



INAUGURAL-DISSERTATION

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

vorgelegt von

Dipl.-Phys. Tanja Haas

aus Bad Kreuznach

Tag der mündlichen Prüfung: 07. November 2007

Alterungsstudien und Studium der Betriebseigenschaften des Outer Trackers des LHCb Detektors

Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Uwer

Prof. Dr. Karl-Tasso Knöpfle

Kurzfassung

Der Outer Tracker ist Teil des Spurfindungssystems des LHCb-Detektors. Er benutzt Driftkammern, um die Spur eines Teilchens zu bestimmen. Die 2,5 m langen Straws mit einem Durchmesser von 4,9 mm werden im Proportionalmodus betrieben und sollen später die Spur mit einer Einzeltrefferauflösung von $200\text{ }\mu\text{m}$ bestimmen.

In dieser Arbeit werden im ersten Teil die Betriebseigenschaften des Outer Trackers bestimmt. Dabei werden insbesondere Ortsauflösung und Effizienz untersucht.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit Alterungsstudien. Weder bei einem Test mit Röntgenstrahlen mit einer Energie von 8 keV noch mit hochionisierenden Protonen wurde eine Änderung des Modulverhaltens aufgrund von Alterungseffekten festgestellt. Die Beschleunigungsfaktoren im Vergleich zu LHCb betrugen dabei 8-180 (Anodenstrom $>80\text{ nA/cm}$) in den am stärksten bestrahlten Regionen. Die akkumulierte Ladung betrug bis zu 3 C/cm . Bei Alterungsuntersuchungen mit Anodenströmen von weniger als 15 nA/cm (Beschleunigungsfaktor 1) wurde allerdings bei den bereits produzierten Outer Tracker Modulen schon nach wenigen Tagen ($1\text{--}2\text{ mC/cm}$) ein deutlicher Verlust der Gasverstärkung gemessen. Diese Alterung hängt von einer Vielzahl von Parametern wie Gasflussgeschwindigkeit oder Driftgasmischung ab und tritt nicht bei Anodenströmen $>12\text{ nA/cm}$ auf. Die Alterung wird durch Ausgasung eines im Modul verwendeten Materials verursacht. Untersuchungen ergaben, dass die Ausgasungen wahrscheinlich durch den Epoxidkleber verursacht werden. Durch Spülen und Erwärmen der Module kann die Alterung deutlich reduziert werden, so dass nach derzeitigem Stand die Outer Tracker Module für mehrere Jahre im LHCb Detektor betrieben werden können.

Abstract

The Outer Tracker is part of the LHCb tracking system. It uses drift chamber to measure the track of a particle. The straws have a length of 2.5 m and a diameter of 4.9 mm. They are operated in proportional mode and should measure tracks with a precision of $200\text{ }\mu\text{m}$ per hit.

In the first part, this thesis presents the results of a performance study for the Outer Tracker, focussing on spatial resolution and efficiency.

The main part of this thesis deals with aging studies. Neither a test with 8 keV X-rays nor with highly ionising protons showed any change in the module behavior due to aging. The acceleration factors compared to LHCb were 8-180 (anode current $>80\text{ nA/cm}$) in the most irradiated areas. A charge of up to 3 C/cm was accumulated. Aging tests at anode currents below 15 nA/cm (acceleration factor 1) showed a significant gain drop for the already produced modules after only a few days ($1\text{--}2\text{ mC/cm}$) of irradiation. The aging depends on several parameters like gas flow velocity or gas mixture. There is no aging for anode currents $>12\text{ nA/cm}$. This aging is an effect of outgassing material used in the module. Tests showed that the outgassing is probably caused by the epoxy adhesive. Flushing and warming the modules reduce the aging significantly. As things are, the Outer Tracker modules can be operated in LHCb for several years.

Inhaltsverzeichnis

Motivation	11
1 Das LHCb-Experiment	13
1.1 LHC	13
1.2 Physik mit dem LHCb-Detektor	14
1.2.1 Grundlagen: Die CKM-Matrix	14
1.2.2 B-Physik bei LHCb	16
1.3 Der LHCb-Detektor	21
1.3.1 Messungen mit dem LHCb-Detektor	21
1.3.2 Die Detektorkomponenten	23
1.3.3 Der Trigger	25
2 Der Outer Tracker	27
2.1 Der Aufbau des Outer Trackers	27
2.2 Modulproduktion	30
2.3 Die Ausleseelektronik	31
2.4 Teilchenflüsse im LHCb Outer Tracker	31
3 Gasdetektoren	35
3.1 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie	36
3.1.1 Primärionisation	37
3.1.2 Drift und Diffusion in Gasen	39
3.1.3 Rekombination und Elektronenanlagerung	40
3.2 Das Proportionalzählrohr	41
3.2.1 Gasverstärkung	42
3.3 Design des LHCb Outer Trackers	45
4 Messung der Kammereigenschaften	49
4.1 Motivation	49
4.2 Experimenteller Aufbau	49
4.2.1 Aufbau der Module	49
4.2.2 Aufbau der Elektronik	50
4.2.3 Trigger	51
4.3 Analyse der Teststrahlraten	52
4.3.1 Parameter	53

4.3.2	Korrektur der Rohdaten	53
4.3.3	Alignment und erste Residuen	55
4.3.4	Ortsauflösung	57
4.3.5	Effizienz	66
4.3.6	Rauschen und Crosstalk	69
4.3.7	Zusammenfassung und Vergleich mit anderen Analysen	71
5	Alterung bei Gasdetektoren	73
5.1	Formen der Alterung	74
5.2	Ursachen für Alterung von Gasdetektoren	75
5.3	Messung der Alterung	78
5.4	Materialien im Outer Tracker	79
5.5	Frühere Messungen in Heidelberg	79
5.6	Neue Messungen	81
6	Bestrahlung mit stark ionisierenden Teilchen	83
6.1	Aufbau	83
6.1.1	Das Modul	83
6.1.2	Kalibrierung	84
6.2	Bestrahlung	86
6.3	Zusammenfassung	92
7	Alterungsstudien mit Röntgenstrahlung	95
7.1	Parameter der Bestrahlung	95
7.1.1	Die Röntgenanlage	95
7.1.2	Die Module	95
7.1.3	Der Aufbau	96
7.2	Langzeitstudie	98
7.2.1	Messungen während der Bestrahlung	99
7.2.2	Messungen nach Abschluss der Bestrahlung	101
7.2.3	Analyse der Drähte	101
7.3	Gas Mixing Rack	102
7.4	Zusammenfassung	107
8	Alterung bei niedrigen Raten	109
8.1	Erste Messungen des Alterungseffekts	109
8.2	Untersuchung des Anodendrahts	112
8.3	Analysemethode	115
8.4	Systematische Untersuchungen des Alterungseffekts	117
8.4.1	Alterung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer	117
8.4.2	Quantitative Reproduzierbarkeit	119
8.5	Die radioaktiven Quellen	121
8.6	Abhängigkeit der Alterung	123
8.6.1	Abhängigkeit der Alterung von der Teilchenart	123
8.6.2	Abhängigkeit vom Strom	123

8.6.3	Abhängigkeit von der Fläche	124
8.6.4	Weitere Abhängigkeiten	127
8.7	Studien zum Verständnis des Alterungseffekts	127
8.7.1	Verhinderung der Alterung durch hohe Raten	127
8.7.2	Die Ursache der Alterung	129
8.8	Zusammenfassung	135
9	Betrieb der Massenproduktionsmodule	139
9.1	Langzeitspülen der Module	139
9.2	Erwärmen von Modulen	140
9.2.1	Modulverhalten nach Erwärmung	140
9.2.2	Erwärmung mit Heizdecken	142
9.2.3	Einfluss der Erwärmung auf die Alterung	143
9.3	Änderung der Driftgasmischung	145
9.3.1	Ar/CO ₂ /O ₂	146
9.3.2	Ar/CO ₂ /CF ₄	147
9.4	Konditionierung mit hohen Anodenströmen	148
9.4.1	Hohe Anodentröme durch Bestrahlung	149
9.4.2	Training mit negativer Hochspannung	150
9.4.3	Training mit positiver Hochspannung	153
9.5	Alterung des Outer Trackers im LHCb-Detektor	156
9.6	Zusammenfassung	161
10	Zusammenfassung und Ausblick	163
	Abbildungsverzeichnis	165
	Tabellenverzeichnis	169
	Literaturverzeichnis	171
	Danksagung	177

Motivation

Diese Doktorarbeit wurde im Rahmen der Beteiligung des Physikalischen Instituts Heidelberg am LHCb Experiment durchgeführt. Das Physikalische Institut ist unter anderem an der Produktion des LHCb Outer Trackers beteiligt. Der Outer Tracker ist ein auf Proportionalzählrohren basierender Gasdetektor mit insgesamt 53760 Auslesekanälen. Dieser Detektor soll in LHCb über einen Zeitraum von mehreren Jahren Daten liefern. In dieser Zeit werden die Anodendrähte des Zählrohrs im am stärksten bestrahlten Bereich eine akkumulierte Ladung von etwa 1 C/cm sammeln.

Die Aufgabe des Outer Tracker ist es, Teilchenspuren zu rekonstruieren und die Treffer im Vertexdetektor mit den Kalorimeter-Clustern zu verbinden, sowie den Impuls der geladenen Teilchen aus ihrer Ablenkung im Feld des Magneten zu bestimmen. Damit dies möglich ist, muss der Outer Tracker eine hohe Effizienz für Einzeltreffer ($>98\%$) und eine gute Einzeltrefferauflösung ($<200\text{ }\mu\text{m}$) aufweisen. Um diese Parameter zu messen, wurden Daten eines Teststrahls, der 2005 am DESY stattfand, ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Analyse werden in Kapitel 4 vorgestellt.

Im Laufe seiner Betriebszeit sollte der Outer Tracker nicht altern, d.h. er darf sein Verhalten unter Bestrahlung nicht ändern. Darum wurden bereits die Materialien zur Modulproduktion sorgfältig ausgewählt. Während der Produktion wurde auf Reinheit geachtet, um Verschmutzungen zu vermeiden. Trotzdem sind Alterungsstudien unerlässlich, insbesondere da in den letzten Jahren bei verschiedenen Gasdetektoren Alterungseffekte aufgrund von Bestrahlung gefunden wurden (HERA-B [1], CDF [2], *BABAR*[3]). Diese Alterungsstudien bilden den Hauptteil der vorgestellten Arbeit. Es wurden zahlreiche Studien mit 8 keV Röntgenquanten (Kap. 7) und langsamen Protonen (Kap. 6) durchgeführt. Ebenso wurden Teile des LHCb-Gassystems getestet. Dies ist notwendig, da viele Komponenten des Gassystems industriell gefertigt werden und so trotz strenger Spezifikationen nicht der gleichen Kontrolle wie die im Modulbau verwendeten Materialien unterliegen.

Trotz umfangreicher Studien bereits vor und während der Produktion wurde nach Beendigung der Massenproduktion ein bisher in dieser Form nicht bekannter Alterungseffekt bei den Outer Tracker Modulen gefunden. Dies machte umfangreiche Studien nötig, um den komplexen Alterungsprozess zu verstehen (Kap. 8) und Maßnahmen zu finden, die Alterung zu reduzieren bzw. zu verhindern (Kap. 9), so dass die Module im Outer Tracker über einen Zeitraum von mehreren Jahren betrieben werden können.

Kapitel 1

Das LHCb-Experiment

1.1 LHC

Wenn Anfang 2008 der Large Hadron Collider (LHC) in Betrieb geht, werden Teilchen auf eine bisher nicht erreichte Energie beschleunigt. Zwei Protonenstrahlen kollidieren bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s}=14\text{ TeV}$ und bieten damit die Möglichkeit, in neue Bereiche der Physik vorzustoßen. Die Experimente am LHC-Beschleuniger sollen Antworten über die Grenzen des Standardmodells liefern und neue Teilchen finden. Der LHC-Beschleuniger befindet sich in einem Tunnel mit einem Umfang von 27 km. Um die Protonen dort auf ihrer Bahn zu halten, erzeugen supraleitende Magnete bei einer Temperatur von 1,9 K ein Magnetfeld von bis zu 8,4 T [4].

Die Strahl-Strahl Kollisionsrate wird 40 MHz betragen und die Designluminosität ist $L=10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Bei dieser Luminosität werden etwa 25 Proton-Proton Wechselwirkungen pro Kollision erwartet.

Sechs Experimente sind am LHC-Ring in Vorbereitung: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb, LHCf und Totem. ATLAS und CMS sind sogenannte Mehrzweckdetektoren. Sie wurden darauf ausgelegt, ein möglichst breites Spektrum der Hochenergiephysik abzudecken. Ihr Ziel ist es, neue Teilchen, insbesondere Higgs- und SUSY¹-Teilchen, zu finden. Der ALICE-Detektor wurde konzipiert, um Schwerionenkollisionen zu untersuchen. Dazu ist es möglich, den Beschleuniger mit Ionen zu betreiben. Bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s}=5,5\text{ TeV/Nukleon}$ ergibt sich eine maximale Schwerpunktsenergie pro Kern von $\sqrt{s}=1180\text{ TeV}$ für Bleiionen. Außerdem werden bei ALICE auch Messungen mit Goldatomen und Protonen durchgeführt. LHCb – The Large Hadron Collider beauty Experiment – soll die Zerfälle von B-Mesonen untersuchen und insbesondere bei seltenen Zerfällen (Zerfallsverhältnis $<10^{-6}$) nach neuer Physik suchen (Kap. 1.2). Die beiden kleineren Experimente Totem und LHCf untersuchen jeweils Teilchen, die am Wechselwirkungspunkt von ATLAS oder CMS entstehen². Totem befindet sich hinter CMS und untersucht die Luminosität, elastische Streuung und diffraktive Dissoziation. LHCf will bei LHC Theorien über kosmische Schauer testen. Abb. 1.1 zeigt eine Skizze des LHC-Beschleunigers

¹SUSY: SUperSYmmetrie.

²Die Teilchen haben einen so kleinen Winkel zum Protonenstrahl, dass sie nicht mehr von ATLAS und CMS gemessen werden können.

mit den Vorbeschleunigern und den vier Experimenten ALICE, ATLAS, CMS und LHCb [4].

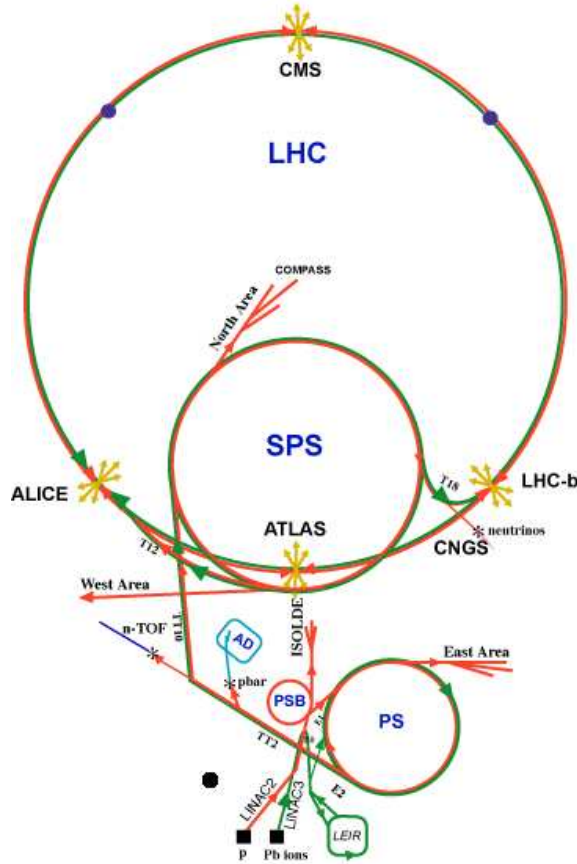


Abbildung 1.1: LHC-Ring mit Vorbeschleunigern und den vier Experimenten ALICE, ATLAS, CMS und LHCb [4].

1.2 Physik mit dem LHCb-Detektor

Ziel des LHCb-Experiments ist es, seltene Zerfälle von B-Mesonen zu untersuchen. Neben der Untersuchung der CP-Verletzung im B-Mesonen System erlauben insbesondere seltene Zerfälle eine indirekte Suche nach neuer Physik. Indirekte Suchen können Beiträge neuer Physik bei einer Energieskala testen, die mit der direkten Suche nicht erreicht werden kann. Das Physikprogramm bei LHCb ist damit komplementär zu den Suchen bei ATLAS und CMS, die direkt nach neuen Teilchen wie z.B. dem Higgs Teilchen suchen, und deckt Bereiche ab, die diese Experimente nicht untersuchen können.

1.2.1 Grundlagen: Die CKM-Matrix

Bei Quarks sind die Masseneigenzustände und die schwachen Eigenzustände nicht identisch. Um beide ineinander überzuführen, muss eine Basistransformation durchgeführt

werden. Gemäß Konvention bleiben die Quarkzustände u , c und t unverändert und nur d , s und b werden gedreht. Die Matrix dieser Basistransformation ist die sogenannte CKM-Matrix³ V_{CKM} :

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Die schwachen Eigenzustände q' sind demnach eine Kombination der Masseneigenzustände q . Die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Quark q_i zu einem Quark q_j ist dabei proportional zum Quadrat des Betrages des entsprechenden Matrixelementes, $|V_{ij}|^2$. Dabei sind die Diagonalelemente der Matrix nahezu eins, die anderen sind stark unterdrückt. Aus der Forderung der Unitarität⁴

$$V_{\text{CKM}} V_{\text{CKM}}^\dagger = V_{\text{CKM}}^\dagger V_{\text{CKM}} = 1 \quad (1.2)$$

ergeben sich Bedingungen für die einzelnen Elemente. B-Zerfälle erlauben zwei der sechs sich ergebenden Dreiecksgleichungen zu überprüfen:

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0, \quad (1.3a)$$

$$V_{tb}V_{ub}^* + V_{ts}V_{us}^* + V_{td}V_{ud}^* = 0. \quad (1.3b)$$

Diese Matrix hat vier freie Parameter, drei Winkel und eine Phase δ . Die einzige Möglichkeit, im Standardmodell im Rahmen der schwachen Wechselwirkung CP-Verletzung zu beschreiben, setzt voraus, dass $\delta \neq 0, \pi$ ist⁵. Eine Parametrisierung der CKM-Matrix in Abhängigkeit der vier Parameter λ , A , ρ und η wurde von Wolfenstein [5] vorgeschlagen:

$$V_{\text{CKM}} \approx \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4) \quad (1.4)$$

Da diese Parametrisierung eine Näherung ist, kommen noch Korrekturen in Form von Termen höherer Ordnung hinzu ($\mathcal{O}(\lambda^4)$). Hier ist $\eta \neq 0$ eine notwendige Bedingung für die CP-Verletzung. Die Gleichungen 1.3 können als Dreieck in der komplexen Ebene dargestellt werden, wobei die beiden Gleichungen bis zur Ordnung $\mathcal{O}(\lambda^3)$ dem gleichen Dreieck entsprechen (Abb. 1.2). Aus der CKM-Matrix ergeben sich noch weitere Dreiecke, allerdings ist das in Abb. 1.2 gezeigte besonders in der B-Physik interessant. Die Fläche dieses sogenannten Unitaritätsdreiecks ist ein Maß für die Größe der CP-Verletzung. Gäbe es keine CP-Verletzung, wäre das Dreieck entartet und $\eta=0$.

³CKM: Cabibbo-Kobayashi-Maskawa.

⁴ V_{CKM}^\dagger : komplex konjugierte von V_{CKM} .

⁵Diese Bedingung ist notwendig, aber nicht hinreichend. Außerdem muss gelten: $m_u \neq m_c \neq m_t$, $m_d \neq m_s \neq m_b$.

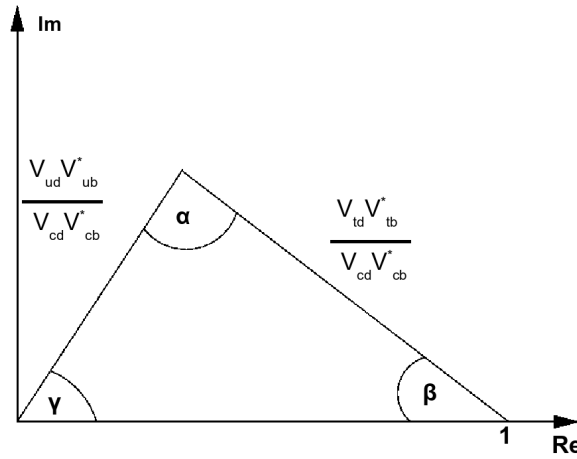


Abbildung 1.2: *Unitaritätsdreieck, das sich aus den Gleichungen 1.3 ergibt. Eine Seite wurde auf die Länge eins normiert.*

Dabei können die Seiten und Winkel des Unitaritätsdreiecks in vielen verschiedenen unabhängigen Prozessen präzise bestimmt werden. In Abbildung 1.3 ist der Stand der Messungen im Sommer 2007 gezeigt [6]. Jedes Band steht dabei für die Bestimmung der Seiten und Winkel des Dreiecks aus einer oder mehrerer Messungen. Die Breite der Bänder gibt den Fehler innerhalb von einer Standardabweichung an. Im Rahmen der derzeitigen Unsicherheiten der Messungen bzw. deren theoretischen Interpretationen stimmen alle Messungen mit dem Standardmodell überein. Das LHCb-Experiment wird die Unsicherheiten vieler Parameter signifikant reduzieren und so das Standardmodell präzise testen oder durch Inkonsistenzen Hinweise auf neue Physik erhalten.

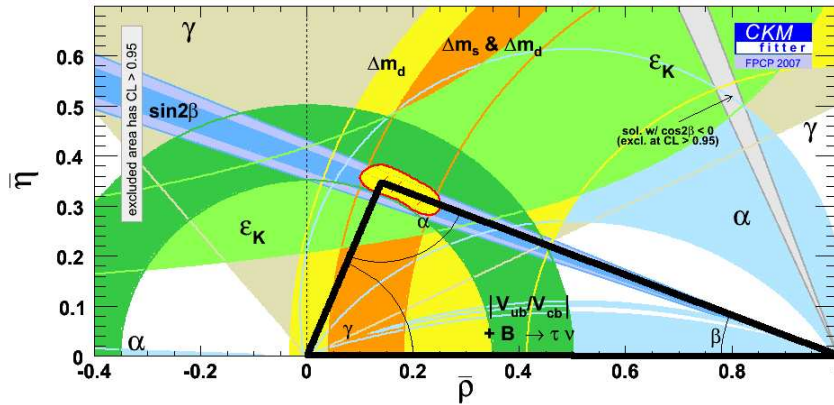


Abbildung 1.3: *Stand der Messung des Unitaritätsdreiecks im Sommer 2007 [6].*

1.2.2 B-Physik bei LHCb

Neben Messungen zur CP-Verletzung im B_s - und B_d -System sollen insbesondere seltene Zerfälle (Verzweungsverhältnis $< 10^{-6}$), die bisher aufgrund der Statistik nicht

zugänglich waren, untersucht werden.

Im folgenden werden einige Analysen aus dem umfangreichen Messprogramm von LHCb vorgestellt.

CP-Verletzung im B_s -System

Bei den neutralen B-Mesonen sind die schwachen und die Masseneigenzustände nicht identisch. Die schwachen Eigenzustände B und \bar{B} sind eine Mischung – äquivalent zu den schwachen Eigenzuständen der Quarks – aus den Masseneigenzuständen B_H und B_L . Die beiden schwachen Eigenzustände B und \bar{B} können ineinander übergehen (oszillieren). Es gibt zwei Feynmangraphen im Standardmodell, die zur B-Oszillation beitragen (Abb. 1.4 am Beispiel des B_s -Mesons). Prinzipiell können in der Box alle Quarks ausgetauscht werden, aber das Top-Quark dominiert.

Die Oszillationsfrequenz von B_s und \bar{B}_s , Δm_s , wurde im Jahr 2006 erstmals präzise am Fermilab mit $\Delta m_s = (17,77 \pm 0,10(\text{stat.}) \pm 0,07(\text{syst.}))\text{ps}^{-1}$ vom CDF-Experiment [7] und D0-Experiment [8] gemessen. Die Messung der Oszillationsfrequenz Δm_s wird bei LHCb als Referenzmessung und Grundlage weiterer Messungen dienen.

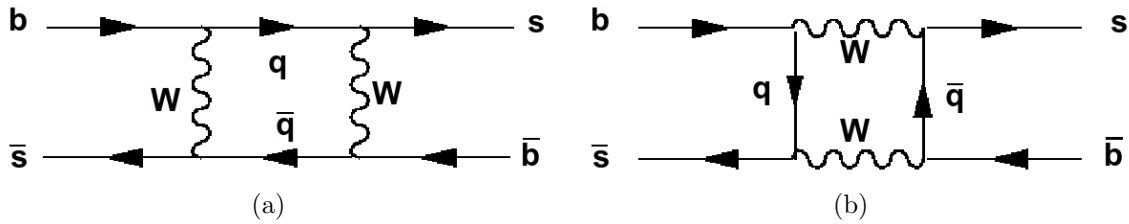


Abbildung 1.4: Feynmangraphen für B_s^0 -Mischung im Standardmodell.

Nach der Messung von Δm_s können in einem weiteren Schritt $\Delta\Gamma_s$ ⁶ und ϕ_s ⁷ gemessen werden. Beide Parameter konnten am Tevatron bisher nur mit großer Unsicherheit gemessen werden [9].

Es gibt verschiedene Zerfälle, aus denen $\Delta\Gamma_s$ und ϕ_s bestimmt werden können, am erfolgsversprechensten ist der Kanal

$$B_s^0(\bar{B}_s^0) \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)\phi(K^+K^-).$$

Die Feynmangraphen zu diesem Zerfall sind in Abb. 1.5 gezeigt. In diesem Zerfall können sowohl $\Delta\Gamma$ als auch ϕ_s in einem kombinierten Fit extrahiert werden. Die Mischungsphase ϕ_s wird aus der zeitabhängigen CP-Asymmetrie des Zerfalls $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$ bestimmt. $\Delta\Gamma$ kann aus dem CP-Eigenzustand des Systems $J/\psi\phi$ bestimmt werden.

Mit diesen Messungen erwartet man mit einer Datenmenge, die einer Luminosität von 2 fb^{-1} (Ein Jahr LHCb) entspricht, eine statistische Genauigkeit von $\sigma_{\text{stat}}(\Delta\Gamma/\Gamma) = 2\%$ und $\sigma_{\text{stat}}(\sin\phi_s) = 0,02\text{--}0,06$. Die derzeit besten Werte, ebenfalls aus einer kombinierten Analyse von $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi$, sind statistisch limitiert und stammen vom D0-Experiment mit $\Delta\Gamma = 0,13 \pm 0,09$ und $\phi_s = -0,70^{+0,47}_{-0,39}$ [9].

⁶ $\Delta\Gamma_s = \Gamma_H - \Gamma_L$, Unterschied der Zerfallsbreiten der Masseneigenzustände des B-Mesons.

⁷ ϕ : Mischungsphase, bewirkt CP-Verletzung.

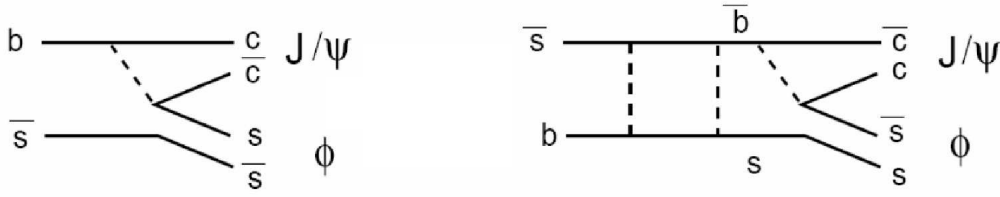


Abbildung 1.5: Feynmangraphen $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$.

Messung des Winkels γ

Wie man in Abbildung 1.3 sieht, ist der Winkel γ mit großen Unsicherheiten behaftet (graue Fläche). Bei LHCb ergeben sich verschiedene Zerfälle, mit denen diese Messung erheblich verbessert werden kann. Dazu eignen sich Zerfälle, in denen ein Quarkübergang $b \rightarrow c$ oder $b \rightarrow u$ stattfindet. Dabei sind die Quarkübergänge $b \rightarrow c$ wahrscheinlicher als $b \rightarrow u$, da hier das Matrixelement V_{cb} auftritt, das größer ist als V_{ub} . Zu den hier vorgestellten Zerfällen wurden Analysestrategien entwickelt, die jeweils in den Referenzen angegeben sind.

$$B_s^0 \rightarrow D_s^\mp K^\pm$$

Eine Möglichkeit, den Winkel γ zu messen, ist der Zerfall

$$\begin{aligned} B_s^0 &\rightarrow D_s^+ K^- \\ B_s^0 &\rightarrow D_s^- K^+ \end{aligned}$$

Möglich sind auch die entsprechenden Zerfälle des \bar{B}_s . In Abbildung 1.6 sind die zu diesem Zerfall gehörigen Feynmandiagramme gezeigt. In erster Ordnung treten nur Baumdiagramme auf, darum ist dieser Zerfall insensitive auf neue Physik in Schleifen. Da sowohl der Zerfall des B_s -Mesons als auch des \bar{B}_s -Mesons in die gleichen Endzustände möglich ist und diese beiden Teilchen auch durch Oszillation ineinander über gehen können, erhält man bei dieser Analyse γ und die Mischungsphase ϕ . Mit dem Wert für ϕ aus der Analyse des Zerfalls $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$ kann γ extrahiert werden. Mit einer Luminosität von 2 fb^{-1} (1 Jahr LHCb) wird eine Sensitivität von $\sigma(\gamma) = 13^\circ$ erwartet.

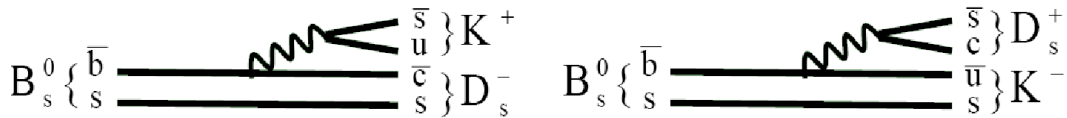


Abbildung 1.6: Feynmangraphen $B_s^0 \rightarrow D^\mp K^\pm$.

$$B^- \rightarrow D^0 (\bar{D}^0) K^-$$

Eine weitere Möglichkeit, den Winkel γ zu messen, ergibt sich aus den Zerfällen der geladenen B-Mesonen:

$$\begin{aligned} B^- &\rightarrow D^0 K^- \\ B^- &\rightarrow \bar{D}^0 K^- \end{aligned}$$

sowie den entsprechenden Zerfällen des B^+ . In erster Ordnung existiert dieser Zerfall nur als Baumdiagramm (Abb. 1.7). In diesem Zerfall wird γ direkt gemessen. Da hier geladene B-Mesonen zerfallen, treten keine Oszillationen auf und es ist keine zeitabhängige Messung des B-Zerfalls nötig [11, 12]. Der Anfangszustand ergibt sich aus der Ladung der gemessenen Teilchen.

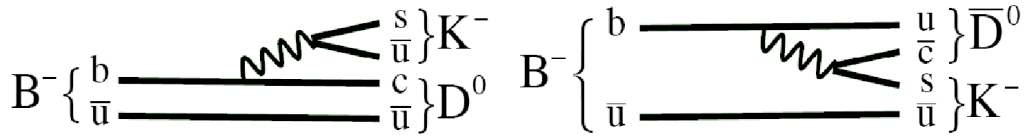


Abbildung 1.7: Feynmangraphen $B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^+$.

$$B_{d/s}^0 \rightarrow \pi\pi \ (KK)$$

Eine dritte Möglichkeit, den Winkel γ zu messen, ergibt sich aus dem Zerfall

$$\begin{aligned} B^0 &\rightarrow \pi^+\pi^- \\ B_s^0 &\rightarrow K^+K^- \end{aligned}$$

Bei diesem Zerfallsmodus [13, 14] werden große Beiträge aus Pinguindiagrammen erwartet, die Feynmangraphen sind in Abb. 1.8 gezeigt.

In Tabelle 1.1 sind Zerfälle zur Bestimmung des Winkels γ und die erwarteten Sensitivitäten nach einem Jahr LHCb (2 fb^{-1}) zusammengefasst.

Seltene Zerfälle

Ein Beispiel für seltene Zerfälle ist der Zerfall [15]

$$B_s \rightarrow \mu\mu.$$

Dieser Zerfall tritt nicht in Graphen ohne Schleifen auf, sondern beispielsweise nur in Boxdiagrammen. Im Standardmodell ist ein Verzweigungsverhältnis von $(3,5 \pm 0,9) \times 10^{-9}$

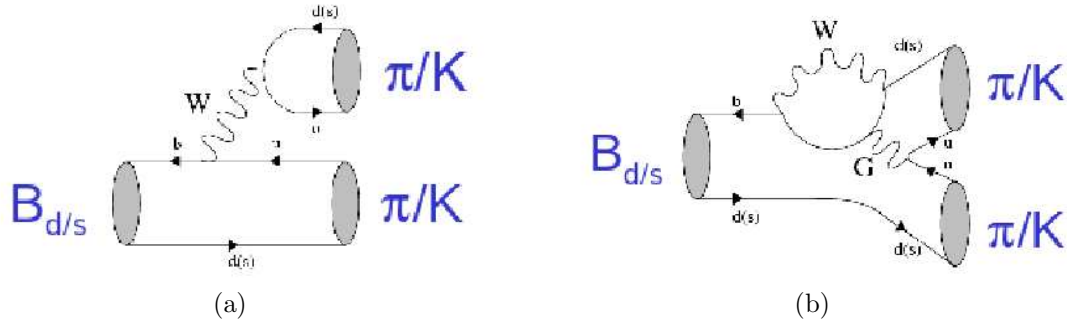


Abbildung 1.8: Feynmangraphen $B_{d/s}^0 \rightarrow \pi\pi(KK)$ (a) Baumdiagramm, (b) Pinguindiagramm: In der Schleife können neue Teilchen auftreten.

Zerfall	Ereignisse	Sensitivität
$B_s \rightarrow D^\mp K^\pm$	5400	$\sigma(\gamma) \sim 14^\circ$
$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	36000	$\sigma(\gamma) \sim 4^\circ$
$B_s \rightarrow K^+ K^-$	36000	
$B^0 \rightarrow D^0 (K\pi, KK) K^{*0} \gamma$	3400, 28000, 500	$\sigma(\gamma) \sim 7 - 10^\circ$
$B^- \rightarrow D^0 (K^- \pi^+, K^+ \pi^-) K^-$	28000, 500	$\sigma(\gamma) \sim 5 - 15^\circ$
$B^- \rightarrow D^0 (K^+ K^-, \pi^+ \pi^-) K^-$	4300, 500	
$B^- \rightarrow D^0 (K_s^0 \pi^+ \pi^-) K^-$	1500-5000	$\sigma(\gamma) \sim 8 - 16^\circ$

Tabelle 1.1: Messung des Winkels γ bei LHCb mit den nach Jahr Datennahme erwarteten Sensitivitäten [16].

vorhergesagt. Im MSSM⁸ hingegen kann das Verzweungsverhältnis um bis zu einem Faktor 100 größer sein als im Standardmodell. Bei LHCb werden bei der Designluminosität im Laufe des ersten Jahres innerhalb der Standardmodellvorhersage 17 Ereignisse erwartet. Abbildung 1.9(a) zeigt die Feynmangraphen, die im Standardmodell beitragen, Abb. 1.9(b) zeigt die zusätzlichen Graphen aus dem MSSM.

In Tabelle 1.2 sind einige weitere seltene Zerfälle aufgelistet, und die Anzahl der Ereignisse, die im ersten Jahr bei LHCb innerhalb des Standardmodells erwartet werden, gegeben.

Die hier vorgestellten Zerfälle zeigen nur einige Möglichkeiten der Messungen bei LHCb. Exakte Messungen der Verzweungsverhältnisse bei B-Zerfällen, die aufgrund von Schleifen unterdrückt sind, erlauben hierbei die Suche nach neuer Physik.

⁸MSSM: Minimal Supersymmetric Standard Model.

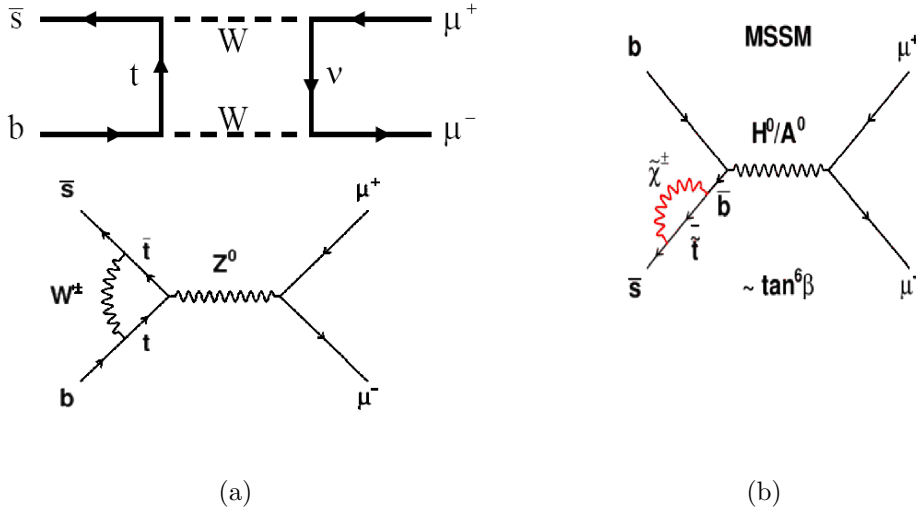


Abbildung 1.9: Zerfall $B_s \rightarrow \mu\mu$: (a) Feynmangraphen im Standardmodell, (b) zusätzliche Beiträge im MSSM.

Zerfall	Ereignisse
$B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$	17
$B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$	7700
$B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma$	35000
$B_s \rightarrow \phi \gamma$	9300

Tabelle 1.2: Seltene Zerfälle und die bei LHCb in einem Jahr im Rahmen des Standardmodells erwarteten Ereigniszahlen [16].

1.3 Der LHCb-Detektor

1.3.1 Messungen mit dem LHCb-Detektor

Der LHCb-Detektor wurde entwickelt, um die Zerfälle aller B-Mesonen zu untersuchen. Der Wirkungsquerschnitt für die Produktion von B-Mesonen am LHC beträgt $500 \mu\text{b}$ [16] im Vergleich zu 1 nb [17] bei $BABAR$ und Belle, allerdings bei einem inelastischen Wirkungsquerschnitt von 100 mb . Bei einer Luminosität von $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ werden im LHCb-Detektor pro Jahr etwa $0,5 \times 10^{12}$ $b\bar{b}$ -Paare erwartet ($BABAR$ hat im Sommer 2007 etwa $4,4 \times 10^8$ $b\bar{b}$ -Paare erzeugt). Bei LHCb braucht man allerdings einen sehr effizienten Trigger für B-Mesonen, um diese aus dem großen Untergrund zu filtern.

Die b-Hadronen entstehen hauptsächlich aus Gluonfusionen. Da nur eine relativ geringe Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} \approx 10 \text{ GeV}$ nötig ist, um ein $b\bar{b}$ Paar zu erzeugen, können auch Gluonen mit einem geringen Anteil am Gesamtimpuls des Protons zur Entstehung beitragen. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass ein Gluon einen großen Anteil

des Gesamtimpulses beiträgt und das zweite nur einen geringen Anteil. Aufgrund der Impulserhaltung fliegen die b - und \bar{b} -Hadronen darum bevorzugt in die gleiche Richtung. Abb. 1.10(a) zeigt den Polarwinkel der beiden b -Hadronen, es gibt fast nur Ereignisse mit sehr kleinen und sehr großen Winkeln. Das bedeutet, beide Hadronen fliegen überwiegend in Vorwärtsrichtung oder in Rückwärtsrichtung. Darum wurde der LHCb Detektor als einarmigen Vorwärtsspektrometer konzipiert. Er deckt einen Winkelbereich von $12 \text{ mrad} < \Theta < 300 \text{ mrad}$ (Pseudorapidity⁹ ($1,8 < \eta < 4,9$)) ab und unterscheidet sich damit prinzipiell von ATLAS und CMS, die den ganzen Raumwinkelbereich abdecken.

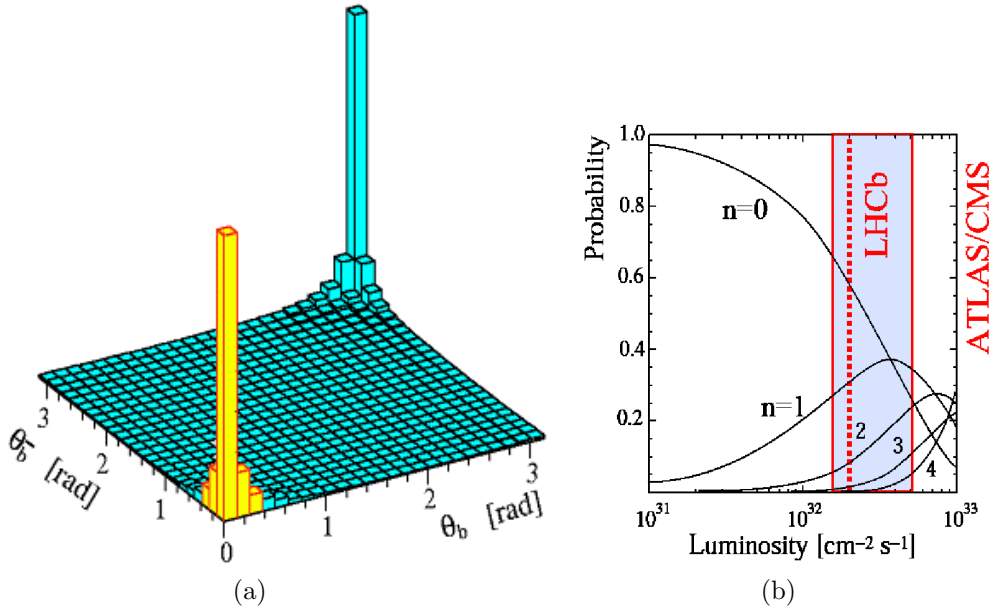


Abbildung 1.10: (a) Polarwinkel der b - und \bar{b} -Hadronen [18]: Es werden entweder beide Teilchen in Vorwärts- oder beide Teilchen in Rückwärtsrichtung emittiert. (b) Durchschnittliche Anzahl der entstehenden Teilchen pro Wechselwirkung in Abhängigkeit der Luminosität. Bei LHCb werden meistens keine oder eine Kollision erwartet.

Im Vergleich zu den anderen Experimenten wird LHCb bei einer niedrigeren Luminosität von $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ betrieben, um die mittlere Anzahl von Kollisionen pro Wechselwirkung auf eins zu reduzieren (Abb. 1.10(b)). Es werden alle möglichen B-Mesonen produziert werden. Dabei beträgt der Anteil an B_u - und B_d -Hadronen je etwa 40 %, an B_s -Mesonen etwa 10 %, der Rest verteilt sich auf B_c -Mesonen und B-Baryonen.

In Abbildung 1.11 ist ein typischer B-Zerfall gezeigt. Der Abstand zwischen Primär- und Sekundärvertex beträgt typischerweise etwa einen Zentimeter für B-Mesonen. Es ist wichtig, den Sekundärvertex und damit diese Distanz zum Primärvertex gut zu bestimmen: Die relativ große Lebensdauer ($\tau \approx 1,5 \text{ ps}$) und damit die Zerfallslänge ist eines der eindeutigen Identifikationskriterien für B-Mesonen.

⁹Pseudorapidity: $\eta = -\ln(\tan \Theta/2)$.

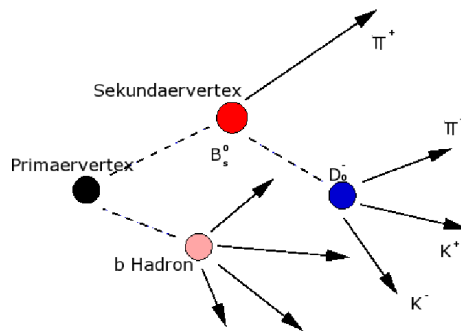


Abbildung 1.11: Zerfall eines B_s^0 -Mesons: Die Zerfallslänge zwischen dem primären und dem sekundären Vertex beträgt typischerweise einen Zentimeter. Die Pionen und Kaone werden direkt nachgewiesen.

1.3.2 Die Detektorkomponenten

Um Zerfälle der B-Mesonen zu rekonstruieren, wird eine sehr gute Vertexpauflösung, eine gute Teilchenidentifikation, insbesondere eine gute π -K-Separation und eine gute Impulsauflösung benötigt. Abbildung 1.12 zeigt den LHCb-Detektor [16], der diese Aufgaben lösen soll.

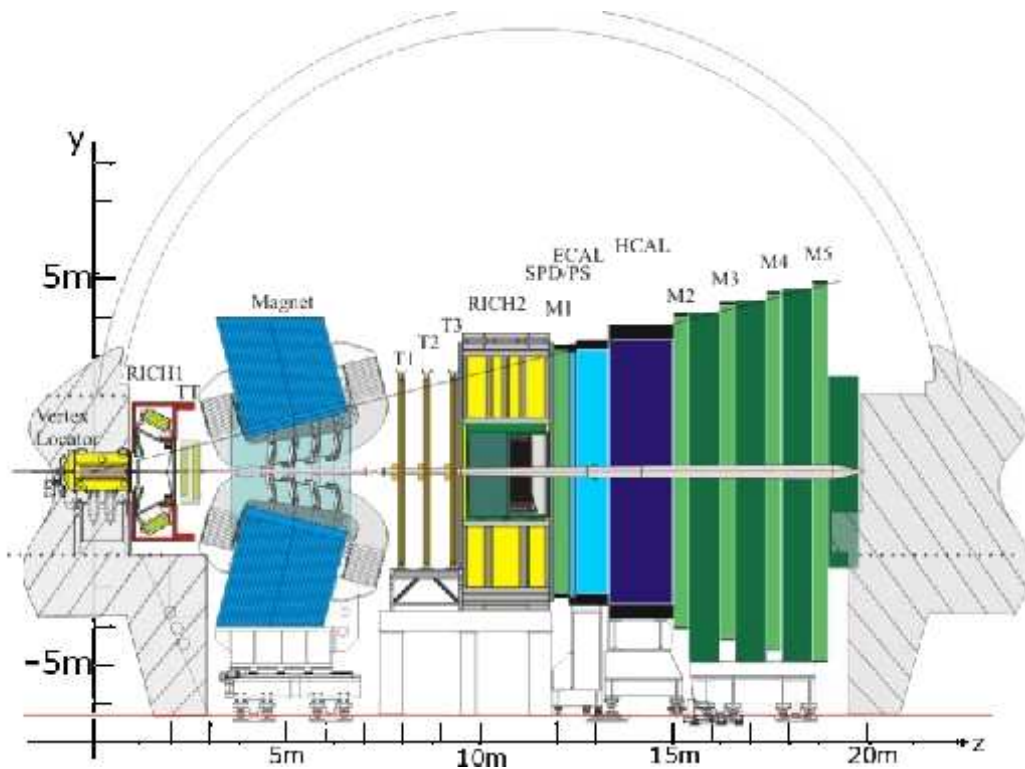


Abbildung 1.12: Der LHCb Detektor [16].

Die Detektorkomponenten können in Vertex- und Spursystem, Detektoren zur Teilchenidentifikation und den Magneten unterteilt werden.

