vorbereitung, Heidelberg, 2004
- [54] LHCb Collaboration, S.Amato *et al.*:
LHCb Technical Proposal
CERN-LHCC-98-4
- [55] LHCb Collaboration:
Status of the LHCb Detector Reoptimization
CERN-LHCC-2003-003
- [56] M.Merk:
GEANT3 LHCb Event Displays
<http://lhcbott.home.cern.ch/lhcbott/tracking/events.html>
- [57] A.Berkin *et al.*:
The LHCb Outer Tracker Front End Electronic
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/uwer/lhcb/Electronics/Review/Overview.pdf>
- [58] B.Bevensee *et al.*:
A Amplifier Shaper Discriminator with Baseline Restoration for the ATLAS Transition Radiation Tracker
IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.43, 1996
- [59] H.Deppe *et al.*:
OTIS - A Radiation Hard TDC for LHCb
<http://wwwasic.kip.uni-heidelberg.de/lhcbot/Presentations/LHC2002/OtisLHC2002.pdf>

- [60] ASIC Labor Heidelberg
Kirchhoff-Institut für Physik, INF 227, 69120 Heidelberg
- [61] D.Wiedner *et al.*
Specification for a Prototype of Auxiliary Board for the Outer Tracker LHCb Internal Note, LHCb-2003-129
- [62] L.G.Christophorou *et al.*:
Fast Gas Mixtures for Gas-filled Particle Detectors
Nuclear Instruments and Methods **A163** (1979) 141
- [63] T.Ferguson *et al.*:
Swelling Phenomena in Anode Wires Aging under a High Accumulated Dose
Nuclear Instruments and Methods **A515** (2003) 266
- [64] L.Malter:
Thin Film Field Emission
Phys. Rev. **50** (2003) 48
- [65] R.Openshaw *et al.*:
Etching of Anode Wire Deposits with CF₄/Isobutane (80:20) Avalanches
Nuclear Instruments and Methods **A307** (1991) 298
- [66] Andrzej Soltan Institute for Nuclear Studies
69 Hoza st., 00-681, Warszawski, Polska
- [67] DuPont High Performance Materials
U.S.23 & DuPontRoad, Circleville, OH 43113, USA
- [68] California Fine Wire
P.O. Box 446, Grover Beach, CA 93483-0446, USA
- [69] Emerson & Cuming Speciality Polymers
63477 Maintal
- [70] MBR Electronics, Solder
Technology, CH-8636 Wald, Switzerland
- [71] Leckdetektor 196 von Meltron Qualitek
Messtechnik GmbH, 41460 Neuss
- [72] GTS Flexible Materials Ltd
41 Rassau Industrial Estate, Ebbw Vale, Gwent, NP23 5SD, United Kingdom
- [73] Lamina Dielectrics Ltd, Myrtle Lane, Billingshurst, Sussex, RH14 9SG, United Kingdom
- [74] Institute of Nuclear Physics
ul.Radzikowskiego 125, 31-342 Kraków

- [75] Röhm GmbH & Co. KG
Kirschenallee, 64293 Darmstadt
- [76] Philips High Tech Plastics
De Run 4315, Bedrijvenpark de Run, 5503 LP Veldhoven, The Netherlands
- [77] Korrespondenz mit S.Hennenberger,
Mechanische Werkstatt CAD, Physikalisches Institut Heidelberg
- [78] T.D.Lee, C.N.Yang:
Question of Parity Conservation in Weak Interactions
Phys.Rev. Vol.104 (1956) 254
- [79] J.H.Christenson *et al.*
Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson Phys.Rev. Vol.13 (1964) 138
- [80] N.Cabibbo:
Unitary Symmetry and Leptonic Decays
Phys.Rev. Letters 10 (1963) 531
- [81] L.Wolfenstein:
Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix
Phys.Rev. Letters 51 (1983) 1945
- [82] ATLAS Collaboration :
Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the LHC at CERN
CERN-LHCC-94-43
- [83] CMS Collaboration :
Technical Proposal
CERN-LHCC-94-38
- [84] ALICE Collaboration :
Technical Proposal for a Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC
CERN-LHCC-95-71
- [85] A.Cardini:
Triple-GEM Global Aging Test for LHCb
Präsentation am Ageing Workshop am CERN
09.Februar 2004, CERN, Geneve, Switzerland

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die dazu beigetragen und geholfen haben, dass ich hier diese Aufgabe verfolgen und eine interessante und schöne Zeit erleben konnte.

- Bei Herrn Prof. Dr. Franz Eisele möchte ich mich bedanken für die Möglichkeit bei ihm zu promovieren und für die gute und interessierte Betreuung.
- Herrn Prof. Dr. Norbert Herrmann danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.
- Vielen Dank an Herr Prof. Dr. Ulrich Uwer für die Anregungen, das Interesse und die Unterstützung meiner Arbeit.
- Dr. Sebastian Bachmann danke ich für die fruchtenden Diskussionen, seine Hilfe und die ständige Motivierung. Einen besonderen Dank auch für die gemeinsame Organisation der Fussballabende an den Neckarwiesen.
- Vielen Dank an Tanja Haas und Dirk Wiedner für das freundschaftliche Arbeitsklima und die kollegiale Unterstützung.
- Stellvertretend für alle Angestellten der Mechanischen Werkstätten und der Elektronischen Werkstatt, die beim Bau der Testmodule und der Ausleseelektronik für das Labor behilflich waren, möchte ich mich bei Herrn Christian Rummel, Herrn Simon Rabenecker und Herrn Rudolf Rusnyak bedanken.
- An alle Mitglieder der HE Gruppe geht mein Dank für die freundschaftliche Atmosphäre am Institut und den gemeinsamen Mittagstisch.
- Für das Korrekturlesen der Arbeit ein extra Dankeschön an Sebastian Bachmann, Tanja Haas und Aleksandra Adametz.
- Mein ganz besonderer Dank geht an Frau Karin Huget und Prof. Dr. Siegfried Rolle von der Technischen Fachhochschule in Wildau, die mit Interesse und großem Engagement die Analysen der Anodendrähte mit dem Rasterelektronenmikroskop durchführten. Was wäre diese Arbeit ohne diese tollen Bilder!
- Ich bedanke mich bei meinen Eltern Hans-Jörg und Inge Walter. Sie gaben mir immer Unterstützung und Rückhalt nicht nur im Studium, sondern bei allem was ich unternahm.
- Vielen Dank Sabine, meine geliebte Frau, für deine Unterstützung, dein Vertrauen und deine Geduld. Ohne dich wären meine *anderen Umstände* schwerer zu ertragen gewesen.