Zur Spurrekonstruktion stehen der Vertexlocator (VELO), Trigger Tracker (TT) sowie der Inner (IT) und der Outer Tracker (OT) zur Verfügung. Der Zerfallsvertex der B-Mesonen muss möglichst gut aufgelöst werden, um eine gute Messung der Lebensdauer zu erlauben. Dazu muss der Vertexlocator [19] nahe am Wechselwirkungspunkt platziert werden. Der Detektor befindet sich innerhalb des Strahlvakuum mit einem minimalen Abstand von 5 mm zum Wechselwirkungspunkt. Der Vertexlocator ist als Siliziumstreifendetektor realisiert. Er besteht aus insgesamt 21 Stationen, die jeweils in eine r- und in eine ϕ -Lage unterteilt sind [19]. Die Ortsauflösung beträgt 10-20 μm in r- und ϕ -Richtung.

Die Tracker Stationen dienen dazu, eine Spur zwischen dem Vertexlocator und den Kalorimetern zu verbinden, aber auch zur Impulsbestimmung geladener Teilchen aus ihrer Ablenkung im Magnetfeld. Dabei sind der Trigger Tracker und der Inner Tracker als Siliziumstreifendetektoren realisiert, der Outer Tracker benutzt Driftkammertechnologie. Der Trigger Tracker ist vor dem Magneten positioniert, er überdeckt eine Fläche von etwa 150 cm \times 130 cm und besitzt vier Stereolagen zum Nachweis von Teilchen. Insgesamt hat er etwa 143000 Auslesekanäle. Der Inner Tracker ist ein Teil der Tracking Stationen nach dem Magneten, er befindet sich nahe am Strahlrohr. Obwohl er nur etwa 2 % der Akzeptanz überdeckt, wird er von ungefähr 20 % aller Spuren durchquert werden. Der IT benutzt ebenfalls eine Siliziumstreifentechnologie und besitzt 130000 Kanäle, die in drei Stationen hintereinander angeordnet sind [20]. Die restlichen 98 % der Detektorakzeptanz überdeckt der Outer Tracker, auf den in Kapitel 2 genauer eingegangen wird.

Der Magnet mit einem Gewicht von 1600 t befindet sich zwischen dem Trigger Tracker und den Tracking Stationen. Sein Feld besitzt eine maximale Stärke von 1,1 T, das Integral über das Magnetfeld $\int B dl$ beträgt 4 Tm. In seinem vertikal orientierten Feld werden geladene Teilchen horizontal abgelenkt. Durch die Ablenkung wird es möglich, den Impuls der Teilchen aus der Krümmung ihrer Spur zu bestimmen [21].

Zur Teilchenidentifikation stehen zwei RICH¹⁰-Detektoren, ein elektromagnetisches und ein hadronisches Kalorimeter sowie der Myondetektor zur Verfügung. Die RICH-Detektoren dienen insbesondere zur Separation von Kaonen und Pionen. Der erste RICH-Detektor, RICH1, befindet sich vor dem Magneten. Er besteht aus zwei verschiedenen Radiormaterialien mit zwei Brechungsindizes: einem Aerogel mit $n=1,03$ und C_4F_{10} mit $n=1,0014$. Damit ist es möglich, Kaonen und Pionen mit einem Impuls von bis zu 10 GeV bzw. 50 GeV zu separieren. RICH2 befindet sich hinter den Trackingstationen, verwendet CF_4 mit $n=1,0005$ als Radiator und kann Pionen und Kaonen bis zu einer Energie von 100 GeV trennen [22]. Die Kalorimeter befinden sich hinter dem RICH2-Detektor. Das elektromagnetische Kalorimeter ist ein in Schachlik-Technologie gebautes Sampling Kalorimeter, das Blei als Absorber und Plastikszintillatoren als aktives Medium verwendet. Es hat eine Strahlungslänge von 25 X_0 ¹¹ und dient vor allem zum Nachweis von Elektronen, Photonen und π^0 -Mesonen. Das hadronische Kalorimeter besteht aus Eisen und Szintillatoren und soll Hadronen nachweisen [23]. Das Myonsystem benutzt in der ersten Station nahe des Strahlrohrs GEM¹²-Technologie, sonst MWPCs¹³, sowie

¹⁰RICH: Ring Imaging Cherenkov Detector.

¹¹Die Strahlungslänge X_0 gibt an, nach welcher Strecke die Energie eines Elektrons auf 1/e gefallen ist.

¹²GEM: Gas Electron Multiplier, Gaselektronvervielfacher.

¹³MWPC: Multi Wire Proportional Chambers, Vieldrahtproportionalkammern.

Eisenabsorber [24].

1.3.3 Der Trigger

Der Trigger ist bei LHCb von sehr großer Bedeutung, da er die Ereignisse mit B-Mesonen aus dem großen Untergrund von “Minimum Bias Events”¹⁴ zu selektieren muss. Der Trigger besteht aus zwei Stufen, einem Hardwaretrigger – Level0 Trigger – und einem Softwaretrigger – HLT: High Level Trigger –, die zusammen die Ausleserate auf 2 kHz reduzieren sollen.

Der Hardwaretrigger

Der Hardwaretrigger soll die Ausleserate auf 1 MHz reduzieren. Er kombiniert Informationen aus den Kalorimetern, dem Myonsystem und dem sogenannten “Pile-up Veto System”. Dazu werden eigene Triggerdaten genutzt. Das “Pile-up Veto System”, ein Teil des Vertexlocators, verwirft Ereignisse mit mehreren Primärvertices. Um die B-Zerfälle (invariante Masse der B-Mesonen: ~ 5 GeV) zu selektieren wird nach Teilchen mit einer hohen Transversalenergie gesucht. Dabei werden die Kalorimeter genutzt, um die Hadronen, Elektronen, Photonen und neutralen Pionen mit der höchsten Transversalenergie zu selektieren. Im Myonsystem wird nach den beiden Myonen mit dem größten Transversalimpuls gesucht.

Der Softwaretrigger

Der High Level Trigger soll die Ausleserate auf 2 kHz reduzieren, was einer Datenmenge von etwa 50 GByte/s entspricht. Dabei benutzt er die vollständige Auslese des Detektors. Der Softwaretrigger benutzt sogenannte unabhängige “Trigger alleys”, Triggerpfade, um die Informationen aus dem Level0 Trigger auszuwerten und zu verbessern. Dabei gibt es verschiedene Pfade, die je nach Level0 Information angesprochen werden, nämlich einen Myon-, einen Myon- & Hadron-, einen Hadronpfad und einen Pfad aus dem elektromagnetischen Kalorimeter. In dieser Stufe werden die Ereignisse bereits teilweise rekonstruiert, um Informationen über das zerfallene Teilchen zu erhalten. Dazu sollen 2000 CPUs zur Verfügung stehen [25].

¹⁴Minimum Bias Event: sämtliche in einer Wechselwirkung entstehenden Teilchen.

Kapitel 2

Der Outer Tracker

Der LHCb Outer Tracker ist neben dem Trigger Tracker und dem Inner Tracker ein Teil des Spurrekonstruktionssystems. Er befindet sich ebenso wie der Inner Tracker direkt hinter dem Magneten und überdeckt die weiter vom Strahlrohr entfernten Regionen mit – im Vergleich zum Inner Tracker – niedrigeren Raten. Abb. 2.1 [26] zeigt eine schematische Darstellung des Spurkammersystems mit allen Komponenten. Die Aufgaben des Outer Trackers sind die Verbindung der Treffer im Vertexlocator und in den Kalorimetern sowie die Impulsmessung eines Teilchens (erwartete Impulsauflösung: $\delta p/p = 0,35\%$ bei $p = 1 \text{ GeV}/c$) aus der Krümmung der Spur im Magnetfeld. Dazu ist eine Einzeltrefferauflösung von etwa $200 \mu\text{m}$ nötig. Der Outer Tracker ist in Driftkammertechnologie gebaut, also – im Gegensatz zu den anderen Komponenten der Spurfindung – ein Gasdetektor (Kap. 3). Er überdeckt eine Fläche von $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ und besteht aus drei Stationen mit je vier Ebenen doppellagiger Module. Dabei sind die zweite und die dritte Ebene um $\pm 5^\circ$ gegenüber der y-Achse verdreht (Stereolagen). Durch diese Drehung erhält man eine Information über die Position des Teilchendurchgangs entlang des Straws. Die Auflösung beträgt in dieser Richtung einige Zentimeter. Dies ist bei der Spurrekonstruktion wichtig, um die richtigen Teilchenspuren zu verbinden und die Anzahl der falschen Spuren zu reduzieren.

2.1 Der Aufbau des Outer Trackers

Die kleinste Einheit des Outer Trackers ist ein Straw, ein gasgefülltes, dünnwandiges Röhrchen mit einem Draht in der Mitte (Funktionsweise: Kap. 3.2). Jeder Straw besitzt einen Innendurchmesser von $4,9 \text{ mm}$, eine Länge von etwa $2,5 \text{ m}$ und arbeitet als eigenständige Detektoreinheit. Durchquert ein Teilchen den Straw, werden Gasatome ionisiert und das Signal der Elektronen, die in einem elektrischen Feld zum Draht driften, gemessen (Kap. 3). Die Zeitdifferenz zwischen der Wechselwirkung der LHC-Teilchenpakete und der Messung des Signals am Draht kann in einen Abstand vom Draht umgerechnet werden (Kap. 4). Ein Treffer kann mit einer Auflösung von $200 \mu\text{m}$ in der Ablenkungsebene des Magneten bestimmt werden.

Abb. 2.2(a) zeigt einen solchen Straw. Er besteht aus mehreren Schichten von Aluminium und Kapton, um einerseits als Kathode zu dienen und andererseits die Gasdichtigkeit

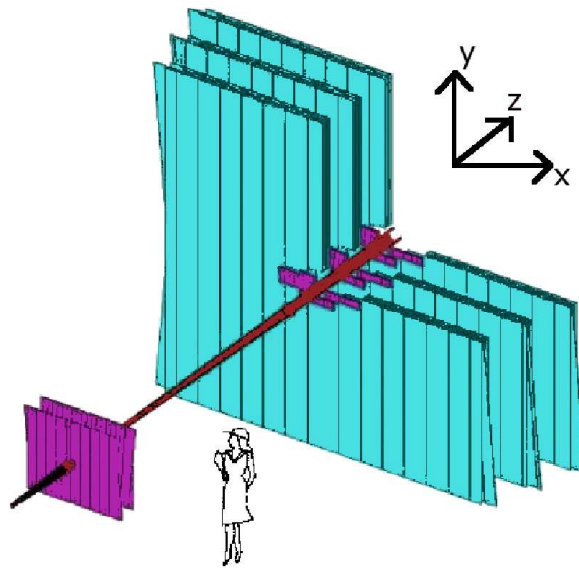


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Outer Trackers (türkis), des Inner Trackers und des Trigger Trackers (violett) [26].

zu gewährleisten. Abb. 2.2(b) [26] zeigt die einzelnen Schichten eines Straws bei einer Gesamtdicke von knapp über $100\ \mu\text{m}$. Die innere Strawwand besteht aus einer Lage kohlenstoffdotiertem Kapton (KaptonXC), das die Kathode bildet. Durch den Kohlenstoff wird das Kapton leitfähig. Die äußere Lage ist ein Kapton-Aluminium Laminat. Das Kapton gewährleistet die Gasdichtigkeit der Straws, das Aluminium bildet den Massenkontakt zum Modul. Da aufgrund der mittleren Kaptonlage keine Leitfähigkeit zwischen der Kathode und der Außenwand besteht, ist es nötig, diesen Kontakt durch eine sogenannte “Zunge”, die die beiden Lagen verbindet, am Ende jeden Straws zu gewährleisten.

Die Anode ist ein goldbeschichteter Wolframdraht mit einem Durchmesser von $25\ \mu\text{m}$. Der Anodendraht befindet sich in der Mitte des Straws. Für die Eigenschaften des Detektors ist es wichtig, dass der Draht über die gesamte Länge von 2,5 m mit einer Präzision von besser als $50\ \mu\text{m}$ in der Mitte des Straws platziert ist. Um dies zu ermöglichen, werden alle 80 cm sogenannte Drahtpositionierer verwendet. An den Enden des Straws werden Endstücke angebracht. Die Drahtpositionierer und Endstücke sind in Abb. 2.2(c) gezeigt [26].

Die Straws werden in Modulen mit einer Länge von 5 m bzw. 2,5 m zusammengebaut. Da nahe am Strahlrohr die Occupancy sehr hoch ist, kann dort der Outer Tracker nicht mehr benutzt werden. Stattdessen wird dort ein Siliziumstreifendetektor verwendet (Inner Tracker). In direkter Umgebung des Strahlrohrs werden darum die 2,5 m Module eingebaut.

Ein Modul besteht aus zwei Lagen Straws. Der Aufbau ist in Abb. 2.3 schematisch dargestellt [26]. Abbildung 2.3(a) zeigt eine Lage. Die Straws besitzen eine Länge von 2,5 m, um die Occupancy zu verringern. In den 5 m-Modulen sind jeweils 64 Straws nebeneinander und zwei hintereinander angeordnet. Damit ergeben sich 128 Straws pro Modullage bzw. 256 Straws für ein zweilagiges Modul. Der Querschnitt eines solchen Moduls ist in Abb. 2.3(b) gezeigt. Hier sieht man, dass die Straws der beiden Lagen

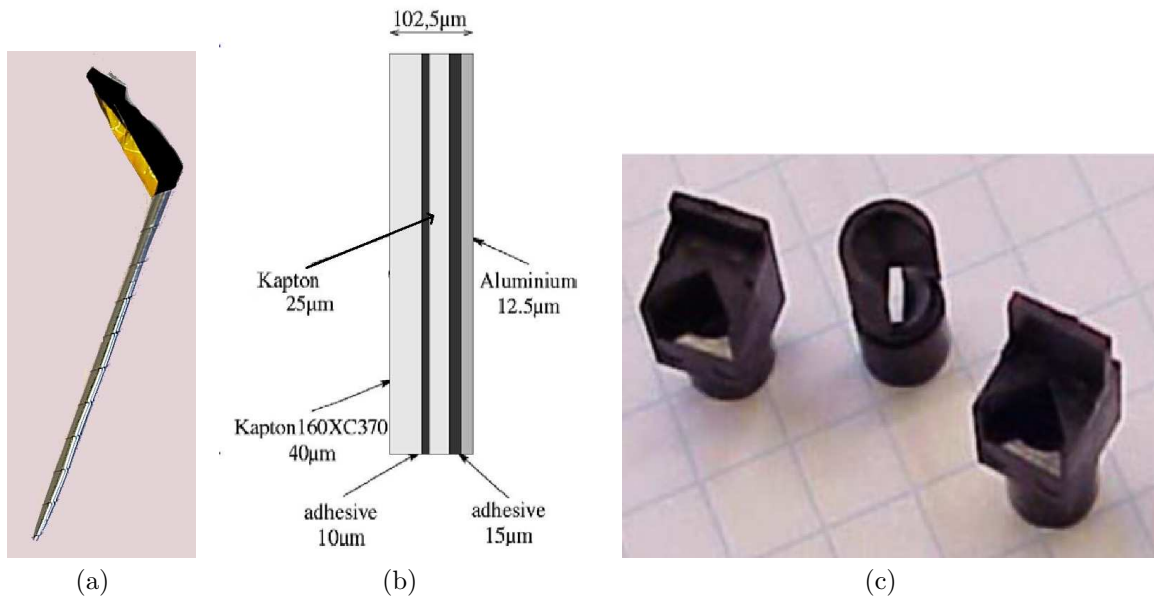


Abbildung 2.2: Straw und Drahtpositionierer [26]. (a) Photo eines Straws. (b) Die einzelnen Schichten einer Strawwand. (c) Zwei Endstücke und ein Drahtpositionierer.

um einen halben Radius versetzt sind, um die inaktiven Bereiche zu minimieren. Bei den 2,5 m-Modulen gibt es keine Unterbrechung in der Mitte, die Straws gehen über die komplette Länge des Moduls.

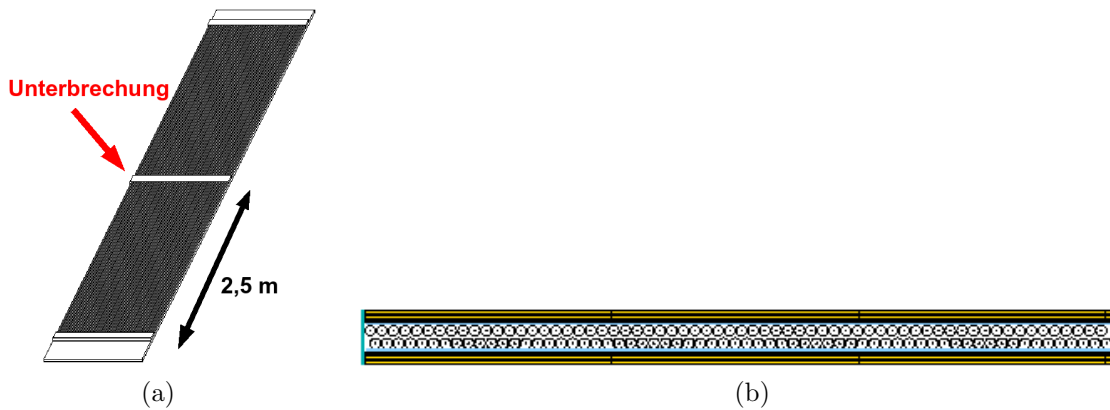


Abbildung 2.3: Modulaufbau: Schema einer Lage(a) und Querschnitt durch das Modul (b) mit den beiden Lagen Straws.

Die Module werden beim Einbau in den Outer Tracker in Lagen zusammengefasst. Abb. 2.4 [26] zeigt die Aufsicht aus der Strahlrichtung auf solch eine Lage. Der Strahl definiert die z-Richtung, die Module und die Straws sind in y-Richtung ausgerichtet. Die Ablenkungsebene des Magneten entspricht der x-Richtung. In der Abbildung sieht man, dass sich die 5 m-Module weiter außen im Detektor befinden, nahe am Strahlrohr

und dem Inner Tracker sind die 2,5 m-Module eingebaut. Um diesen Bereich abzudecken, wurden auch Module mit einer Breite von nur 32 Straws gebaut. Eine Lage setzt sich aus insgesamt 14 5 m-Modulen, sechs 2,5 m-Modulen und zwei schmalen 2,5 m-Modulen zusammen. Jeweils vier Lagen werden zu einer Station zusammengefasst. Dabei sind die zweite und die dritte Lage um $\pm 5^\circ$ gedreht (Stereolagen), man erkennt in Abb. 2.4 die überstehende Kante. Drei Stationen ergeben den Outer Tracker. Er besteht aus insgesamt 24 Strawlagen mit 53760 Straws.

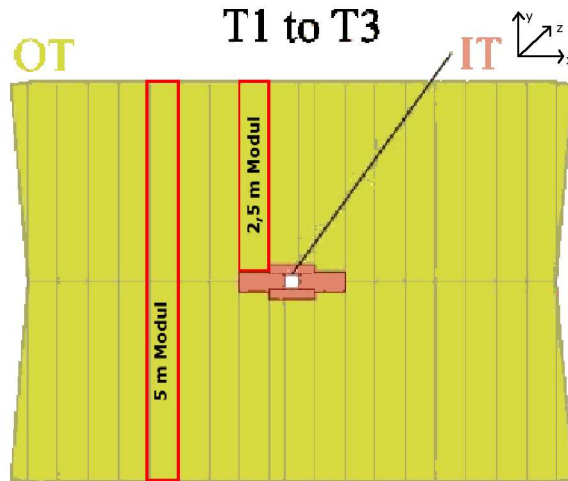


Abbildung 2.4: Outer Tracker Modullage (gelb). Eine Lage besteht aus den einzelnen Modulen. Nahe am Strahlrohr, wo sich ebenfalls der Inner Tracker (rosa) befindet, sind die 2,5 m langen Module installiert, weiter außen die 5 m-Module. [26].

2.2 Modulproduktion

Um eine Einzeltrefferauflösung von $200\,\mu\text{m}$ zu erreichen, müssen die Module über die gesamte Länge von 5 m auf besser als $100\,\mu\text{m}$ genau gefertigt sein und auch die Straws in den Modulen müssen an der erwarteten Stelle sein. Dies stellt große Anforderungen an die Modulproduktion. Um die geforderten Grenzwerte einzuhalten, wurden speziell gefertigte Halte- und Transportvorrichtungen verwendet.

Die Module wurden an drei Standorten gefertigt: NIKHEF und Heidelberg produzierten die 5 m-Module, die 2,5 m-Module wurden in Warschau gebaut. Zuerst müssen die Straws vorbereitet werden. Sie werden geschnitten und mit Drahtpositionierern und Endstücken versehen. Die Straws werden auf einem speziell gefertigten Aluminiumtemple angeordnet, bevor sie auf einem Paneel verklebt werden. Dieses extrem leichte, aber stabile Paneel bildet später eine Außenseite des Moduls. Es besteht aus einer äußeren Lage aus Kohlenstofffaser, die dem Modul Stabilität gibt, einem leichten Rohacelschaum und einem Aluminium-Kapton Laminat, das den Massenkontakt aller Straws sichert und für die Gasdichtigkeit des Moduls sorgt. Als nächstes wird der Anodendraht durch die Straws gezogen und auf einem HV-Durchführungsboard verlötet. Dasselbe geschieht

mit einem zweiten Paneel. Die beiden Paneele werden verbunden, indem sie mit Seitenwänden verklebt werden. Während der Produktion werden die Paneele nur mit Hilfe spezieller Halterungen bewegt und fixiert, um eine Ebenheit von besser als $200\text{ }\mu\text{m}$ über die Länge des Moduls zu sichern [28].

Bereits während der Produktion müssen die Module eine Reihe von Qualitätstests passieren. Es wird die Drahtspannung gemessen, um ein Durchhängen oder Reißen der Drähte zu verhindern. Weiterhin werden bei den einzelnen Lagen die Dunkelströme an Luft gemessen. Ist ein Modul vollendet, werden die Gasdichtigkeit bestimmt, die Ströme unter Driftgas gemessen und für jeden Straw an mehreren Stellen die Pulshöhe mit einer Eisenquelle gemessen, um die Uniformität des Signals zu untersuchen [29].

2.3 Die Ausleseelektronik

Die Auslese der Outer Tracker Module befindet sich an den beiden Enden der 5 m-Module, bzw. an einem Ende eines 2,5 m-Moduls in den sogenannten Frontendboxen. Das Signal wird zuerst in den Vorverstärker ASDBLR¹ geführt, der das Signal verstärkt und diskriminiert. Der Vorverstärker gibt einen differentiellen digitalen Puls aus, der zur Zeitmessung an den OTIS²-Chip weitergegeben wird. Der am Heidelberger ASIC Labor entwickelte Chip [30] arbeitet als TDC³ und misst die Zeit zwischen Signal im Outer Tracker und dem Wechselwirkungszeitpunkt. Ein OTIS-Chip ist in der Lage, 16 Vorverstärkerkanäle zu verarbeiten. Zwei OTIS-Chips werden zu einer OTIS Karte zusammengefasst, in einer Frontendbox befinden sich vier Karten, die 128 Straws auslesen. Die Daten aller OTIS Karten einer Frontendbox werden von einer optischen Senderkarte (GOL⁴ Aux Karte) zusammengefasst. Diese bildet einen seriellen Datenstrom und sendet die Daten über optische Fasern an eine Empfängerkarte (O-Rx Karte) im Elektronikraum. Sowohl die GOL Aux Karte als auch die O-Rx Karte wurden am Physikalischen Institut Heidelberg entwickelt [31]. Die Empfängerkarte wandelt die optischen Signale in elektrische zurück, diese werden dann von dem Level1 Buffer Board (TELL1) verarbeitet [32]. Abb. 2.5 zeigt das Schema der Auslekette mit den einzelnen Komponenten [33].

2.4 Teilchenflüsse im LHCb Outer Tracker

In Abbildung 2.6 sind die Outer Tracker Stationen (ohne Kennzeichnung der Stereolagen) im Koordinatensystem des LHCb-Detektors gezeigt. Der Strahl geht in z-Richtung und die Straws der nicht gedrehten Lagen sind parallel zur y-Achse ausgerichtet. Damit ist eine Ortsauflösung in x-Richtung gegeben, die der Ablenkebene des Magneten entspricht.

Wenn man den Arbeitspunkt des Outer Trackers im LHCb Detektor bestimmen will, ist die Frage entscheidend, welche Anodenströme beim Betrieb gemessen werden. Bei einer Luminosität von $2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ für den Betrieb des LHCb Detektors und einer

¹ASDBLR: Amplifier Shaper Discriminator with BaseLine Restoration.

²OTIS: Outer tracker Time Information System.

³TDC: Time to Digital Converter.

⁴GOL: Gigabit Optical Link.

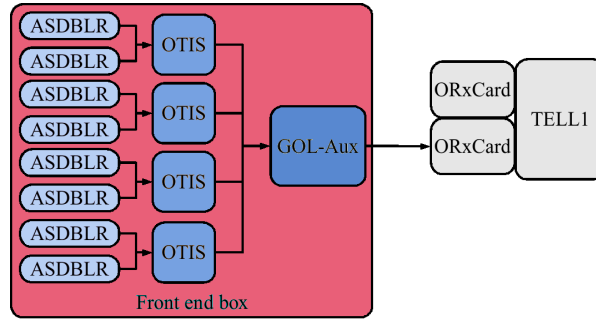


Abbildung 2.5: Auslese des Outer Trackers mit Vorverstärker (ASDBLR), TDC (OTIS) und optischer Senderkarte (GOL Aux Karte) in der Frontend-box, sowie optischer Empfängerkarte (O-Rx Karte) und Level1 Buffer Board (TELL1) [33].

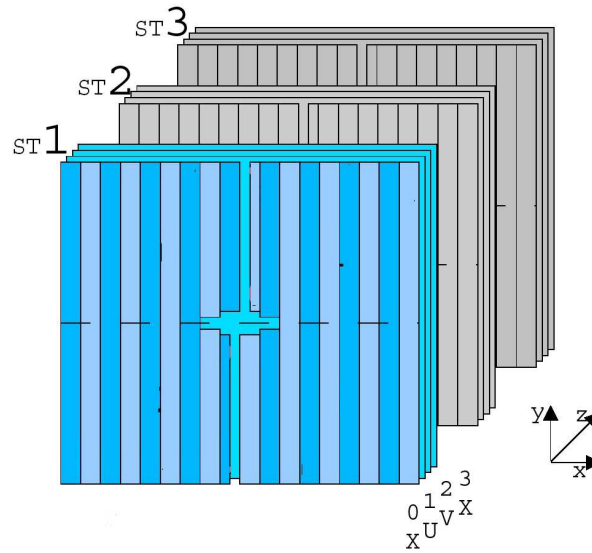


Abbildung 2.6: Outer Tracker im Koordinatensystem des LHCb Detektors: Der Strahl definiert die z -Richtung, die Straws sind parallel zur y -Achse ausgerichtet.

Proton-Proton Kollisionsrate von 40 MHz ergibt sich bei einem Wirkungsquerschnitt von 100 mb für “Minimum Bias Events” eine Ereignisrate von 14,6 MHz [27]. Mit Monte Carlo Studien kann die Verteilung der Teilchen im Outer Tracker bestimmt und daraus der erwartete Anodenstrom berechnet werden [34].

In Abbildung 2.7 ist die erwartete Teilchenrate in der ersten Lage des Outer Trackers gezeigt, wenn die obigen Parameter angenommen werden. In Abb. 2.7(a) ist der gesamte Outer Tracker gezeigt, in Abb. 2.7(b) nur der innere Teil, durch den die meisten Teilchen gehen. Wie man sieht, beträgt die Rate im innersten Bereich etwa 35-40 kHz, fällt aber innerhalb weniger Zentimeter bereits auf eine Rate von wenigen Kilohertz ab. Um die Occupancy eines Straws zu bestimmen, müssen alle Treffer entlang dieses Straws aufsummiert werden. Daraus ergibt sich eine erwartete Occupancy für die Straws direkt oberhalb des Wechselwirkungspunktes von etwa 5,1 %, für die Straws mit der höchsten

Teilchenrate pro Zentimeter etwa 5,0 %. Die erwartete Occupancy bei $x=60$ cm beträgt 5,8 %. Die höhere Occupancy ergibt sich, da in diesem Bereich die Straws länger sind.

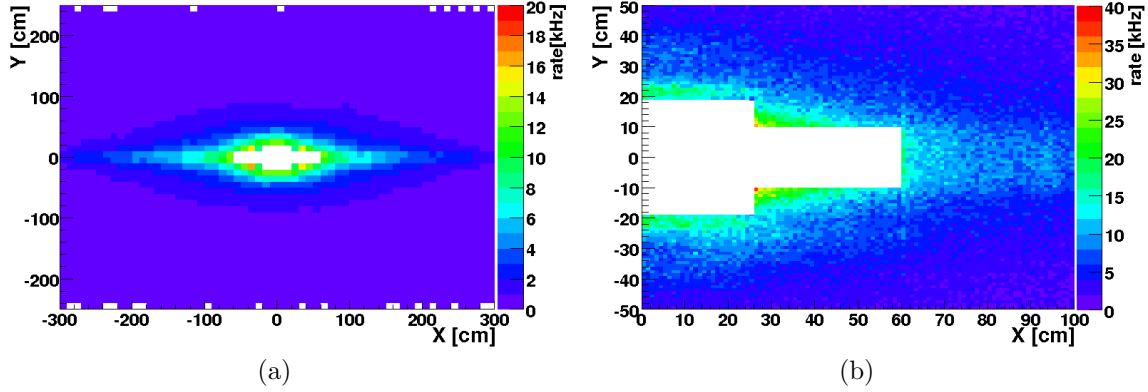


Abbildung 2.7: Erwartete Teilchenrate in der ersten Lage des LHCb Outer Trackers: (a) zeigt den gesamten Outer Tracker mit einer Auflösung von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. In Abb. (b) ist der innere Bereich mit einer Auflösung von $1\text{ cm} \times 0,5\text{ cm}$ (Strawbreite) gezeigt. Der Bereich in der Mitte wird im Experiment vom Inner Tracker überdeckt.

Aus den Teilchenraten kann nun der erwartete Anodenstrom im LHCb Outer Tracker berechnet werden (Kap. 3.2). Das Ergebnis ist in Abbildung 2.8 gezeigt.

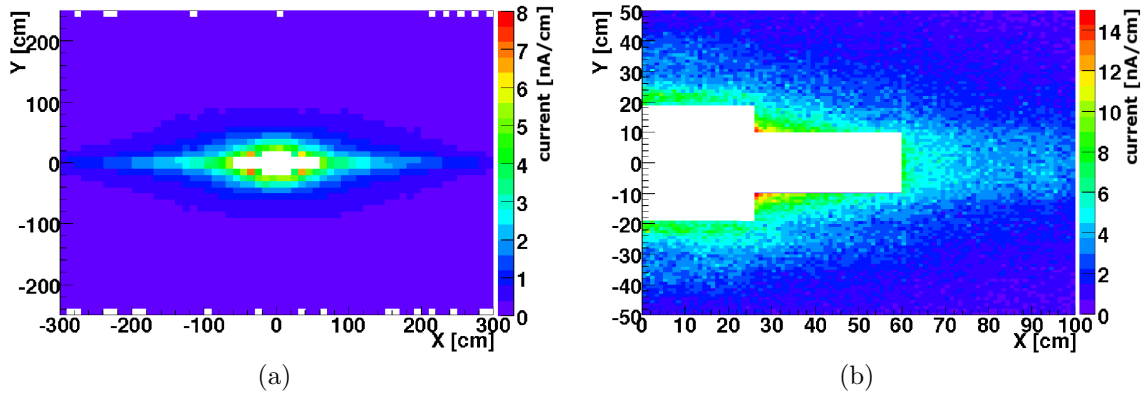


Abbildung 2.8: Anodenstrom in der ersten Lage des LHCb Outer Trackers: (a) zeigt den gesamten Outer Tracker mit einer Auflösung von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. In Abb. (b) ist der innere Bereich mit einer Auflösung von $1\text{ cm} \times 0,5\text{ cm}$ (Strawbreite) gezeigt. Der Bereich in der Mitte wird im Experiment vom Inner Tracker überdeckt.

Es ergibt sich also ein maximaler Strom von etwa $12\text{--}14\text{ nA/cm}$ im am stärksten bestrahlten Bereich des Outer Trackers und etwa 10 nA/cm im umgebenden Bereich. Wenn man von einer Betriebsdauer von 10 Jahren ausgeht, wird der Detektor etwa

10^8 s betrieben werden. In dieser Zeit akkumuliert der Draht also eine Ladung von etwa $10 \text{ nA/cm} \times 10^8 \text{ s} = 1 \text{ C/cm}$ im stark bestrahlten Bereich. Während der ganzen Zeit muss der Outer Tracker zuverlässig Daten liefern.

Kapitel 3

Gasdetektoren

Ein Outer Tracker Modul besteht aus 256 einzelnen Driftröhrchen (Strawtubes). Dabei kann jeder Straw als ein unabhängiger Detektor betrachtet werden, der nach dem Prinzip eines Proportionalzählers funktioniert. Er zählt damit – ebenso wie zum Beispiel MWPCs¹ oder GEMs² – zu der Gruppe der Gasdetektoren und dient meist der Ortsbestimmung eines Teilchendurchgangs.

Proportionalzählrohre weisen geladene Teilchen beim Durchqueren eines gasgefüllten Volumens nach. In diesem befinden sich eine Kathode und eine Anode, zwischen welchen eine Spannung anliegt. Die im sogenannten Zählgas erzeugten Elektronen werden zur Anode hin beschleunigt und erzeugen dort ein Ladungssignal, welches detektiert wird (Abbildung 3.1).

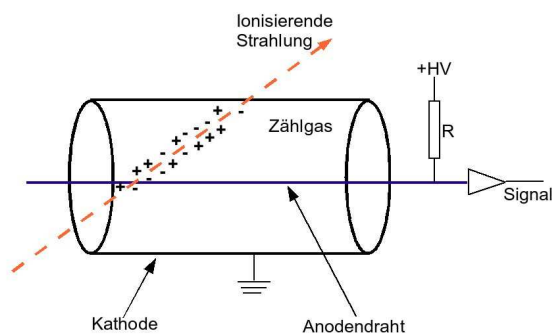


Abbildung 3.1: Funktionsweise eines Strawtubes. Ionisierende Teilchenstrahlung durchquert ein gasgefülltes Volumen und erzeugt Elektronen und Ionen. Die Elektronen driften zu einem auf positive Hochspannung gelegten Anodendraht und erzeugen ein Ladungssignal, welches nachgewiesen wird.

Proportionalzähler arbeiten in einem bestimmten Hochspannungsbereich. Das nachgewiesene Signal ist dabei proportional zu den primär erzeugten Elektronen. Gasdetek-

¹MWPC: Multi Wire Proportional Chambers, Vieldrahtproportionalkammern.

²GEM: Gas Electron Multiplier, Gaselektronvervielfacher.

toren können aber auch in anderen Moden betrieben werden. In Abbildung 3.2 sind die verschiedenen Arbeitsbereiche in Abhängigkeit von der Anodenspannung gezeigt. Bei Ionisationskammern findet kein Gasverstärkungsprozess statt, nur die Elektronen, die von dem durchquerenden Teilchen erzeugt werden, erreichen die Anode und induzieren ein Signal. Nach dem Proportionalmodus geht das Zählrohr bei hohen Spannungen in den Geiger-Müller Modus über. Dort ist das Signal nicht mehr proportional zu den primär erzeugten Elektronen, sondern besitzt immer die gleiche Höhe.

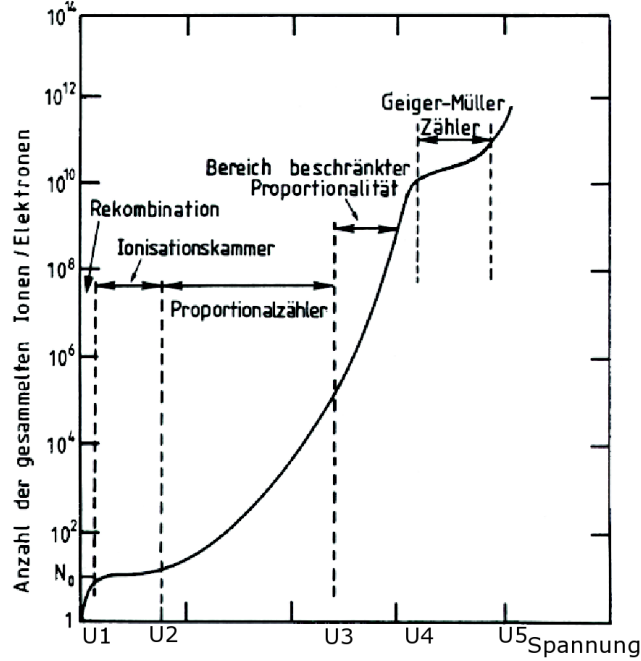


Abbildung 3.2: Arbeitsbereiche eines Gasdetektors. Abhängig von der Spannung kann er als Ionisationskammer, Proportionalzähler oder Geiger-Müller Zähler betrieben werden [38].

Im folgenden Kapitel werden zuerst die grundlegenden Prinzipien eines Gasdetektors erläutert, bevor genauer auf das zylindrische Proportionalzählrohr, welches im LHCb Outer Tracker verwendet wird, eingegangen wird.

3.1 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Durchqueren geladene Teilchen ein Absorbermedium, geben sie über verschiedene Wechselwirkungen Energie ab. Bei schweren geladenen Teilchen wird der Energieverlust pro Längeneinheit über weite Bereiche durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben [36]:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (3.1)$$

mit

$$N_a: \text{Avogadrozahl} = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1},$$

r_e : klassischer Elektronradius = $2,817 \cdot 10^{-13}$ cm,
 m_e : Elektronmasse = $511 \text{ keV}/c^2$,
 Z : Kernladungszahl des Absorbers,
 A : Massenzahl des Absorbers,
 I : mittlere Ionisationsenergie,
 W_{\max} : maximaler Energietransfer bei einer Kollision,
 ρ : Dichte des Absorbers,
 z : Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung,
 $\beta = v/c$ (v : Geschwindigkeit des Teilchens, c : Lichtgeschwindigkeit),
 $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$,
 δ : Dichtekorrektur,
 C : Schalenkorrektur.

Die Dichtekorrektur berücksichtigt, dass ein Teilchen entlang seiner Spur die Atome polarisiert und darum das Feld für entferntere Teilchen reduziert wird. Der Energieverlust bei Stößen mit diesen Atomen ist darum geringer. Dieser Term muss insbesondere bei höheren Energien und dichterem Absorbern berücksichtigt werden. Die Schalenkorrektur ist dagegen für kleine Energien relevant, wenn die Geschwindigkeit des einfallenden Teilchens in der Größenordnung der gebundenen Elektronen liegt. In diesem Fall kann nicht mehr angenommen werden, dass das Elektron im System des einfallenden Teilchens stationär ist. In Abbildung 3.3 ist der Verlauf für Myonen in Kupfer [37] in Abhängigkeit von $\beta\gamma$ des einfallenden Myons gezeigt. Die gestrichelten Linien geben den Verlauf ohne die Korrekturterme an. Der Verlauf besitzt ein Minimum bei $\beta\gamma \approx 4$. Teilchen mit dieser Energie werden minimal ionisierende Teilchen genannt (MIP). Ab einer Energie von etwa 1 TeV dominiert der Verlust durch Photonenabstrahlung.

Die Bethe-Bloch-Formel gilt in erster Linie für schwere geladene Teilchen. Elektronen und Positronen verlieren ihre Energie nur im niederenergetischen Bereich ($< 20 \text{ MeV}$) hauptsächlich durch Ionisation, im hochenergetischen dominiert die Bremsstrahlung [37].

Für Absorbermaterialien mit geringer Dichte wie Gase folgt der gesamte Energieverlust eines durchquerenden geladenen Teilchens weitgehend einer Landauverteilung. Abbildung 3.4 zeigt den gemessenen Energieverlust und den Vergleich mit der theoretischen Erwartung [35]. Der Ausläufer wird durch δ -Elektronen erklärt. Dies sind Elektronen in Atomen, die genügend Energie aufnehmen, um selber wieder zu ionisieren. Photonen verlieren ihre Energie – abhängig von ihrer momentanen Energie – durch den photoelektrischen Effekt, Comptonstreuung oder Paarproduktion. Dabei wird das Photon entweder vollständig absorbiert oder unter großen Winkeln gestreut. Bei niedrigeren Energien, z.B. Photonen aus einer ^{55}Fe -Quelle mit $5,9 \text{ keV}$ Energie, dominiert der Photoeffekt.

3.1.1 Primärionisation

Als Resultat dieser Prozesse werden bei geladenen Teilchen Elektronen-Ion Paare entlang der Spur erzeugt. Die Anzahl der sogenannten Primärelektronen hängt sowohl von der Dichte des Gases als auch von der Energie des durchquerenden Teilchens ab. Haben die Primärelektronen ausreichend Energie (größer als das Ionisationspotential des

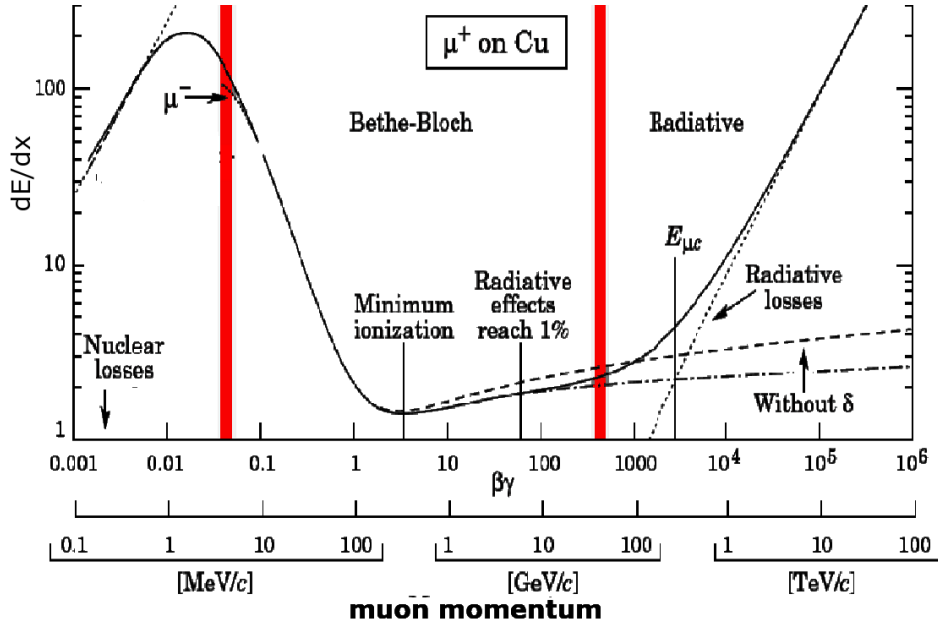


Abbildung 3.3: Energieverlust in Materie für schwere geladene Teilchen anhand von Myonen in Kupfer [37]. Im mittleren Teil (begrenzt durch die roten Balken) wird der Verlust von der Bethe-Bloch-Formel beschrieben. Für Energien im Bereich > 1 TeV dominieren radiative Verluste. Bei niedrigen Energien dominieren die Schalenkorrekturen. Die gestrichelte Linie gibt den Verlauf ohne die Dichtekorrektur δ wieder. Teilchen mit einer Energie von $\beta\gamma \approx 4$ werden als minimal ionisierende Teilchen (MIP) bezeichnet.

Zählgasen), erzeugen sie in direkter Umgebung weitere Elektronen, die sogenannten Sekundärelektronen. Der gesamte Komplex wird im weiteren Cluster genannt. Bei Photonen findet aufgrund des Photoeffekts eine Punktionisation statt, es wird nur an einer Stelle im Straw ein Elektron erzeugt, welches dann Sekundärteilchen ionisiert. Abbildung 3.5 zeigt die Cluster entlang einer Spur für geladene Teilchen (links) und eine Punktionisation bei Photonen (rechts).

Ist die mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion Paares (W_i) bekannt, ergibt sich für geladene Teilchen die gesamte Anzahl der primär und sekundär erzeugten Elektronen (n_T) als

$$n_T = \frac{\Delta E}{W_i}, \quad (3.2)$$

wobei ΔE der Energieverlust des Teilchens beim Durchqueren des Gases ist.

Die mittlere Anzahl der primären (n_p) und der totalen (n_T) Ionisationen für minimal ionisierende Teilchen sowie die mittlere Energie W_i ist für verschiedene Gase in Tabelle 3.1 angegeben [35]. Im weiteren bezeichnet Primärionisation die Teilchen, die nicht im Gasverstärkungsprozess entstehen, also n_T , da diese Zahl in die Berechnung des Gasverstärkungsfaktors einfließt.

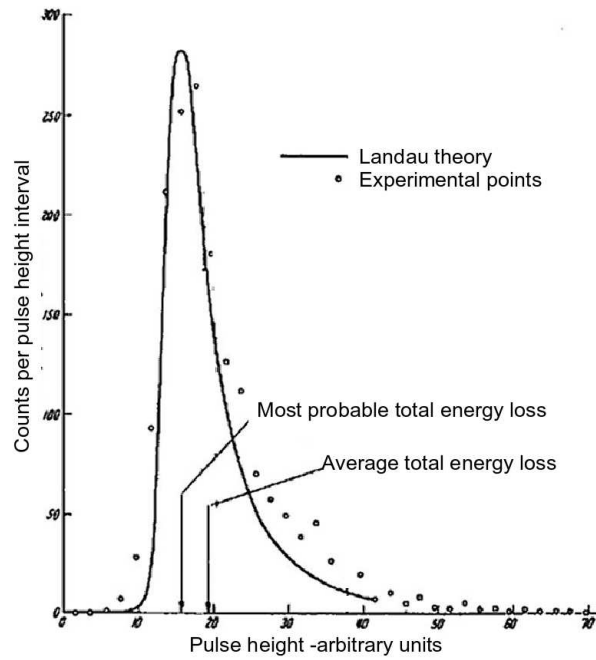


Abbildung 3.4: Der totale Energieverlust eines Teilchens bei der Durchquerung eines Gases folgt einer Landauverteilung [35].

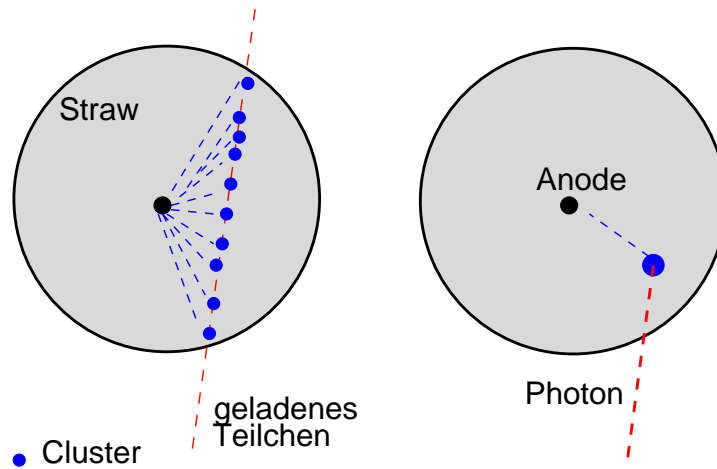


Abbildung 3.5: Ionisationscluster für geladene Teilchen und Photonen. Während geladene Teilchen entlang ihrer Spur mehrere Cluster erzeugen, verlieren Photonen ihre gesamte Energie an einem Punkt.

3.1.2 Drift und Diffusion in Gasen

Die erzeugten Elektronen bewegen sich im Gas. Liegt eine Spannung an, ist diese Bewegung eine Überlagerung von zwei verschiedenen Effekten. Zum einen werden die Elektronen zur Anode hin beschleunigt, zum anderen gibt es ungerichtete Stöße mit den umgebenden Atomen und Molekülen³. Dabei legt ein Elektron im Mittel zwischen zwei

³Sollte ein äußeres Magnetfeld anliegen, beeinflusst auch dieses die Bewegung.

Gas	n_p [1/cm]	n_T [1/cm]	W_i [eV]
Argon	29,4	94	26
CO ₂	32	91	33
O ₂	22	73	31
N ₂	10	56	35

Tabelle 3.1: Anzahl der Ionisationen pro Zentimeter für verschiedene Gase und minimal ionisierende Teilchen. Dabei bezeichnet n_p die primär vom durchfliegenden Teilchen erzeugten Elektronen, n_T die totale Anzahl. W_i ist die mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion Paares [35].

Stößen eine freie Weglänge λ zurück. Diese hängt sowohl von der Wahl des Gases als auch von dem Druck ($\hat{=}$ Teilchendichte) ab. Die ungerichtete Bewegung wird nicht von dem elektrischen Feld beeinflusst. Die aus diesen Effekten resultierende Driftgeschwindigkeit kann vereinfacht dargestellt werden als

$$\vec{v}_{\text{Drift}} = \frac{e}{m} \vec{E} \tau(\vec{E}, \varepsilon), \quad (3.3)$$

wobei \vec{E} die Feldstärke und $\tau(\vec{E}, \varepsilon)$ die Zeit zwischen zwei Stößen ist [38]. Der Wirkungsquerschnitt für Stöße und somit auch τ ist stark von der Energie der Elektronen ε abhängig und durchläuft Maxima und Minima (Ramsauereffekt, [39]). Die Ursachen sind quantenmechanische Beugungsphänomene, die auftreten, wenn die De-Broglie-Wellenlänge der Elektronen in der Größenordnung der Moleküle liegt. In Abbildung 3.6 ist die Driftgeschwindigkeit für verschiedene Gasmischungen in Abhängigkeit des elektrischen Feldes gezeigt [40]. Man sieht die Abhängigkeit der Driftgeschwindigkeit von den verschiedenen Anteilen der Komponenten. Bereits geringe Mengen bestimmter Gase, hier CF₄, können die Driftgeschwindigkeit stark beeinflussen, da sich der Wirkungsquerschnitt für Stöße ändert.

Da Ionen wesentlich schwerer sind als Elektronen, liegt ihre Driftgeschwindigkeit etwa um einen Faktor 10^3 unter der der Elektronen. Die meisten Elektron-Ion Paare entstehen nahe der Anode. Während die Elektronen sehr schnell die Anode erreichen und abtransportiert werden, driften die Ionen langsamer über eine längere Wegstrecke zur Kathode. Aufgrund der von den Ionen verursachten Ladungsverschiebung stammt der dominierende Teil eines Signals von ihnen.

3.1.3 Rekombination und Elektronenanlagerung

Da eine große Zahl der Elektron-Ion Paare die Voraussetzung für eine gute Orts- und Energieauflösung ist, müssen sie lange genug als freie Teilchen existieren, um nachgewiesen zu werden. Es gibt zwei Prozesse, die die Anzahl reduzieren und damit den Nachweis behindern können. Liegt kein elektrisches Feld an, das Elektronen und Ionen räumlich trennt, rekombinieren sie innerhalb kurzer Zeit wieder unter Aussendung eines Photons:

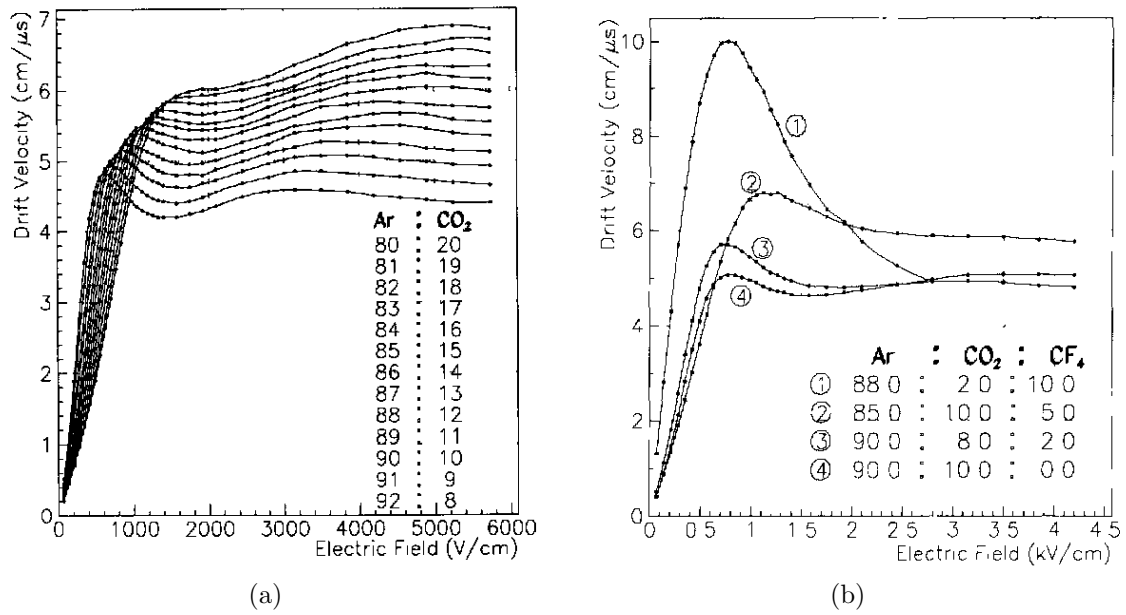


Abbildung 3.6: (a) Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit des elektrischen Feldes für verschiedene Ar/CO₂ Mischungen (Die Messungen entsprechen von oben nach unten den angegebenen Driftgasmischungen) und (b) verschiedene Ar/CO₂/CF₄ Mischungen [40].



Die Rate hängt dabei von der Konzentration der positiven und negativen Ionen sowie der Driftgaswahl ab. Zum anderen gibt es den Effekt der Elektronenanlagerung (Attachment). Dabei werden Elektronen von elektronegativen Atomen eingefangen, deren äußere Schale beinahe voll ist:



Der Effekt tritt auch bei einer räumlichen Trennung der Elektronen und Ionen auf und spricht gegen die Verwendung von elektronegativen Gasen in der Driftgasmischung. Diese Eigenschaft, Elektronenaffinität genannt, tritt beispielsweise besonders stark bei H₂O, O₂ oder CF₄ auf. Im Gegensatz dazu stehen Edelgase wie Argon oder Neon mit einer vollbesetzten äußeren Schale, die keine Elektronen mehr aufnehmen und eine negative Elektronenaffinität haben.

3.2 Das Proportionalzählrohr

Der Proportionalzähler ist durch die Gasverstärkung gekennzeichnet. Das gemessene Signal ist proportional zum Energieverlust des einfallenden Teilchens.

3.2.1 Gasverstärkung

Im weiteren werden nur noch zylindrische Geometrien betrachtet. Im Zentrum befindet sich der Anodendraht, die Wand des Zylinders ist die Kathode, die auf Masse liegt. Es ergibt sich ein radialsymmetrisches elektrisches Feld $|\vec{E}(r)|$, das der Gleichung

$$|\vec{E}(r)| = \frac{U_0}{r \ln r_a/r_i} \quad (3.6)$$

mit

r_a : Radius des Zylinders,

r_i : Radius des Drahtes,

U_0 : Spannung,

folgt. Setzt man für diese Variablen die Werte des Outer Trackers ein ($r_a=2,45$ mm, $r_i=0,0125$ mm, $U_0=1520$ V) ergibt sich die in Abbildung 3.7 gezeigte Feldstärkeverteilung. In diesem Feld werden die Elektronen beschleunigt und gewinnen Energie. Ist der Gewinn zwischen zwei Stößen größer als die Ionisationsenergie des Gases, werden weitere Elektronen erzeugt. Dieser Prozeß findet fast nur nahe der Anode statt, wo die Feldstärke ausreichend hoch ist, um den Elektronen genügend Energie zuzuführen. Da dort viele Teilchen auf einer kurzen Strecke erzeugt werden, wird die Entstehung Lawinenbildung genannt.

Aus Gleichung 3.6 ergibt sich dabei der Energiegewinn ΔE_{kin} im elektrischen Feld zu

$$\Delta E_{\text{kin}} = -e \int_{r_1}^{r_2} |\vec{E}(r)| d\vec{r} = \frac{eU_0}{\ln r_a/r_i} \ln r_2/r_1. \quad (3.7)$$

Hierbei sind r_1 und r_2 die Radien, zwischen denen das Elektron an Energie gewinnt.

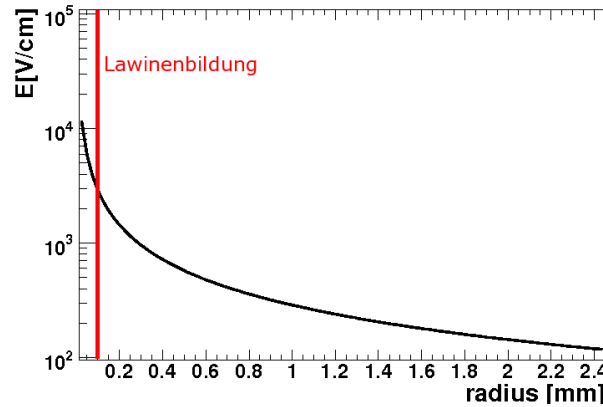


Abbildung 3.7: Feldstärke im Outer Tracker in Abhängigkeit des Drahtabstandes. Die Funktion folgt aus Gleichung 3.6 unter Verwendung der Outer Tracker Geometrie ($r_a=2,45$ mm, $r_i=0,0125$ mm, $U_0=1520$ V). Nahe des Anodendrahtes ist die Feldstärke groß genug, dass auf einer kurzen Strecke viele Elektron-Ion Paare erzeugt werden (Lawinenbildung).

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron-Ion Paar erzeugt wird, ist antiproportional zur freien Weglänge λ zwischen zwei Stößen. Dieser Parameter $\alpha = 1/\lambda$ wird erster Townsend Koeffizient genannt und gibt die Anzahl der erzeugten Elektron-Ion Paare pro Wegstrecke an. Der Zuwachs an Elektronen je Wegstrecke beträgt also

$$dN = N_0 \alpha(r) dr, \quad (3.8)$$

wobei dN den Zuwachs der Elektronen pro Wegstrecke und N_0 die anfängliche Anzahl an Elektronen angibt. Da α vom elektrischen Feld abhängt, zeigt es im Driftrohr auch eine Abhängigkeit vom Radius. Für die Driftdistanz bis zum Anodendraht ergibt sich eine Gesamtanzahl von Elektronen N

$$N = N_0 \exp \left[\int_{r_i}^{r_{\min}} \alpha(r) dr \right] \quad (3.9)$$

Der Faktor N/N_0 wird die Gasverstärkung oder Gain G genannt:

$$\frac{N}{N_0} = G = \exp \left[\int_{r_i}^{r_{\min}} \alpha(r) dr \right] = \exp \left[\int_{E_{r_i}}^{E_{\min}} \frac{\alpha(E)}{dE/dr} dE \right] \quad (3.10)$$

Dabei ist r_{\min} der Abstand vom Draht, bei dem das elektrische Feld ($E_{\min} = E(r_{\min})$) ausreichend stark ist, um sekundäre Elektronen zu erzeugen. Nun kann Gleichung 3.6 differenziert und eingesetzt werden. Unter der Annahme, dass α in erster Näherung proportional zu E ist, gilt $\alpha = k E$ (Diethorn Approximation). Es ergibt sich [41]:

$$\ln G = \int_{E_{r_{\min}}}^{E_i} \frac{U_0}{\ln r_a/r_i} \frac{\alpha(E)}{E^2} dE \quad (3.11a)$$

$$G = \exp \left[\frac{kU_0}{\ln r_a/r_i} \ln \left(\frac{E(r_i)}{E_{\min}} \right) \right] \quad (3.11b)$$

E_{\min} ist abhängig von der Dichte und damit vom Druck des Gases, da es bei größerer Dichte eine höhere Anzahl von elastischen Stößen gibt. Ersetzt man nun $E_{\min}(p)$ durch $E_{\min}(p_0)p/p_0$, mit p_0 als Druck bei einem Referenzwert, kann die Gleichung folgendermassen geschrieben werden:

$$G = \exp \left[\frac{kU_0}{\ln r_a/r_i} \ln \left(\frac{E(r_i)}{E_{\min}(p_0)} \frac{p}{p_0} \right) \right] \quad (3.12)$$

In der Nähe des Anodendrahtes wird die Feldstärke so groß, dass auf sehr kurzen Wegstrecken (etwa $100 \mu\text{m}$) sehr viele Elektron-Ion Paare gebildet werden, fast die ganze Gasverstärkung findet hier statt. In Abbildung 3.8(a) [42] ist eine Monte Carlo Simulation der Lawinenbildung in unmittelbarer Umgebung des Anodendrahtes gezeigt. Da sich die Elektronen wesentlich schneller bewegen als die Ionen, hat die Lawine die Form eines Tropfens, in dessen Schwanz sich die positiven Ionen befinden. Abbildung 3.8(b) zeigt eine schematische Darstellung [35]. Proportionalzähler haben eine typische Gasverstärkung von etwa 10^4 - 10^6 .

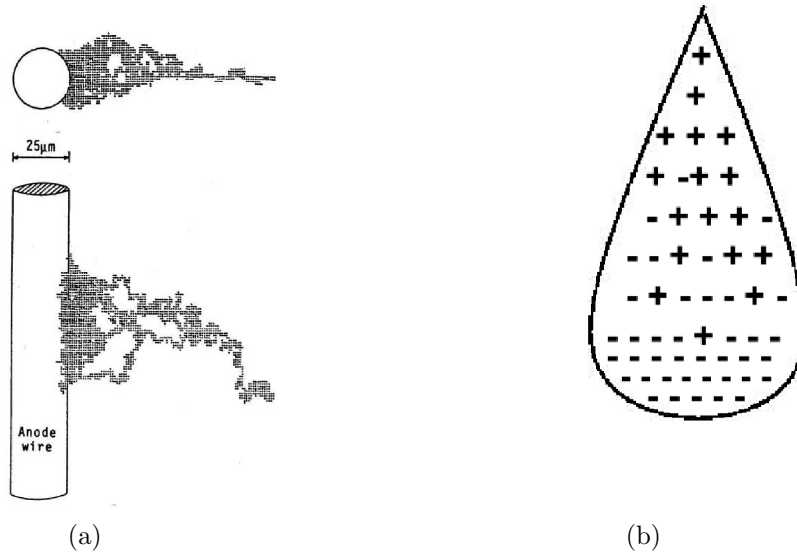


Abbildung 3.8: (a) Simulation der Lawinenbildung. Diese setzt erst wenige Zählrohdrahtdurchmesser von der Anode entfernt ein [42] und trägt den größten Anteil zum Gasverstärkungsprozess bei. Die leichten Elektronen driften mit größerer Geschwindigkeit zur Anode als die Ionen. Dadurch kommt es zur Tropfenform (b).

Ein anderer Effekt, der bei der Lawinenbildung eine Rolle spielen kann und somit auch Einfluss auf die Gasverstärkung hat, ist die Bildung sogenannter UV-Photonen. Diese entstehen, wenn Elektronen aus tieferen Schalen herausgelöst werden. Regen sich die Atome ab, entstehen Photonen. Diese wechselwirken mit dem Gas und können so weitere Elektronen erzeugen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Photon erzeugt wird, wird zweiter Townsend Koeffizient genannt. Entstehen so viele UV-Photonen, dass sie nicht mehr vernachlässigbar sind, arbeitet der Detektor nicht mehr im Proportionalmodus. Es können Dauerentladungen entstehen. Um bei einer höheren Gasverstärkung arbeiten zu können, ohne den Proportionalmodus zu verlassen, fügt man der Gasmischung Löschgase, sogenannte Quencher, bei. Diese bestehen aus mehratomigen Molekülen und absorbieren Photonen. Da diese Moleküle Rotations- und Vibrationszustände besitzen, können sie Photonen unterschiedlicher Energie aufnehmen. Dabei regen sie sich durch elastische Kollisionen ab, ohne wiederum Photonen abzustrahlen.

Bei sehr großen Raten pro Zentimeter können Raumladungseffekte die Gasverstärkung beeinflussen. Durch die hohe Anzahl der langsam driftenden positiven Ionen in Anodendrahtnähe wird das elektrische Feld und somit auch die Gasverstärkung reduziert. In Abbildung 3.9 ist die Gasverstärkung in Abhängigkeit der Rate [29] für 8 keV Photonen gezeigt. In den bei LHCb verwendeten Straws erzeugen sie etwa zehnmal mehr Primärelektronen als MIPs.

Die effektive Gasverstärkung G_{eff} kann bei Kenntnis der Anzahl der Primärteilchen während der Messung aus Anodenstrom und Teilchenrate bestimmt werden.

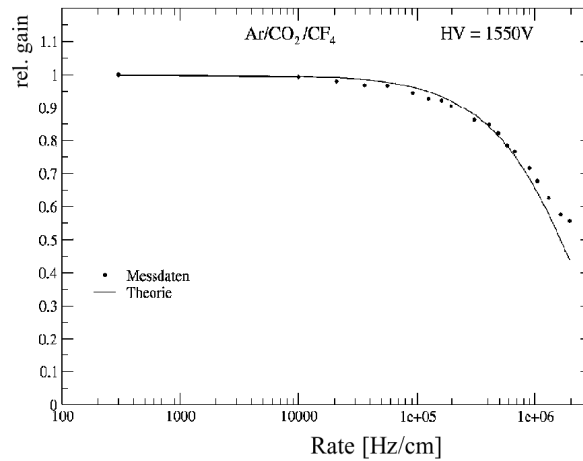


Abbildung 3.9: Raumladungseffekte bei 8 keV Photonen. Die Primärionisation ist etwa einen Faktor zehn größer als bei MIPs in einem Straw mit 5 mm Durchmesser. Die Linie kennzeichnet die Theorie, die Punkte sind Messungen [29].

Es gilt:

$$G_{\text{eff}} = \frac{I}{R \cdot e \cdot n_T} \quad (3.13)$$

mit

- I: Anodenstrom,
- R: Teilchenrate,
- e: Elementarladung,
- n_T : totale Anzahl der Primärelektronen pro Teilchen.

Wie man sieht, ist $I/R \sim G_{\text{eff}}$, ändert sich also dieser Faktor im Laufe einer Messung bei gleichbleibender Rate, kann man daraus Rückschlüsse auf das Detektorverhalten ziehen.

3.3 Design des LHCb Outer Trackers

Die Aufgabe des LHCb Outer Trackers ist die Rekonstruktion der Spuren geladener Teilchen nach dem Passieren des Magneten. Außerdem soll anhand der Krümmung der Spur im Feld des Magneten der Impuls der Teilchen bestimmt werden. An den Outer Tracker werden dabei folgende Anforderungen gestellt:

1. Der Outer Tracker muss den gesamten Detektor, bis auf den innersten Bereich, abdecken, eine Fläche von $5\text{ m} \times 6\text{ m}$.
2. Da sich der Outer Tracker vor den Kalorimetern befindet, die die Energie der Teilchen bestimmen sollen, ergeben sich Anforderungen an das Materialbudget, welches möglichst klein gehalten werden muss.

3. Aufgrund der hohen Wechselwirkungsrate von 40 MHz und der hohen Teilchendichte nahe am Strahlrohr ist ein schneller Detektor mit einer geringen Totzeit nötig.
4. Der LHCb Detektor soll über einen Zeitraum von zehn Jahren betrieben werden. Im Laufe dieser Zeit muss auch der Outer Tracker verwendbar bleiben. Dabei ist der Detektor einer enormen Strahlenbelastung ausgesetzt. Deswegen müssen im Outer Tracker kontrollierte Bedingungen herrschen, um Alterung zu verhindern oder zu minimieren, damit auch nach Jahren noch eine Datennahme möglich ist.

Aufgrund der großen Fläche ist ein Siliziumdetektor nicht praktikabel. Darum entschied man sich für Strawtubes (Kap. 2). Diese ermöglichen über die Länge von 5 m eine hohe Genauigkeit der Drahtposition und damit eine gute Ortsauflösung sowie eine große mechanische Stabilität. Durch die Trennung der Volumen in einzelne Straws wird weiterhin die Raumladungsdichte reduziert, da immer nur ein Anodendraht anspricht.

Um das Materialbudget vor den Kalorimetern möglichst gering zu halten, werden für den Bau des Outer Trackers nur leichte Materialien verwendet, die selten mit den Teilchen wechselwirken. Es werden mit Kohlenstofffaser beschichtete Rohacel Paneele benutzt, die trotz ihres geringen Gewichts die nötige Stabilität gewährleisten. Die Straws selbst bestehen aus einer nur etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ dicken Wand aus Kapton [43]-Aluminiumlaminat. Dadurch ergibt sich eine Strahlungslänge von 0,8 % pro Outer Tracker Lage, insgesamt etwa 10 % für den kompletten Outer Tracker.

Bei der Wahl des Driftgases müssen viele Parameter berücksichtigt werden:

- Hohe Driftgeschwindigkeit,
- Geringer Elektroneneinfang und geringe Diffusion, um eine gute Ortsauflösung zu ermöglichen,
- Hohe Gasverstärkung, damit einer der ersten Cluster ein Signal auslöst und damit die Ortsauflösung verbessert,
- Inert, damit keine Detektorkomponenten angegriffen werden oder Ablagerungen entstehen,
- Günstig, nicht giftig, brennbar oder explosiv.

Edelgase haben eine gute Gasverstärkung im Vergleich zu mehratomigen Molekülen, bei denen es viele Anregungszustände gibt, die nicht zur Ionisation führen. Insbesondere Argon, Xenon und Krypton haben einen großen ersten Townsend Koeffizient. Da Argon die günstigste Alternative ist, ist es ein bevorzugtes Driftgas. Allerdings erlaubt reines Argon nur Gasverstärkungen im Bereich von 10^3 - 10^4 , höhere Gasverstärkungen führen zu Dauerentladungen. Diese entstehen durch Photoelektronen und UV-Photonen, die im Abregungsprozess des Argons entstehen. Um die Gasverstärkung zu erhöhen wird ein mehratomiges Löschgas mit einem großen Wirkungsquerschnitt beigemischt. Durch die zahlreichen Rotations- und Vibrationszustände können diese Moleküle die Teilchen gut

absorbieren. Verwendet werden größere Moleküle wie Isobutan, aber auch Kohlendioxid ist eine Alternative.

Die Beigabe von elektronegativem Tetrafluormethan (CF_4) erhöht die Driftgeschwindigkeit in der Gasmischung (Abb. 3.6). Gleichzeitig hat es aber einen hohen Attachementkoeffizienten, absorbiert also die Elektronen und verschlechtert damit die Energie- und Ortsauflösung im Detektor, da Elektronen von einer höheren Anzahl von Clustern den Draht erreichen müssen, um ein Signal auszulösen. Außerdem können bei Verwendung von CF_4 bei der Bestrahlung sowohl Fluorwasserstoff (HF) und die dazugehörige Flusssäure als auch Fluorionen entstehen. Die Moleküle sind hochreaktiv und können die Drahtoberfläche anätzen.

Aufgrund der Vorteile der hohen Geschwindigkeit entschied man sich ursprünglich für eine Driftgasmischung von $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ (75 %/10 %/15 %). Bei Studien von Michael Walter [29] wurde allerdings beobachtet, dass die Beigabe von CF_4 zur Driftgasmischung zu Ätzungen und Reißen des Drahtes führt. Da dieser Effekt bei Ar/CO_2 (70 %/30 %) nicht beobachtet wurde, änderte man die Driftgasmischung. Diese Mischung besitzt eine geringfügig geringere Driftgeschwindigkeit (Abb. 3.6), stellt aber eine sicherere Alternative da.

Kapitel 4

Messung der Kammereigenschaften

4.1 Motivation

Im März 2005 fand am Experimentierbereich 22 des DESY¹ ein Strahltest des LHCb Outer Tracker statt. Der zur Verfügung stehende Elektronstrahl hatte eine im Bereich von 1 GeV bis 6 GeV justierbare Energie. In diesem Test sollten erstmals die endgültigen Outer Tracker Module in Kombination mit Prototypen der Ausleseelektronik untersucht und die Kammereigenschaften bestimmt werden. Aufgrund des zur Verfügung stehenden Platzes wurden 2,5 m lange S1U Module (Kap. 2.2) der Produktionsstätte Warschau verwendet. Zur Auslese standen sogenannte Frontendboxen mit Vorverstärker, TDC²-Karten und einer Karte für den optischen Link zur Verfügung (Kap. 2.3).

Die Rolle des Triggers übernahm eine Koinzidenzschaltung aus mehreren Szintillatoren, welche auch als Referenz der Zeitmessung diente. Vor den Modulen bot ein Siliziumstreifendetektor aus 6 Lagen mit einer guten Ortsauflösung (intrinsische Auflösung $< 3 \mu\text{m}$, [44]) eine zusätzliche Möglichkeit, die Durchgangsposition des Elektronenstrahls zu bestimmen. Eine Skizze des Aufbaus ist in Abb. 4.1(a) gezeigt.

4.2 Experimenteller Aufbau

4.2.1 Aufbau der Module

Um eine unabhängige Rekonstruktion von Spuren zu ermöglichen, wurden vier Kammern mit acht Lagen Straws benutzt. Die Kammern wurden aufrecht stehend ohne Stereowinkel zueinander installiert. Der Strahl traf senkrecht auf die Kammerebenen. Die Module wurden so aufgebaut, dass sich bei den Modulen 1, 3 und 4 die Auslese am oberen Ende befand, bei Modul 2 am unteren. Dieser Aufbau wurde gewählt, um die Möglichkeit zu haben, die Effizienz abhängig vom Abstand der Auslese zu untersuchen. Für die Module 1, 2 und 4 betrug die Laufstrecke des Signals somit 225 cm, für Modul 3 25 cm. Der gesamte Aufbau befand sich auf einer senkrecht verfahrbaren Plattform.

¹DESY: Deutsches Elektronen-Synchrotron.

²TDC: Time to Digital Converter.

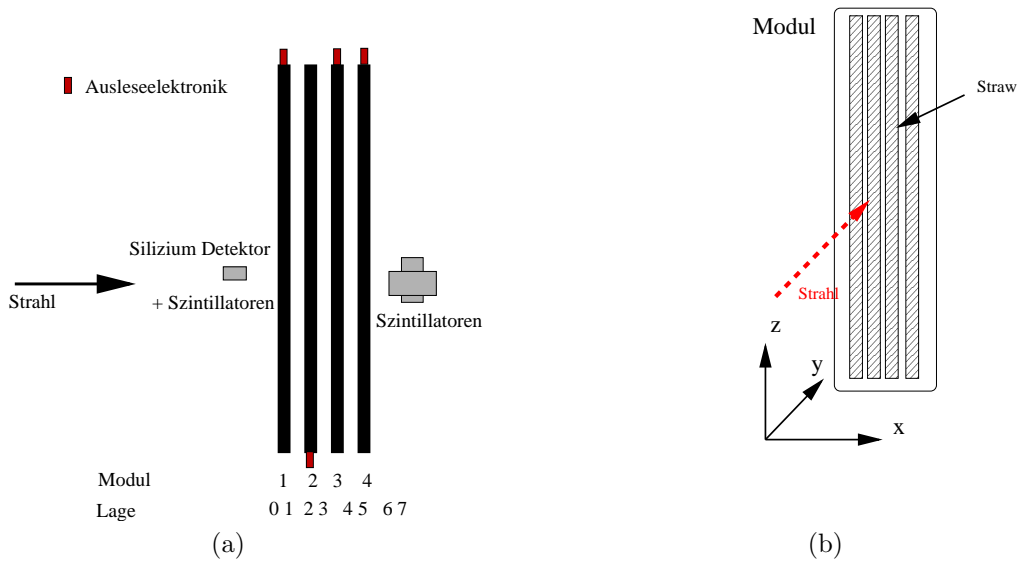


Abbildung 4.1: Setup während der Bestrahlung. Abb. (a) zeigt den Aufbau der Module. Der Strahl trifft senkrecht auf die vier nacheinander angeordneten Module. Abb.(b) zeigt das Koordinatensystem. Die x-Achse verläuft senkrecht zu den Straws in laterale Richtung, die y-Achse ist durch die Strahlrichtung definiert, die z-Achse verläuft parallel zu den Straws.

Das Koordinatensystem

Wie in Abb. 4.1(a) gezeigt ist, werden die Module, ausgehend vom Strahl, von 1 bis 4 gezählt, die einzelnen Lagen der doppelagigen Module von 0 bis 7. Die Straws werden von 0 bis 63 gezählt.

Der Draht des ersten Straws der nullten Lage kennzeichnet den Ursprung des gewählten Koordinatensystems. Die x-Achse zeigt senkrecht zu den Straws, die y-Achse entlang des Strahls und die z-Achse entlang der Straws (Abb. 4.1(b)).

4.2.2 Aufbau der Elektronik

Die Module wurden mit vollständigen Prototypen aller Komponenten der Ausleseelektronik ausgestattet (Kapitel 2.3). Da das Level1-Triggerboard noch nicht zur Verfügung stand, wurde dieses durch einen PC ersetzt, der die Aufgabe übernehmen sollte. Abbildung 4.2 zeigt den während des Testbeams verwendeten Aufbau.

Zur Zeitmessung wurden drei externe Leitungen zu einem TDC Board geführt, um die Messung der Szintillatorsignale zu ermöglichen (Kap 4.2.3). Jeweils 128 Kanäle eines Halbmoduls wurden über eine optische Faser ausgelesen. In der Empfängerkarte wurden die optischen Signale deserialisiert, an eine FPGA³-Karte mit PCI⁴-Interface weitergeleitet, welches die eigentliche Auslese übernahm [45], und auf einem PC gespeichert. Um

³FPGA: Field Programmable Gate Array.

⁴PCI Peripheral Component Interconnect, Bus-Standard.

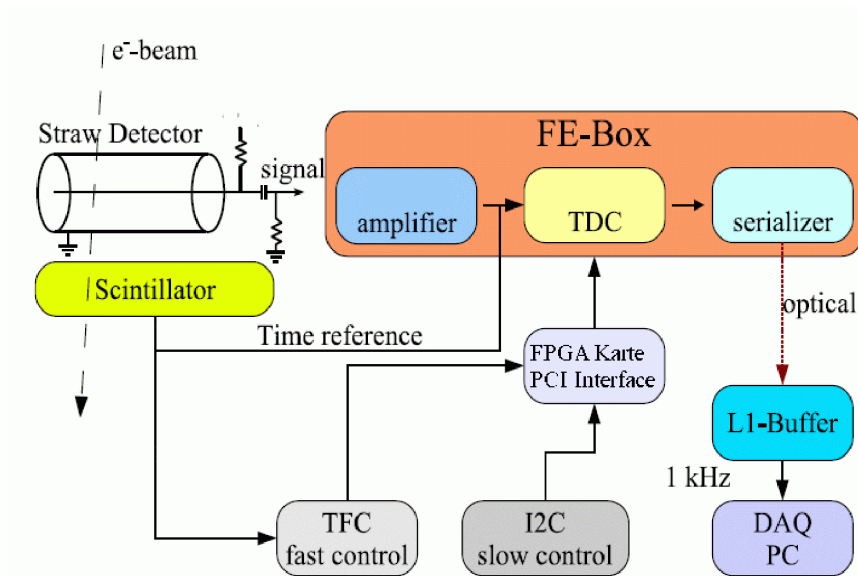


Abbildung 4.2: Ausleseelektronik mit Frontendbox, Szintillator zur Triggerung und den Komponenten zur Kontrolle und weiteren Auslese der Daten.

den Aufbau zu betreiben, waren zusätzlich noch ein Fast-Control-System (TFC⁵) und ein Slow-Control-System nötig. Der TFC stellte eine 40 MHz Clock, den Bunch-Zähler und den Event-Zähler sowie Reset Signale zur Verfügung. Die Slow-Control Signale wie Vorverstärkerschwelle waren über I²C⁶ von einem PC steuerbar [46]. Die Signale beider Systeme wurden über eine eigens für den Betrieb im Testbeam gebaute Verteilerkarte an die Frontendboxen weitergeleitet.

4.2.3 Trigger

Der Outer Tracker-TDC misst Zeiten synchron zu einem 40 MHz Takt, der der späteren Wechselwirkungsrate bei LHCb entspricht. Er ist nicht in der Lage, asynchrone Signale zur Zeitmessung zu nutzen. Da die Ankunft der Elektronen in den Modulen aber zufällig zum 40 MHz Takt ist, ist es nötig, eine Zeitreferenz vorzugeben, um Driftzeiten zu messen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von zwei oder mehr Szintillatoren, die sich im Strahl befinden. Wird eine Koinzidenz der Szintillatorsignale gemessen, wird ein Trigger gesendet und die Auslese gestartet. Da die Kammersignale schneller verarbeitet werden als die Szintillatorsignale, ist es nötig, die Auslese mehrere Zyklen vor der Ankunft der Szintillatorsignale zu beginnen, um den Teilchendurchgang zu registrieren. Die Auslesezeit beträgt 75 ns, also drei Zyklen, da die Signale über einen gewissen Zeitraum verteilt sind. Ein zweiter, verzögerter Trigger ermöglicht eine zusätzliche Zeitmessung der Szintillatoren. Dazu werden die Signale über eine extern gelegte Leitung in einen TDC gespeist und über die Frontendbox ausgelesen.

Es standen vier Szintillatoren zur Verfügung, zwei vor und zwei hinter den Kammern.

⁵TFC: Timing and Fast Control.

⁶I²C: Inter-Integrated Circuit, serieller Datenbus.

Für die hier vorgestellte Analyse wurde nur eine Koinzidenz der beiden hinteren Szintillatoren als Trigger verwendet, da die vorderen zum Siliziumdetektor gehörten und dieser Aufbau hier nicht verwendet wurde.

Die Zeitdifferenz zwischen den beiden Szintillatoren sollte konstant sein. Abb. 4.3 zeigt die Zeitdifferenz. Die Breite der Verteilung ist 0,8 ns. Bei gleicher Zeitauflösung für beide Szintillatoren erhält man für jeden einzelnen $0.8/\sqrt{2} \text{ ns} \approx 0,56 \text{ ns}$. Da dieser Wert wesentlich kleiner ist als die Driftzeit im Straw, können beide Szintillatoren zur Zeitmessung verwendet werden.

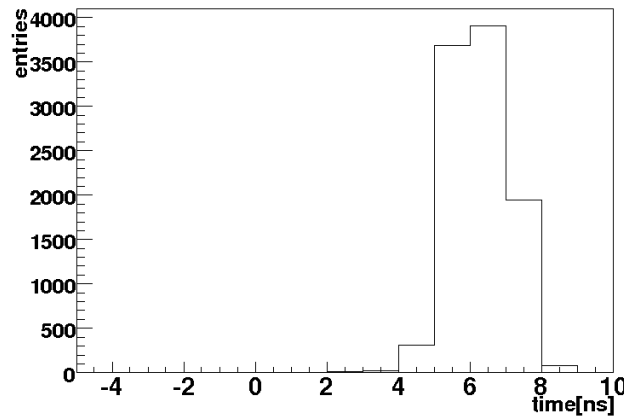


Abbildung 4.3: Zeitdifferenz zwischen den beiden Szintillatoren hinter den Modulen. Die Auflösung ist besser als eine Nanosekunde.

4.3 Analyse der Teststrahldaten

Neben dem ersten vollständigen Test der gesamten elektronischen Auslekette in einem System mehrerer Frontendboxen stand vor allem die Bestimmung der Kammerreigenschaften im Vordergrund. Insbesondere die Ortsauflösung und die Effizienz in Abhängigkeit von Hochspannung und Vorverstärkerschwelle sollten bestimmt werden. Weiterhin wurden Rauschen und Crosstalk untersucht.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Datenanalyse verwendet nicht den Siliziumstreifendetektor zur Definition des Spurpunktes. Aufgrund der zusätzlichen Vielfachstreuung ist eine Benutzung schwierig und bietet gegenüber einer unabhängigen Analyse allein unter Verwendung der Kammerdaten keinen Vorteil.

Eine zusätzliche Analyse mit Siliziumdetektor wurde am NIKHEF durchgeführt, ebenso eine parallele Analyse allein mit den Outer Tracker Daten [46].

Ein weiterer Vorteil der Outer Tracker Analyse im Vergleich zur Analyse mit Siliziumdetektor ist die Größe der bestrahlten Fläche. Während bei Messungen mit dem Siliziumdetektor mit einer aktiven Fläche von $32 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ nur etwa drei Straws ausgeleuchtet werden, sind es ohne diesen etwa sechs. In Abb. 4.4 ist das Strahlprofil ohne Siliziumdetektor gezeigt.

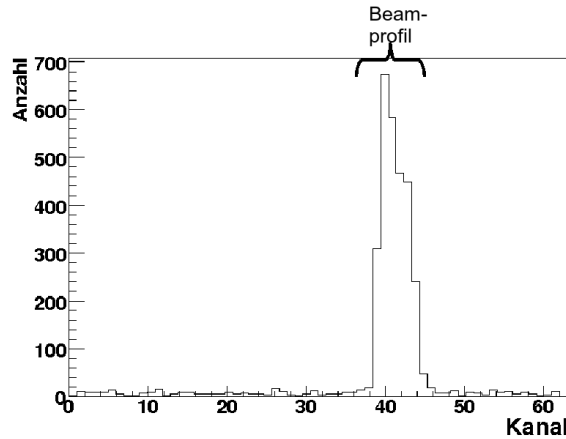


Abbildung 4.4: *Strahlprofil ohne Siliziumdetektor am Beispiel der Lage 5. Selbst ohne Siliziumdetektor werden nur fünf Staws komplett vom Strahl überstrichen. Signale in anderen Lagen werden durch Rauschen erzeugt.*

Für die Untersuchung der Auflösung und der Effizienz wurden nur die vom Elektronenstrahl überstrichenen Kanäle betrachtet. Die Kammereigenschaften werden für die mittleren Module 2 und 3 bestimmt, die Module 1 und 4 dienen zur Rekonstruktion der Spur. Um diese zu optimieren, werden jeweils exakt ein Treffer in jeder der Lagen der Module 1 und 4 verlangt. Es werden keine Bedingungen an die Anzahl der Treffer in den Modulen 2 und 3 gestellt.

4.3.1 Parameter

Im Laufe der Bestrahlung wurden sowohl die Hochspannung als auch die Schwelle der Vorverstärker variiert, um den Einfluss dieser Parameter auf die Auflösung und die Effizienz zu bestimmen. Auch die Abhängigkeit von Rauschen und Crosstalk soll gemessen werden. Falls nicht besonders erwähnt, wurden die in dieser Analyse verwendeten Daten bei einer Hochspannung von $HV=1550\text{ V}$ und einer Vorverstärkerschwelle von $\text{Thr}=700\text{ mV}$ aufgenommen. Diese Vorverstärkerschwelle kann in die Höhe des Ladungspulses umgerechnet werden. Der Puls ergibt sich aus der empirischen Formel [46]

$$\text{Thr}[\text{fC}] = \exp(-1,25 + 0,0033 \cdot \text{Thr}[\text{mV}]) \quad (4.1)$$

Damit ergibt sich für eine Schwelle von 700 mV ein Ladungspuls von 3 fC .

4.3.2 Korrektur der Rohdaten

Im folgenden werden nur die Straws betrachtet, die sich vollständig im Elektronenstrahl befanden. Nur für Rauschen und Crosstalk werden alle Kanäle der Module betrachtet.

T0-Korrektur

Die Driftzeit eines Teilchens ergibt sich als Differenz der Ankunftszeit des Elektronsignals eines Straws und des Triggersignals:

$$t_{\text{drift}} = t_{\text{roh}} - t_{\text{szint}} + t_{\text{offset}} \quad (4.2)$$

Trägt man die sich ergebenden Zeiten in einem Histogramm auf, erhält man ein erstes Driftzeitspektrum. Da die Signale der einzelnen Lagen verschiedene Ankunftszeiten im TDC haben und das Triggersignal nicht synchron zu den 25 ns-Zyklen ist (Kap. 4.2.3), beginnt dieses Spektrum nicht bei Null (t_{offset}). Zur Korrektur wird eine Gerade an die ansteigende Flanke der Verteilung gefittet und der Schnittpunkt mit der x-Achse bestimmt. Dies muss für jede Lage einzeln durchgeführt werden, da sich die Laufzeiten unterscheiden. In Abb. 4.5 wird der Fit an einem Beispiel gezeigt.

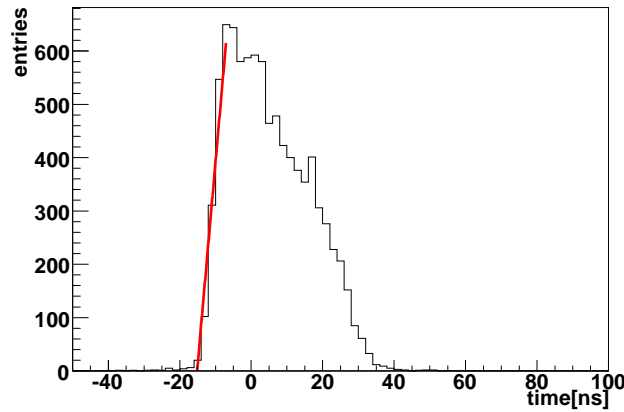


Abbildung 4.5: *T0 Korrektur für Lage 5. Aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der x-Achse ergibt sich der Korrekturfaktor t_{offset} .*

Die Korrekturfaktoren der einzelnen Lagen sind in Tabelle 4.1. aufgeführt. Wie man sieht, ist die Korrektur für das zweite Modul um etwa 10 ns geringer. Bei diesem Modul befindet sich die Auslese näher am Strahl (Abb. 4.1(a)). Bei einer Signalgeschwindigkeit im Straw von $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ ergibt sich somit ein Laufzeitunterschied von $2 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^{-8} \text{ s} = 2 \text{ m}^7$, entsprechend dem tatsächlichen Abstand (Kap. 4.2.1). Nach den Korrekturen beginnt die Spektren bei $t=0 \text{ ns}$. (Abb. 4.6(a)).

Bestimmung der $r(t)$ -Relation

Unter der Annahme einer gleichmäßigen Ausleuchtung der Zelle gilt [47]:

$$\frac{dN}{dr} = \frac{N_{\text{max}}}{R_{\text{max}}} = \text{const}, \quad (4.3)$$

mit

⁷typische Geschwindigkeit eines Signals im Anodendraht

Modullage	0	1	2	3	4	5	6	7
Korrektur[ns]	15,0	13,0	3,0	3,7	13,6	14,5	13,3	13,5
Fehler[ns]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

Tabelle 4.1: *T0 Korrekturen der einzelnen Lagen.*

dN/dr : Änderung der Teilchenzahl in Abhängigkeit des Abstandes vom Anodendraht,

N_{\max} : Gesamtzahl der Teilchen,

R_{\max} : Strawradius (2,45 mm).

Daraus kann eine erste Driftzeit ($r(t)$) Relation bestimmt werden, indem das Driftzeit-spektrum aufintegriert und auf den maximalen Strawradius normiert wird (2,45 mm, Abb. 4.6(b)):

$$\text{integrated spectrum}[\text{bin } i] = \sum_{j=0}^i \text{TDC spectrum}[\text{bin } j] \quad (4.4)$$

Nun ist es möglich, jeder gemessenen Driftzeit einen Radius $r_{\text{Hit}} = r_{\text{Hit}}[t_{\text{drift}}]$ zuzuordnen.

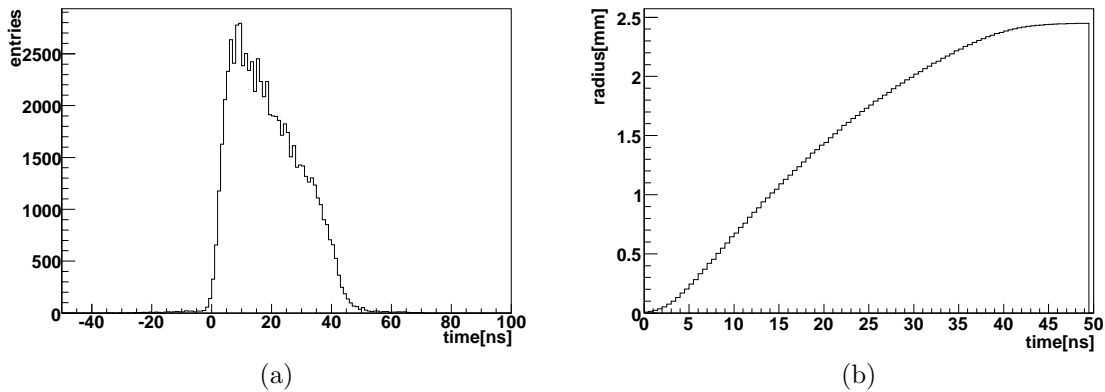


Abbildung 4.6: Abb.(a) Korrigiertes Driftzeitspektrum für alle Lagen. Die Verteilung beginnt nun bei Null. Abb.(b) Integriertes Spektrum der Daten aus Abb. (a) für alle Lagen. Die Verteilung ist auf den Zellradius (2,45 mm) normiert.

4.3.3 Alignment und erste Residuen

Um eine Spur durch die getroffenen Straws zu fitten, ist es in einem ersten Schritt nötig, die sogenannte Rechts-Links-Ambiguität⁸ aufzulösen. Es werden nur Zeiten gemessen und daraus der Abstand des Teilchens vom Draht bestimmt. Darum gibt es mehrere

⁸Ambiguität: Zweideutigkeit.

Möglichkeiten für ein Teilchen, den Straw zu durchqueren, bedingt durch die Geometrie und die anderen getroffenen Straws üblicherweise zwei: recht und links des Drahtes (relativ zur Richtung des Teilchens). Diese Zweideutigkeit kann gelöst werden, indem die Güte einer Spur für alle möglichen Kombinationen von Ambiguitäten bestimmt wird. Dazu wird eine Gerade an alle Spurpunkte angepasst und die Kombination mit dem kleinsten χ^2 -Wertes gewählt. Dieser ist definiert über:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=0}^N d_i^2 \quad (4.5)$$

mit

N: Anzahl der in den Fit eingegangen Treffer,
d: kürzeste Abstand zwischen Spur und Treffer.

Die Anzahl der Freiheitsgrade ist um zwei reduziert, da diese durch die Gerade festgelegt werden. Da bei den hier analysierten Daten der Strahl senkrecht auf die Module trifft, sind die Ambiguitäten durch die beiden Treffer in den zwei Lagen eines Moduls eindeutig festgelegt. Nur bei Ineffizienzen (nur ein Treffer je Modul) oder Crosstalk (zwei benachbarte Treffer je Lage) ist ein Lösung nötig der Ambiguitäten.

Sind die Ambiguitäten festgelegt, ist es möglich, eine Spur an die vorhandenen Punkte anzupassen und daraus einen neuen Abstand vom Draht r_{Spur} (Abstand Gerade–Draht) zu erhalten. Die Geraden und die daraus resultierenden Radien werden für jeden Treffer separat bestimmt, da die Abstände unabhängig von dem untersuchten Treffer sein sollten und dieser darum im Fit nicht berücksichtigt wird. Der Radius r_{Spur} ergibt sich dann aus dem kleinsten Abstand zwischen Gerade und Anodendraht ⁹:

$$r_{\text{Spur}} = \sqrt{(x_{\text{Draht}} - x_{\text{Spur}})^2 + (y_{\text{Draht}} - y_{\text{Spur}})^2} = x_{\text{Draht}} - x_{\text{Spur}} \quad (4.6)$$

Im nächsten Schritt muss der Aufbau ausgerichtet werden. Dazu ist es nötig, die vorzeichenbehafteten Residuen zu berechnen. Das Residuum ist definiert als der kleinste Abstand zwischen dem gemessenen und dem gefitteten Radius:

$$\Delta x = x_{\text{Spur}} - x_{\text{Hit}} \quad (4.7)$$

Wiederum ist die vereinfachte Formel ausreichend, da der Strahl senkrecht auf das Modul trifft. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Residuen zu kombinieren, abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung.

Ausrichtung der Module

Um den Detektor auszurichten, kann man die Residuen so kombinieren, dass die Residuenverteilung die Verschiebung der Module zueinander angibt.

Ein vom Strahl voll ausgeleuchteter Straw wird recht und links vom Draht an jeder Position vergleichbar oft von Teilchen durchquert. Somit sollten rechts und links des

⁹Da in diesem Fall der Strahl nahezu senkrecht auf das Modul trifft, ist es ausreichend, die Projektion auf die x-Koordinate als Abstand zu verwenden. Der Fehler ist im Bereich von wenigen Mikrometern und somit viel kleiner als die erwartete Auflösung von etwa 200 μm .

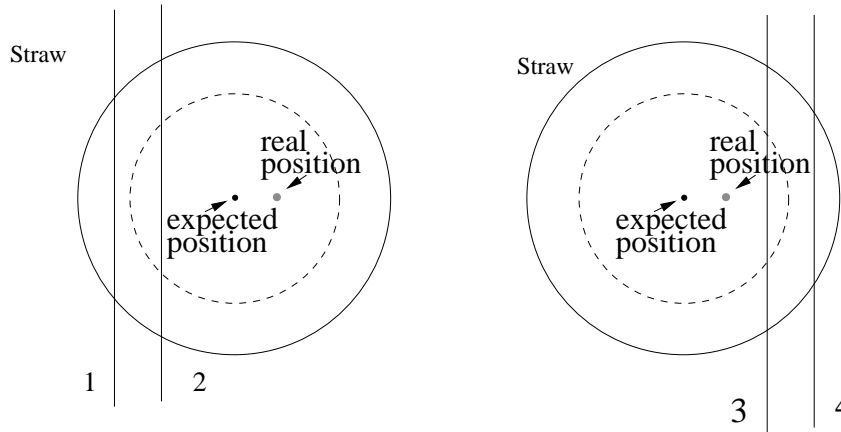


Abbildung 4.7: Residuenkombination zur Ausrichtung der Module: bei einem ausgerichteten Detektor erwartet man rechts und links des Drahtes gleich viele Treffer. Kombiniert man Fall 1 und 2 sowie Fall 3 und 4 würde man bei einem alignierten Detektor eine Verteilung um Null erwarten.

Drahtes gleich viele Treffer sein. Kombiniert man, wie in Abbildung 4.7 gezeigt, die Residuen 1 und 2 (links des Drahtes, Ambiguität = -1) sowie 3 und 4 (rechts des Drahtes, Ambiguität = 1), indem man ihnen das gleiche Vorzeichen zuordnet, erwartet man eine Verteilung der Residuen um einen Mittelwert von Null. Trifft dies nicht zu, ist der Draht nicht an der erwarteten Position und das Verhältnis der rechts- und linksseitigen Treffer verschoben.

Dazu werden die Residuen folgendermaßen kombiniert:

$$\Delta r = |r_{\text{Hit}} - r_{\text{Spur}}| \cdot A, \quad (4.8)$$

wobei A für die Ambiguität steht.

Die Alignierung wird durch Verschiebung der Modulpositionen um die Abweichung des Mittelwerts von Null korrigiert. Das zu alignierende Modul wird dabei nicht zur Spurfundung verwendet, um diese nicht zu beeinflussen. Dieses Verfahren wird iterativ so lange durchgeführt, bis die Mittelwerte der einzelnen Lagen innerhalb von $10\text{-}20\,\mu\text{m}$ mit Null verträglich sind. In Abb. 4.8 sind die vorzeichenbehafteten Residuen aller Modullagen vor der Korrektur gezeigt. Die Mittelwerte aller Lagen sind deutlich von Null verschieden. Zur Bestimmung der Parameter wurde ein Gaussfit durchgeführt.

Abbildung 4.9 zeigt die Modullagen nach der Ausrichtung der Module. Die Mittelwerte stimmen innerhalb von $20\,\mu\text{m}$ mit Null überein und die Verteilungen sind deutlich schmaler und werden gut durch eine Gaussfunktion beschrieben.

4.3.4 Ortsauflösung

Entscheidend für die Spurfundung und die Impulsauflösung im späteren Experiment ist eine exzellente Ortsauflösung der einzelnen Treffer von besser als $200\,\mu\text{m}$ [27]. Um dies zu erreichen, ist eine kalibrierte $r(t)$ -Relation nötig. Die in Abschnitt 4.3.2 aus den Rohdaten erhaltene Beziehung ist hierbei nur der erste Schritt.

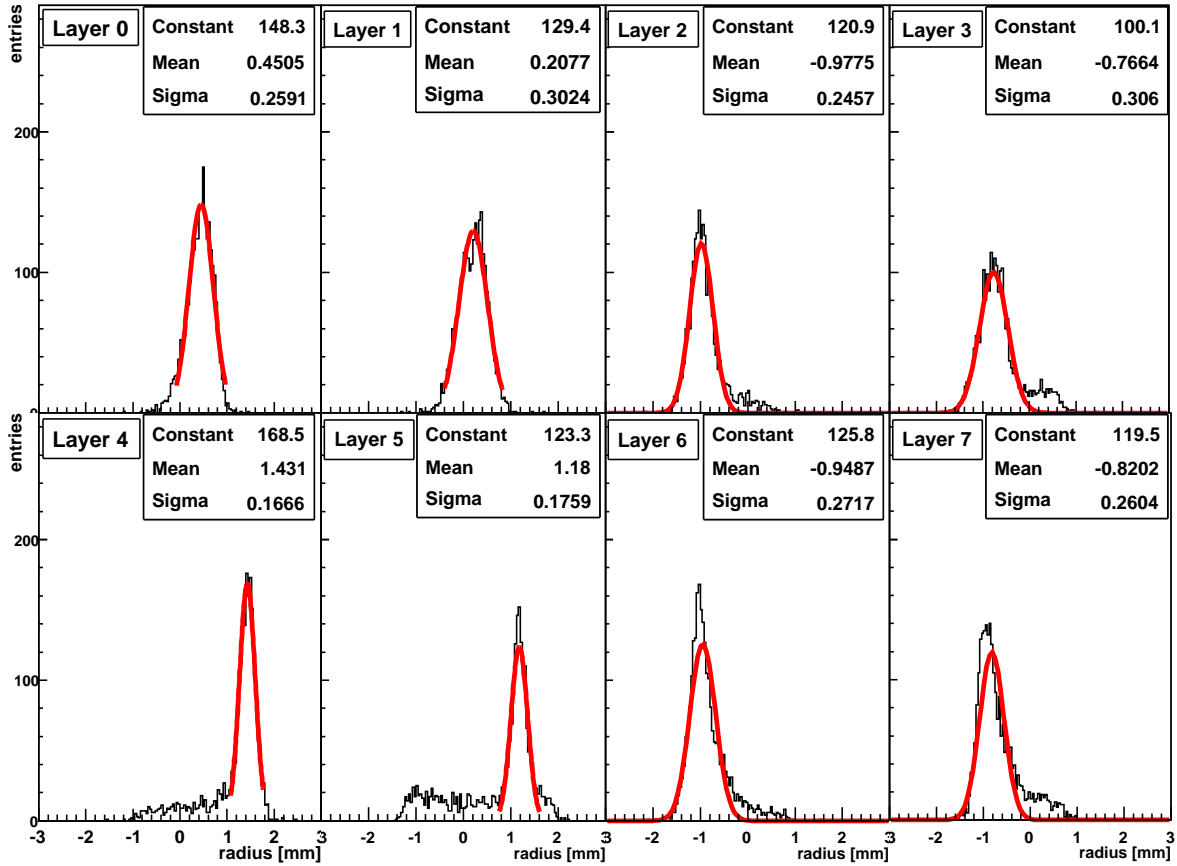


Abbildung 4.8: Die vorzeichenbehafteten Residuen eines nicht ausgerichteten Detektors. Die Mittelwerte weichen deutlich von Null ab.

Um die Ortsauflösung zu erhalten, werden für den alignierten Detektor ebenfalls Residuen berechnet. Die Kombination der Residuen folgt diesmal:

$$\Delta r = (r_{\text{Hit}} - r_{\text{Spur}}) \cdot A, \quad (4.9)$$

womit man sogenannte nicht vorzeichenbehaftete Residuen erhält. Die Verteilung wird mit einer Gaußkurve gefittet, die Breite dieser Kurve wird als Residuenauflösung bezeichnet.

Grundlagen

Im nächsten Schritt wird die $r(t)$ -Relation verbessert. Üblicherweise wird dazu die Driftzeit gegen r_{Spur} aufgetragen (Abb. 4.10(a)) und diese Verteilung gefittet. In dieser Analyse wurden allerdings die aus dem Geradenfit bestimmten Radien r_{Spur} gegen die zu dem Treffer gehörende Zeitmessung aufgetragen (Abb. 4.10(b)), da dies eine bessere Beschreibung bei kleinen Radien ermöglicht. Die Verteilung wird entlang der y-Achse in Abschnitte unterteilt. Jedem dieser Abschnitte wird mit einer Gaußfunktion gefittet und der Mittelwert gegen die Zeit aufgetragen (Abb. 4.11(a)). Durch einen Fit dieser Punk-

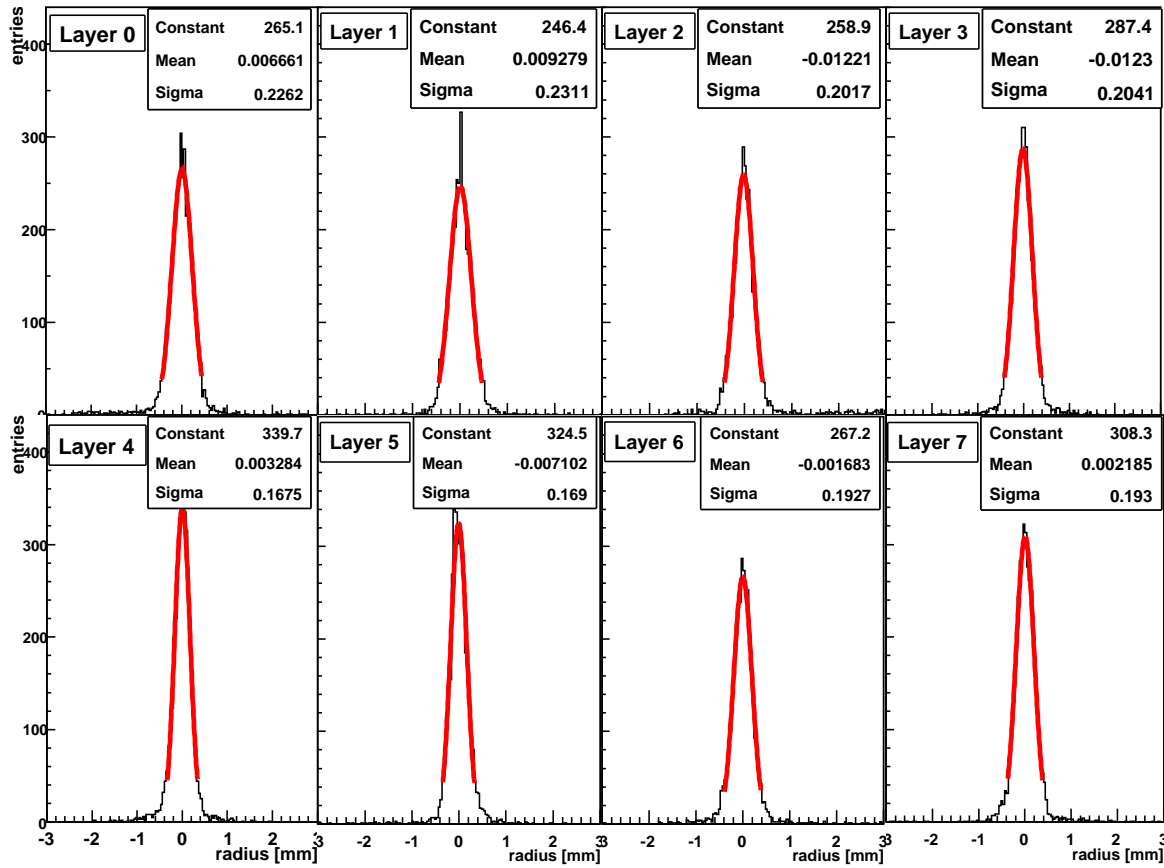


Abbildung 4.9: Die vorzeichenbehafteten Residuen eines ausgerichteten Detektors. Die Mittelwerte stimmen innerhalb von $20\mu\text{m}$ mit Null überein.

te erhält man eine neue $r(t)$ -Relation. In diesem Fall erweist sich ein Polynom dritten Grades als beste Wahl für die Fitfunktion.

Bei kleinen und großen Radien treten jedoch Probleme auf. Bei sehr kleinen Radien ($r < \text{Ortsauflösung}$) ist es möglich, dass die Ambiguität falsch bestimmt wird. Dadurch wird das Residuum falsch berechnet. Außerdem ist die intrinsische Zellauflösung am Draht schlechter. Ein Teilchen erzeugt beim Durchqueren des Straws Cluster (Kap. 3.1.1). Da diese statistisch verteilt sind, ist der Abstand des nächsten Clusters größer als der kleinste Abstand der Spur zum Draht. Dieser Effekt wirkt sich insbesondere bei kleinen Radien aus und verschlechtert die Auflösung. Selbst für Spuren nahe am Draht wird darum eine Zeit gemessen, die größer als Null ist, wie in Abbildung 4.10(b) zu sehen ist. Dieser Aspekt kann in einer $r(t)$ -Analyse einfacher berücksichtigt werden als in einer $t(r)$ -Analyse.

Bei großen Radien ist die Strecke des Teilchen im Straw relativ gering ist. Darum kommt es zu weniger Primärelektrone und darum zu Ineffizienzen. Die Statistik wird zu gering, um einen guten Gaussfit zu ermöglichen, was allerdings keine Einfluss auf die Auflösung in diesem Bereich hat. Darum muss in diese Bereiche durch Fortführung der Fitfunktion interpoliert werden.

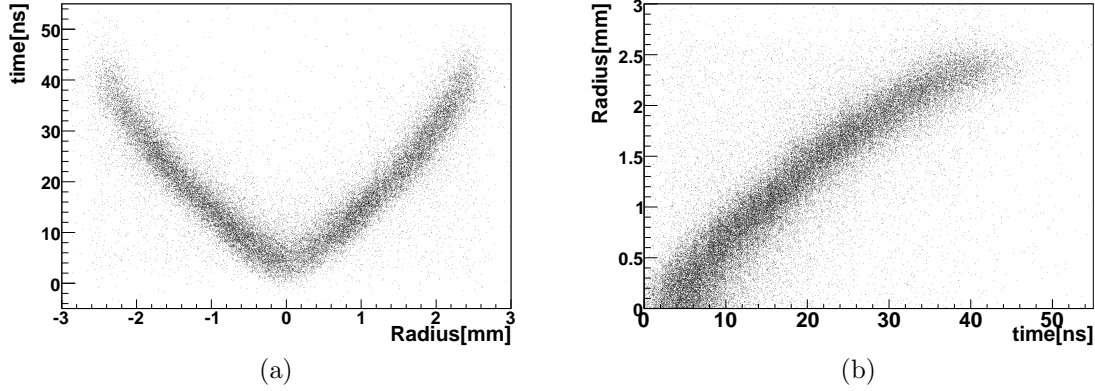


Abbildung 4.10: Korrelation von r_{Spur} und gemessener Zeit. In Abbildung (a) ist die Driftzeit in Abhängigkeit von r_{Spur} aufgetragen. Um die $r(t)$ -Relation zu optimieren, wurde r_{Spur} in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen, wie in Abb. (b) gezeigt.

Abbildung 4.11(b) zeigt die sich ergebende $r(t)$ -Relation (rot). Im Vergleich zu der ursprünglichen Relation (schwarz), beschreibt sie die Bereiche für kleine und für große Radien anders.

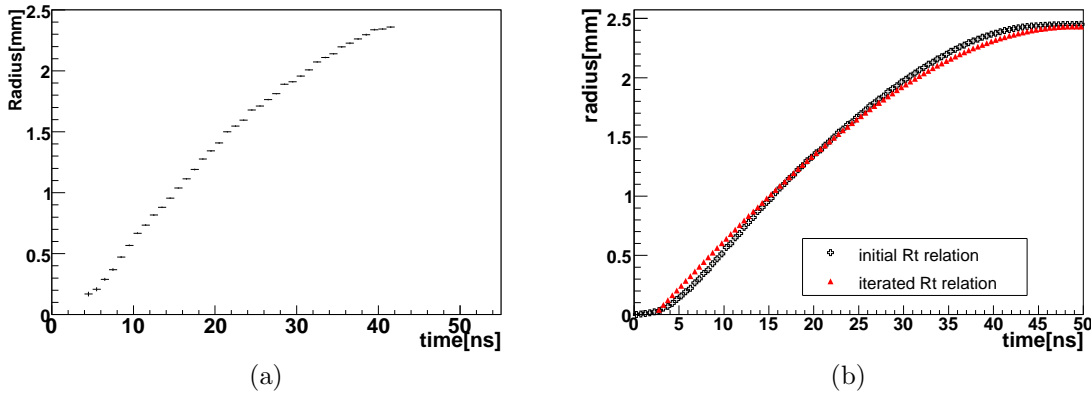


Abbildung 4.11: Abb. (a) zeigt die Mittelwerte des Gaussfits der einzelnen in y geschnittenen Bereiche. An diese Punkte wird eine neue $r(t)$ -Relation gefittet. Abb. (b) vergleicht die ursprüngliche (schwarz) und die kalibrierte (rot) $r(t)$ -Relation. Insbesondere bei kleinen und bei großen Radien zeigt sich eine Änderung.

Aus der neuen $r(t)$ -Relation wird nun wieder ein Radius $r_{\text{Hit},2}$ für alle Treffer bestimmt, eine Spur gefittet und ein neuer $r_{\text{Spur},2}$ Wert bestimmt. Mit diesen Daten wird die Ausrichtung des Detektors verbessert und neue Residuen berechnet. Dieses Verfahren wird iterativ so lange durchgeführt, bis sich die Breite der Residuenverteilung nicht mehr ändert.

Resultate

Bei dieser Analyse erwies sich eine Iteration als ausreichend. Abbildung 4.12 zeigt die Residuenverteilung aller Lagen nach einer Iteration sowie einen Gaussfit an die Verteilung, aus dem die Breite entnommen wird. Die Verteilung wird nur im Bereich von $\pm 2\sigma$ gefittet. Dies geschieht, indem mit der aus einem ersten Gaussfit über einen Bereich von ± 3 mm erhaltenen Breite der Fit wiederholt wird. Die Ausläufer der Verteilung bestehen aus einem Untergrund von Rauschen und Crosstalk.

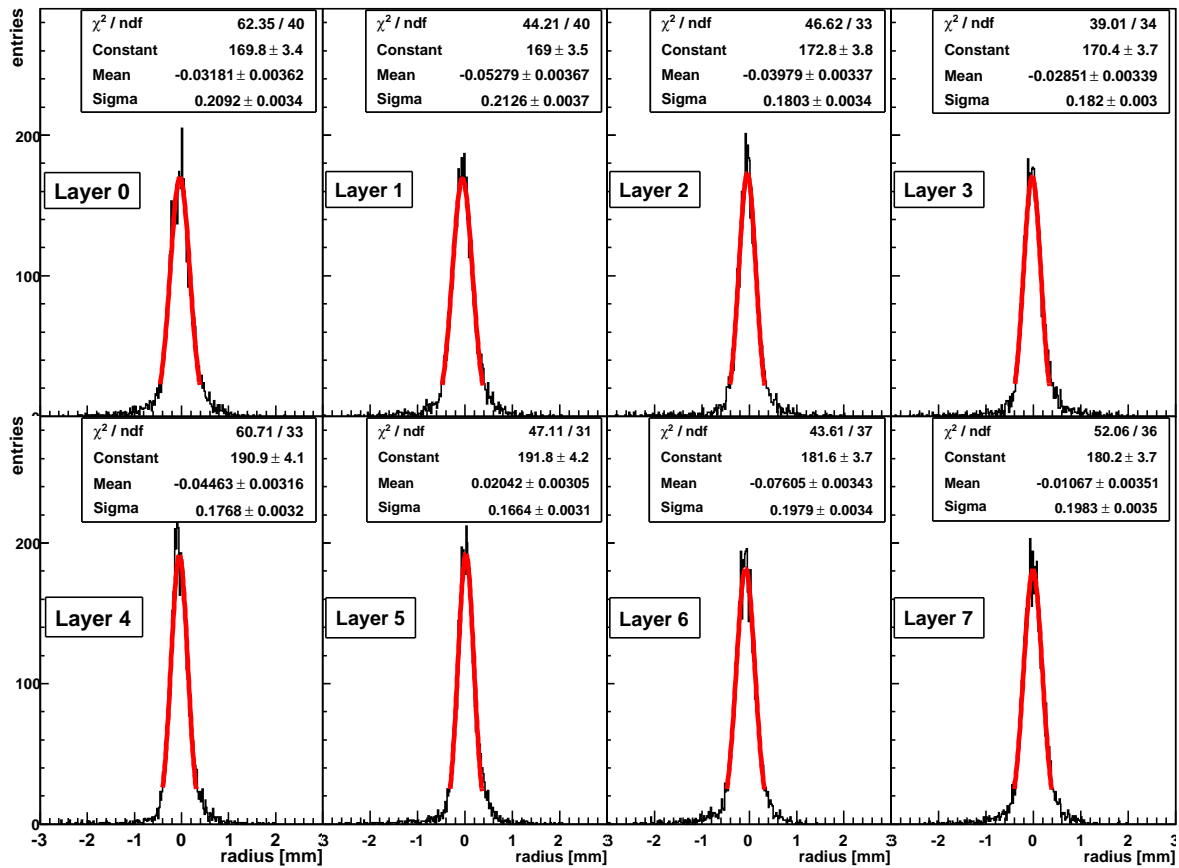


Abbildung 4.12: Residuen aller acht Lagen nach einer Iteration der $r(t)$ -Beziehung und Gaussfit der jeweiligen Verteilungen. Die Ausläufer der Verteilungen bestehen aus Rauschen und Crosstalk.

In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der ursprünglichen $r(t)$ -Relation, nach der ersten und nach der zweiten Iteration gezeigt. Bereits bei der zweiten Iteration ändern sich die Werte nicht mehr signifikant. Darum sind alle folgenden Residuenaufösungen nach der ersten Iteration angegeben. Die Residuenauflösung der äußeren Module ist schlechter, da die Spurvorhersage mit einfließt. Diese ist für die äußeren Lagen aufgrund der Extrapolation der Geraden über eine längeren Strecke schlechter.

Wie in Kap. 4.3.4 erläutert, erwartet man nahe am Draht eine schlechtere Ortsauflösung. In Abb. 4.13 ist die Residuenbreite in Abhängigkeit des Abstandes vom Draht

Lage	0	1	2	3	4	5	6	7
Initiale $r(t)$ -Relation [μm]	242	244	223	228	190	173	208	203
Erste Iteration [μm]	209	216	180	182	177	166	198	198
Zweite Iteration [μm]	215	216	186	191	173	166	196	201

Tabelle 4.2: *Residuenauflösung aus der initialen $r(t)$ -Relation, nach einer und nach zwei Iterationen. Bereits bei der zweiten Iteration ändert sich die Breite nicht mehr signifikant.*

gezeigt. Für jeden Bereich wurde die Breite des Gaussfits der entsprechenden Residuenverteilung bestimmt. Um eine ausreichende Statistik zu erhalten, wurden hier die Daten aller Lagen verwendet. Für kleine Radien ist die Auflösung schlechter, während sie mit zunehmendem Abstand besser als $200\mu\text{m}$ wird. Der leichte Anstieg in der Auflösung bei $1,5\text{mm}$ ist in der Position der Module relativ zur Strahlachse zu finden. Es hat sich gezeigt, dass sich die ineffizienten Bereiche¹⁰ zwischen den Straws einer Lage für zwei Module aufaddieren. Hat ein Modul Treffer mit einem Radius von etwa $1,5\text{mm}$, gibt es eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass in einem anderen Modul Ineffizienzen auftreten. Damit verschlechtert sich die Spurrekonstruktion und folglich die Auflösung in diesem Bereich.

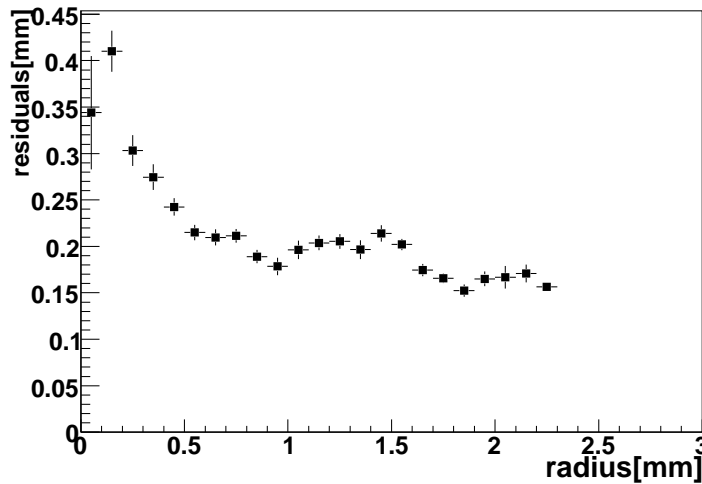


Abbildung 4.13: *Residuenbreite in Abhängigkeit des Zellradius. Für kleine Radien ist die Auflösung aufgrund der in Kap. 4.3.4 erläuterten Effekte schlechter.*

Um die Güte der $r(t)$ -Relation zu überprüfen, wird der χ^2 -Wert einer Spur nach Formel 4.5 berechnet. Zusätzlich fließt die Residuenauflösung der einzelnen Lagen als

¹⁰Diese ergeben sich, da der Innendurchmesser eines Straws $4,9\text{mm}$ beträgt, aber der Abstand zwischen zwei Anodendrähten $5,2\text{mm}$ ist.

Gewichtungsfaktor ein Somit ergibt sich:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=0}^N \frac{\text{dist}_i^2}{\sigma_i^2} \quad (4.10)$$

Bei sieben Treffern je Spur und zwei Fitparametern ergeben sich fünf Freiheitsgrade. In Abbildung 4.14(a) ist die Verteilung der χ^2 -Werte aufgetragen. Abbildung 4.14(b) zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der χ^2 -Werte. Im Idealfall erwartet man eine flache Verteilung. Ein Maximum bei großen Wahrscheinlichkeiten bedeutet, dass die Gewichte überschätzt wurden und der χ^2 -Wert zu klein bestimmt wird. Ein Peak bei sehr kleinen Wahrscheinlichkeiten ergibt sich aus einer schlechten Modellbeschreibung oder einzelnen Treffern mit großen Abweichungen (z.B. Rauschen). Das einzelne überhöhte Bin bei Null in Abb. 4.14(b) ergibt sich unter anderem aus den verbliebenen Rausch- und Crosstalkhits, die auch in Abb. 4.12 zu sehen sind. Ein weiterer Betrag sind Spuren mit weniger als acht Treffern. Durch die Ineffizienzen verschlechtert sich der Spurfit. Das die Verteilung sonst flach ist, zeigt, dass die $r(t)$ -Relation die Messung gut beschreibt.

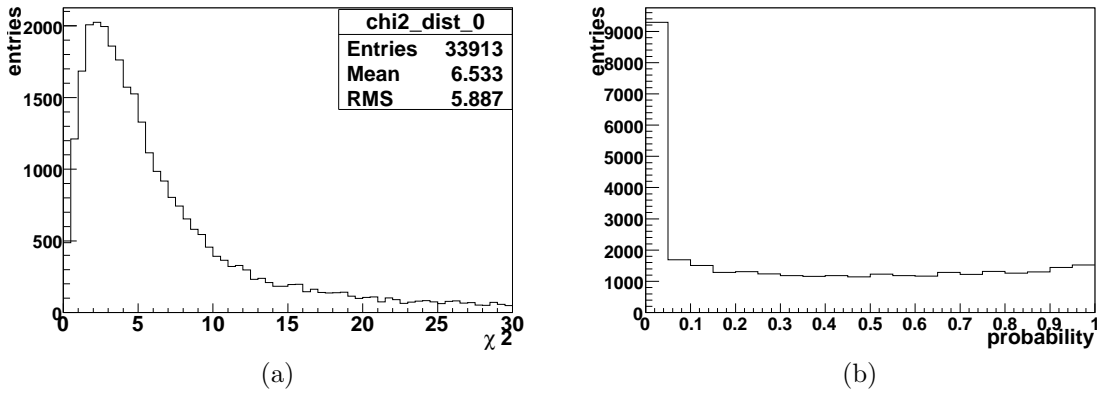


Abbildung 4.14: Abb. (a) zeigt die χ^2 -Verteilung aus dem Spurfit. In Abb. (b) ist die χ^2 -Wahrscheinlichkeit dieser Verteilung aufgetragen. Das überhöhte Bin bei Null resultiert aus Rauschen und Crosstalk. Die übrige Verteilung ist flach, was für die Güte der $r(t)$ -Relation spricht.

Intrinsische Zellaufösung

Die Breite der Residuen setzen sich aus zwei Anteilen zusammen: der intrinsischen Auflösung der Zelle und dem Fehler der Spurvorsage. Dabei fließen Alignierungsfehler und eine fehlerhafte $r(t)$ -Beziehung sowohl in die intrinsische Auflösung als auch in die Spurvorsage ein, da diese Fehler beide Parameter beeinflussen.

$$\sigma_{\text{meas}} = \sqrt{\sigma_{\text{intrinsic}}^2 + \sigma_{\text{track}}^2} \quad (4.11)$$

Um die intrinsische Auflösung zu bestimmen, wird verlangt, dass es in jeder der acht Modullagen exakt einen Treffer gibt und die beiden Treffer eines Moduls zusammen-

gehören. Durch diese Bedingung wird der Fehler der Spurvorhersage, der durch Rauschen und Ineffizienzen zunimmt, minimiert. Auf die Zellauflösung darf dies keinen Einfluss haben.

Die Spur, eine Gerade, wird durch zwei Parameter beschrieben: dem Winkel zum Strahl (Steigung der Gerade) und dem Schnittpunkt mit der x-Achse. Da die Spurparameter selbst aus den Daten gewonnen werden, sind sie ebenfalls mit einer Unsicherheit behaftet. Da sie korreliert sind, muss die Kovarianz der beiden, welche ebenfalls nicht bekannt ist, in den Fehler der Spurvorhersage σ_{track}^2 eingehen. Es gilt [48]:

$$\sigma_{\text{track}}^2 = \sigma_{\text{slope}}^2 + \sigma_{y0}^2 - 2\text{cov.} \quad (4.12)$$

Um die Fehler zu berechnen, nimmt man an, dass die x-Position der einzelnen Hits exakt bekannt ist. Die y-Position hat eine Unsicherheit, die aus der intrinsischen Zellauflösung stammt. Da diese noch nicht bekannt ist, wird ein Wert angenommen. Damit können nun σ_{slope} , σ_{y0} , die Kovarianz und daraus folgend σ_{track} berechnet werden. Mit der angenommenen theoretischen Zellauflösung $\sigma_{\text{intrinsic}}$ wird eine theoretische Residuenauflösung bestimmt. Der χ^2 -Wert für die Differenz dieser berechneten Residuenauflösung und der gemessenen Residuenauflösung wird berechnet.

Diese Schritte werden für verschiedene $\sigma_{\text{intrinsic}}$ durchgeführt und der χ^2 -Wert gegen die Zellauflösung aufgetragen. Abb. 4.15 zeigt diese Verteilung. Es ergibt sich ein Minimum für eine intrinsische Auflösung von $138 \mu\text{m}$. Unter Verwendung dieses Wertes für den Fehler der Spurvorhersage σ_{track} und der gemessenen Residuenauflösung wird nach Gleichung 4.11 für jede Lage einzeln die intrinsische Zellauflösung berechnet.

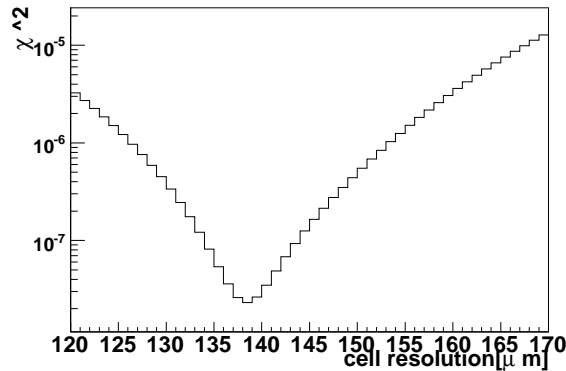


Abbildung 4.15: χ^2 -Verteilung in Abhängigkeit der gewichteten intrinsischen Auflösung aller Lagen. Für den kleinsten χ^2 -Wert (hier bei $138 \mu\text{m}$) wird die Auflösung aller Lagen berechnet.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 gezeigt. In die Berechnung ist die Residuenauflösung nach einer Iteration eingeflossen. Da für diesen Teil der Analyse andere Bedingungen an die Treffer der inneren Lagen gestellt wurden, stimmen die Zahlen nicht mit Tabelle 4.2 überein. Während die Zellauflösung für alle Lagen vergleichbar sein sollte, ist der Fehler der Spurvorhersage von der Lage abhängig. Allerdings sieht man, dass die intrinsische Auflösung in den Lagen 4 und 5 (Modul 3) geringfügig besser ist. Offenbar

ist es nicht gelungen, die Zellauflösung und den Fehlern der Spurvorhersage komplett zu trennen. Der Unterschied der einzelnen Lagen beim Fehler der Spurvorhersage resultiert aus der Tatsache, dass bei den äußeren Lagen die Gerade über eine längere Strecke extrapoliert werden muss, darum ist dort der Fehler größer.

Lage	gemessene Auflösung [μm]	intrinsische Auflösung [μm]	Fehler der Spur- vorhersage [μm]
0	175	146	96
1	172	145	93
2	153	138	66
3	157	143	64
4	142	127	63
5	144	129	65
6	174	146	94
7	176	147	97

Tabelle 4.3: *Intrinsische Auflösung der Straws. Es wurde die Residuenauflösung nach der ersten Iteration der $r(t)$ -Beziehung verwendet. Da für diese Berechnung andere Bedingungen an die inneren Lagen gestellt wurden, stimmen die Zahlen nicht mit Tabelle 4.2 überein.*

Variation von Hochspannung und Vorverstärkerschwelle

Die Kenntnis der Abhängigkeit der Auflösung von Hochspannung und Schwelle ist wichtig, um einerseits das Verhalten des Detektors zu verstehen, zum anderen aber auch, falls es im Betrieb nötig sein sollte, diese Parameter zu ändern. In Abb. 4.16 ist die Zellauflösung in Abhängigkeit der beiden Parameter gezeigt. Variiert wurden dabei immer nur Schwellen und Hochspannung der inneren Lagen (2-5), während die äußeren Lagen als Referenz konstant blieben. Die Vorverstärkerschwelle wurde nur für das zweite Modul (Lagen 2, 3) variiert.

Wie man sieht, verschlechtert sich die Auflösung sowohl bei der Reduktion der Hochspannung als auch bei der Erhöhung der Schwellenspannung des Vorverstärkers. In beiden Fällen müssen mehr Cluster den Anodendraht erreichen, um ein Signal auszulösen, entweder weil ein Cluster kleiner ist (bei der Reduktion der Hochspannung) oder weil die Schwelle erhöht wurde.

Man hat allerdings bei der Hochspannung (1500-1650 V) einen Bereich, in dem die Betriebsparameter geändert werden können, ohne starken Einfluss auf die Ortsauflösung zu nehmen.

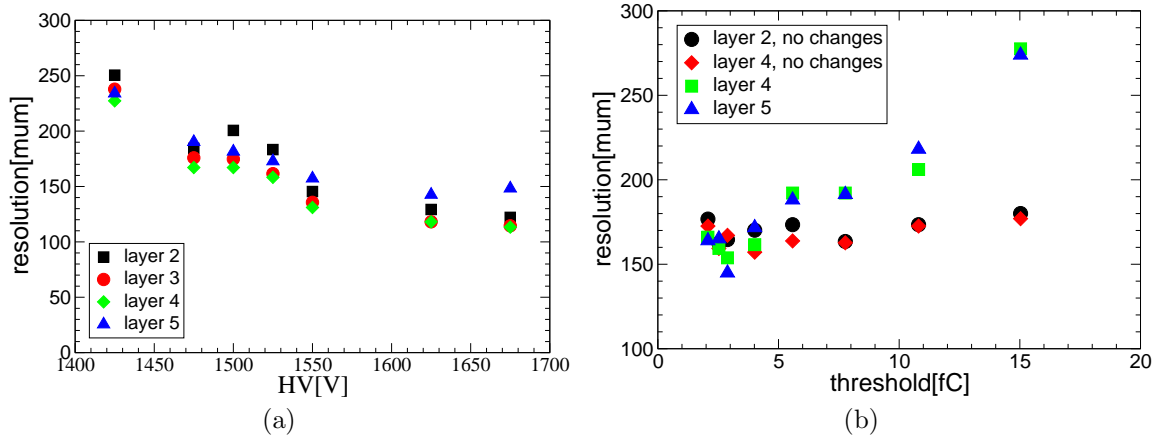


Abbildung 4.16: (a) Zellauflösung in Abhängigkeit der Hochspannung (b) Zellauflösung in Abhängigkeit der Vorverstärkerschwelle. Die nominellen Parameter liegen bei einer Hochspannung von $HV = 1550 \text{ V}$ und einer Schwelle von $Thr = 700 \text{ mV} \cong 3 \text{ fC}$.

4.3.5 Effizienz

Die Effizienz bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Teilchendurchgang im Detektor auch tatsächlich ein Treffer im Straw registriert wird. Sie ist definiert als die Anzahl der in einem Bereich um die vorhergesagte Spur gefundenen Treffer, geteilt durch die Anzahl aller erwarteten Spuren in diesem Bereich:

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{Anzahl Treffer im Bereich einer Spur}}{\text{alle Spuren}} \quad (4.13)$$

Der Suchbereich wurde zwischen $\pm 2 \text{ mm}$ und $\pm 1 \text{ Straw}$ um den vorhergesagten Spurdurchgang variiert.

Die Zelleffizienz betrachtet nur die Effizienz eines einzelnen Straws in Abhängigkeit des Radius. Sie hängt von Driftgaseigenschaften ab. Die Lageneffizienz gibt die Anzahl der Treffer innerhalb einer Lage im Vergleich zur Gesamtzahl der Spuren an. Hier werden die ineffizienten Bereiche zwischen den Straws berücksichtigt, die zu einer Minderung führen. Beide Effizienzen werden ebenfalls in Abhängigkeit der Hochspannung und der Vorverstärkerschwelle untersucht.

Plateau-effizienz

Bei der Durchquerung eines Straws erzeugt ein Teilchen Primärionisationen (Kap. 3.1.1). Die mittlere Ionisationslänge λ eines geladenen Teilchens in einem mit Argon gefüllten Straw beträgt $325 \mu\text{m}$. Da die Wahrscheinlichkeit der Clustererzeugung am Rand des Straws aufgrund der begrenzten Weglänge geringer ist, wird in diesen Bereichen eine geringere Effizienz erwartet. Unter der Annahme, dass die Anzahl der Cluster im Straw einer Poissonverteilung folgt, kann man die erwartete Zelleffizienz berechnen. Löst bereits der erste Cluster ein Signal aus, ergibt sich aus der Poisson-Verteilung folgende Formel:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{plateau}} \left(1 - \exp \frac{-2\sqrt{R^2 - X^2}}{\lambda} \right), \quad (4.14)$$

mit

- $\epsilon_{\text{plateau}}$: Effizienz im Plateau der Zelle,
- R: Radius der Zelle (2,45 mm),
- X: Abstand des Teilchens zum Draht,
- λ : mittlere Ionisationslänge.

In Abbildung 4.17(a) ist die Funktion (rot) im Vergleich zu den gemessenen Daten gezeigt (grau). Die blaue und pinkfarbene Kurve zeigen den Verlauf, wenn erst der zweite oder dritte Cluster ein Signal erzeugen. Wie man sieht, werden die Daten nicht richtig beschrieben. Wird die Funktion mit der intrinsische Zellauflösung verschmiert (Abb. 4.17(b)), sieht man, dass die Verteilungen für zwei (blau) oder drei (pink) Cluster die Daten gut beschreiben.

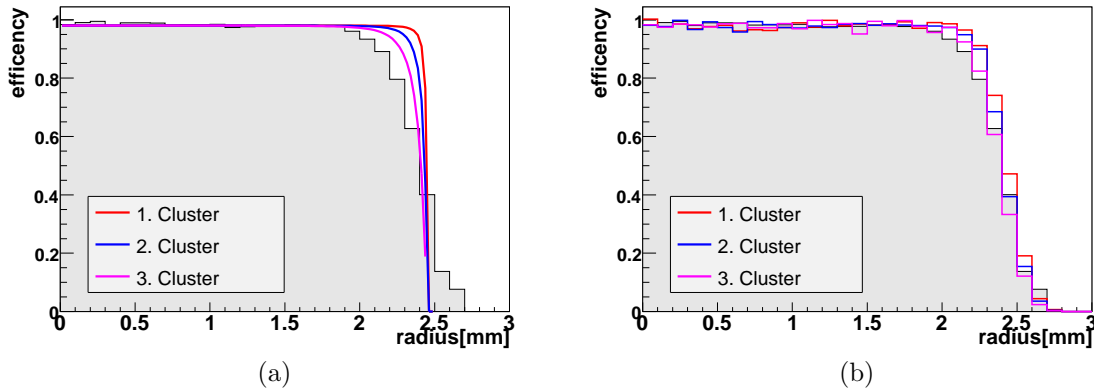


Abbildung 4.17: Theoretische Zelleffizienz: (a) Zelleffizienz aus der Poissonverteilung, wenn der erste (rot), zweite (blau) oder dritte (pink) Cluster ein Signal auslöst. Wie man sieht, werden die Daten (grau) nicht korrekt beschrieben. Verschmiert man diese Verteilung zusätzlich mit der intrinsischen Zellauflösung (140 μm) und betrachtet die Ergebnisse wieder für ein (rot), zwei (blau) und drei (pink) Cluster, sieht man, dass ein Model wo erst der zweite und dritte Cluster ein Signal auslösen, die Daten (grau) gut beschreibt.

Die Bestimmung des Plateauwertes der Verteilung ergibt im weiteren die Plateau-effizienz der Zelle. Da es keine inaktiven Bereiche gibt, sollte sie im Idealfall bei korrekt gewählter Hochspannung und Vorverstärkerschwelle nahezu 100 % sein. Abbildung 4.18 zeigt die Bestimmung der Plateau-effizienz am Beispiel einer Lage. Tabelle 4.4 gibt die Plateau-effizienz der Lagen 2-5 bei nominellen Parametern sowohl für ein Suchfenster von ± 2 mm als auch ± 1 Straw an.

Die Abhängigkeit der Plateau-effizienz von Hochspannung und Vorverstärkerschwelle ist in Abbildung 4.19 gezeigt. Bei zu geringen Spannungen ist die Gasverstärkung zu gering, um ein Signal auszulösen, bei zu hohen Schwellen wird das Signal nicht registriert. Beides führt zu einem Effizienzverlust. Vergleicht man die Effizienzen bei einer

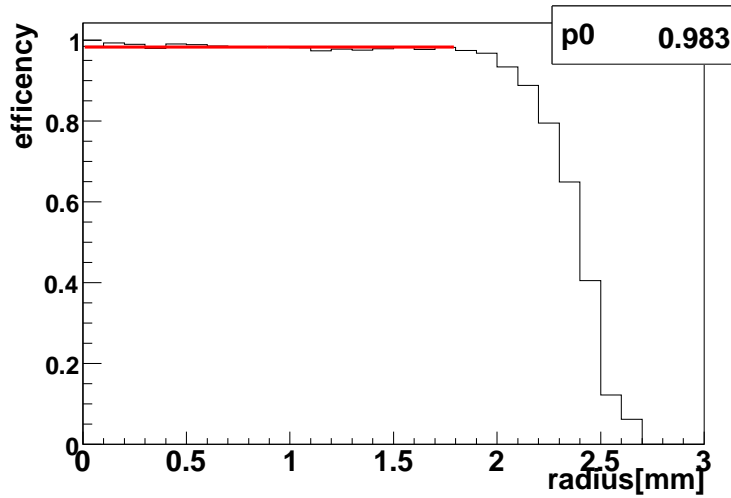


Abbildung 4.18: Die Plateau-effizienz ergibt sich aus der Bestimmung des Plateauwertes der Verteilung. Dazu wird dieses gefittet und der Wert angegeben. Dies wird für jede Lage separat durchgeführt.

Lage	2	3	4	5
Plateau-effizienz (2 mm) [%]	98.1	97.0	98.7	98.9
Plateau-effizienz (1 Straw) [%]	98.7	98.3	99.6	99.6

Tabelle 4.4: Plateau-effizienz der einzelnen Lagen bei nominellen Parametern sowohl für ein Suchfenster von ± 2 mm als auch ± 1 Straw

Hochspannung von 1550 V und einer Vorverstärkerschwelle von 700 mV jeweils in Abb. 4.19(a) und 4.19(b) unterscheiden sich geringfügig, da zwei unterschiedliche Datensätze für die Variation der beiden Parameter verwendet wurden. Aus diesen Unterschieden ergibt sich ein Fehler auf die einzelne Messung von 0,6 %.

Lageneffizienz

Für die Lageneffizienz spielen die ineffizienten Bereiche der Kammern eine Rolle. Beim Outer Tracker erwartet man theoretisch aufgrund des Verhältnisses von Strawinnendurchmessers (aktiver Bereich, 4,9 mm) zum Abstand der Drähte (5,25 mm) eine maximale Effizienz von 93 %. Beim Testbeam ist die maximale Effizienz höher, da fünf Straws bestrahlt wurden, es aber nur vier ineffiziente Bereiche zwischen diesen Straws gibt. Darum erhöht sich die maximale Effizienz auf 94,6 %. In Tabelle 4.5 sind die Effizienzen der Lagen 2 bis 5 für ein Suchfenster von 2 mm und 1 Straw angegeben. Da zusätzlich noch die Ineffizienzen am Rand der Straws hinzukommen, entsprechen die Werte nicht der Multiplikation der maximalen Effizienz mit der Plateau-effizienz.

Auch die Lageneffizienz wurde in Abhängigkeit von Hochspannung und Schwellenspannung untersucht. Der Verlauf ist vergleichbar dem der Zelleffizienz.

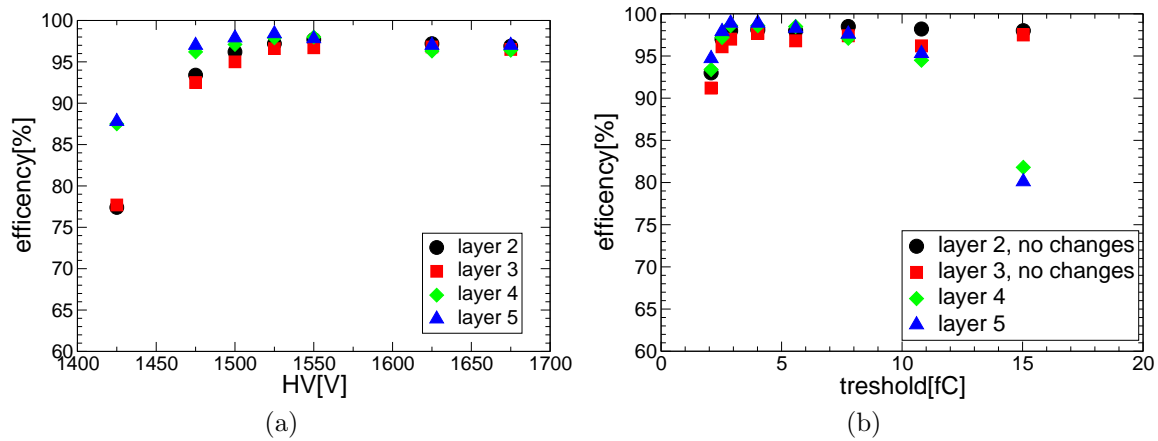


Abbildung 4.19: Abhängigkeit der Plateau-effizienz von Hochspannung (a) und Schwelle (b). Die nominellen Parameter liegen bei einer Hochspannung $HV=1550$ V und einer Schwelle $Thr=700$ mV $\cong 3$ fC. Der Fehler einer Messung beträgt 0,6 %, was in dieser Darstellung nicht mehr sichtbar ist.

Lage	2	3	4	5
Lageneffizienz (2 mm) [%]	87.2	87.1	92.5	89.8
Lageneffizienz (1 Straw) [%]	88.7	88.9	94.3	91.3

Tabelle 4.5: Lageneffizienz der einzelnen Lagen bei nominellen Parametern sowohl für ein Suchfenster von ± 2 mm als auch ± 1 Straw

4.3.6 Rauschen und Crosstalk

Ein Aspekt des Strawdesigns war die Minimierung des Crosstalks und des Rauschens. Sie erschweren die Spurfindung und können die Auflösung des Detektors verschlechtern. Beide Phänomene sind stark von der Schwelle abhängig und haben typischerweise eine kleinere Signalhöhe als echte Teilchen. Diese Untersuchungen wurden von Jan Knopf [49] durchgeführt, werden hier aber wegen der Vollständigkeit präsentiert.

Crosstalk

Crosstalk, der durch das Übersprechen eines Signals in einen benachbarten Kanal definiert ist, kann ein großes Problem sein. Da es Signale in zwei benachbarten Kanälen gibt, ist es in diesem Fall wesentlich schwieriger, den zu einer Spur gehörigen Hit zu finden. Damit verschlechtert sich die Auflösung. Darum ist es wichtig, Crosstalk zu minimieren. Abbildung 4.20 zeigt den “digitalen Crosstalk”¹¹ in Abhängigkeit der Schwellenspannung und der Hochspannung.

Erwartungsgemäß nimmt Crosstalk mit steigender Diskriminatorschwelle ab, da die

¹¹Bei “digitalem Crosstalk” war das im Nachbarkanal erzeugte Signal groß genug, um die Vorverstärkerschwelle zu passieren und in der Digitalelektronik (TDC) einen Treffer zu hinterlassen.

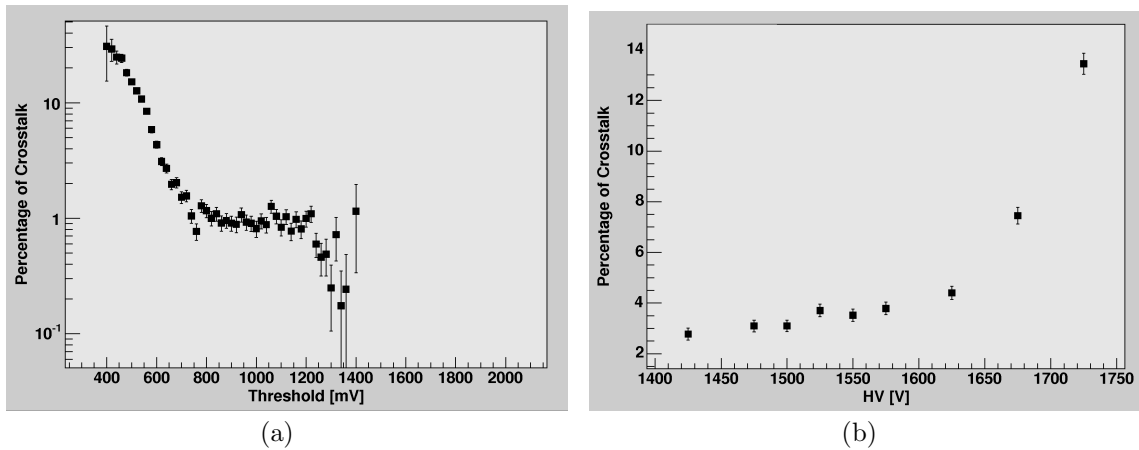


Abbildung 4.20: Abhängigkeit des Crosstalks von Schwelle (a) und Hochspannung (b). Angegeben ist jeweils der Prozentsatz der durch Crosstalk erzeugten Treffern im Vergleich zu allen Treffern. Die nominellen Parameter liegen bei einer Hochspannung $HV = 1550 \text{ V}$ und einer Schwelle $Thr = 700 \text{ mV} \hat{=} 3 \text{ fC}$. Für diese Parameter erwartet man etwa 1-3 % Crosstalk

Crosstalk Signale, welche kleiner als echte Signale sind, die Schwelle nicht übersteigen. Mit zunehmender Hochspannung werden die Signale und damit auch der Crosstalksignale größer und überschreiten somit die Schwelle wieder. Bei einem geplanten Arbeitspunkt von 700 mV erwartet man 1-3 % digitalen Crosstalk.

Rauschen

Als Rauschen werden unkorrelierte, in allen Kanälen auftretende Signale gezählt. Um diese tatsächlich unabhängig von einem Teilchendurchgang zu finden, wird ein Zeitfenster betrachtet, das kein Signal enthalten sollte. Da die Szintillatordaten in einem anderen Zeitfenster ausgelesen werden als die Kammerdaten (Kap. 4.2.3), kann dieses hierzu benutzt werden. Außer in den Kanälen der Szintillatoren erwartet man kein Signal, dennoch auftretende Treffer müssen demzufolge Rauschen sein. Auch in diesem Fall wird digitales Rauschen untersucht, d.h. Signale, die groß genug waren, die Vorverstärkerschwelle zu passieren. Rauschen entsteht oft durch das Einkoppeln von äußeren Signalen, die von anderer Elektronik abgestrahlt werden. Da die Straws wie Antennen wirken, ist es relativ einfach, diese Signale einzukoppeln. Typischerweise tritt das Rauschen erst in einzelnen Kanälen auf, die auch sofort starkes Rauschen zeigen. Dies liegt zum einen daran, dass die einzelnen Kanäle leicht unterschiedlich auf die eingestellte Schwelle reagieren. Weiterhin kann es von der Position im Detektor, den Kontakten der Steckverbindungen und weiteren Faktoren abhängen. Die Ergebnisse der Untersuchungen, wiederum in Abhängigkeit von Schwelle und Hochspannung, sind in Abbildung 4.21 gezeigt. Eine tatsächliche Vorhersage des Rauschverhaltens ist schwierig, da dieses von den äußeren Bedingungen abhängt.

Ab einer Vorverstärkerschwelle von $Thr = 700 \text{ mV}$ ist der prozentuale Anteil der rauschenden Kanäle sehr gering. Auch bei der Erhöhung der Hochspannung nimmt das Rauschen erst ab 1600 V stärker zu.

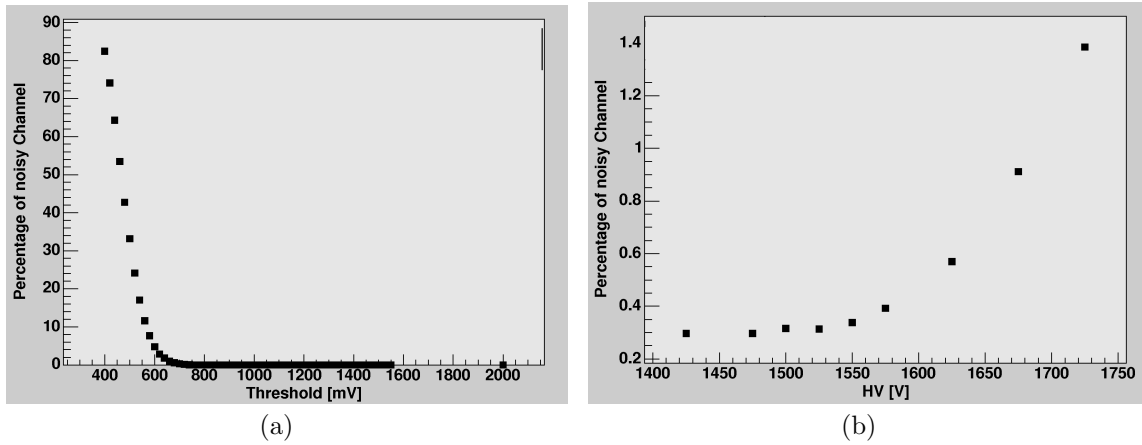


Abbildung 4.21: Abhängigkeit des prozentualen Anteils der rauschenden Kanäle von Schwelle (a) und Hochspannung (b). Die nominellen Parameter liegen bei einer Hochspannung $HV=1550\text{ V}$ und einer Schwelle $Thr=700\text{ mV} \hat{=} 3fC$.

4.3.7 Zusammenfassung und Vergleich mit anderen Analysen

Während des Testbeams mit 6 GeV Elektronen wurden erstmals mehrere Module mit der finalen Ausleseelektronik betrieben. Die Analyse wurden auf Daten durchgeführt, die bei einer Hochspannung $HV=1550\text{ V}$ und Schwellenspannung des Vorverstärkers $Thr=700\text{ mV} \hat{=} 3fC$ aufgenommen wurden. Dabei wurde gezeigt, dass die angestrebte Spurauflösung von $200\text{ }\mu\text{m}$ erreicht werden kann und hier sogar unterboten wurde. Die Straweffizienz entspricht mit etwa 98% im Plateaubereich den Erwartungen. Crosstalk und Rauschen befinden sich für diese Parameter auf einem niedrigen Niveau. Für eine Variation der Hochspannung von 1520 V-1600 V und der Schwelle von 700 mV-900 mV sind keine großen Änderungen des Verhaltens zu erwarten.

Teile diese Analyse können auch für eine korrekte Beschreibung des Outer Tracker Verhaltens in Monte Carlo Studien verwendet werden [50]. Insbesondere für die Alignierung ist eine realistische Beschreibung der $r(t)$ -Relation von Bedeutung, ebenso Studien über die Residuenauflösung in Abhängigkeit des Abstandes vom Draht. Für Spurfindungsalgorithmen ist eine korrekte Simulation der Effizienzen wichtig, um die Algorithmen zu optimieren.

Eine Analyse unter Verwendung der Siliziumstreifendetektoren zur Spurdefinition liefert konsistente Resultate. Aufgrund der Vielfachstreuung stellte sich jedoch heraus, dass diese Art der Analyse einer unabhängigen Analyse allein unter Verwendung der Outer Tracker Daten unterlegen ist.

Kapitel 5

Alterung bei Gasdetektoren

Alterungseffekte in Gasdetektoren sind fast so lange bekannt, wie diese Detektoren zum Nachweis von Teilchen Verwendung finden [51]. Die Alterung ist gekennzeichnet durch unerwünschte Änderungen im Detektorverhalten aufgrund der Bestrahlung. Ursache der Alterung sind in der Regel Polymerbildung in der Nähe der Anode: Bedingt durch die hohe Feldstärke können dort Verhältnisse auftreten, die denen der Plasmachemie nicht unähnlich sind [52]. Die dort entstehenden freien Radikale¹ können sich gemeinsam mit Monomeren² zu langkettigen, verzweigten Polymeren verbinden. Diese schwerlöslichen, guthaftenden Moleküle können sich zu nichtleitenden Schichten auf Kathode und Anode ablagern und das Detektorverhalten verschlechtern. In Abbildung 5.1 ist der Prozess schematisch dargestellt [53]. Freie Radikale (hier: CH_2) verbinden sich zu langen Molekülketten und lagern sich auf Oberflächen ab. Um diese Reaktionen zu verhindern, müssen Radikale und Monomere im Driftgas vermieden oder reduziert werden. Bedingt durch die Vielzahl der möglichen Reaktionen und Reaktionspartner bei der Bildung der Polymere ist es praktisch unmöglich, eine exakte Beschreibung der Vorgänge in den Kammern zu geben.

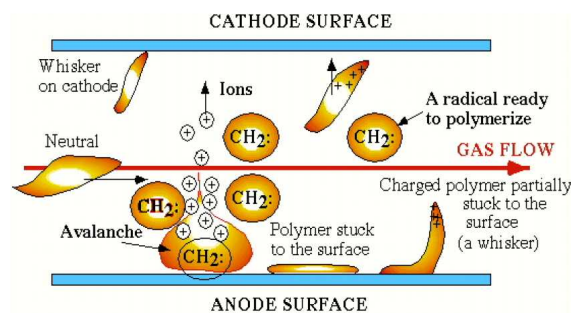


Abbildung 5.1: *Polymerisation: Die Radikale verbinden sich zu langen Ketten und lagern sich auch den Oberflächen ab [53].*

Anzeichen für Alterung können die Verminderung der Gasverstärkung, Verschlechte-

¹Radikale: Atome oder Moleküle mit mindestens einem ungepaarten Elektron, die besonders reaktionsfreudig sind.

²Monomere: kleine Moleküle mit einer reaktionsfähigen Doppelbindung oder einer funktionellen Gruppe.

rung der Energieauflösung, selbsterhaltende Entladungen, Dunkelströme, HV-Instabilität, Anschwellen des Drahtes, Drahtätzung oder gar das Reißen eines Drahtes sein [54].

5.1 Formen der Alterung

Alterungseffekte an der Anode

Ablagerungen auf dem Anodendraht, der in der Regel aus einem goldbeschichteten Wolframdraht mit einem Durchmesser im Bereich von 20-30 μm besteht, können zu nichtleitenden Schichten führen, die die Gasverstärkung im betreffenden Bereich soweit vermindern können, dass die Signale zu klein werden, um zu detektiert zu werden [2, 3]. Die Ablagerungen treten als durchgehende Schicht oder in Form feiner, vom Draht absteherender Härchen, sogenannten Whiskers, auf. Auch leitende Ablagerungen können einen Verlust der Gasverstärkung bewirken. Nimmt der Durchmesser des Anodendrahtes um einige Mikrometer zu, ändert sich das elektrische Feld und die Gasverstärkung wird reduziert.

Neben den Ablagerungen wurden weitere Effekte an den Anodendrähten beobachtet:

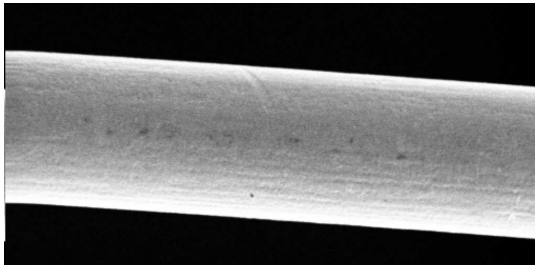
- Das Anätzen des Drahtes, das zum Reißen und damit zum kompletten Verlust eines Kanals führen kann. Dies kann durch sehr reaktive Radikale hervorgerufen werden, die im hohen elektrischen Feld nahe des Drahtes entstehen können [55].
- Das Anschwellen eines Drahtes bedingt durch Reaktionen unterhalb der Goldschicht. Dabei kommt Driftgas durch kleine Risse und Fehler in der Goldschicht mit dem Wolfram in Kontakt. Enthält das Driftgas Sauerstoff, oxidiert das Wolfram, was zum Anschwellen und zum Aufbrechen der Goldschicht führt [56].

Abbildung 5.2 zeigt neben einem neuen, unbestrahlten Draht auch einige Beispiele für Ablagerungen. Die Drähte stammen von Alterungsuntersuchungen aus Heidelberg. Weitere Beispiele sind in Abbildung 5.3 gezeigt. Diese Bilder stammen von Alterungsmessungen am ATLAS TRT³ [57]. Hier sieht man, wodurch die Alterung beeinflusst werden kann. Die Abbildungen 5.3(a) und 5.3(b) zeigen Beschädigungen der Goldoberfläche bei verschiedenen Gasmischungen. Abbildung 5.3(c) zeigt den Effekt von Sauerstoff und Wasser im Driftgas. Auf der Oberfläche konnte Sauerstoff sowie große Mengen Wolfram nachgewiesen werden. Abbildung 5.3(d) zeigt, dass bereits geringe Mengen Silizium innerhalb kürzester Zeit (0,1 C/cm) starke Effekte hervorrufen können.

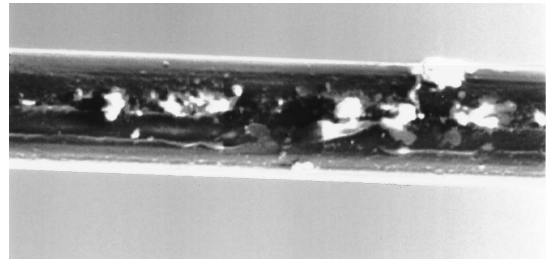
Ablagerungen auf der Kathode – Maltereffekt

Bei dünnen nichtleitenden Ablagerungen auf der Kathode sammeln sich dort die positiv geladenen Ionen und erzeugen ein hohes elektrisches Feld. Es kommt zur Feldemission von Elektronen aus der Kathode. Diese driften zur Anode und erzeugen dabei im Gasverstärkungsprozess wiederum positive Ionen, die sich auf der nichtleitenden Schicht sammeln (Abb. 5.4). Diese selbsterhaltenden Entladungen bleiben bestehen, auch wenn

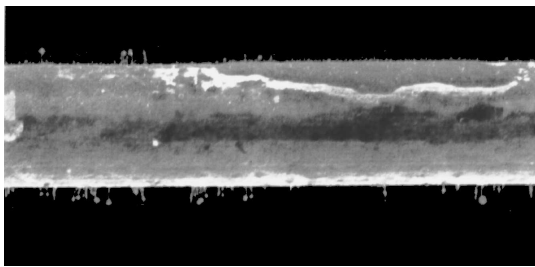
³TRT: Transition Radiation Tracker, Übergangsstrahlungsdetektor.



(a) Neuer Draht.



(b) Ablagerungen auf dem Draht. Die Goldschicht ist unter der kohlenstoffhaltigen Lage fast nicht mehr zu sehen.



(c) Sogenannte Whisker, feine Härchen, die vom Draht abstehen.



(d) Gerissener Draht. Man erkennt die Stufe, an der zuerst die Goldschicht weggeätzt wurde, bevor das Wolfram zutage trat.

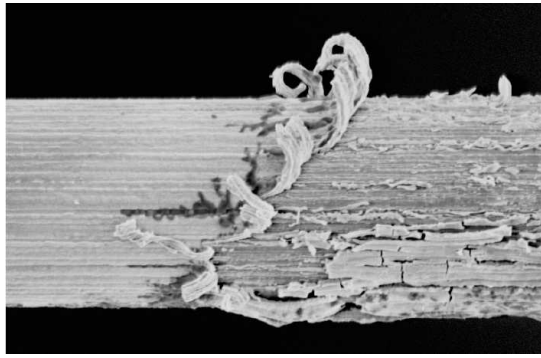
Abbildung 5.2: *Alterung des Anodendrahtes. Der Durchmesser des Drahtes beträgt $25\mu\text{m}$, die Fotos wurden mit dem Elektronenmikroskop aufgenommen [59].*

die Bestrahlung beendet wird. Erst durch Abschalten der Hochspannung erlöschen die Ströme nach einiger Zeit wieder. Man nennt diesen Effekt Maltereffekt [58]. Er wurde beispielsweise beim Outer Tracker des HERA-B Detektors beobachtet und wurde dort durch eine schlecht leitende Kathode verursacht [1].

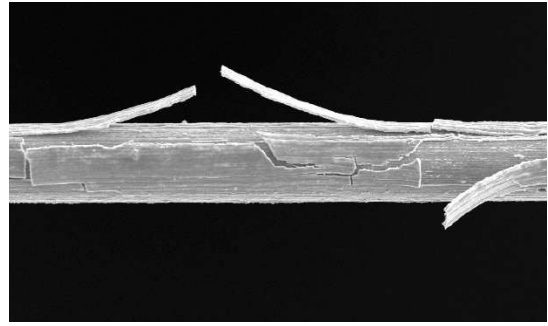
5.2 Ursachen für Alterung von Gasdetektoren

Die Alterung von Gasdetektoren wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Die Maßnahmen gegen das Auftreten von Alterung beginnen bereits vor der Produktion des Detektors. Die im Modulbau verwendeten Materialien dürfen nicht ausgasen, da sich die Molekülfragmente ablagern oder mit dem Driftgas reagieren können. Besonders Kohlenwasserstoffe und Silizium sind problematisch, da sie sich leicht ablagern und nichtleitende Schichten bilden. Darum beginnt die Vermeidung der Alterung bereits mit einer sorgfältigen Auswahl der Komponenten [60, 61]. Weiterhin muss bei der Modulproduktion auf Reinheit geachtet werden, damit auch in diesen Stadium keine Verunreinigungen in das System gelangen.

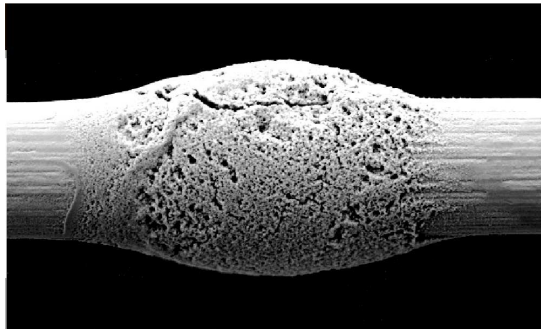
Allerdings spielen nicht nur die äußeren Faktoren eine Rolle, auch die Art und Stärke



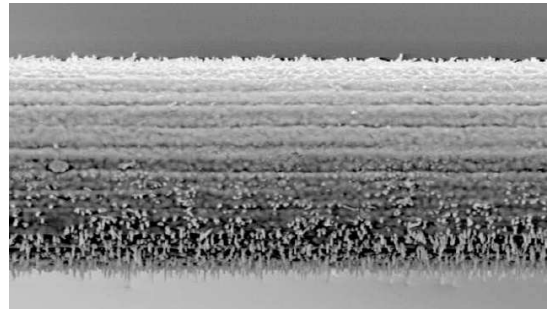
(a) Xe/CF₄/CO₂ 70%/20%/10%, 6 C/cm, 5 μ A/cm



(b) Xe/CF₄/CO₂ 70%/27,5%/2,5%, 2 C/cm, 1 μ A/cm



(c) Xe/CF₄/CO₂ 70%/20%/10% + 1,2% H₂O + 1,5% O₂, 0,5 C/cm



(d) Xe/CF₄/CO₂ 70%/20%/10%, 0,08 C/cm, 0,1 μ A/cm + Silizium

Abbildung 5.3: *Alterung des Anodendrahtes–Beispiele vom ATLAS TRT [57]. Die Parameter während der Bestrahlungen stehen in den Bildunterschriften.*

der Bestrahlung ist entscheidend für das Auftreten von Alterung.

Alterung tritt nach einer gewissen Bestrahlungsdauer auf. Diese Zeitdauer kann von verschiedenen Faktoren abhängen. Als Maß für die Dauer der Bestrahlung der Anode wird die akkumulierte Ladung angegeben, sie wird für Anodendrähte in C/cm angegeben. Hier werden Parameter wie Ströme und Anzahl der Primär- und Sekundärionisationen berücksichtigt und es ergeben sich Vergleichswerte für akkumulierte Ladungen bei Bestrahlungen mit verschiedenen Parametern. Beim LHCb Outer Tracker erwartet man im am stärksten bestrahlten Bereich etwa 1 C/cm während der gesamten Betriebsdauer. Ein Ziel der Bestrahlungstests ist es, diese Menge an akkumulierter Ladung zu sammeln. Da es nicht praktikabel ist, einen Test über zehn Jahre durchzuführen, muss der Beschleunigungsfaktor erhöht werden. Dies ist allerdings auch eine der Variablen, die Einfluss auf die Alterung haben:

- Der **Beschleunigungsfaktor** gibt an, wie schnell die Ladung im Vergleich zum späteren Detektorbetrieb gesammelt wird. Ein hoher Beschleunigungsfaktor bedeutet auch eine hohe **Rate** und einen hohen **Strom**. Da sowohl die akkumulierte Ladung als auch der Beschleunigungsfaktor einen Einfluss auf die Alterung haben können, muss in den Tests immer ein Kompromiss zwischen diesen beiden Varia-

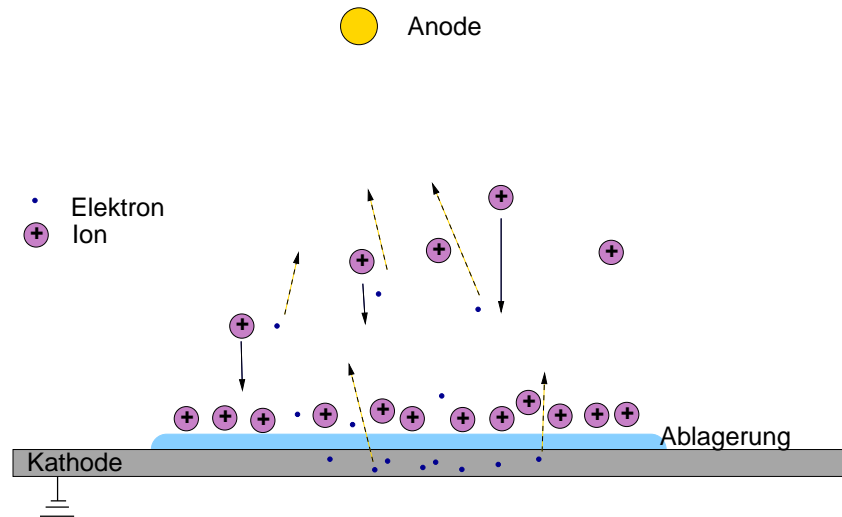


Abbildung 5.4: Beim Maltereffekt kommt es durch nichtleitende Ablagerungen auf der Kathode zu einer Anlagerung von positiven Ionen und dadurch zu einem starken elektrischen Feld. Es kommt zur Feldemission von Elektronen aus der Kathode. Diese driften zur Anode, erzeugen im Gasverstärkungsprozess neue Ionen und sorgen so für selbsterhaltende Entladungen, die erst durch Abschaltung der Hochspannung beendet werden [58].

blen gefunden werden.

- Die **Art der Teilchen** kann die Alterung ebenfalls beeinflussen. Die Unterschiede beziehen sich hierbei in erster Linie auf die Primärionisation. Während minimal ionisierende Teilchen (MIP) im Schnitt 30 Elektron-Ion-Paare bei der Durchquerung eines Outer Tracker Straws (Durchmesser: 4,9 mm) erzeugen, kann bei hochionisierenden Teilchen ein Faktor 1600 im Vergleich zu MIPs, also bis zu 50000 Elektron-Ion Paare, deponiert werden.
- Auch die **bestrahlte Fläche** kann einen Einfluss auf die Alterung haben. Die Konzentration an Molekülen und Radikalen, die Alterung verursachen, kann von der bestrahlten Fläche abhängig sein. In vielen Fällen wird während der Alterungsstudien nur eine wenige Quadratzentimeter große Fläche bestrahlt, während im Betrieb bei LHCb der ganze Detektor mit mehreren hundert Quadratmetern bestrahlt wird.

Ein linearer Zusammenhang zwischen der Stärke der Alterung und der Stärke der einzelnen Parametern muss nicht gegeben sein. Es ist ebenfalls möglich, dass Alterung erst ab einer bestimmten Stärke auftritt oder sogar nur bis zu einer bestimmten Stärke eines Parameters gemessen wird. Darum versucht man beispielsweise, Tests mit möglichst niedrigen Beschleunigungsfaktoren durchzuführen, um so den Verhältnissen beim Betrieb des Outer Tracker im LHCb Detektor möglichst nahe zu kommen.

All diese Faktoren machen eine Extrapolation der Labormessungen auf das Verhalten des gesamten Detektors extrem schwierig. Bedingt durch die Anzahl der zu den Alterungseffekten beitragenden Parameter ist es kaum möglich, alle Kombinationen abzudecken, um mögliche versteckte Abhängigkeiten zu finden. Ein Problem in diesem

Zusammenhang ist die erwartete Betriebsdauer des LHCb-Detektors von 10 Jahren und die in dieser Zeit akkumulierte Ladung. Obwohl in Heidelberg über mehrere Jahre Alterungsuntersuchungen für den LHCb Outer Tracker durchgeführt worden sind, konnten nicht alle Möglichkeiten abgedeckt werden. Bei Alterungsstudien mit Röntgenquanten betrug der Beschleunigungsfaktor mindestens 15-20, bei Bestrahlungen mit hochionisierenden Teilchen (Protonen am MPI Beschleuniger) war er deutlich höher. Die bestrahlte Strahlänge betrug maximal 60-70 cm und es wurden immer nur wenige Straws bestrahlt. Die meisten Tests wurden mit Röntgenquanten mit einer Primärionisation von etwa 300 Elektron-Ion Paaren durchgeführt, während beim LHCb-Betrieb in erster Linie minimal ionisierende Teilchen mit 30 Elektron-Ion Paaren pro Straw erwartet werden.

5.3 Messung der Alterung

Um im Laufe einer Bestrahlung Alterung festzustellen, ist eine Kontrolle der Gasverstärkung eine geeignete Methode. Photonen aus einer ^{55}Fe -Quelle mit einer Energie von 5,9 keV erzeugen an einem Punkt im Straw mittels Photoeffekt ein Elektron, welches weitere Teilchen ionisiert. Photonen deponieren also ihre gesamte Energie an einer Position. Bei einer konstanten Gasverstärkung wird ein Signal fester Größe gemessen. Eine Änderung der Signalthöhe bedeutet also eine Änderung der Gasverstärkung. Trägt man die Signalthöhen in ein Histogramm auf, ist das Maximum der Verteilung ein Maß für die Verstärkung. In Abbildung 5.5 sind die gemessenen Pulshöhen in mV bei zwei Messungen des Eisenspektrums dargestellt. Die rote Verteilung zeigt eine Messung ohne Alterung, die blaue zeigt die Gasverstärkung bei Alterung. Beide Messungen stammen von unterschiedlichen Positionen im selben Modul, andere Parameter wurden nicht verändert. Die mittlere Signalthöhe ist bei der blauen Verteilung (bestrahlt) deutlich reduziert⁴. Soll allerdings die Gasverstärkung einer größeren Fläche mit einer guten Ortsauflösung bestimmt werden, ist diese Methode sehr zeitaufwändig.

Da im Laufe der in dieser Arbeit vorgestellten Messungen oft Eisenspektren an mehreren hundert Positionen gemessen werden mussten, wurde eine schnellere Möglichkeit gesucht. Eine einfachere Methode als das Fitten des Maximums ist eine Mittelwertbildung mehrerer Signale. Diese Messung lässt sich um einen Faktor 5-6 schneller durchführen. Dazu wird direkt der Mittelwerte aus 256 Signalen gebildet und das Resultat ohne weitere Fitprozeduren benutzt. Diese Methode ist etwas ungenauer als der Fit der Verteilung, aber die Auflösung ist für unsere Messungen ausreichend. In den Kap. 6 und Kap. 7 wird die Gasverstärkung aus den Spektren bestimmt, in den Kapiteln 8 und 9 wird die Methode der Mittelwertbildung verwendet.

⁴Prinzipiell kann sich die Gasverstärkung auch aufgrund äußerer Parameter wie z.B. Luftdruckschwankungen ändern. Da diese Messungen aber in kurzem zeitlichen Abstand durchgeführt wurden, kann man das hier ausschließen.

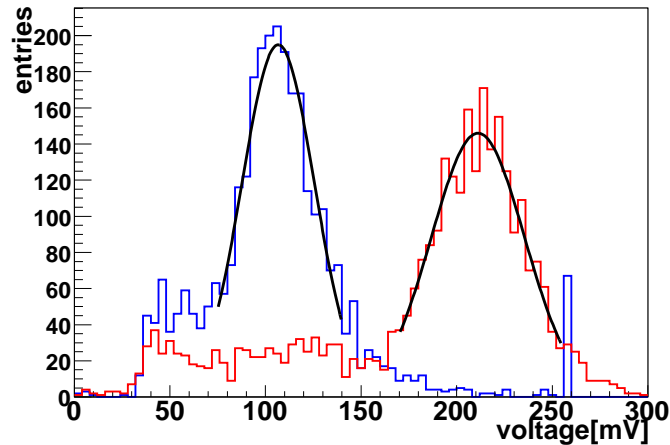


Abbildung 5.5: *Messung eines Eisenspektrums an einer bestrahlten (blau) und einer unbestrahlten (rot) Position. Der Mittelwert an der bestrahlten Stelle ist deutlich reduziert.*

5.4 Materialien im Outer Tracker

Ein wichtiger Faktor bei der Alterung sind die verwendeten Materialien. Sie erhalten im Laufe der Jahre eine große Strahlendosis, die keinen Einfluss auf die Materialeigenschaften haben darf. Außerdem ist entscheidend, dass die Stoffe nicht ausgasen [61]. Bereits kleinste Mengen können sich auf Kathode und Anode ablagern oder im hohen Feld nahe des Drahtes dissoziieren und so Alterungseffekte hervorrufen.

Darum wurden in allen Bestrahlungstests Module verwendet, deren Materialien aus der laufenden Modulproduktion entnommen wurden. Dadurch werden bei einem Test nicht nur unterschiedliche Bestrahlungsparameter getestet, sondern auch die verwendeten Werkstoffe einer Prüfung unterzogen. Hierbei wurde besonders darauf geachtet, dass im Laufe eines Experiments auch Drahtpositionierer und Leiterplatten bestrahlt wurden. In Tabelle 5.1 sind alle Materialien angegeben, die sich in Kontakt mit dem Driftgas befinden [60, 62].

5.5 Frühere Messungen in Heidelberg

In Heidelberg wurden über mehrere Jahre grundlegende Bestrahlungsstudien durchgeführt. Die Doktorarbeit von Michael Walter [29] enthält Messungen zur Ausgasung verschiedener Materialien, der Gaswahl und der Abhängigkeit der Alterung vom Wassergehalt des Driftgases. Aufgrund dieser Messungen wurde die Gasmischung von der ursprünglich bevorzugten (Ar/CO₂/CF₄ in dem Volumenverhältnis 75 %/10 %/15 %) zu Ar/CO₂ (70 %/30 %) geändert, da nicht ausgeschlossen werden konnte, dass mit Tetrafluormethan Probleme auftreten. Mit dem CF₄-haltigen Gas ist beispielsweise die Bildung der hochreaktiven Flusssäure (HF) im Plasma möglich. Tabelle 5.2 fasst diese Messungen zusammen [29]. Diese Tests wurden immer bei einem hohen Beschleunigungsfaktor (> 40) durchgeführt, um einen großen Bereich der geplanten LHCb-Betriebsdauer

Komponente	Material
Straw	Kapton, KaptonXC, Aluminium
Drahtpositionierer	Noryl N110
Anode	goldbeschichteter Wolframdraht
Seitenwand, Paneel	Aluminium, Kaptonfolie
Epoxydkleber	Araldit A103, Härter HY991, Quarzmehl
Lötpunkte	Lötzinn Elsold Typ C3
PCB	Epoxidharz+Glasfaser

Tabelle 5.1: *Im Outer Tracker verwendete Materialien, die in Kontakt mit der Driftgasmischung kommen.*

abzudecken. Dabei wurden eine akkumulierte Ladung von bis zu 2,5 C/cm gesammelt.

Test	Untersuchte Parameter	Gas	Ergebnis
Material	Ausgasen: Schutzfolien Straws	Ar/CO ₂ /CF ₄	keine Änderung im Betriebsverhalten
Gasmischung	Ar/CO ₂ /CF ₄ , Ar/CO ₂	Ar/CO ₂ /CF ₄ , Ar/CO ₂	Ar/CO ₂ /CF ₄ : Ablagerungen, Drahtreißen; Ar/CO ₂ : keine Probleme, sichere Alternative
Wassergehalt	<50 ppm, 500 ppm, 3500 ppm	Ar/CO ₂ /CF ₄ , Ar/CO ₂	Ar/CO ₂ /CF ₄ : In trockenem Gas (<50ppm) Kohlenstoffablagerungen, aber kein Verlust der Gasverstärkung, bei hohem Wassergehalt Anzeichen für Drahtätzen; Ar/CO ₂ : keine Ablagerungen bei 50 ppm, Bildung von Whiskers bei höherem Wassergehalt

Tabelle 5.2: *Frühere Alterungsmessungen am LHCb Outer Tracker in Heidelberg [29]*

Aus diesen Messungen ergab sich der Schluss, dass der Outer Tracker bei einem geringen Wassergehalt (<100 ppm) betrieben werden sollte, da in diesem Regime bei Ar/CO₂ keine Ablagerungen gefunden wurden.

5.6 Neue Messungen

Alle im weiteren erwähnten Messungen wurden im Rahmen dieser Doktorarbeit durchgeführt. Nachdem in den grundlegenden Messungen Ar/CO₂ als Driftgas gewählt wurde, soll in den folgenden Bestrahlungen diese Zählgas Mischung ausführlich getestet werden. Weiterhin sollte das in LHCb benutzte Gassystem auf seine Eignung in Bezug auf Alterung untersucht werden. Kapitel 6 stellt die Ergebnisse der Bestrahlung mit hochionisierenden Teilchen am Protonenbeschleuniger des Max Planck Instituts für Kernphysik [63] in Heidelberg vor. Weiterhin wurde eine Langzeitstudie mit Röntgenquanten durchgeführt (Kap. 7). In den Kapiteln 8 und 9 wird ein neues Phänomen beschrieben: stark ratenabhängige Alterungseffekte, die nur bei relativ geringer Strahlungsintensität auftreten.

Kapitel 6

Bestrahlung mit stark ionisierenden Teilchen

Im Laufe des Jahres 2004 fanden zwei Strahlzeiten am Max Planck Institut für Kernphysik [63] in Heidelberg statt. Dort werden Protonen auf eine maximale kinetische Energie von 21 MeV beschleunigt. Der Protonenstrom kann von 1 nA bis zu $10\text{ }\mu\text{A}$ variiert werden. Unterhalb von 1 nA wird der Strahl instabil und schwer fokussierbar. Für die hier vorgestellten Tests war es nötig, den Strahl bei einem möglichst geringen Strom zu betreiben, da bereits mit einem Protonenstrom von 1 nA die Anodenströme im Detektor um wenigstens einen Faktor zehn höher waren als bei anderen Alterungsstudien.

6.1 Aufbau

Abbildung 6.1 zeigt den schematischen Aufbau. Der Strahl aus dem Beschleuniger wird in der Vakuumkammer an einer $2,73\text{ }\mu\text{m}$ dicken Goldfolie getreut. Er wird dadurch aufgefächert, um die Teilchendichte zu verringern und gleichzeitig die bestrahlte Fläche zu vergrößern. Der ungestreute Strahl wird von einem 22 mm durchmessenden Faraday Cup¹ aus Tantal gestoppt [64].

Die gestreuten Teilchen verlassen die Vakuumkammer durch ein $100\text{ }\mu\text{m}$ starkes Edelstahlfenster, bevor sie auf weitere Edelstahlbleche treffen. Die Folien senken die Energie der Teilchen. Danach durchqueren die Protonen das Modul. Das Modul ist von einer zum Strahl hin offenen Edelstahlbox umschlossen, um eine Gefährdung von Menschen zu verhindern.

6.1.1 Das Modul

Es wurde ein Modul mit 14 Straws mit einer Länge von je 40 cm verwendet. Jeweils sieben Straws befinden sich in einem eigenen, abgeschlossenen Gasvolumen. So ist es möglich, im Laufe einer Bestrahlung die beiden Driftgase Ar/CO₂ und Ar/CO₂/CF₄ gleichzeitig zu testen. Eine Skizze des Moduls ist in Abbildung 6.2 gezeigt. In einigen

¹Faraday Cup: Becher aus leitfähigem Metall, welcher geladene Teilchen im Vakuum zu stoppt. Der Teilchenstrom im Faraday Cup kann ausgelesen werden.

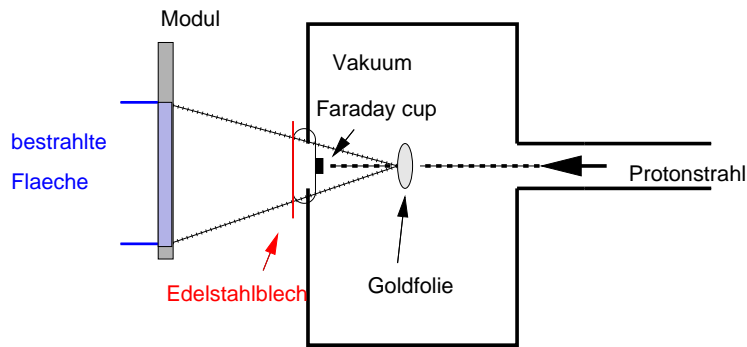


Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau: der Protonenstrahl kommt von rechts und wird an der Goldfolie gestreut. Die gestreuten Protonen bestrahlen das Modul, welches sich links befindet.

Straws befinden sich zusätzlich Drahtpositionierer, die ebenfalls bestrahlt werden sollen, um mögliche Probleme aufgrund von Ausgasungen zu finden. Zur Auslese wurden VV50-2 -Vorverstärker verwendet. Der in Heidelberg entwickelte Vorverstärker [65] hat einen Verstärkungsfaktor von $1,2 \text{ mV/fC}$, mit einem dynamischen Bereich von 200 mV können damit Signale bis $\approx 160 \text{ fC}$ ausgelesen werden.

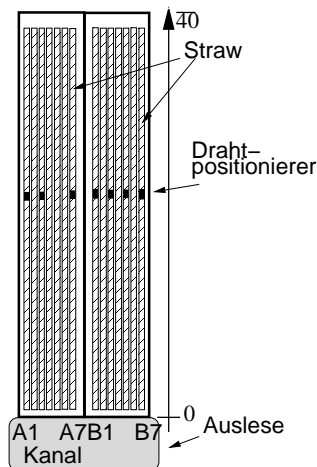


Abbildung 6.2: Es wurde ein Modul mit zwei getrennten Gasvolumen verwendet. Damit ist es möglich, die beiden Gasmischungen Ar/CO_2 und $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ gleichzeitig zu testen. In jeder Kammer befinden sich sieben Straws mit einer Länge von je 40 cm , teilweise mit Drahtpositionierer.

6.1.2 Kalibrierung

Vor Beginn der Bestrahlung mussten erst die Strahlparameter vermessen und eingestellt werden. Damit erhält man Angaben über die Teilchenrate und den Anodenstrom pro Zentimeter und kann daraus die Primärionisation und die akkumulierte Ladung pro

Zentimeter bestimmen. Neben dem Anodenstrom in den Straws und dem Protonenstrom konnte auch der Strom im Faradacyup gemessen werden. Dabei zeigte sich, dass etwa 90 % der Teilchen nicht gestreut, sondern in dem Faradacyup gestoppt wurden. Die Energie der Protonen wurde am Austrittsfenster mit mehreren $100\,\mu\text{m}$ dünnen Edelstahlblechen gesenkt. Ziel war es, die Energie der Protonen so weit zu senken, dass die Primärionisation der Protonen im Modul maximal ist (Bragg Peak). Die Abhängigkeit der Primärionisation im Modul von der Dicke der Edelstahlbleche ist in Abbildung 6.3 gezeigt. Die Primärionisation ergibt sich für die Protonen aus dem Energieverlust pro Längeneinheit beim Durchqueren des Straws. Für schwere geladene Teilchen folgt dieser der Bethe-Bloch-Formel (Kap. 3.1). Der Energieverlust ist maximal bei kleinen β -Werten, also bei einer geringen Energie.

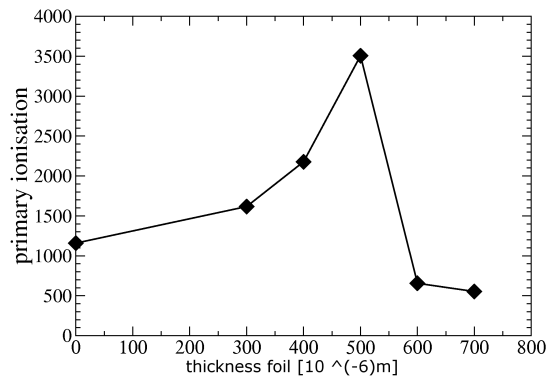


Abbildung 6.3: *Primärionisation im Straw in Abhängigkeit der Absorberdicke. Sie ist maximal bei etwa $500\,\mu\text{m}$.*

Die Primärionisation in den Straws ergibt sich aus

$$n = \frac{I}{e \cdot G \cdot R}. \quad (6.1)$$

Dabei sind

- I: Anodenstrom,
- n: Primärionisation,
- e: Elementarladung = $1,6 \times 10^{-19}\text{C}$,
- G: Gasverstärkung,
- R: Teilchenrate im Detektor.

Mit den gemessenen Teilchenraten und Anodenströmen kann nun die Primärionisation berechnet werden. Im Mittel werden etwa 3500 Primärelektronen erzeugt. In Tabelle 6.1 ist ein Vergleich mit Ionisationen von MIPs, 5,9 keV Photonen einer ^{55}Fe -Quelle und 8 keV Röntgenstrahlen (entspricht der Strahlung, die in der Röntgenanlage des Physikalischen Instituts erzeugt wird, Kap. 7) für LHCb Straws gezeigt.

Das Strahlprofil im Modul im Lauf der beiden Strahlzeiten ist in Abbildung 6.4 gezeigt. Das Modul wurde so ausgerichtet, dass das Profil möglichst symmetrisch zur Modulmitte ist. Die inneren Kanäle fehlen, da sich dort die Trennwand der beiden Gasvolumen befindet und während der ersten Strahlzeit die innersten Kanäle aufgrund tech-

Teilchen	MIP	5,9 keV Elektron (⁵⁵ Fe-Quelle)	8 keV (K _α) Röntgenquant (Röntgenanlage, Kap. 7))	stark ionisieren- des Teilchen
Primärelektronen	ca. 35	ca. 220	ca. 300	im Mittel 3500

Tabelle 6.1: *Primärionisation für Teilchen unterschiedlicher Energien*

nischer Probleme beim Anschluss nicht genutzt wurden. Das Profil über die Breite der Straws ist bei der ersten Strahlzeit sehr steil, während es in der zweiten Strahlzeit beinahe eben ist. Der Unterschied der Profile kommt von dem unterschiedlichen Abstand des Moduls vom Austrittsfenster, es wurde für die zweite Zeitperiode weiter entfernt, um eine gleichmäßige Verteilung über eine größere Fläche zu erhalten. Um die beiden Strahlzeiten vergleichen zu können, wurden drei Kanäle nur während der ersten Strahlzeit bestrahlt und zwei andere nur während der zweiten. Fünf Kanäle wurden während beider Strahlzeiten bestrahlt. Die äußeren Kanäle dienten als Referenz und wurden zu keinem Zeitpunkt dauerhaft bestrahlt, sondern nur mit Hochspannung versorgt, um Rate und Anodenstrom in diesen Straws zu messen.

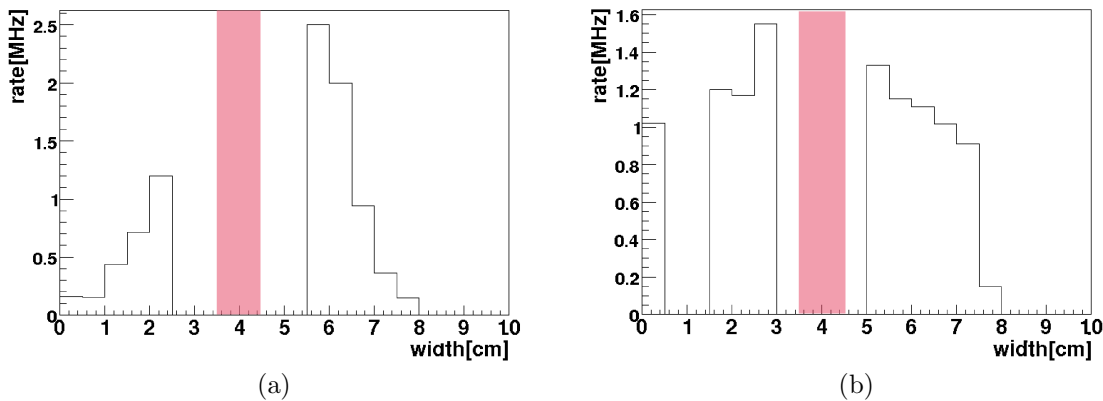


Abbildung 6.4: (a) *Strahlprofil während des ersten Strahltests. Aufgrund der Wand (roter Balken), die die beiden Gasvolumen trennt und wegen nicht genutzter Kanäle ergibt sich die Lücke.* (b) *Strahlprofil während des zweiten Strahltests. Die Kanäle werden diesmal gleichmäßiger bestrahlt, da das Modul weiter vom Austrittsfenster entfernt ist.*

6.2 Bestrahlung

Die Bestrahlung soll mögliche Alterungsprobleme mit hochionisierenden Teilchen zeigen. Das ist trotz einer kurzen Bestrahlungsdauer von einigen Tagen möglich, da aufgrund der

hohen Rate ein sehr hoher Beschleunigungsfaktor im Vergleich zu LHCb gegeben ist und erste Anzeichen von Alterung auch schon nach relativ kurzer Zeit zu sehen sein können. Als Maß für die Alterung wird die Änderung der Gasverstärkung genutzt. Während der Bestrahlung wird regelmäßig für alle Straws beziehungsweise Strawgruppen die Rate und der Anodenstrom gemessen. Nach Gleichung 6.1 ist bei einer festen Hochspannung (und konstanter Temperatur und Druck) das Verhältnis von Anodenstrom zu Rate proportional zur Gasverstärkung und dient somit als erster Hinweis auf mögliche Alterung. Um lokale Effekte messen zu können, werden vor und nach der Bestrahlung die einzelnen Straws in kleinen Schritten entlang des Anodendrahtes mit einer ^{55}Fe -Quelle vermessen. Die von der Eisenquelle emittierten 5,9 keV Photonen haben bei fester Hochspannung eine konstante Gasverstärkung. Ändert sich diese, ist dies ein deutliches Anzeichen für Alterung (Kap. 5.3).

Die Kanäle werden im folgenden mit einem **A** für Ar/CO₂ und mit einem **B** für Ar/CO₂/CF₄ als Driftgasmischung gekennzeichnet. In Tabelle 6.2 sind die wichtigsten Ergebnisse beider Bestrahlungen zusammengefasst. Aufgrund der starken Steigung im Strahlprofil während der ersten Periode wurden in den einzelnen Kanälen stark unterschiedliche Mengen an Ladung gesammelt. Die angegebenen Werte gelten jeweils für die am stärksten bestrahlte Stelle jedes Straws. Der Strahl wurde im Laufe der ersten Periode 46 h und der zweiten 44 h betrieben. Aufgrund technischer Limitierungen wurde die Bestrahlung nicht bei der nominellen Hochspannung von 1520 V durchgeführt, sondern bei einer Hochspannung von 1450 V. Dadurch wird die Gasverstärkung und damit auch der Anodenstrom um einen Faktor 2 reduziert.

Die Ergebnisse dieser Bestrahlung sind in Abbildung 6.5 gezeigt. Abb. 6.5(a) und Abb. 6.5(b) zeigen das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung entlang der Straws für Ar/CO₂ bzw. Ar/CO₂/CF₄. Für alle Kanäle ist die akkumulierte Ladung angegeben (10 Jahre LHCb entsprechen 1 C/cm). Die Daten wurden dabei auf Druckunterschiede korrigiert². Die Messung des unbestrahlten Referenzkanals zeigt die Variation der Gasverstärkung während einer Messung. Besitzen die Straws keinen Drahtpositionierer (wie z.B. Kanal 6A), kann die Abweichung vom Mittelwert größer sein. Da der Draht dadurch weniger Führung besitzt, befindet er sich nicht mehr exakt in der Mitte des Straws, was Einfluss auf die Gasverstärkung hat [66]. Da die Testmodule im Vergleich zur Massenproduktion nicht mit gleicher Präzision produziert werden konnten, tritt bei ihnen dieses Problem verstärkt auf. Der Effekt ist während der Messung stark von den Umgebungsparametern (Luftdruck, Temperatur) abhängig. Aus diesen Gründen können selbst bei den normierten Plots Schwankungen von $\pm 5\%$ auftreten. Innerhalb dieser Sensitivität kann kein Verlust der Gasverstärkung festgestellt werden.

Die Abbildungen 6.6 zeigen die Messung des Anodenstrom im Straw über die Teilcherate (I/R) im Laufe der Bestrahlungen. Es ist jeweils ein Referenzkanal angegeben, dessen Hochspannung nur zur Messung dieser beiden Parameter für eine kurze Zeit ange-

²Der Effekt des Luftdrucks wurde mit einem Mittelwert aus mehreren Messungen der Gasverstärkung im schwach bestrahlten Bereich des Moduls korrigiert.

¹Im stärksten bestrahlten Bereich.

²11.02.-15.02.04.

³13.05.-16.05.04.

⁴Bei einer angenommenen akkumulierten Ladung von 1 C/cm in 10 Jahren.

	Ar/CO ₂						Ar/CO ₂ /CF ₄					
Kanal	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B2	B3	B4	B5	B6	B7
akkumulierte Ladung ^{1 2} Test I [mC/cm]	Referenzkanal	28	64	120	300			352	232	88	28	Referenzkanal
akkumulierte Ladung ^{1 3} Test II [mC/cm]				156	156	200	200	196	204	196		
Gesamtladung [mC/cm]		28	64	276	456	200	200	548	436	284	28	
Beschleunigungsfaktor ² Test I		15	34	64	170			185	123	46	15	
Beschleunigungsfaktor ³ Test II				110	110	140	140	135	140	135		
LHCb-Jahre ⁴		0,3	0,6	1,7	5,0	2	2	5,5	5,3	2,0	0,3	

Tabelle 6.2: Die wichtigsten Resultate der ersten und zweiten Bestrahlung. Die Kanäle A7 und B1 sind hier nicht aufgeführt, da sie weder als Referenz dienten noch bestrahlt wurden.

schaltet wurde. Es wurde auf den ersten Wert der Messung normiert. Im Prinzip ist es mit diesem Verhältnis während der Messung bereits möglich, erste Anzeichen für einen Verlust der Gasverstärkung zu sehen, da $G \sim I/R$ ist. Allerdings traten im Laufe der Bestrahlung Schwankungen im Protonenstrahl auf. Dadurch änderte sich die Teilchendichte im Straw. Da aufgrund der hohen Rate Raumladungseffekte (Abb. 3.9) eine Rolle spielten, änderte sich damit auch die Gasverstärkung. Deswegen ist der Faktor I/R nicht konstant über die Bestrahlungsdauer und es können bei diesen Messungen keine konkreten Anzeichen für Alterung erkannt werden. Alle Schwankungen des Faktors I/R sind mit den Schwankungen im Protonenstrahl konsistent.

Aufgrund der Bestrahlungen mit einer akkumulierten Ladung von bis zu 550 mC/cm ergaben sich innerhalb der Sensitivität der Messmethoden keine Hinweise auf Alterung.

Streamer

Streamer sind selbstlöschende Gasentladungen, die bei hohen Spannungen auftreten. Aufgrund des relativ hohen Anteils an Löschgas (CO₂, Kap. 3.2.1) wird eine laterale Ausbreitung verhindert und die Entladung ist lokal begrenzt [38]. Sie entstehen durch UV-Photonen³, die eine Ladungslawine auslösen und sind gekennzeichnet durch eine

³niederenergetische Photonen.

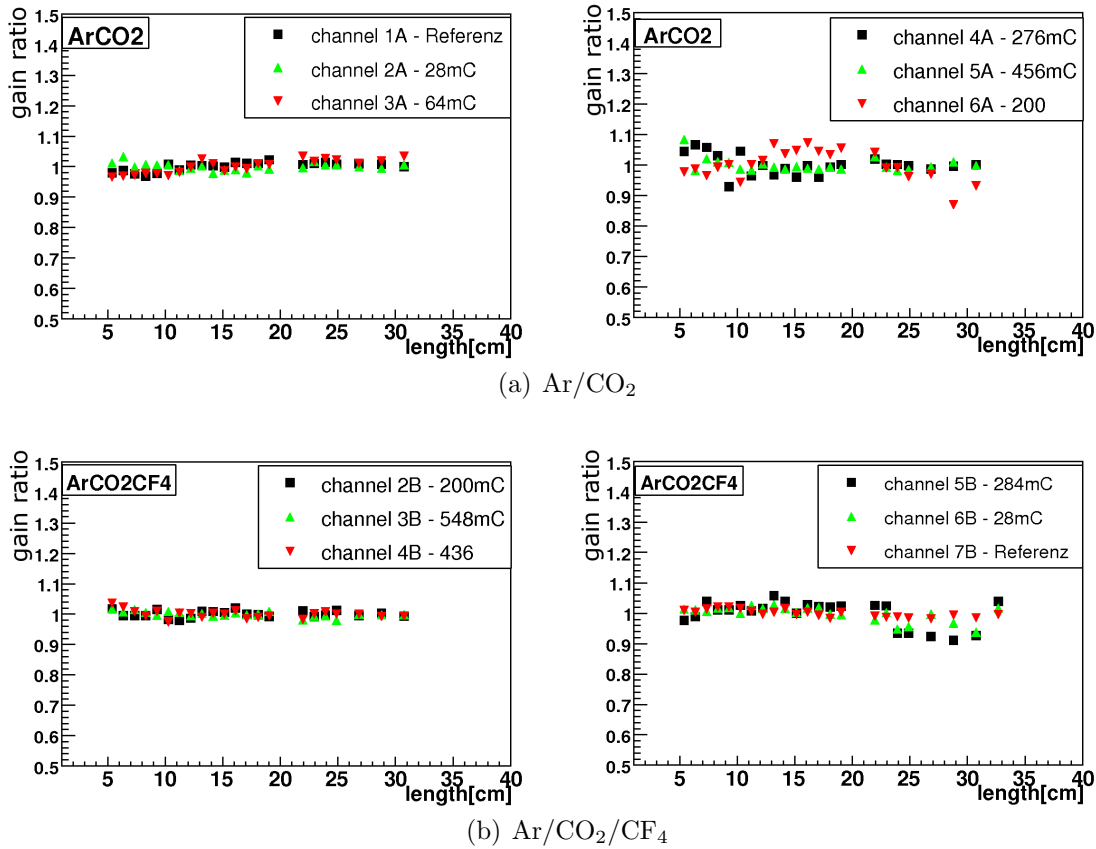


Abbildung 6.5: Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung für beide Strahltests: (a) Scan entlang der mit Ar/CO₂ gespülten Straws. (b) Scan entlang der mit Ar/CO₂/CF₄ gespülten Straws. Die Messungen wurden auf die Werte vor der Bestrahlung normiert und auf Unterschiede aufgrund von Druckschwankungen korrigiert. Man sieht keinen signifikanten Abfall entlang des Straws.

sehr große Ladung im Vergleich zu einem normalen Puls und durch eine lange Dauer des Signals. Aufgrund der am Draht entstehenden hohen Ladungsdichte an positiven Ionen wird das elektrische Feld reduziert und die Gasverstärkung nimmt ab. Dadurch entstehen weniger neue Elektronen. Schließlich verlöscht der Streamer. Die typische Form eines Streamers am Oszilloskop ist in Abbildung 6.7 [64] gezeigt. Dieses Signal wurde ohne Vorverstärker aufgenommen. Man sieht im Vergleich ebenfalls das Signal eines Photons aus einer ⁵⁵Fe-Quelle.

Da Streamer aufgrund ihrer Signalforn einerseits eine sehr lange Totzeit verursachen, zum anderen durch die Stärke der Entladung die Straws beschädigen können, sollten sie vermieden werden. Dabei ist die Streamerentstehung auch von der Wahl des Driftgases abhängig. Bei dieser Messung werden keine Vorverstärker genutzt, da der VV50-2 in Sättigung gehen würde. Darum wird die nachfolgende Elektronik direkt an den Straw angeschlossen.

Um die Streamersignale von den normalen Signalen zu unterscheiden, kann man sich

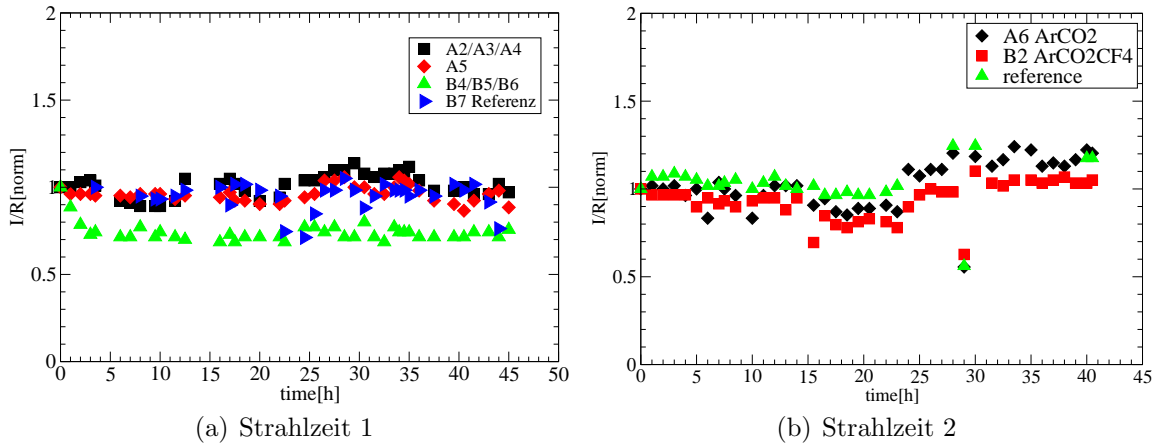


Abbildung 6.6: Messungen von Anodenstrom über Rate für die beiden Strahlzeiten. Die Schwankungen kommen von leichten Variationen des Strahlprofils, wodurch sich aufgrund der Ratenkapazität die Gasverstärkung ändert.

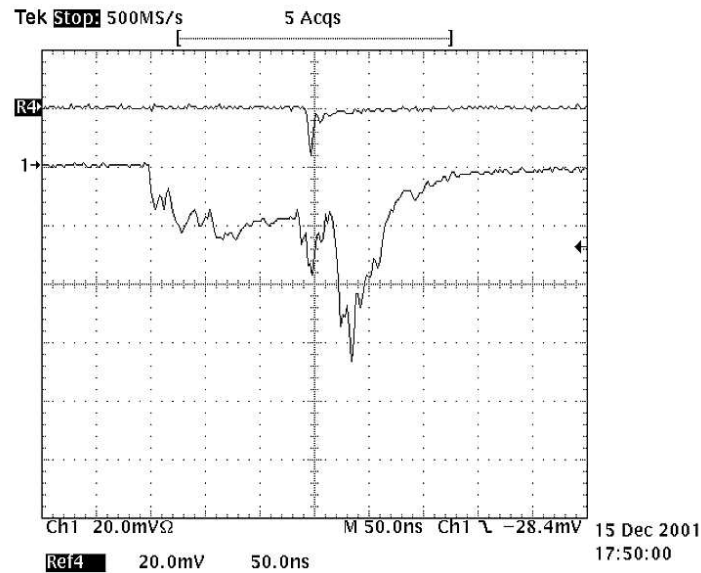


Abbildung 6.7: Signal eines Streamers am Oszilloskop im Vergleich zu einem normalen ^{55}Fe -Signal [64]. Der Streamer zeichnet sich durch seine Länge und die Stärke des Pulses aus.

ihre typische Form zunutze machen. Ein Signal wird als Streamer gezählt, wenn es eine minimale Signalthöhe sowie eine Mindestdauer hat.

Der Aufbau der Schaltung zu dieser Messung ist in Abb. 6.8 gezeigt. Zur Detektierung des Signals werden zwei Typen von Diskriminatoren genutzt. Das aus dem Straw einlaufende Signal wird geteilt und zum einen in einen “Leading Edge”-Diskriminator mit einer Schwelle von -70 mV geführt. Überschreitet ein Signal die Schwelle, wird ein -800 mV -

NIM⁴ Rechtecksignal von definierter Länge ausgegeben. Außerdem wird das Signal in einen Komparator⁵ mit einer Schwelle von -20 mV geführt. Nachdem das erste Signal zusätzlich verzögert wurde, werden die beiden Signale an ein UND-Gatter weitergeleitet. Nur bei ausreichender Länge des Komparatorsignals gibt das Gatter ein Ausgangssignal weiter, das als Streamer gezählt wird. Somit ist die charakteristische Form eines Streamers über die Dauer des Komparatorsignals und die Höhe der Diskriminatorschwelle eindeutig bestimmt.

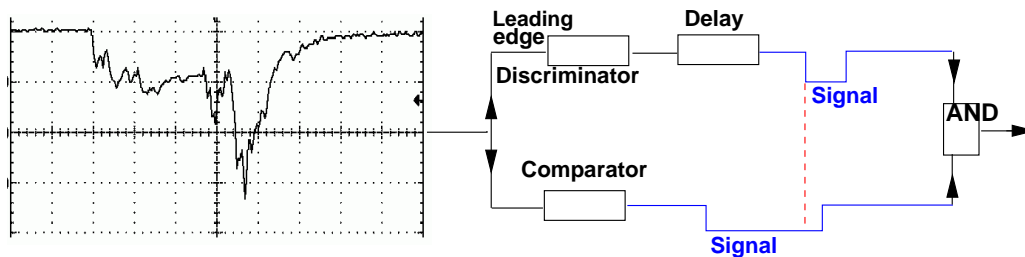


Abbildung 6.8: Um Streamer nachzuweisen, wird das Signal geteilt und einerseits in einen Leading Edge Diskriminator mit einer Schwelle von -70 mV geleitet, um eine minimale Signalthöhe zu verlangen. Andererseits wird der Puls in einen Komparator geführt, dessen Ausgangssignal abhängig ist von der Länge des Eingangssignals. Falls eine bestimmte Länge und Höhe erreicht sind, zählt ein UND-Gatter das Signal als Streamer.

Mit dieser Schaltung kann die Streamerrate in Abhängigkeit der Hochspannung bestimmt werden. Die Häufigkeit der Streamer ergibt sich aus dem Verhältnis der Streamerrate über der Teilchenrate bei nomineller Hochspannung⁶:

$$\text{Streamerhäufigkeit} = \frac{\text{Streamerrate}}{\text{Teilchenrate bei nomineller Hochspannung}} \quad (6.2)$$

Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse für Ar/CO_2 . Die ersten Streamer werden bei einer Hochspannung von 1700 V gemessen, danach steigt die Rate exponentiell an. Vergleicht man die Spannung beim ersten Auftreten der Streamer mit dem Arbeitspunkt von 1520 V , unterscheidet sich die Gasverstärkung um einen Faktor 4-5 [64]. Für $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ konnte die oben beschriebene Methode nicht angewandt werden. Die Signalform entsprach der in Abbildung 6.7 gezeigten, allerdings waren Dauer und Höhe des Pulses mit dem eines Protonsignals identisch. Somit konnte nur optisch am Oszilloskop das Auftreten der ersten Streamer bestimmt werden. Diese wurden bei einer Hochspannung von 1820 V gefunden.

Bei Ar/CO_2 wurden die ersten Streamer bei einer Spannung von 1700 V gemessen, im Gegensatz dazu konnte die Spannung bei $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ auf eine Spannung von 1820 V

⁴NIM: Nuclear Instrument Module.

⁵Der Komparator gibt kein Signal definierter Länge aus. Die Signallänge ist bestimmt von der Dauer, die das Eingangssignal überhalb einer Schwelle liegt. Die Schwellenspannung und die Spannung des Signals werden also verglichen.

⁶Bei dieser Spannung kann angenommen werden, dass keine Streamer auftreten.

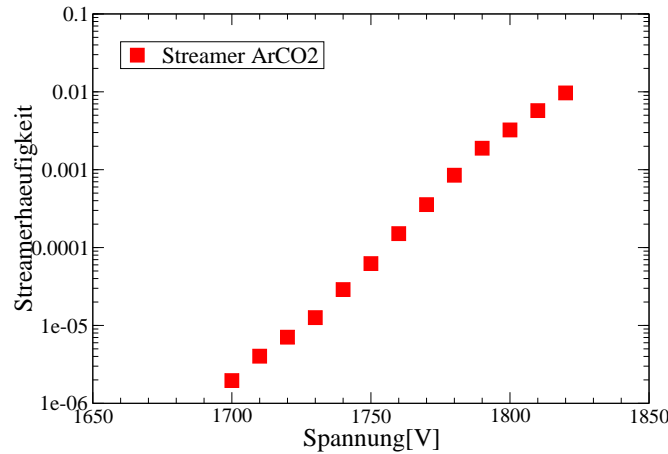


Abbildung 6.9: Streamerhäufigkeit in Ar/CO₂. Die Rate steigt exponentiell mit der Hochspannung an. Die ersten Streamer wurden bei 1700 V gemessen, das entspricht im Vergleich zu dem Arbeitspunkt von 1520 V einem Faktor 4-5 in der Gasverstärkung.

erhöht werden. Da Tetrafluormethan eine hohe Elektronaffinität hat (Kap. 3.1.3), Elektronen damit also leicht aufnimmt, entspricht dieses Verhalten den Erwartungen.

Beim Betrieb des LHCb Outer Trackers mit Ar/CO₂ sind keine Probleme mit Streamern zu erwarten. Erstens liegt die Gasverstärkung, bei der die ersten Streamer nachgewiesen werden konnten, um einen Faktor 4-5 [64] höher als im LHCb Betrieb. Weiterhin entstanden bei dieser Bestrahlung im Mittel 3500 Primärelektronen. Bei LHCb werden in erster Linie MIPs mit etwa 30 Primärelektronen produziert. Darum ist die Ladungsdichte bei gleicher Hochspannung geringer und man erwartet, dass die ersten Streamer erst bei einer größeren Hochspannung gemessen werden.

6.3 Zusammenfassung

Im Laufe zweier Strahlzeiten mit einer Gesamtdauer von 90 h mit hochionisierenden Teilchen wurden sowohl Ar/CO₂ als auch Ar/CO₂/CF₄ als Driftgas verwendet. Durch Abbremsen der 21 MeV Protonen deponierten diese im Mittel 3500 Primärelektronen im Straw. Dies entspricht etwa einem Faktor 1000 in der Primärionisation im Vergleich zu MIPs. Aufgrund der hohen Rate und des starken Abfalls des Strahlprofils wurden Beschleunigungsfaktoren von 15 bis 185 im Vergleich zu LHCb erreicht. Dadurch konnte trotz einer kurzen Zeit eine signifikante Ladung je Drahtlänge gesammelt werden. Die Messung der Gasverstärkung hat keinen Hinweis auf Alterung ergeben.

Weiterhin wurde Streamerentstehung bei Bestrahlung mit hoch ionisierenden Teilchen untersucht. Mit Ar/CO₂ wurden die ersten Streamer bei einer Spannung von 1700 V gemessen, wurde Ar/CO₂/CF₄ verwendet, sogar erst bei 1820 V. Beide Spannungen liegen deutlich über dem geplanten Arbeitspunkt von 1520 V. Zudem werden bei LHCb in erster Linie MIPs mit einer mittleren Primärionisation von 30 Elektronen pro Straw erwartet, wodurch die Ladungsdichte am Straw und damit die Zahl der Streamer bei

gleicher Hochspnnung reduziert wird.

Während der Bestrahlung traten keine anderen Alterungserscheinungen auf. Insbesondere gab es keine Hinweise das Auftreten von Kathodeneffekten wie den Maltereffekt [1].

Kapitel 7

Alterungsstudien mit Röntgenstrahlung

In diesem Kapitel werden Alterungsstudien mit Röntgenstrahlen vorgestellt. Diese Messungen wurden mit einer Röntgenanlage am Physikalischen Institut durchgeführt. Da es mit diesem Messstand möglich ist, Bestrahlungen mit unterschiedlicher Rate über eine relativ große Fläche durchzuführen, wurde er bereits in früheren Studien oft genutzt [29].

7.1 Parameter der Bestrahlung

7.1.1 Die Röntgenanlage

Die Röntgenanlage am Physikalischen Institut bietet gegenüber radioaktiven Quellen den Vorteil, dass die Intensität und die Größe der bestrahlten Fläche über große Bereiche variierbar sind. Der Messstand FXT 160.000 von FeinFocus [67] besitzt eine offene Kathode. Er kann mit einer Beschleunigungsspannung von bis zu 100 kV und einem Strom von 1 mA betrieben werden. Die verwendete Kupferanode emittiert unter anderem Photonen mit einer Energie von 8 keV (K_{α} -Linie).

Die zu testenden Module werden an einer in alle Richtungen verfahrbaren Halterung angebracht. Durch die Änderung des Abstand von der Röntgenröhre kann die Größe des bestrahlten Bereichs variiert werden.

7.1.2 Die Module

Die hier beschriebenen Tests wurden mit Ar/CO₂ (70 %/30 %) als Driftgas Mischung durchgeführt. Es wurden vier identische Testmodule gebaut, deren Material aus der Massenproduktion stammt. Einzig die Stirn- und Seitenwände wurden gesondert angefertigt. Sie bestehen aus Aluminium und somit aus einem Material, das auch an anderen Stellen (Paneele, Straws) im Modulbau verwendet wird (Kap. 5.4). Die einlagigen Module enthalten 16 Straws mit einer Länge von je 83,5 cm, 12 davon mit Drahtpositionierern. An beiden Enden der Straws befinden sich HV-Durchführungsplatinen, das Modul kann

somit an beiden Enden ausgelesen werden. Ein Foto eines Testmodule ist in Abbildung 7.1 gezeigt, im Hintergrund sieht man einen Teil eines 5 m-Moduls als Vergleich.

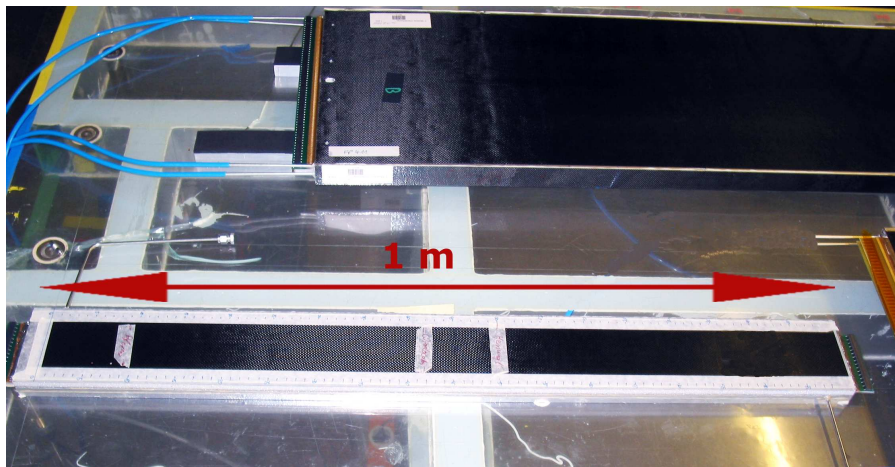


Abbildung 7.1: Testmodul. Im Hintergrund ist zum Vergleich ein Teil eines 5-Meter Moduls gezeigt.

Vor der Bestrahlung wurden – analog zu den Massenproduktionsmodulen (Kap. 2.1) – Drahtspannung, Dunkelströme und Gasdichtigkeit getestet. Nur wenn die Module diese Qualitätskriterien erfüllten, wurden sie für die Bestrahlungstests eingesetzt.

7.1.3 Der Aufbau

Die Module werden zur Bestrahlung senkrecht eingebaut, die Auslese der einzelnen Kanäle befindet sich am unteren Ende. Die Gasversorgung erfolgt ebenso von unten, der Gasauslass ist am oberen Ende des Moduls. Da die Driftgasmischung schwerer ist als Luft, wird so gewährleistet, dass die Luft vollständig aus dem Modul gespült wird. Das Signal des Vorverstärkers wird für jeden Kanal einzeln ausgelesen, jeweils ein oder drei Straws werden an eine Hochspannungsversorgung angeschlossen. Über diese Verbindung wird auch der Anodenstrom in den Kanälen während der Bestrahlung gemessen.

Im Rahmen der Alterungstests wird ein festes Messprogramm ausgeführt, um vergleichbare Resultate zu erhalten. Bereits vor Beginn der Bestrahlung wird die Gasverstärkung großflächig über das Modul vermessen. Dazu wird das ^{55}Fe -Spektrum vieler Punkte eines Straws bestimmt (in Zukunft: “Scannen”). Für eine gute Ortsauflösung wird ein Kollimator benutzt, der den bestrahlten Bereich auf wenige Millimeter einschränkt. Das Scannen geschieht in einem regelmäßigen Abstand von einem Zentimeter über die bestrahlte Länge des Straws. Zusätzlich wird eine Vergleichsmessung im unbestrahlten Teil jedes Straws durchgeführt. Dies geschieht für alle bestrahlten Straws, wie auch für einen Referenzstraw, an dem während der Bestrahlung keine Hochspannung liegt.

Danach wird das Strahlprofil der Röntgenröhre vermessen. Dazu wird beinahe das gesamte Modul mit Blei abgedeckt, nur ein Zentimeter des Moduls bleibt unbedeckt, um den Anodenstrom zu messen. Die Intensität des Photonstrahls nimmt mit

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (7.1)$$

ab, wobei μ der Absorptionskoeffizient ist und x die Strecke, die das Teilchen im Blei zurücklegt. Mit einem Massenabschwächungskoeffizient $\mu_M = \mu/\rho$ (ρ : Dichte) von etwas $100 \text{ cm}^2/\text{g}$ für 8 keV Photonen in Blei [38] ergibt sich, dass nach einem Millimeter Blei weniger als ein Promille der Photonen noch vorhanden sind. Die Dicke der Abschirmung betrug 2-4 mm.

Die Abdeckung lässt einen Zentimeter der Straws frei. Verfährt man nun das Modul bei eingeschalteter Röntgenanlage und misst den Anodentrom einzelner Straws, erhält man ein Strahlprofil für einen festen Abstand von der Quelle. Eine Skizze des Aufbaus ist in Abb. 7.2 gezeigt.

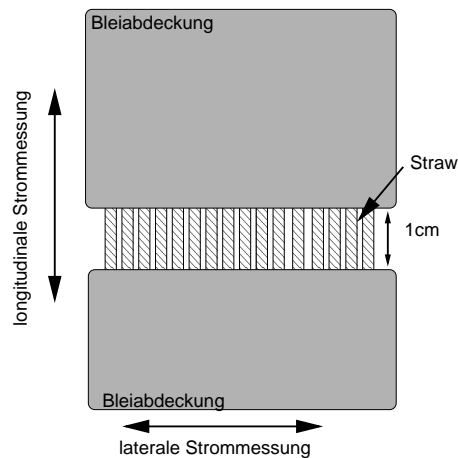


Abbildung 7.2: Die Messung des Strahlprofils erfolgt in longitudinaler und in lateraler Richtung. Dazu wird der Anodenstrom in einem 1 cm breiten Streifen eines Straws gemessen.

Das gemessene Profil senkrecht und parallel zu den Straws ist in Abbildung 7.3 gezeigt. Gemessen wurde der Anodenstrom pro Zentimeter. Die tatsächliche Position des Moduls während der späteren Bestrahlung wird dabei durch die Linien angedeutet. Wie man sieht, ermöglicht das relativ flache Profil über größere Flächen eine einheitliche Bestrahlung.

Während der Bestrahlung sind 10-15 cm am unteren Ende der Straws abgedeckt. In diesem Bereich werden Referenzpunkte gemessen. Während der kompletten Dauer der Bestrahlung wird der Anodentrom der einzelnen Hochspannungskanäle gemessen und gespeichert. Um das Modul vor zu hohen Anodenströmen aufgrund von Schwankungen des Strahls oder Kurzschlüssen im Straw zu schützen, wird der Anodenstrom überwacht. Wird ein festgelegter Grenzwert überschritten, schaltet ein Sicherheitssystem die komplette Anlage automatisch ab. Aus den gemessenen Anodenströmen wird die akkumulierte Ladung berechnet werden. Der Strahl wird im Laufe eines Tests regelmäßig kurz abgeschaltet, um an einer bestrahlten Stelle der Straws sowie an der mit Blei abgedeckten Referenzstelle ^{55}Fe -Spektren zu messen. Aus dem Verlauf dieser Messungen können bereits Anzeichen für Alterung erkannt werden.

Nach Beendigung der Bestrahlung wird wieder jeder Straw gescannt und die Ergebnisse mit der ursprünglichen Messung verglichen, um die Stärke und den Umfang eines

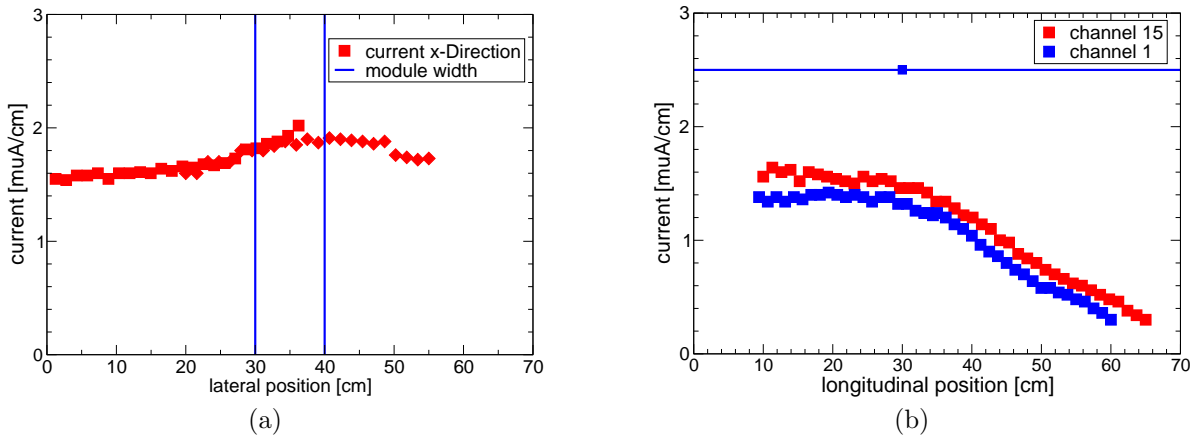


Abbildung 7.3: Strahlprofil der Röntgenquelle in etwa 1,2m Abstand (a) Strahlprofil senkrecht zu den Straws. Die blaue Linien deuten die tatsächliche Breite des Moduls an. (b) Strahlprofil parallel zu den Straws. Die blaue Linie zeigt die Lage des Moduls, der Punkt die Position der Drahtpositionierer.

möglichen Verlusts der Gasverstärkung zu bestimmen. Sind diese Tests abgeschlossen, kann ein Modul geöffnet werden, um die Oberfläche der Drähte zusätzlich mit einem Lichtmikroskop oder einer Kombination von Elektronenmikroskop und Röntgenspektalanalyse zu untersuchen.

7.2 Langzeitstudie

Nach der Entscheidung, Ar/CO_2 als Driftgas zu verwenden, wurde ein neuer Alterungstest geplant. Dieser hatte das Ziel, ein Testmodul möglichst nahe an den späteren Bedingungen zu bestrahlen. Ein vergleichbarer Test wurde schon mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ als Driftgas Mischung durchgeführt. Nach der Entscheidung, Ar/CO_2 zu verwenden, musste dieser Test mit der neuen Driftgas Mischung wiederholt werden. In diesem Test sollte das Modul bis zu einer akkumulierten Ladung von mindestens 2 C/cm bestrahlt werden, was etwa einem Betrieb von 20 Jahren LHCb entspricht. Da es nicht möglich ist, diesen Test über mehrere Jahre zu betreiben, musste ein Beschleunigungsfaktor >1 gewählt werden. Dies bedeutet höhere Anodenströme pro Strahlänge und somit die Änderung eines Parameters, der die Alterung entscheidend beeinflussen kann. Zwischen der akkumulierten Ladung und einem niedrigen Beschleunigungsfaktor muss ein Kompromiss gefunden werden.

Bestrahlt wurden sieben Kanäle. Der Aufbau ist in Abbildung 7.4 gezeigt, gekennzeichnet sind die Bleiabdeckung und die Positionen der ^{55}Fe -Scans während der Bestrahlung. Dabei kennzeichnen die helleren Kreise die bestrahlten Kanäle, die dunkelroten zwei Referenzkanäle. Weiterhin sind die Gasflussrichtung sowie die Drahtpositionierer zu sehen.

Die Anodenströme je Längeneinheit wurden zu Beginn so gewählt, dass ein Faktor 15-25 im Vergleich zu einem erwarteten Anodenstrom in LHCb von etwa 10 nA/cm im

Kanal	1	4	6	8	9	14	15
Periode 1: Tag 1-78							
Hochspannung[V]	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520
Anodenstrom [nA/cm]	230	230	220	220	260	170	170
Beschleunigungsfaktor	20	20	20	20	24	15	15
Periode 2: Tag 79-117							
Hochspannung[V]	1520	1580	1580	1520	1580	1520	1580
Anodenstrom [nA/cm]	230	460	440	220	520	170	340
Beschleunigungsfaktor	20	40	40	20	45	15	30
gesamte gesammelte Ladung [C/cm]	2,0	2,6	2,6	2,0	3,0	1,7	2,3

Tabelle 7.1: *Parameter der Langzeitstudie. Nach einer Bestrahlungsdauer von 117 Tagen wurde eine akkumulierte Ladung von bis zu 3 C/cm gesammelt.*

5 % auf. Diese Abweichungen treten sowohl nach oben und nach unten auf und stammen von der Korrektur der Vorverstärker. Die Verstärkungsfaktoren hängen geringfügig von der Temperatur ab. Allerdings unterscheidet sich diese Abhängigkeit, genauso wie der Verstärkungsfaktor selber, bei den verschiedenen Vorverstärkern. Darum ist es nicht möglich, einen Verlust der Gasverstärkung, der kleiner als 5 % ist, in diesen Messungen zu bestimmen.

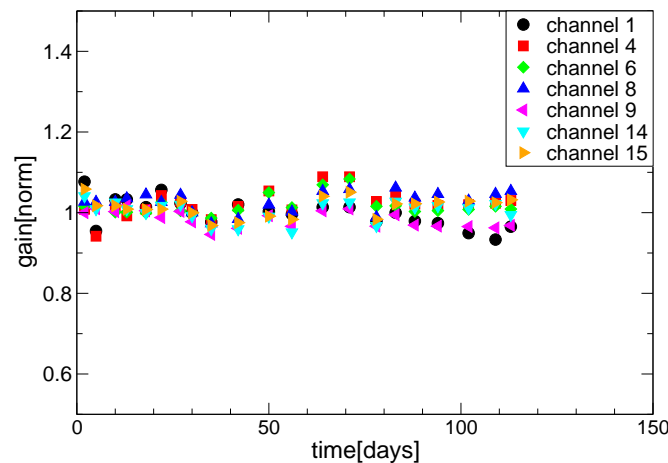


Abbildung 7.5: *Vergleich der normierten Gasverstärkung aus den im Laufe der Bestrahlung genommenen Eisenspektren. Effekte aufgrund von Druck- und Temperaturschwankungen sowie unterschiedlichen Vorverstärkern wurden korrigiert.*

Innerhalb der Messgenauigkeit ist während der 113 Tage dauerenden Bestrahlung in keinem der Kanäle ein Verlust der Gasverstärkung aufgetreten.

7.2.2 Messungen nach Abschluss der Bestrahlung

Die Gasverstärkung wurde zu drei Zeitpunkten entlang der Straws vermessen: vor der Bestrahlung, als die Hochspannung geändert wurde und nach der Bestrahlung. Da sich die Größe der gescannten Bereiche unterscheidet, wird nicht das Verhältnis der Messungen nach und vor Bestrahlung gebildet, sondern die auf eine Referenzposition normierte Gasverstärkung direkt verglichen. In Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 sind Resultate der Scans für alle Kanäle gezeigt. Für Kanal 1 existiert kein Scan vor der Bestrahlung, da es ursprünglich nicht geplant war, diesen Kanal zu bestrahlen. Aufgrund von Problemen eines anderen Straws wurde dieser aber doch zur Bestrahlung gewählt. Kanal Nr.10 ist der nicht bestrahlte Referenzstraw. Der Abfall bei manchen Straws an Position 42 wird durch die Drahtpositionierer verursacht, die sich an diesen Stellen befinden. Da die Position der Drahtpositionierer von Straw zu Straw um einige Millimeter variiert, wird er nicht in jeder Messung getroffen.

Die Scans entlang des Drahtes zeigen bei den verschiedenen Messungen geringfügige Unterschiede. Da Abweichungen in beide Richtungen auftreten, zeigt dies allerdings die Sensitivität der Messungen. Da bei Kanal 9 der Drahtpositionier fehlt, werden hier stärkere Schwankungen der Gasverstärkung gemessen, da der Draht nicht mehr exakt in der Mitte des Straws ist. Dadurch ändert sich das elektrische Feld und somit die Gasverstärkung. Auch nach einer Bestrahlung von bis zu 3 C/cm kann mit der gegebenen Sensitivität in keinem der Kanäle ein Verlust der Gasverstärkung gesehen werden.

7.2.3 Analyse der Drähte

Nach dem Abschluss der Untersuchungen wurde das Modul geöffnet, um die bestrahlten Drähte mit einem optischen Mikroskop zu untersuchen. Bei diesen Inspektionen wird nach Veränderungen oder Ablagerungen auf der Drahtoberfläche gesucht. Zum Vergleich wird dabei sowohl ein unbestrahlter, aber eingebauter als auch ein neuer Draht betrachtet. Abbildung 7.8(a) zeigt einen neuen Draht. In Abbildung 7.8(b) ist ein Draht gezeigt, der in das Module eingebaut, aber nicht bestrahlt wurde. Man erkennt keinen Unterschied zu dem neuen Draht.

Vergleicht man damit die bestrahlten Drähte, sieht man nur geringe Unterschiede. In den Abbildungen 7.9(a) und 7.9(b) sind Drahtproben aus den am stärksten bestrahlten Regionen gezeigt. Dies bedeutet eine Ladungsansammlung von bis zu 3 C/cm. Man erkennt hier leichte Verfärbungen der Drahtoberfläche. Im Vergleich zu Drähten, die starke Alterung zeigen (Abb. 5.2) erkennt man jedoch nur minimale Veränderungen. Die Abbildungen 7.9(c) und 7.9(d) zeigen Verfärbungen im Bereich der Drahtpositionierer, die bei allen bestrahlten Positionieren auftraten. Diese geringfügigen Verfärbungen nach einer akkumulierten Ladung von 1,7-3 C/cm (17-30 Jahre LHCb Betrieb) wurden als unerheblich eingestuft, da trotz der großen Menge an Ladung kein Verlust der Gasverstärkung in diesem Bereich gemessen werden konnte. Daher wurde auf weitere Untersuchungen verzichtet.

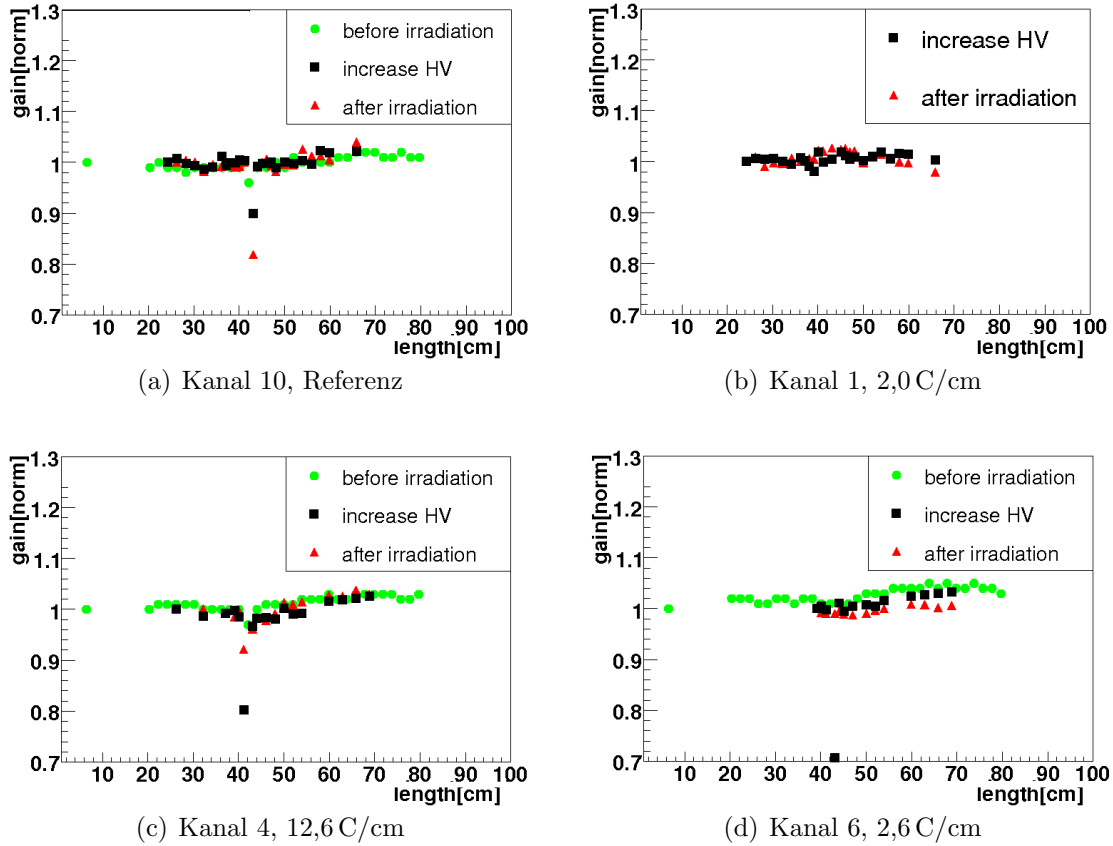


Abbildung 7.6: Die Gasverstärkung entlang der Straws 1, 4, 6 und 10 wurde vor der Bestrahlung, bei der Änderung der Hochspannung und nach der Bestrahlung gemessen. Da teilweise verschiedene Bereiche gemessen wurden, konnten die Ergebnisse nicht direkt aufeinander normiert werden. Der Abfall bei Position 42 kennzeichnet die Lage der Drahtpositionierer. Für Straw 1 existiert kein Scan vor der Bestrahlung, da es ursprünglich nicht geplant war, diesen Straw zu bestrahlen.

7.3 Gas Mixing Rack

Um die Module mit Gas zu versorgen werden im Gassystem des LHCb OT auch Komponenten zum Mischen und Verteilen des Driftgases benötigt. Die Aufgabe des Gas Mixing Racks ist es, die einzelnen Komponenten (Ar und CO₂) im richtigen Verhältnis zu mischen. Im Gas Mixing Rack werden Durchflussregler, verschiedene Ventile sowie andere industriell gefertigte Produkte verwendet, darum muss sichergestellt werden, dass die verwendeten Materialien keine Alterung im Outer Tracker verursachen. Insbesondere Silikonöle, die oft als Schmiermittel für Dichtungen verwendet werden, können Probleme verursachen, da bereits kleinste Mengen an Silikon starke Alterung verursachen können [57].

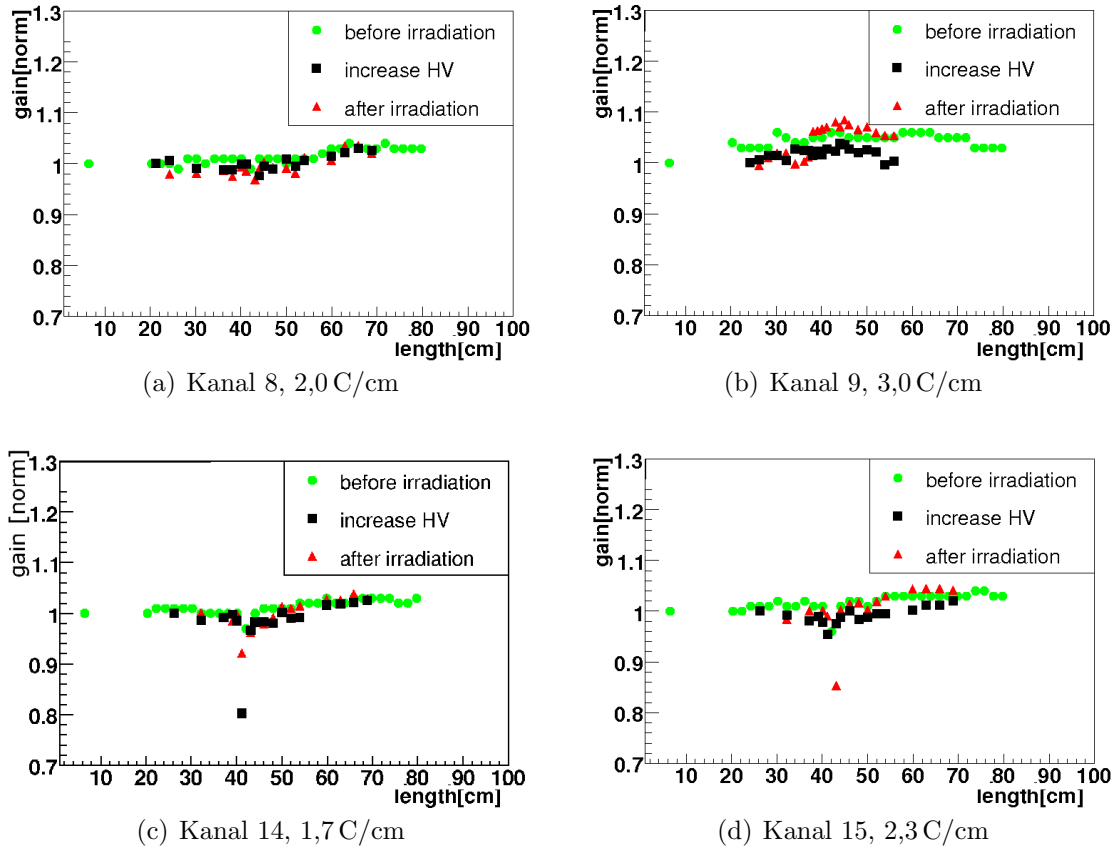
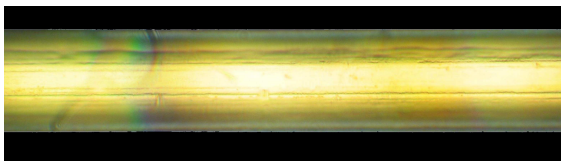
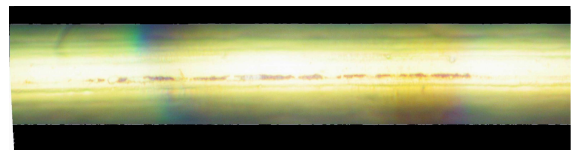


Abbildung 7.7: Die Gasverstärkung entlang der Straws 8,9, 14, und 15 wurde vor der Bestrahlung, bei der Änderung der Hochspannung und nach der Bestrahlung gemessen. Da teilweise verschiedene Bereiche gemessen wurden, konnten die Ergebnisse nicht direkt aufeinander normiert werden. Der Abfall bei Position 42 kennzeichnet die Lage der Drahtpositionierer.



(a)



(b)

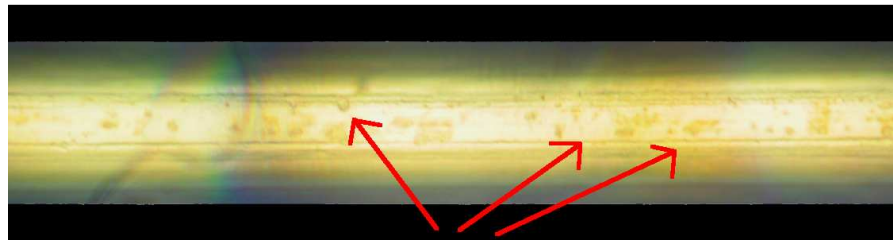
Abbildung 7.8: Beispiele unbestrahlter Drähte. Abb. (a) zeigt einen neuen Draht. Abb. (b) zeigt einen eingebauten, aber nicht bestrahlten Draht.

Verteiler und Mixing Racks aller Experimente am LHC wurden von einer Gruppe¹ am CERN für alle Experimente am LHC entwickelt. Darum kann teilweise auf die Erfahrungen und Komponentenvalidierung anderer Experimente zurückgegriffen werden [68]. Trotz dieser Studien sollen die einzelnen Komponenten des Gassystems getestet werden,

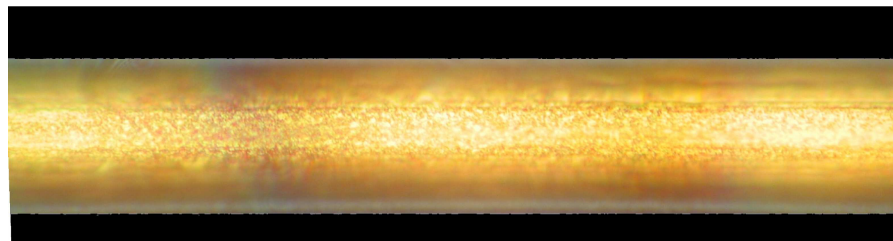
¹PH-TA1-GS: Physics Department - Technical Assistance 1- Gas Section.



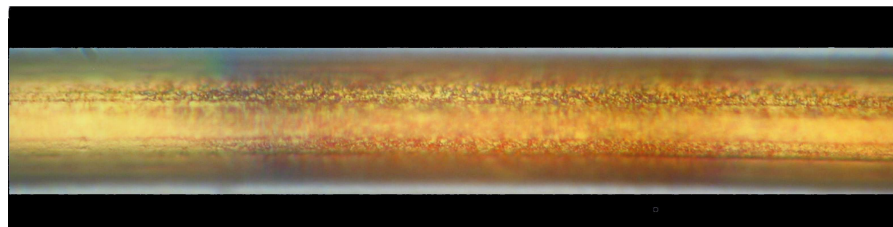
(a) Draht 6-2,6 C/cm akkumulierte Ladung



(b) Draht 9-3,0 C/cm akkumulierte Ladung



(c) Verfärbung nahe des Drahtpositionierers



(d) Verfärbung nahe des Drahtpositionierers

Abbildung 7.9: Beispiele bestrahlter Drähte. Die Pfeile deuten auf die Verfärbungen nach der Bestrahlung.

um mögliche Probleme aufgrund von Ausgasung auszuschließen. Zu diesem Zweck wurde das Gas Mixing Rack [69] vom CERN nach Heidelberg transportiert, um Bestrahlungstests durchzuführen.

Um das Gas Mixing Rack an das System der Röntgenanlage anzuschließen, wurden 20 m neue Edelstahlgasleitungen verlegt. Abbildung 7.10 zeigt ein Skizze des Aufbaus. Die roten Leitungen wurden neu angeschlossen. Um auszuschließen, dass eine mögliche Alterung nicht die Folge verschmutzter Leitungen ist, wurde erst ein Strahltest ohne das Gas Mixing Rack unter Verwendung des Bypasses durchgeführt. Ein neues Testmodul, baugleich mit dem Modul aus Kap. 7.2 wurde für diese Studien verwendet.

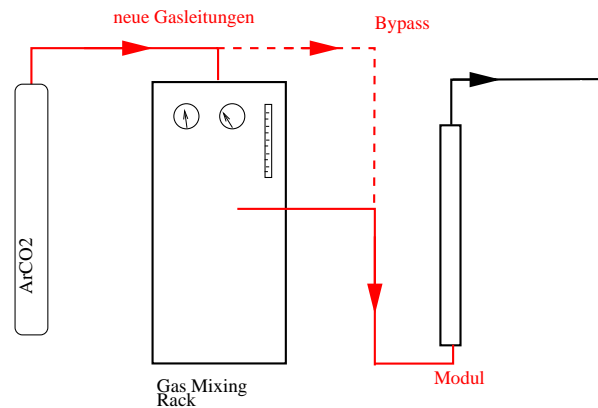


Abbildung 7.10: Setup mit Gas Mixing Rack. Die rot gekennzeichneten Gasleitungen wurden neu verlegt.

Über einen Zeitraum von drei Wochen wurden vier Straws über eine Länge von 60 cm in der Röntgenanlage bestrahlt. Der Beschleunigungsfaktor betrug im Laufe dieser Bestrahlung etwa 50, dadurch ergibt sich eine akkumulierte Ladung von etwa 1 C/cm im am stärksten bestrahlten Bereich. Der höhere Beschleunigungsfaktor im Vergleich zu den Messungen in 7.2 ergibt sich aus der unterschiedlichen Fragestellung. Bei dieser Studie stand weniger Zeit zur Verfügung, trotzdem sollte eine ausreichende Menge an Ladung gesammelt werden. Abbildung 7.11 zeigt die Resultate der Scans im Laufe der Bestrahlung. Diese wurden jeweils an der am stärksten bestrahlten Stelle gemessen und auf die erste Messung normiert. Wie bereits in Kaptitel 7.2.1 ist auch hier eine Schwankung von $\pm 5\%$ gegeben. Abbildung 7.12 zeigt die Scans entlang der Straws. Angegeben ist das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung. Bei keiner der beiden Messungen zeigte sich ein signifikanter Verlust der Gasverstärkung. Damit konnten die Gasleitungen und der gesamte Aufbau validiert werden.

Nach diesen Resultaten wurde eine Bestrahlung mit dem Gas Mixing Rack begonnen. Dazu wurde das Gas zusätzlich durch das Rack gespült, während der Bypass abgeschaltet wurde. Mögliche Verschmutzungen oder kritische Substanzen können somit in das bestrahlte Modul transportiert werden und dort Alterung verursachen. Es wurde das gleiche Modul wie im vorherigen Test verwendet, allerdings Kanäle, die bisher nicht bestrahlt wurden.

Für diesen Test wurden sechs Straws verwendet. Wie bereits in der vorhergehenden Bestrahlung werden die Straws über eine Länge von 60 cm bestrahlt. Die Beschleunigungsfaktoren sind vergleichbar, daraus ergibt sich aus einer Bestrahlungszeit von 30 Tagen eine akkumulierte Ladung im am stärksten bestrahlten Bereich von 1,4 C/cm. Tabelle 7.2 fasst noch mal die wichtigsten Parameter der beiden Tests zusammen.

Auch in diesem Test wurden sowohl während als auch nach der Bestrahlung Messungen zur Gasverstärkung durchgeführt. Abbildung 7.13 zeigt die Resultate der Messungen im Laufe der Bestrahlung. Wie man sieht, zeigt Kanal 2 starke Schwankungen im Laufe der Bestrahlung, die sich allerdings auf Probleme mit dem Vorverstärker zurückführen lassen.

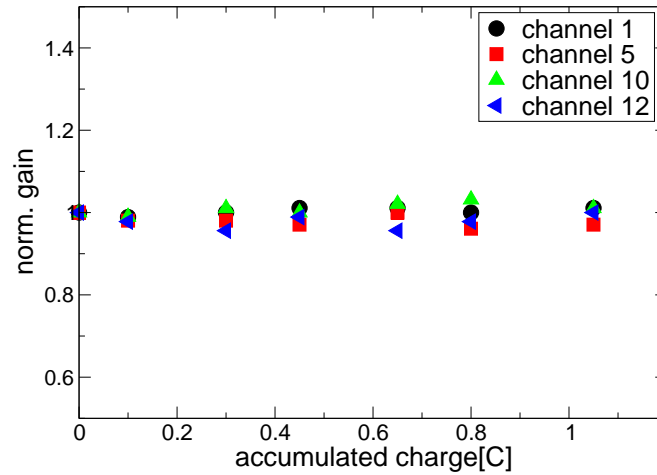


Abbildung 7.11: Ergebnisse der Messungen im Laufe der Bestrahlung zum Test der Gasleitung.

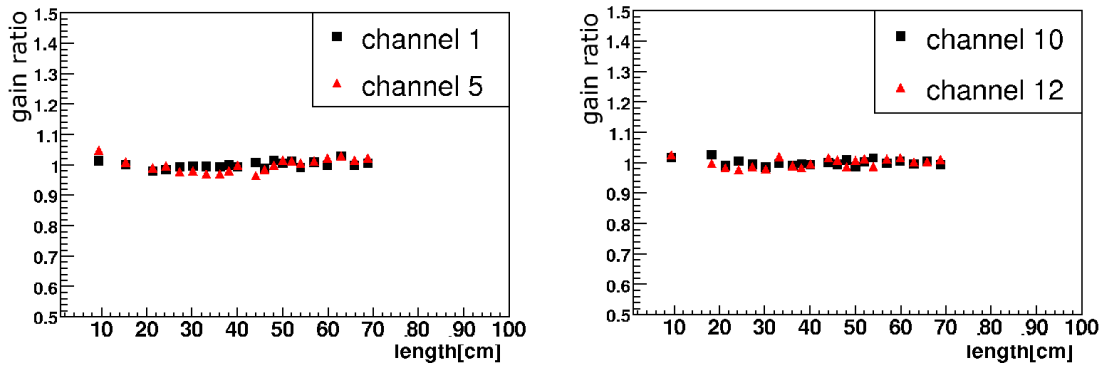


Abbildung 7.12: Ergebnisse des Strahltests der Gasleitungen. Gezeigt ist das Verhältnis der Gasverstärkung der bestrahlten Straws (Kanal 1, 5, 10, 12) nach und vor der Bestrahlung. Jeder der vier Straws sammelte in einem Zeitraum von drei Wochen etwa 1 C/cm akkumulierte Ladung.

Abbildung 7.14 zeigt das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung entlang der Straws. Es wurden das Verhältnis der Daten nach und vor der Bestrahlung gebildet. Zusätzlich ist die gleiche Messung für die beiden Referenzstraws gezeigt. Insbesondere zeigt Kanal 2 keine Auffälligkeiten, was bestätigt, dass sich die Probleme der obigen Messung auf die Elektronik zurückführen lassen. Innerhalb der Sensitivität, mit der diese Messungen durchgeführt werden können, ist an keiner Stelle ein Abfall der Gasverstärkung zu erkennen.

Bei den Alterungsstudien mit dem LHCb Gas Mixing Rack konnte bis zu einer akkumulierten Ladung von $1,4\text{ C/cm}$ (etwa 14 Jahre LHCb Betrieb) bei einem Beschleunigungsfaktor von etwa 50 kein Verlust der Gasverstärkung festgestellt werden. Insbesondere sind keine Probleme aufgrund von Silikon aufgetreten.

	Test der Leitung	Test des Racks
Anzahl der Straws	4	6
bestrahlte Länge [cm]	60	60
Anodenstrom [nA/cm]	500	500
Dauer [Tage]	21	30
akkumulierte Ladung [C/cm]	1	1,4
Beschleunigungsfaktor	≈ 50	≈ 50
Gasaustausch [Vol/h]	1	1

Tabelle 7.2: *Parameter der Bestrahlung des Gas Mixing Racks*

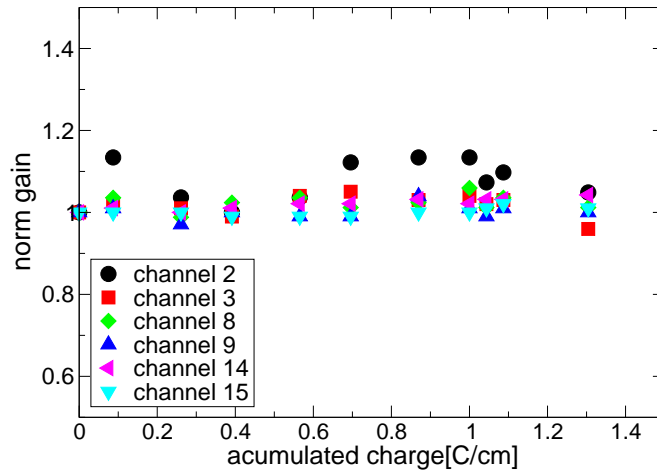


Abbildung 7.13: *Ergebnisse der Messungen im Laufe der Bestrahlung für die sechs bestrahlten Straws.*

7.4 Zusammenfassung

Am Physikalischen Institut in Heidelberg besteht die Möglichkeit, Alterungsmessungen an einem 8 keV Röntgenmessstand durchzuführen. Dieser bietet die Möglichkeit, Testmodule großflächig über einen längeren Zeitraum zu bestrahlen.

In den hier vorgestellten Tests lag der Schwerpunkt auf dem Verhalten bei hoher akkumulierter Ladung. Darum betrug der Beschleunigungsfaktor 15-50. Die hier vorgestellten Tests wurden mit 1 m-Testmodulen durchgeführt, deren Materialien der Produktion entnommen wurden. Als Driftgasmischung wurde Ar/CO₂ verwendet.

Weder die Langzeitstudie mit einer akkumulierten Ladung von bis zu 3 C/cm bei niedrigeren Beschleunigungsfaktoren (15-45) noch der Test des Gas Mixing Racks ergaben Hinweise auf Probleme mit Alterung bei den gewählten Parametern. Dazu wurden

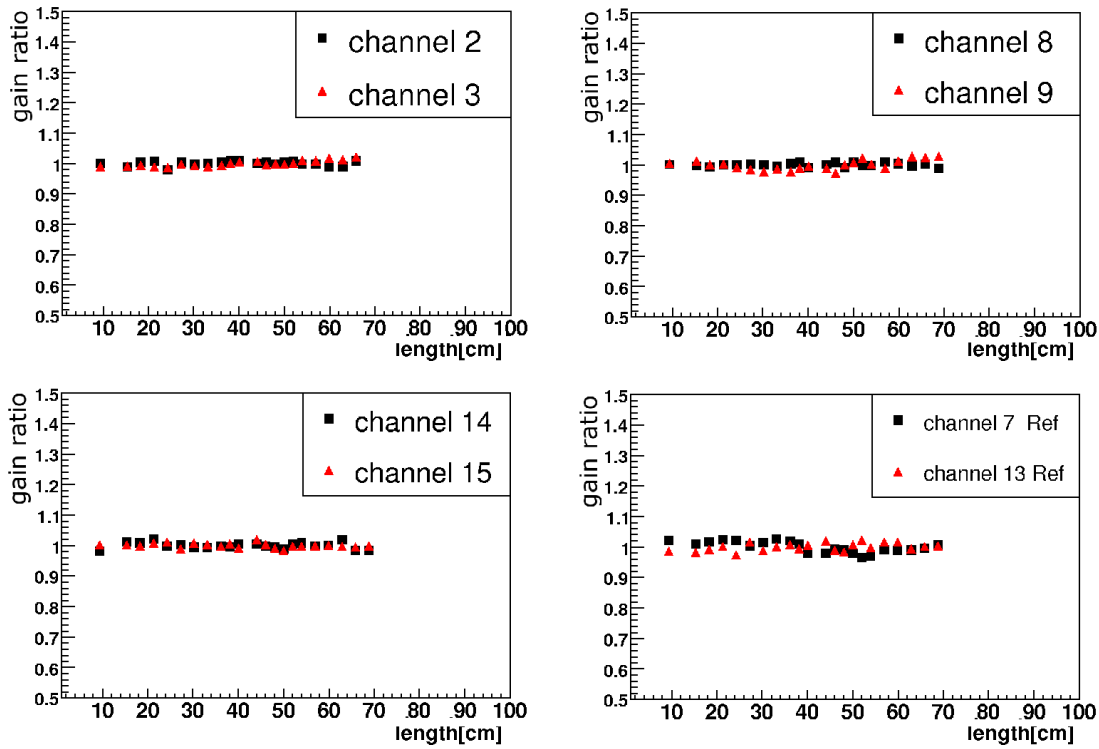


Abbildung 7.14: Ergebnisse des Strahltests unter Verwendung des Gas Mixing Racks. Gezeigt ist das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung für die bestrahlten (Kanal 2, 3, 8, 9, 14, 15) und die Referenzstraws (7, 13). Jeder der sechs bestrahlten Straws sammelte in einem Zeitraum von 30 Tagen etwa $1,4 \text{ C/cm}$ akkumulierte Ladung.

sowohl vor als auch nach der Bestrahlung die Straws über weite Längen gescannt. Außerdem wurde die Gasverstärkung während der Bestrahlung an festen Punkten kontrolliert. Innerhalb der Sensitivität wurde kein Abfall der Gasverstärkung festgestellt. Auch die optische Analyse der Drähte zeigte keine massiven Ablagerungen.

Auch bei einer Bestrahlung eines Moduls mit dem LHCb Gas Mixing Rack im Gas-Kreislauf sind keine Probleme festgestellt worden.

Kapitel 8

Alterung bei niedrigen Raten

In den nächsten beiden Kapiteln wird ein Alterungseffekt behandelt, dessen Auftreten zuerst im Gegensatz zu den bisherigen Messungen zu stehen scheint. Allerdings wurde in den bisherigen Studien Alterung bei hohen Beschleunigungsfaktoren untersucht. Der Anodenstrom betrug in allen Bereichen mehr als 50 nA/cm. Wie in Kap. 5 erklärt, können aufgrund der Vielzahl von Parametern nur die wahrscheinlichen Kombinationen getestet werden. Dies waren Studien mit großer akkumulierter Ladung und daraus folgend hohen Strömen.

Der hier beschriebene Effekt tritt nur bei Anodenströmen auf, die kleiner als 15 nA/cm sind, bei größeren Strömen wird keine Alterung gemessen. Er konnte demzufolge in den bisherigen Studien nicht beobachtet werden. Die Alterung tritt bereits nach wenigen Tagen bzw. einer akkumulierten Ladung von nur 1-2 mC/cm auf.

Im Laufe der nächsten beiden Kapitel wird immer wieder auf Ergebnisse die am NIKHEF erzielt worden sind, eingegangen werden. Aufgrund des Umfangs der Studien und zur Kontrolle der Ergebnisse wurden die Messungen an beiden Laboren durchgeführt. Um ein vollständiges Bild der Messungen zu geben, werden deshalb auch Ergebnisse dieser Studien in dieser Doktorarbeit kurz vorgestellt.

8.1 Erste Messungen des Alterungseffekts

Im Herbst 2005 wurde am NIKHEF während eines Tests mit einer ^{90}Sr -Quelle (β^- -Strahler) ein neues Alterungsphänomen entdeckt. Nach einer 20 h dauerenden Bestrahlung eines Massenproduktionsmoduls mit Driftgas unter nomineller Hochspannung wurde an der bestrahlten Stelle ein starker Verlust der Gasverstärkung festgestellt. Der Strom dieser Bestrahlung betrug im Maximum 25 nA/cm. Vergleicht man die Intensität einer solchen Quelle mit typischen Intensitäten im Röntgenmessstand, ist sie um einen Faktor von 20-50 niedriger. Abbildung 8.1 zeigt das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung mit der Sr-Quelle. Im weiteren Kapitel wird die Gasverstärkung nach der Bestrahlung – wenn nicht anders erwähnt – immer auf die Daten vor der Bestrahlung normiert und auf den Luftdruck korrigiert.

Erste Annahmen gingen davon aus, dass die Ursache der Alterung außerhalb des Moduls zu suchen ist, da sowohl bei der Wahl der Materialien als auch bei der Produktion

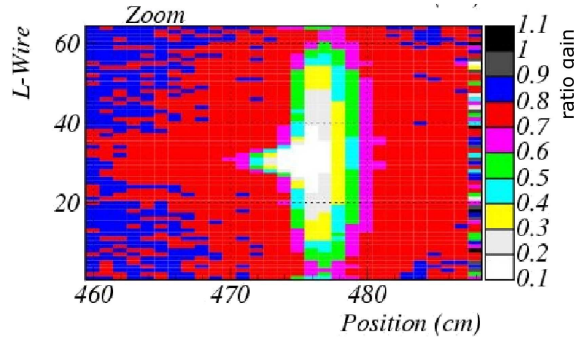


Abbildung 8.1: Gasverstärkung nach der am NIKHEF durchgeführten Bestrahlung mit einer ^{90}Sr -Quelle. Die Gasverstärkung ist im bestrahlten Bereich um bis zu 80 % gesunken [70].

der Module sorgfältig darauf geachtet wurde, mögliche Quellen für Alterung zu vermeiden (Kap. 5.4).

Zur Untersuchung dieser These wurde das am NIKHEF hergestellte Modul – im weiteren “N123” nach seiner Produktionsnummer genannt – nach Heidelberg geschickt und hier mit einer Eisenquelle bestrahlt. Damit der Maximalstrom dem der NIKHEF-Messungen entsprach, wurde die Hochspannung für diese wie auch für alle weiteren Messungen auf 1600 V erhöht. Der Gasfluss betrug 1 Vol/h. Während der mehrere Tage dauernden Bestrahlung wurde täglich die Pulshöhe sowohl der bestrahlten Kanäle als auch der unbestrahlten Referenzpositionen gemessen. Eine Skizze der bestrahlten Fläche und der Messpunkte ist in Abb. 8.2 gezeigt. Für die Kanäle 10-21 wurde an einer Drahtposition die Pulshöhe einer ^{55}Fe -Quelle gemessen.

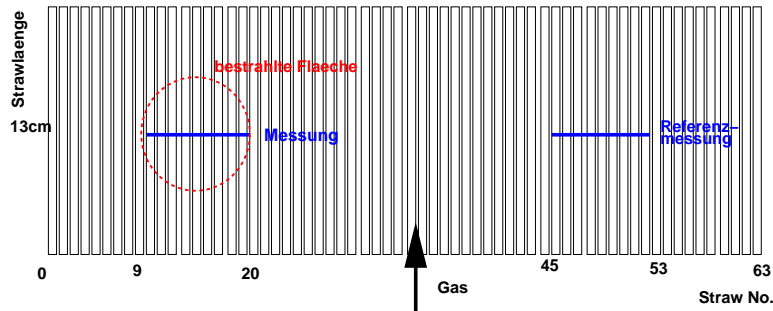


Abbildung 8.2: Skizze der Bestrahlung und Messung von Modul N123: Der rote Kreis zeigt den bestrahlten Bereich, die blauen Linien zeigen die Messpunkte.

Die Ergebnisse dieser Bestrahlung sind in Abbildung 8.3 gezeigt. Die Pulshöhen wurden auf die Messungen im unbestrahlten Bereich normiert, um mögliche Schwankungen aufgrund des Luftdruckes zu korrigieren. Abbildung 8.3(a) zeigt die Änderung der Gasverstärkung im Laufe der Bestrahlung für ausgesuchte Kanäle. Man sieht einen klaren Abfall, allerdings unterschiedlich stark für die verschiedenen Kanäle. Bei manchen Straws ist kein Verlust aufgetreten, während bei anderen die Gasverstärkung um mehr als 60 % reduziert wurde. Die Gasverstärkung zu Beginn und nach einer Bestrahlung von 152 h

für eine größere Anzahl von Kanälen ist in Abbildung 8.3(b) gezeigt. Die größten Ströme während der Bestrahlung wurden in Kanal 14 gemessen, der keinen Verlust der Gasverstärkung zeigt, während bei anderen Kanälen der Verlust bis zu 80 % betrug. Da in Heidelberg ein vollständig anderes Gassystem verwendet wurde, konnte das Gassystem am NIKHEF als Ursache der Alterung ausgeschlossen werden.

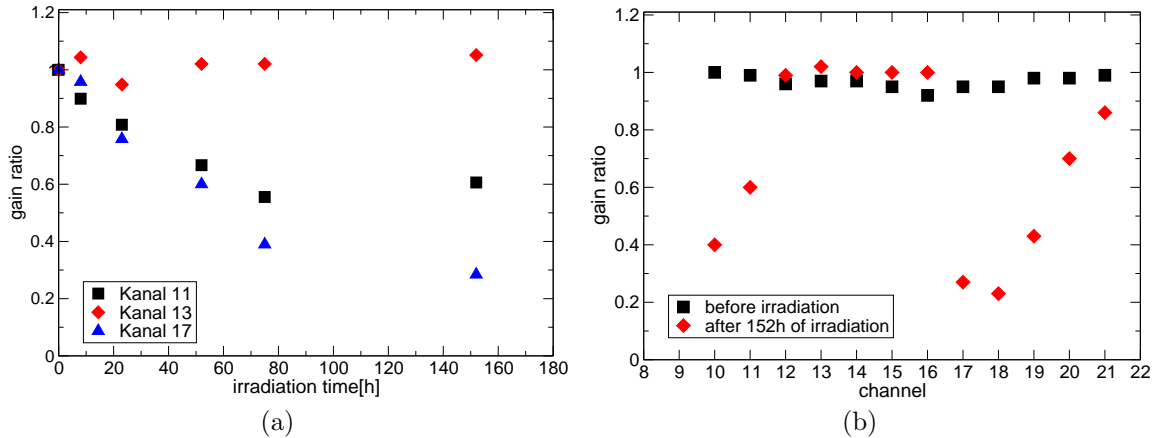


Abbildung 8.3: Ergebnisse der ersten Bestrahlungen in Heidelberg an dem am NIKHEF produzierten Modul N123. In Abbildung (a) ist die Gasverstärkung für ausgewählte Kanäle im Laufe der Bestrahlung gezeigt. In Abbildung (b) sieht man die Gasverstärkung für alle vermessenen Kanäle zu Beginn der Bestrahlung und nach 152 h. Das Maximum der Bestrahlung befand sich etwa bei Kanal 14, in dem kein Abfall der Gasverstärkung gemessen wurde. Dort wurde eine akkumulierte Ladung von etwa 25 mC/cm gesammelt, im Bereich mit der größten Schädigung (Kanal 17, 18) etwa $2\text{--}8 \text{ mC/cm}$. In beiden Abbildungen wurde die Gasverstärkung auf die unbestrahlten Bereiche normiert.

Um zu untersuchen, ob auch andere Module Alterung zeigen, wurde ein in Heidelberg produziertes Modul bestrahlt (im weiteren Modul “HD52” genannt). In einem ersten Test wurde das Modul mit zwei unterschiedlich starken Eisenquellen (Kap. 8.5) bestrahlt, nachdem es zuvor für einige Tage mit Driftgas gespült wurde. Die Quellen wurden an der gleichen Position entlang der Straws platziert, aber bei unterschiedlichen Kanälen. In Abbildung 8.4 ist eine Skizze des Aufbaus und der Messpositionen gezeigt. Der Abstand der beiden Quellen war so groß, dass sie sich nicht gegenseitig beeinflussten.

In Abbildung 8.5 sind die Ergebnisse dieser Bestrahlung nach einer Dauer von 50 h an zwei verschiedenen Positionen gezeigt [71]. Die beiden Messungen über die volle Modulbreite wurden im Abstand von 2 cm entlang des Straws durchgeführt. Man erkennt den Verlust der Signalhöhe, den die Quellen verursacht haben.

Die Resultate dieser Messung zeigen, dass die Alterung bei Modulen beider Produktionsstandorte auftritt.

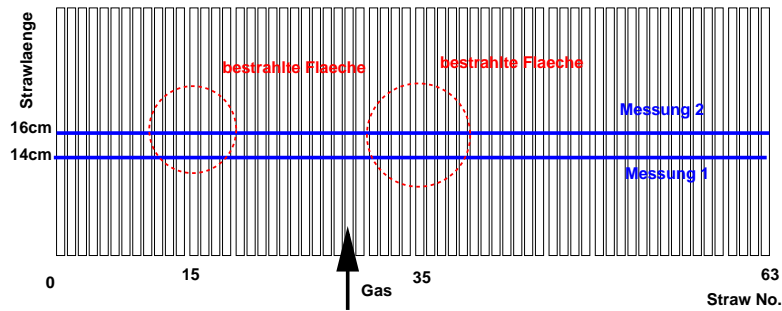
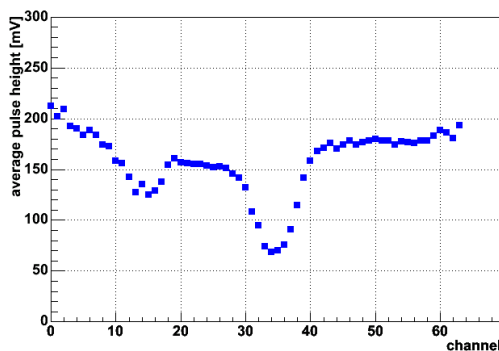
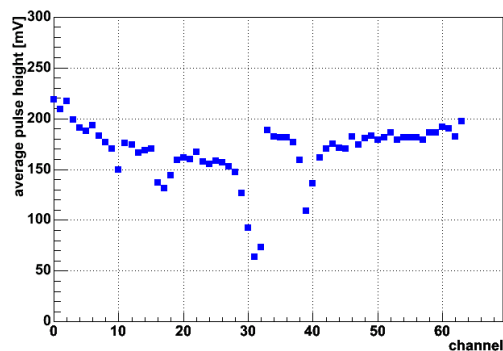


Abbildung 8.4: Skizze der Bestrahlung und Messung Modul HD52: Die roten Kreise zeigen die bestrahlten Bereiche, die blauen Linien zeigen die Messpunkte.



(a) Position: 14 cm



(b) Position; 16 cm

Abbildung 8.5: Erste Alterungsmessungen mit zwei Eisenquellen an einem in Heidelberg produzierten Modul. Abb. (a) und (b) zeigen die Gasverstärkung an zwei verschiedenen Positionen entlang des Straws. Sie befinden sich in einem Abstand von 2 cm. Man erkennt den Verlust der Signalhöhe, den die beiden Quellen nach einer Bestrahlung von 50 h ($\cong 1\text{-}3\text{ mC/cm}$ im stärksten geschädigten Bereich) verursacht haben [71].

8.2 Untersuchung des Anodendrahts

Der Verlust der Gasverstärkung aufgrund von Alterung wird gewöhnlich durch eine Änderung des Anodendrahtes (Kap. 5.1) verursacht. Häufig bilden sich isolierende Schichten auf der Oberfläche. Diese Ablagerungen bestehen oft aus großen Kohlenwasserstoffmolekülen.

Ein bestrahltes Modul wurde geöffnet, um Proben sowohl aus dem bestrahlten als auch aus einem unbestrahlten Bereich zu entnehmen, diese zu untersuchen und mit einem neuen Draht zu vergleichen. Die Analysen wurden von NIKHEF in Auftrag gegeben [72, 73, 74]. Zuerst aber wurden Proben in Heidelberg mit einem optischen Mikroskop untersucht. Abb. 8.6 zeigt neben einem unbestrahlten Draht eine Probe aus einer stark bestrahlten Region (Abb. 8.6(b), 96 h, 50 % Verlust der Gasverstärkung). Die Verfärbungen (Interferenzeffekte) deuten bereits auf eine Ablagerung mit einer Dicke von

einigen hundert Nanometern hin.

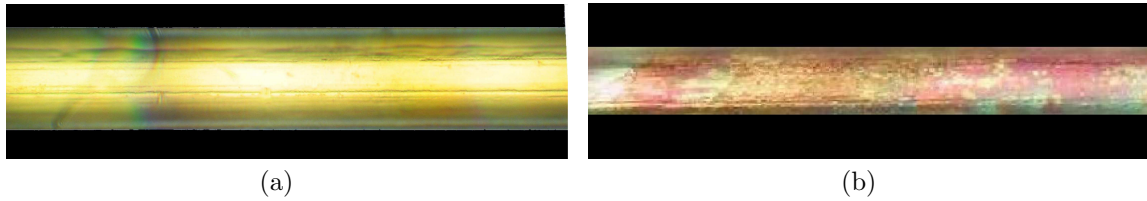


Abbildung 8.6: Vergleich eines unbestrahlten Drahtes (a) und eines bestrahlten Drahtes (b). Die Verfärbungen bei der bestrahlten Probe deuten auf eine Ablagerung mit einer Dicke von einigen hundert Nanometer hin. Die hier gezeigte Drahtprobe wurde 96 h (2-6 mC/cm) bestrahlt, danach wurde ein Verlust der Gasverstärkung von 50 % gemessen. Die Probe stammt von Draht BU42 aus dem Modul HD52.

Danach wurden die Drähte unter einem Elektronenmikroskop¹ betrachtet. Dabei wird mit einem fein fokussierten Elektronenstrahl eine Oberfläche in einem Raster abgetastet. Aus dem Strom der rückgestreuten Elektronen wird ein Bild zusammengesetzt. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 8.7 gezeigt. Abb. 8.7(a) zeigt die Aufnahme eines neuen Drahtes, Abb. 8.7(b) die Aufnahme eines bestrahlten Drahtes (N003, Draht 63, 150 h Bestrahlung, 60 % Verlust der Gasverstärkung). Man sieht deutlich den Unterschied zwischen den beiden Proben. Insbesondere die hellen Flecken deuten auf nichtleitende Ablagerungen hin.

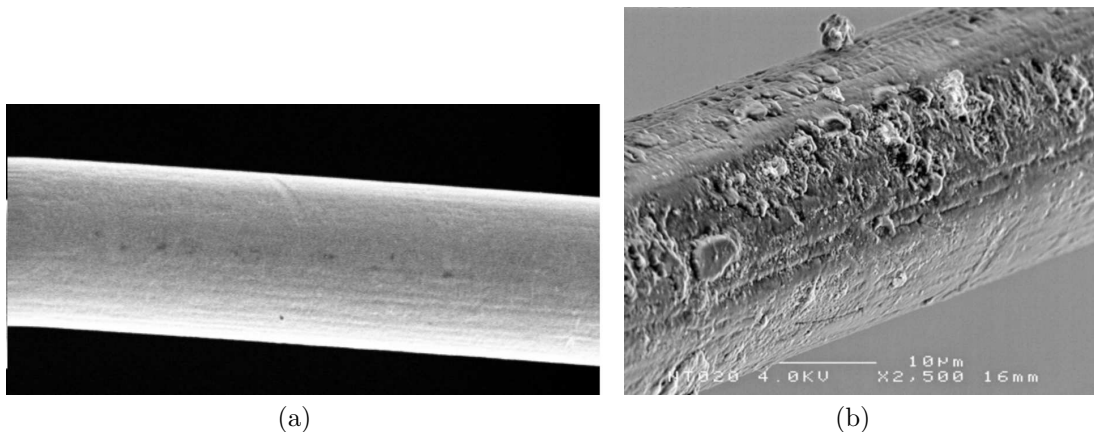


Abbildung 8.7: Ein unbestrahlter Draht (a) und ein bestrahlter Draht (b) unter dem Elektronenmikroskop. Vergleicht man die beiden Aufnahmen, erkennt man die Veränderungen gegenüber einem neuen Draht. Die hellen Flecken deuten auf nichtleitende Schichten hin (Modul N003, 150 h, 60 % Verlust der Gasverstärkung) [72, 73].

Um Informationen über die Art der Ablagerungen zu erhalten, wurde eine Röntgen-

¹SEM: Scanning Electron Microscope.

spektralanalyse² und eine Analyse mit Flugzeitmassenspektrometer³ durchgeführt. Bei beiden Geräten können nur kleine Bereiche untersucht werden, es muss also zuvor bereits entschieden werden, welche Stellen untersucht werden sollen.

Bei der Röntgenspektralanalyse können einzelne Elemente auf der Drahtoberfläche detektiert werden. Dabei wird nach einer Anregung der Probe aus der emittierten charakteristischen Röntgenstrahlung die Elementzusammensetzung ermittelt. Mit dieser Methode ist es allerdings nur möglich, Elemente nachzuweisen und keine Moleküle. Zusätzlich kann man mit diesem Gerät keinen Wasserstoff nachweisen, mögliche Kohlenwasserstoffe sind also nur über Kohlenstoff und Sauerstoff identifizierbar. In Abbildung 8.8 sind zwei Analysen gezeigt. Abb. 8.8(a) zeigt die Ergebnisse bei einem neuen Draht. Es wird in erster Linie die Oberfläche des goldbeschichteten Wolframdrahtes detektiert sowie minimale Mengen Kohlenstoff. Die Höhe der Peaks unterschiedlicher Elemente kann nicht direkt verglichen werden, da das Gerät unterschiedliche Nachweissenssensitivitäten für die verschiedenen Elemente besitzt. Nur die Peaks des gleichen Elementes können direkt verglichen werden. Bei der Analyse eines bestrahlten Drahtes (Abb. 8.8(b), Modul N003, 150 h, 60 % Verlust der Gasverstärkung) sieht man neben dem Gold einen deutlichen Kohlenstoffpeak, weiterhin Sauerstoff sowie Wolfram vom Draht. Wasserstoff ist wahrscheinlich, aber nicht nachweisbar. Auch diese Analyse deutet auf Ablagerungen hin. Der Kupferpeak stammt nicht vom Draht sondern von der Drahthalterung.

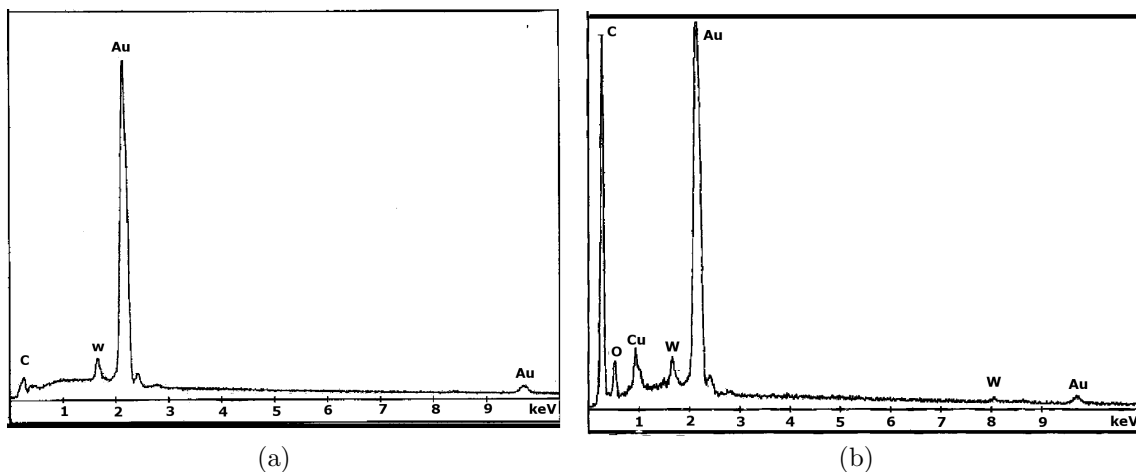


Abbildung 8.8: Ergebnisse der Röntgenspektralanalyse: Im Gegensatz zu einem unbestrahlten Draht (a), bei dem in erster Linie Gold sowie geringe Mengen Kohlenstoff detektiert werden, wird bei einem bestrahlten Draht (b, Modul N003, 150 h, 60 % Verlust der Gasverstärkung) auch Kohlenstoff und Sauerstoff nachgewiesen. Dies deutet auf Ablagerungen hin. Das Wolfram stammt aus angegriffenen Stellen des Drahtes. Das Kupfer stammt von der Drahthalterung [74].

Bei einem Flugzeitmassenspektrometer wird die Masse (bzw. Masse/Ladung) der betreffenden Bruchstücke aus der Flugzeit der Ionen in einem elektrischen Feld bestimmt.

²EDS: Energy dispersive X-Ray spectroscopy.

³TOF: Time Of Flight mass spectroscopy.

Damit ist es auch möglich, Moleküle oder Molekülfragmente zu identifizieren. Allerdings kann mit dieser Methode nur die Oberfläche untersucht werden, die Eindringtiefe ist kleiner als ein Nanometer. Das Spektrometer kann in einem positiven und in einem negativen Modus betrieben werden, ist also in der Lage, Kationen und Anionen nachzuweisen. Es wurden wieder ein neuer Draht und ein bestrahlter Draht verglichen. Während bei dem neuen Draht vor allem Gold nachgewiesen werden konnte, fanden sich auf dem bestrahlten Draht Kohlenstoff, Sauerstoff sowie Spuren von Kalzium, Kalium und Natrium. Kohlenwasserstoffe konnten nicht in größerer Menge identifiziert werden.

Bei vergleichbaren Untersuchungen eines unbestrahlten, aber im Modul eingebauten Drahtes konnte keine Ablagerungen festgestellt werden. Die Analysen lassen den Schluss zu, dass sich im Laufe der Bestrahlung Ablagerungen mit einer Dicke von nur wenigen hundert Nanometern auf dem Draht bilden. Sie sind offenbar nichtleitend und bestehen in erster Linie aus Kohlenstoff und Sauerstoff, möglicherweise auch aus Wasserstoff.

8.3 Analysemethoden

Bei den folgenden Untersuchungen des Kammerverhaltens in einem größeren Bereich um die Quelle zeigte sich, dass der Effekt durch eine Reihe gut reproduzierbarer Eigenschaften gekennzeichnet ist. Dies ist für einen Alterungseffekt untypisch. Die Ergebnisse einer Bestrahlung sind oft schwer reproduzierbar. Außerdem ist die Art der Effekte ungewöhnlich und wurde in dieser Form und Kombination bisher nicht beobachtet. In Abbildung 8.9 ist das Ergebnis einer Bestrahlung gezeigt. Man sieht einen Ausschnitt eines Moduls, an der x-Achse ist die Strawnummer aufgetragen ($1 \text{ Straw} \hat{=} 0,5 \text{ cm}$), an der y-Achse die Position entlang eines Straws. Jeder der Punkte zeigt ein Verhältnis von zwei Messungen der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung. Damit erhält absolute Werte für die Änderung der Gasverstärkung. Um mögliche Schwankungen aufgrund von Luftdruck und Temperatur zu kompensieren, wird zusätzlich auf das Verhältnis der Gasverstärkung in einen nicht bestrahlten Bereich korrigiert. Der schwarze Kreis markiert die Position der Quelle, der Pfeil gibt die Richtung des Gasflusses an.

Charakteristisch für diesen Alterungseffekt ist der halbmondförmige Bereich, in dem die Abnahme der Gasverstärkung gemessen wird. Direkt unterhalb der Quelle wird kein Verlust der Gasverstärkung gemessen. An dieser Position herrschen die größten Raten und Ströme, demzufolge würde man naiv dort den größten Effekt erwarten. Das halbmondförmige Schädigungsprofil tritt bei allen Messungen mehr oder weniger stark ausgeprägt auf. Auffällig ist die Abhängigkeit von der Gasflussrichtung: die Alterung wird vorwiegend an der näher am Gaseinlass befindlichen Position gemessen. Nachdem das Gas die stark bestrahlte Stelle passiert hat, wird keine Alterung mehr gemessen. Bei wenigen Ausnahmen wurde auch ein beinahe kreisförmiger Fleck gesehen, jedoch in keinem Fall eine andere Ausrichtung des Halbmondes.

Wird in den weiteren Messungen die akkumulierte Ladung angegeben, stammen die Werte aus dem Bereich des größten Verlust der Gasverstärkung, der nicht identisch ist mit dem Bereich der höchsten Ströme.

Um verschiedene Messungen miteinander vergleichen zu können, muss der Verlust der Gasverstärkung quantitativ bestimmt werden. Eine einfache Möglichkeit, die Alterung

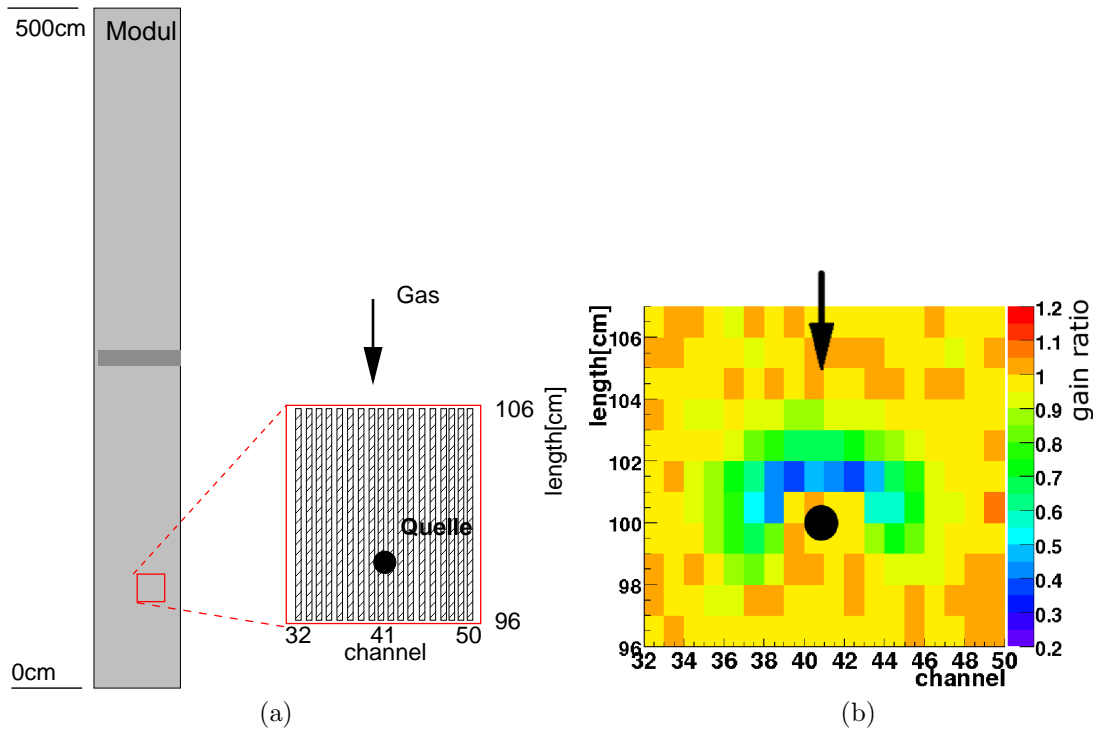


Abbildung 8.9: Ergebnis einer typischen Bestrahlung (Modul HD20, 220h Bestrahlungsdauer, 3-12 mC/cm). Vermessen wird der Ausschnitt eines Moduls (a), der bestrahlt wurde. (b) Die x-Achse zeigt die Strawnummer, die y-Achse die Länge entlang des Straws (1 Straw $\hat{=}$ 0,5 cm). Der Farbcode gibt das Verhältnis der Gasverstärkung nach und vor der Bestrahlung für jeden Punkt an. Der schwarze Kreis zeigt die Position der Quelle während der Bestrahlung. Direkt unterhalb der Quelle ist kein Verlust zu messen. Der Pfeil zeigt die Richtung des Gasflusses. Die halbmondförmige Schädigung ist typisch für diesen Effekt.

zu quantifizieren, ist die Mittelung über eine Anzahl von Positionen, die den stärksten Verlust an Gasverstärkung aufweisen. Diese Methode wies jedoch gerade bei kleinen Verlusten starke statistischen Schwankungen auf.

Um absolute Zahlen für den Verlust der Gasverstärkung zu bestimmen, macht man sich darum die Radialsymmetrie der Quelle zu nutzen. Ausgehend vom Mittelpunkt der Quellenposition wird die Gasverstärkung in Ringsegmenten mit einem festen Abstand von diesem Mittelpunkt ermittelt. Das Segment überstreicht einen Winkelbereich von 220° . Die Methode ist in Abbildung 8.10 gezeigt. Um ein Maß für die Schädigung zu bestimmen, werden die Bins in jedem Segment aufsummiert und die Summe auf die überstrichene Fläche normiert. So erhält man für jedes Segment einen Wert für den Verlust (Abb. 8.10(b)). Der größte Verlust (hier 40 %) wird im folgenden angegeben. Die Ringsegmente besitzen eine Breite von einem Zentimeter. Dies entspricht der Auflösung während der Scans, eine feinere Segmentierung würde also keinen Sinn machen. Wie in Kap 5.3 gezeigt, sind die Werte verteilt mit einer Breite von etwa 2,5 %. Dies wird in

Zukunft als Fehler der Messung angenommen.

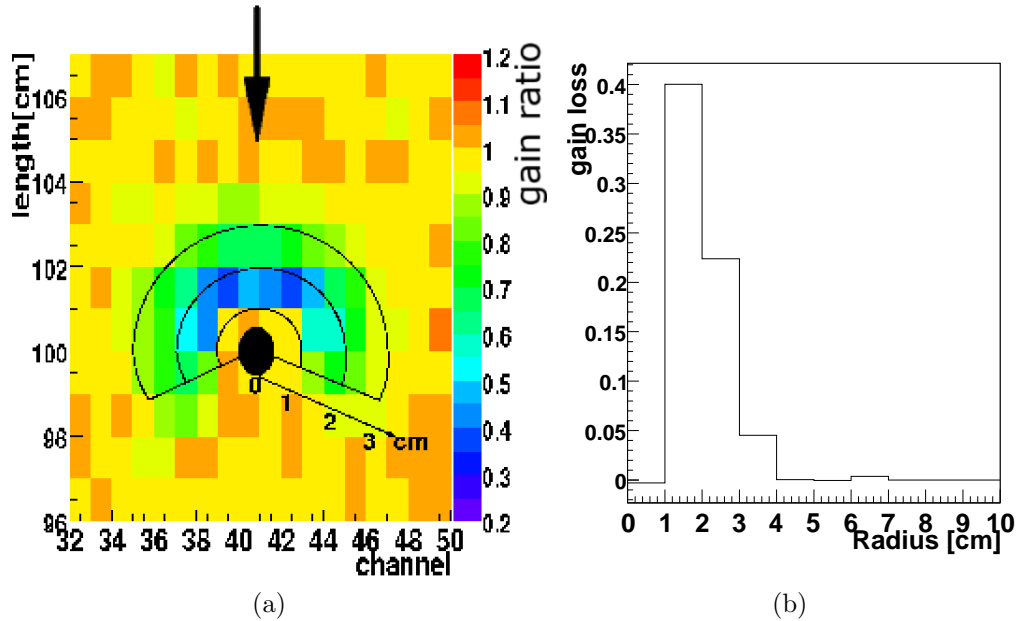


Abbildung 8.10: (a) Um den Verlust der Gasverstärkung quantitativ zu bestimmen, wird die bestrahlte Fläche, ausgehend von der Quelle, in Ringsegmente unterteilt und der Verlust der Gasverstärkung in jedem dieser Ringe bestimmt (Modul 20, 220 h, 3-12 mC/cm). Ein Beispiel ist in Abbildung (b) gezeigt. Hier tritt der größte Verlust in einem Abstand von 1-2 cm auf. Dieser Wert (hier: 40 %) wird im folgenden als Verlust angegeben.

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Analysen mit anderen Verfahren – wie die Bestimmung der Bins mit dem stärksten Verlust – ergeben sich ähnliche Resultate. Dieses Verfahren ist jedoch aufgrund der Mittelung weniger anfällig gegen Schwankungen.

8.4 Systematische Untersuchungen des Alterungseffekts

8.4.1 Alterung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer

Charakteristisch für den hier beschriebenen Effekt sind auch die sehr kurzen Bestrahlungszeiten, nach denen bereits ein Verlust der Gasverstärkung gemessen werden kann. Nach einer Bestrahlung von nur ein bis zwei Tagen (1-3 mC/cm) kann bei einem Modul bereits Alterung festgestellt werden. In Tabelle 8.1 sind einige Beispiele für Messungen aufgelistet. Die Modulnummern entsprechen den Produktionsnummern [75]. Auf die Messungen wird später im Detail eingegangen werden. Alle Module wurden in Heidelberg mit einer Eisenquelle bestrahlt. Gezeigt sind die für die aufgeführten Bestrahlungszeiten (20-50 h) gemessene Abnahmen der Gasverstärkung.

Modul Nr.	Dauer Bestrahlung[h]	Verlust der Gasverstärkung [%]
HD52	50	20; 40
HD63	27	9
HD20	45	10; 18
HD7	27	10; 12
HD27	44	5; 5
N123	20	20
N005	43	36; 34
W023	47	25; 9

Tabelle 8.1: *Typische minimale Bestrahlungszeiten für Alterung bei Messungen, die in Heidelberg durchgeführt wurden. Die Nummern geben die Produktionsnummern der Module an. Stehen bei dem Verlust der Gasverstärkung zwei Zahlen, wurden zwei Bestrahlungen parallel durchgeführt.*

Entscheidend ist die Frage, wie die Alterung mit der Bestrahlungsdauer zunimmt. Abbildung 8.11(a) zeigt bei drei Tests mit langer Bestrahlungsdauer den Verlust der Gasverstärkung zu verschiedenen Zeitpunkten. Der Fehlerbalken gibt die Unsicherheit der Messung an (Kap. 5.3). Dieser Fehler tritt bei jeder Messung auf, wurde aber aufgrund der Übersichtlichkeit nur für jeweils einen Punkt eingezeichnet. Wie man sieht, nimmt die Alterung nicht linear zu, sondern die Kurve flacht mit zunehmender Bestrahlungsdauer ab.

Die Gasverstärkung ist proportional zu dem Verhältnis des Anodenstroms zur Teilchenrate: $G \sim I/R$. Nimmt die Gasverstärkung aufgrund von Alterung ab, muss damit auch der Strom abnehmen. Hängt die Alterung pro Zeit wiederum vom Strom ab (Kap. 8.3), würde man bei einem geringeren Strom einen geringeren Verlust der Gasverstärkung nach der selben Bestrahlungsdauer erwarten. Dieser Effekt könnte das Abflachen der Kurve in Abb. 8.11(a) erklären. Um diese These zu überprüfen, kann die Bestrahlungsdauer auf den reduzierten Strom korrigiert werden. Ist die Annahme richtig, erwartet man eine Gerade für den Verlust der Gasverstärkung in Abhängigkeit der korrigierten Bestrahlungsdauer. Das Ergebnis der Korrektur ist in Abb. 8.11(b) gezeigt. Der Verlust der Gasverstärkung bei Modul 20 entspricht einer Gerade, während die beiden Messungen an Modul 12 weiterhin abflachen. Allerdings ist der Fehler der Messungen groß genug, um auch noch mit der Gerade vereinbar zu sein. Anhand dieser Daten kann somit nicht eindeutig gezeigt werden, ob das abflachen der Kurven in Abb. 8.11(a) nur mit der Abnahme des Stromes erklärbar ist.

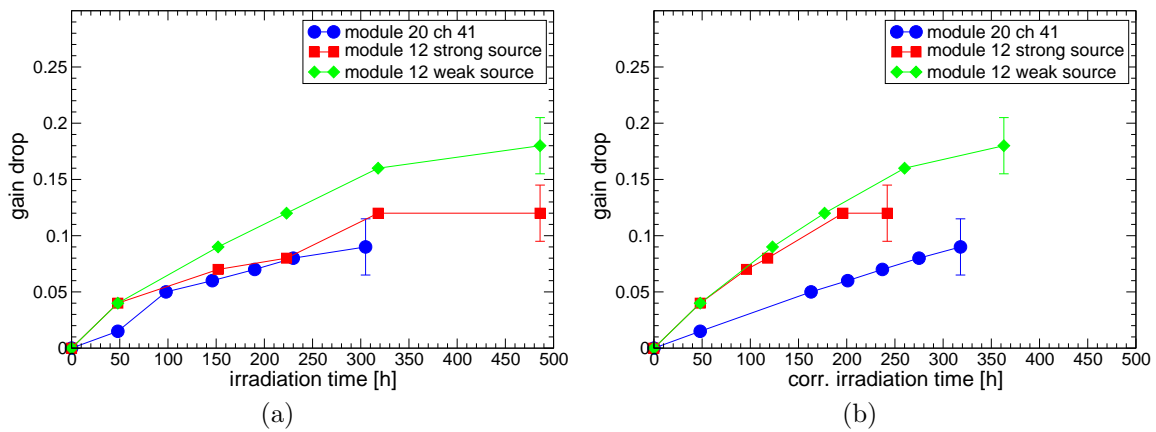


Abbildung 8.11: Alterung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer: (a) Mit zunehmender Bestrahlung scheint die Alterung nicht linear zuzunehmen, sondern die Steigung flacht ab. Die Fehlerbalken geben jeweils die Messungenauigkeit an. Um die Übersichtlichkeit zu erhalten, wurde er immer nur für einen Punkt eingezeichnet. (b) Korrektur der Bestrahlungsdauer unter der Annahme, dass der Verlust der Gasverstärkung pro Zeiteinheit vom Strom abhängt.

8.4.2 Quantitative Reproduzierbarkeit

Vergleicht man quantitativ die Stärke des Signalverlustes nach einer festen Bestrahlungsdauer, können große Variationen auftreten. Nicht einmal bei einem Modul kann ein Verlust der Gasverstärkung immer quantitativ reproduziert werden. Abbildung 8.12 zeigt das Resultat einer Bestrahlung mit zwei symmetrisch platzierten Quellen gleicher Stärke. Die beiden Bestrahlungen wurden gleichzeitig bei einem Gasfluss von 1 Vol/h durchgeführt. Trotzdem sieht man einen Unterschied zwischen den beiden Bereichen, in denen Alterung gemessen wurde. Eine Analyse ergibt einen Verlust der Gasverstärkung von 37 % für die linke Position und 13 % für die rechte Position.

Zum Verständnis der Reproduzierbarkeit wurden die Ergebnisse verschiedener Bestrahlungen verglichen. Dabei fiel auf, dass Straws, die sich weiter außen im Modul befinden – also nahe der Seitenwände – weniger Alterung zeigen als Straws, die sich in der Mitte eines Moduls befinden. Ein besonders deutliches Beispiel für ein solches Resultat ist in Abbildung 8.12(b) gezeigt. Die weiter außen liegenden Straws zeigen deutlich weniger Alterung. Dieser Effekt ist noch nicht richtig verstanden.

Allerdings erklärt dieser Effekt nicht die beiden unterschiedlichen Schädigungen in Abb. 8.12(a), da die beiden Quellen symmetrisch zur Mitte (Kanal 31) platziert wurde. In Tabelle 8.2 ist der Verlust an Gasverstärkung bei Bestrahlungen für weitere Module gezeigt. Die Bestrahlungen wurden immer gleichzeitig durchgeführt und die beiden Quellen symmetrisch zur Modulmitte platziert. Das Verhältnis der beiden Messungen zeigt, dass zwei identische Messungen teilweise nur innerhalb eines Faktors 2 reproduziert werden können. Erst wenn mehr als zwei Messungen verglichen werden, können Tendenzen beim Verhalten der Alterung sicher erkannt werden.

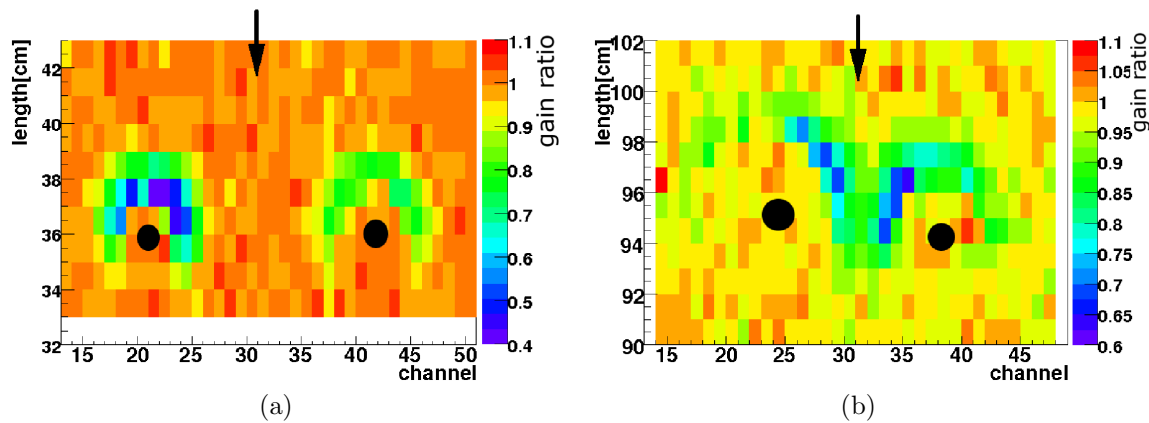


Abbildung 8.12: *Quantitative Reproduzierbarkeit einer Messung. Selbst wenn in einem Modul (Modul W023, 96 h, 2-6 mC/cm) zwei Bestrahlungen parallel mit zwei vergleichbaren Quellen stattfinden, unterscheidet sich die Stärke des Verlusts. Links wurden ein Verlust der Gasverstärkung von 37 % gemessen und rechts 13 %. Abb. (b) zeigt ein besonders deutliches Beispiel dafür, dass die weiter außen liegenden Straws tendenziell weniger Alterung zeigen (Modul 12, 390 h, 6-22 mC/cm).*

Vergleich der Alterungseigenschaften von Modulen unterschiedlicher Produktionsorte

Wie eben gezeigt, ist die quantitative Reproduzierbarkeit begrenzt. Selbst wenn man diesen Faktor berücksichtigt, zeigen allerdings manche Module einen deutlich stärkeren Verlust der Gasverstärkung als andere. Trotz der statistischen Limitierung auf acht Module in Heidelberg bestrahlte Module zeichnet sich eine Tendenz ab, die auch von Messungen am NIKHEF bestätigt wird. Zum direkten Vergleich wird der Verlust der Gasverstärkung der jeweils ersten Bestrahlung eines Moduls verwendet. Vor diesen Bestrahlungen wurden die Module nur für einige Tage gespült. In Tabelle 8.2 sind die Ergebnisse jeweils nach einer Bestrahlungsdauer von etwa 48 h gezeigt. Es sind immer zwei Zahlen angegeben, da die Module gleichzeitig mit den beiden schwachen Eisenquellen bestrahlt wurden. Anderen Parameter wie Gasflussgeschwindigkeit oder Driftgasmischung sind für die aufgelisteten Messungen gleich.

Die am NIKHEF produzierten Module scheinen tendenziell stärker zu altern als in Heidelberg produzierten. Die Warschaumodule zeigen eine weite Variation zwischen geringer Alterung und extrem starker Alterung.

Es stellt sich die Frage, warum die Module unterschiedlich stark altern. Die Materialien zur Modulproduktion wurden zentral verteilt. Unterschiedliche Materialien können also ausgeschlossen werden. Darum muss sich die Produktion geringfügig unterscheiden haben. Es gibt Hinweise, dass eine niedrigere Raumtemperatur am NIKHEF im Vergleich zu Heidelberg das Verhalten beeinflussen haben könnte.

Modul Nr.	Bestrahlungsdauer [h]	Verlust der Gasverstärkung [%] Pos. 1	Verlust der Gasverstärkung [%] Pos. 2	Verhältnis des Verlusts der Gasverstärkung
HD20	45	10	18	0,55
HD7	49	12	19	0,63
HD27	44	4	4	1
HD29	43	10	8	0,8
N123	48	36	49	0,74
N005	43	36	34	0,95
W023	47	25	9	0,36
S1U	46	50	50	1

Tabelle 8.2: Das Verhältnis zweier Bestrahlungen bei einem Modul zeigt, das eine Messung teilweise nur innerhalb eines Faktors zwei reproduziert werden kann. Vergleicht man die Module verschiedener Produktionsstätten, sieht man, dass am NIKHEF produzierte Module tendenziell stärker altern als die in Heidelberg produzierten Module. Die in Warschau produzierten Module verhalten sich unterschiedlich.

8.5 Die radioaktiven Quellen

Für die Bestrahlungen werden verschiedene Quellen benutzt. Am NIKHEF wird meistens eine ^{90}Sr -Quelle verwendet, ein β -Strahler mit einer maximalen Energie von 0,546 MeV. In Heidelberg werden in erster Linie Eisenquellen verwendet. Die ^{55}Fe -Quelle strahlt γ -Teilchen mit einer Energie von 5,9 keV ab. Außerdem wird in Heidelberg für einige Messungen ebenfalls eine ^{90}Sr -Quelle verwendet. Insgesamt werden in Heidelberg vier Quellen für die Bestrahlungen verwendet: eine sogenannte "starke" Eisenquelle mit einer Aktivität von 205 MBq, zwei "schwachen" Eisenquellen, beide mit einer Aktivität von 35,8 MBq sowie die Strontium Quelle mit 0,22 MBq. Die hier gezeigten Ergebnisse aus NIKHEF stammen von zwei Quellen: der ^{90}Sr -Quelle mit einer Aktivität von 3300 MBq sowie einer Eisenquelle mit 130 MBq. Abbildung 8.13 zeigt die Strahlprofile der in Heidelberg verwendeten Quellen. Sowohl der integrierte Strom pro Straw (Abb. 8.13(a)) als auch der Strom pro Zentimeter (Abb. 8.13(b)) ist gegen den Abstand von der Quelle aufgetragen. Aus den Messungen des Stroms pro Straw wurden die Angaben für den Strom pro Zentimeter unter der Annahme eines radialsymmetrischen gaussförmigen Profils bestimmt.

Wie man sieht, ist die Aktivität der beiden schwachen Eisenquellen identisch, sie werden im weiteren nicht unterschieden. Trotz eines Unterschiedes in der Aktivität von 10^3 zwischen der Strontium- und der starken Eisenquelle werden ähnliche Ströme gemessen, da Wirkungsquerschnitt der γ -Quanten im Zählgas klein ist und demzufolge nur ein

Bruchteil im Straw wechselwirkt.

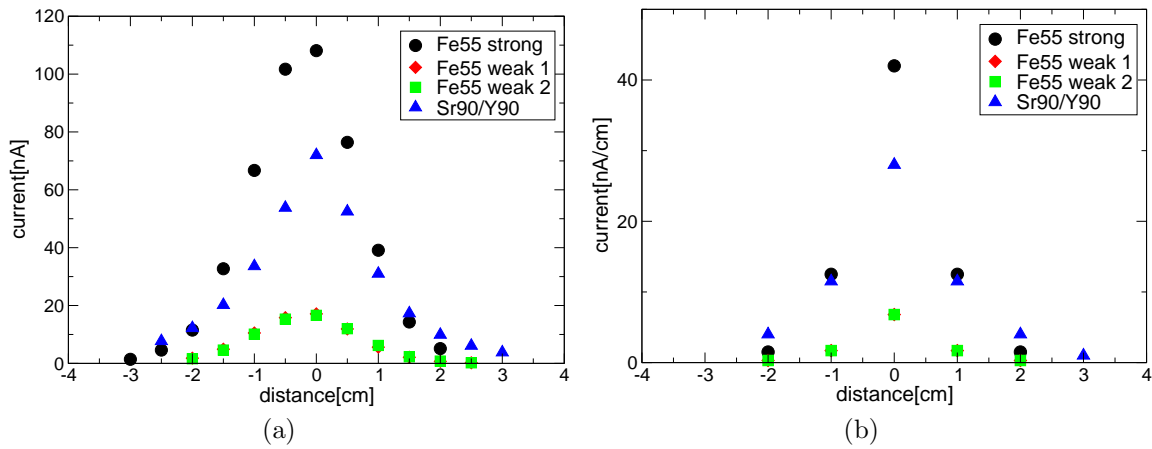


Abbildung 8.13: Strahlprofil der in Heidelberg verwendeten radioaktiven Quellen. Abb. (a) zeigt den Strom pro Straw in Abhängigkeit der Distanz, Abb. (b) den Strom pro Zentimeter. Die beiden schwachen ^{55}Fe -Quellen besitzen die gleiche Aktivität.

Zum Vergleich mit Ergebnissen vom NIKHEF sind in Abbildung 8.14 die Strahlprofile der beiden am NIKHEF verwendeten Quellen gezeigt. Die Strontiumquelle ist deutlich stärker als die in Heidelberg verwendeten Quellen. Allerdings wird bei Bestrahlungen – im Gegensatz zur der Messung des Profils – ein Kollimator verwendet. Dadurch herrschen bei der Bestrahlung mit dieser Strontium- und der starken Eisenquelle vergleichbare Ströme.

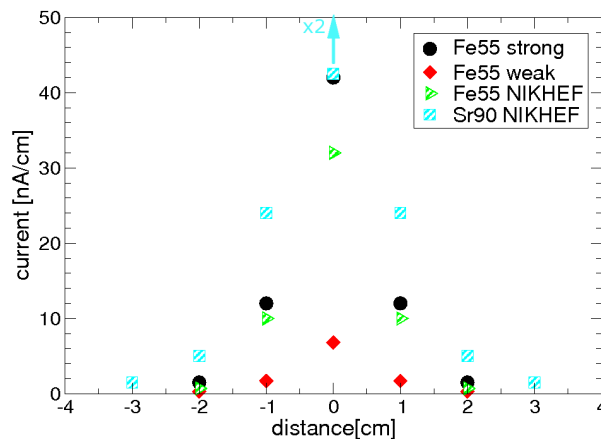


Abbildung 8.14: Strahlprofil der am NIKHEF verwendeten Quellen. Während die Strontiumquelle deutlich stärker ist, besitzt die Eisenquelle eine vergleichbare Intensität. Allerdings werden die Bestrahlungen mit der Strontiumquelle mit einem Kollimator durchgeführt.

In Tabelle 8.3 sind die wichtigsten Daten der in Heidelberg verwendeten Quellen nochmals zusammengefasst. Neben der Gesamtrate und -strom sind auch die Werte für den

am stärksten bestrahlten Bereich angegeben. Da die beiden schwachen Quellen identisch sind, werden die Zahlen nur einmal angegeben.

Quelle	Aktivität [Bq] (Juni '07)	Strom [nA]	Strom im stärksten Bereich [nA/cm]	Rate [kHz]	Rate im stärksten Bereich [kHz/cm]
Starke ^{55}Fe	$2,05 \times 10^8$	460	41	136	12,5
Schwache ^{55}Fe	$3,58 \times 10^7$	60	6.8	20	2,0
^{90}Sr	$2,2 \times 10^5$	320	38	143	12,5

Tabelle 8.3: *Aktivität der Heidelberger Quellen.*

8.6 Abhängigkeit der Alterung von den Bestrahlungsparametern

8.6.1 Abhängigkeit der Alterung von der Teilchenart

Da die Bestrahlungen mit Eisen- und mit Strontiumquellen durchgeführt werden, also mit γ - und β -Strahlen, kann untersucht werden, ob sich die Alterung unterscheidet. Dazu wurde in Heidelberg für eine Bestrahlung die Strontiumquelle genutzt. Sonst wurden keine Parameter geändert. Das Ergebnis einer Bestrahlung von 280 h ist in Abbildung 8.15(a) zu sehen. Der halbmondförmige Verlust der Gasverstärkung ist im Vergleich zu einer Eisenquelle größer, da das Strahlprofil etwas breiter ist (Abb 8.13). Quantifiziert man den Verlust der Gasverstärkung mit der in Kap. 8.3 beschriebenen Methode, ergibt sich die Verteilung in Abb. 8.15(b) mit einem maximalen Verlust von 50 %. Die Alterung scheint unabhängig von den Quellen und der Art der Teilchen. Also kann die Strontiumquelle gleichberechtigt neben den Eisenquellen für weitere Bestrahlungen eingesetzt werden.

8.6.2 Abhängigkeit vom Strom

Bei einem Vergleich von starken und schwachen Eisenquellen zeigt sich, dass der maximale Verlust bei beiden Quellen ähnlich ist, obwohl sich die Intensität unterscheidet. Die unterschiedlichen Eisenquellen erlauben, nach einer Abhängigkeit des Effekts vom Anodenstrom zu suchen. Mit der in Kap. 8.3 beschriebenen Methode ist es möglich, den Verlust in Abstand der Quelle zu ermitteln und diesen mit den entsprechenden Strömen im Modul zu korrelieren. Abbildung 8.16 zeigt die Ergebnisse für die schwache (Abb. 8.16(a)) und die starke (Abb. 8.16(b)) Eisenquelle. In schwarz ist der Verlust der Pulshöhe in

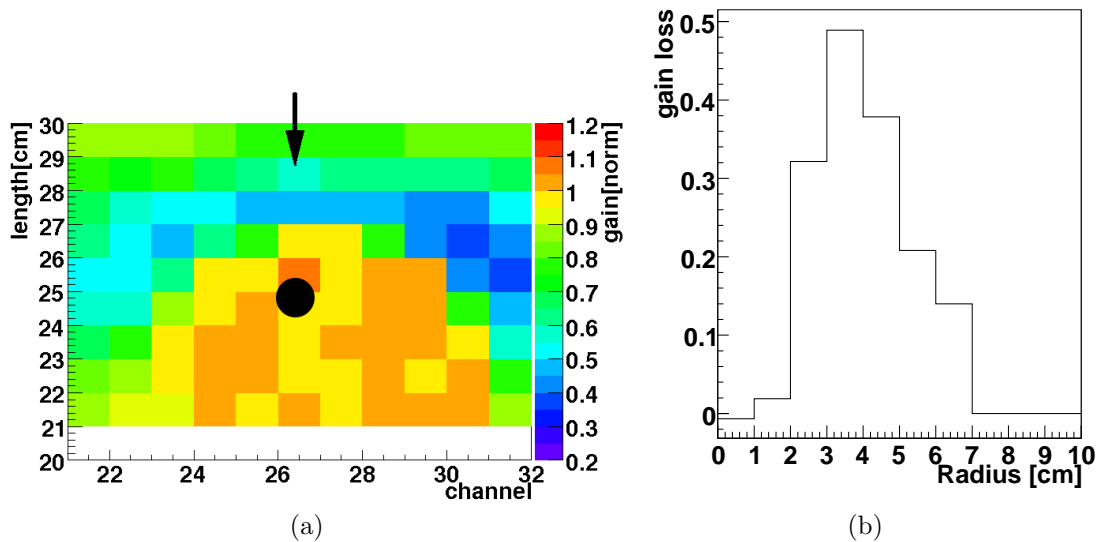


Abbildung 8.15: Bestrahlung mit einer Strontiumquelle (Modul HD63, 280 h, 4-15 mC/cm): (a) Erwartungsgemäß ist aufgrund des größeren Stroms und des breiteren Strahlprofils der Halbmond ausgeprägter als bei einer Eisenquelle. (b) Die Analyse zeigt ein mit der Eisenquelle vergleichbares Profil.

Abhängigkeit des Abstandes von der Quelle gezeigt, in rot ist der Anodenstrom pro Zentimeter angegeben, der sich aus dem Strahlprofil in Abb. 8.13 ergibt. Man sieht bei beiden Quellen, dass der maximale Verlust ab einem minimalen Strom von 3-5 nA/cm auftritt, auch wenn sich der Abstand aufgrund des unterschiedlichen Strahlprofils unterscheidet. Für größere Anodenströme ist die Alterung unabhängig vom Strom pro Längeneinheit. Ab einer oberen Schwelle für den Strom pro Längeneinheit wird keine Alterung mehr gemessen. Diese obere Schwelle tritt auch bei den schwachen Eisenquellen auf, bei denen maximal ein Anodenstrom von 15 nA/cm gemessen wird. Daraus kann geschlossen werden, dass bei einem Anodenstrom, der höher als 12 nA/cm ist, keine Alterung mehr auftritt. Bei kleineren Strömen als 3-5 nA/cm nimmt der Verlust der Gasverstärkung mit dem Anodenstrom ab.

8.6.3 Abhängigkeit von der Fläche

Bei den meisten Tests wurden in Heidelberg nur kleine Flächen mit einer Größe von 30-80 cm² bestrahlt. Aufgrund der Geometrie der Quellen ist die am NIKHEF bestrahlte Fläche größer, aber verglichen mit dem späteren Experiment immer noch klein. Da der Alterungseffekt auch von der bestrahlten Fläche abhängen kann (Kap. 5.2), wurde eine Möglichkeit gesucht, ein Modul großflächig zu bestrahlen. Als gute Lösung bot sich hier die Heidelberger Röntgenanlage an (Kap. 7.1.1). Aufgrund des beschränkten Raumes wurde kein 5 m-Modul bestrahlt, sondern ein 2,5 m-Modul gewählt.

Vor der Bestrahlung wurde das vertikale und das horizontale Strahlprofil mit einem Testmodul vermessen (Kap. 7.1.3) und ein Intensitätsprofil erstellt. Das Profil der

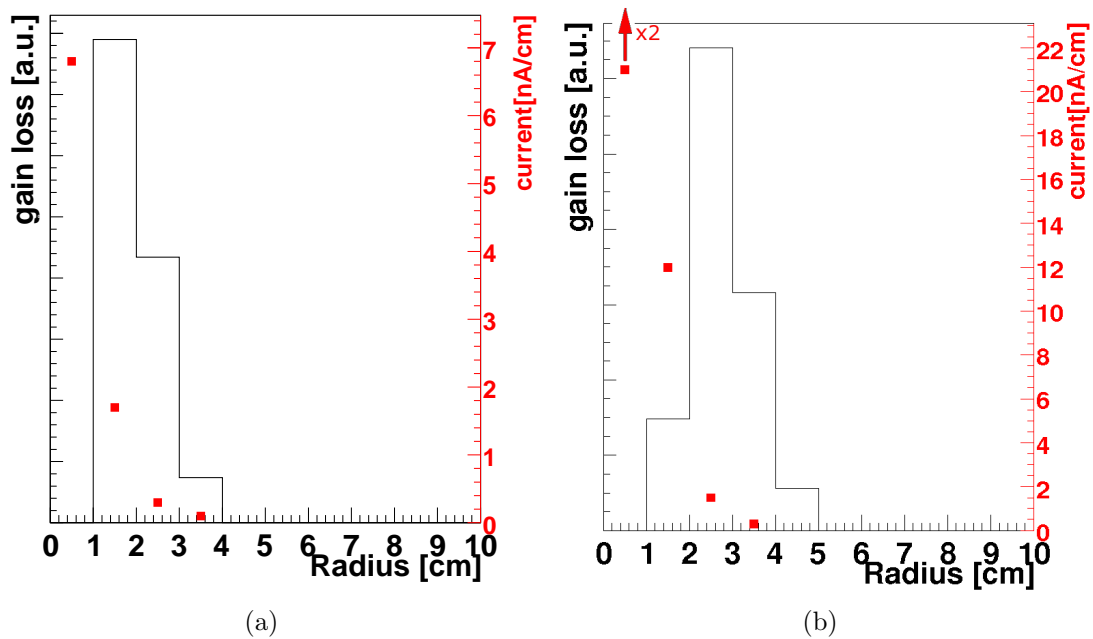


Abbildung 8.16: Die maximale Alterung tritt sowohl bei der schwachen (a) als auch bei der starken (b) Eisenquelle bei einem minimalen Anodenstrom von 3-5 nA/cm auf. Aufgrund der unterschiedlichen Breite des Strahlprofils unterscheiden sich jedoch die Abstände von der jeweiligen Quelle.

Röntgenröhre, angegeben als Anodenstrom pro cm ist in Abb 8.17 zu sehen.

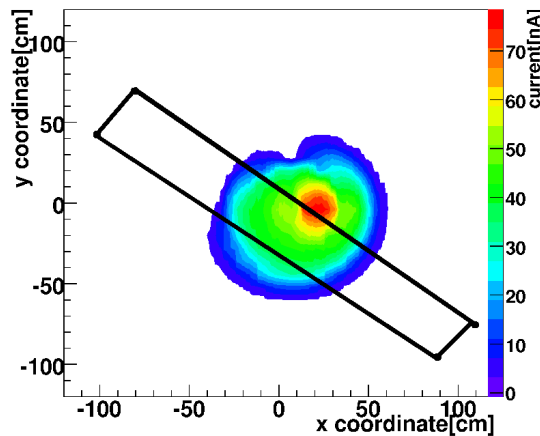


Abbildung 8.17: Strahlprofil der Röntgenanlage während der Bestrahlung eines 2,5 m-Moduls. Der Anodenstrom wurde so eingestellt, dass das Maximum mit der starken Eisenquelle vergleichbar ist. Die schwarzen Linien geben die Lage des Moduls während der Bestrahlung an.

Der Fehler der Strommessung beträgt etwa einen Faktor zwei und ist damit wesentlich größer als die Strommessung der radioaktiven Quellen. Die Ursache dieser Ungenauig-

keit sind Schwankungen des Stroms der Röntgenröhre im Bereich von Stunden. Diese Schwankungen werden während der Messung des Strahlprofils nicht erfasst. Der Strom der Röntgenröhre wurde auf den kleinsten möglichen Wert eingestellt (0,02 mA), um die Intensität zu minimieren. Die Hochspannung des Anodendrahtes wurde dann so justiert, dass der maximale Anodenstrom pro Zentimeter mit dem der starken Eisenquelle vergleichbar war. Dazu musste die Hochspannung für die Bestrahlung von den üblichen 1600 V auf 1520 V gesenkt werden.

Die Ergebnisse der Bestrahlung sind in Abb. 8.18 gezeigt. Der Pfeil zeigt die Richtung des Gasflusses an, die Zahlen geben die ungefähren Modulströme in nA/cm während der Bestrahlung wieder. Man erkennt im Bereich von 80-100 cm über die volle Breite des Moduls Alterung. Flussabwärts ist im selben Strombereich keine Alterung zu sehen. Diese Ergebnisse sind konsistent mit den Bestrahlungen der radioaktiven Quellen. Die halbmondformige Schädigung bei 120 cm stammt von einer Bestrahlung mit einer radioaktiven Quelle nach dem Test in der Röntgenanlage.

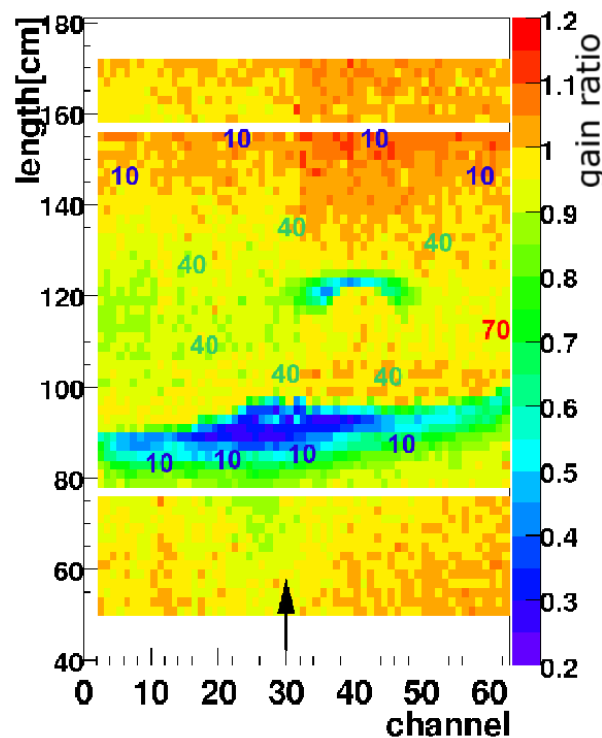


Abbildung 8.18: *Ergebnis der Bestrahlung in der Röntgenanlage. Man erkennt deutlich den Verlust der Gasverstärkung über die volle Breite des Moduls. Die farbigen Zahlen geben die ungefähren Ströme in nA/cm während der Bestrahlung an, der Pfeil zeigt die Richtung des Gasflusses während der Bestrahlung. Die Schädigung bei 120 cm stammt von einer Bestrahlung mit einer Quelle nach dem Test im Röntgenbunker.*

Vor der eigentlichen Bestrahlung in der Röntgenanlage wurde das Modul an einer

Stelle bereits mit einer Eisenquelle bestrahlt, um sicher zu stellen, dass auch die 2,5 m-Module altern. Das Ergebnis dieser Bestrahlung ist in Abbildung 8.19(a) gezeigt. Ein Scan an der gleichen Stelle nach der Röntgenbestrahlung ergab, dass die Alterung nicht mehr nachgewiesen werden konnte (Abb. 8.19(b)). In diesem Bereich herrschten während des Test in der Röntgenanlage die stärksten Ströme. Mögliche Ablagerungen auf den Drähten wurden offenbar entfernt. Nach dem Test in der Röntgenanlage wurde eine neue Bestrahlung mit einer Quelle begonnen, um zu sehen, ob die hohen Ströme auch einen Einfluss auf die Ergebnisse einer neuen Bestrahlung haben. Die Position befand sich dabei noch in dem Gebiet, in dem starke Ströme auftraten. Die Schädigung in Abb. 8.18 ist das Ergebnis dieser Bestrahlung (280 h, 4-15 mC/cm). Durch die Behandlung des Moduls mit hohen Strömen konnte offensichtlich keine Änderung des Verhaltens unter Bestrahlung erreicht werden.

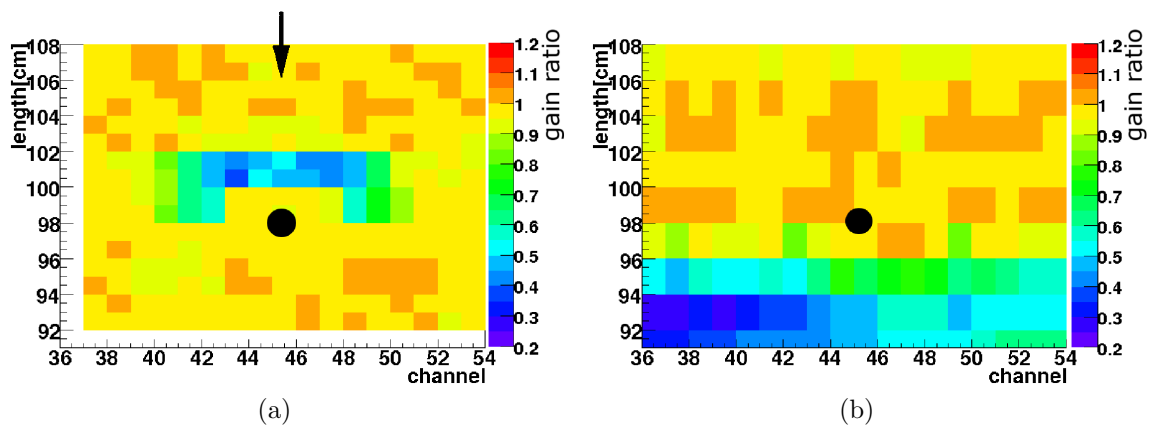


Abbildung 8.19: Die Stelle, die vor der Bestrahlung (58 h, 1-4 mC/cm) in der Röntgenanlage Alterung zeigte (a) ist nach dem Test nicht mehr nachweisbar (b). Der Verlust bei 92-96 cm stammt von der Bestrahlung in der Röntgenanlage (siehe Abb. 8.18).

8.6.4 Weitere Abhängigkeiten

In zahlreichen Studien wurde Abhängigkeiten der Alterung von verschiedenen Faktoren untersucht. Am NIKHEF wurde eine Testreihe durchgeführt, um zahlreiche Variablen zu überprüfen [77]. Die Resultate sind in Tabelle 8.4 dargestellt.

8.7 Studien zum Verständnis des Alterungseffekts

8.7.1 Verhinderung der Alterung durch hohe Raten

Abb. 8.5 zeigt, dass direkt unterhalb der Quelle keine Alterung auftritt. Auch bei der Analyse der Gasverstärkung in Abhängigkeit des Stromes (Abb. 8.16(b)) sieht man, dass bei großen Strömen keine Alterung auftritt. Um dieses Phänomen zu verstehen, wurden verschiedene Tests durchgeführt.

Test	Variation	Bemerkungen	Ergebnis
Entfernung vom Gaseinlass	Bestrahlungen bei 20 cm, 70 cm, 115 cm, 125 cm, 180 cm, 230 cm	_____	keine Abhängigkeit entlang des Straws
Hochspannung	1450 V, 1600 V, 1800 V	vergleichbares Beamprofil bei allen Tests durch Änderung des Quellenabstandes	keine Abhängigkeit von der Hochspannung
Gasmischung	Ar/CO ₂ (60 %/40 %), (70 %/30 %), (80 %,20 %)	Standardmischung: Ar/CO ₂ (70 %/30 %)	mehr Alterung bei höherem Argonanteil
Feuchtigkeit	<50 ppm, 600 ppm, 2000 ppm	_____	keine Abhängigkeit von der Feuchtigkeit

Tabelle 8.4: *Ergebnisse von Studien am NIKHEF über weitere Abhängigkeiten [77]*

Transportstudien

Bestrahlt man dieselben Kanäle eines Moduls gleichzeitig an unterschiedlichen Stellen entlang des Straws, stellt sich die Frage, ob die Bestrahlung der ersten Position Einfluss auf die zweite Bestrahlung hat.

Der Aufbau eines solchen Tests ist in Abbildung 8.20 skizziert. Es wurde eine Stelle nahe des Gaseinlasses bestrahlt (Position A) und eine zweite in einem Abstand l ($l=25$ cm (B1), 75 cm (B2)). In einer dritten Messung wurde ein Abstand von 180 cm untersucht.

Für diese Bestrahlungen wurden die beiden schwachen Eisenquellen verwendet, damit die Alterung an beiden Positionen aufgrund der gleichwertigen Bestrahlung leichter verglichen werden kann. Der Gasfluss betrug 1 Vol/h bei allen Messungen. In Abbildung 8.21 sind die Ergebnisse der Bestrahlung mit einer Distanz von 25 cm und 75 cm gezeigt. In Abb. 8.21(a) sieht man, dass das Ergebnis bei gleicher Bestrahlung an Pos. A. sich deutlich von den beiden weiteren Bestrahlungen unterscheidet (Abb. 8.21(b) (25 cm) und 8.21(c) (75 cm)). Man sieht bei beiden Positionen, dass die Gasverstärkung in den mittleren Kanäle nicht abgenommen hat. Die entspricht den Kanälen, in denen bei Position A der höchsten Strom pro Längeneinheit herrschte (Strahlprofile: Abb. 8.13). Die äußeren Kanäle zeigen einen schwachen Verlust der Gasverstärkung. Offensichtlich hat die Bestrahlung von Position A Einfluss auf den Verlust der Gasverstärkung bei Position B.

In Abb. 8.22 sind die Ergebnisse der Bestrahlung mit einem Abstand von 180 cm

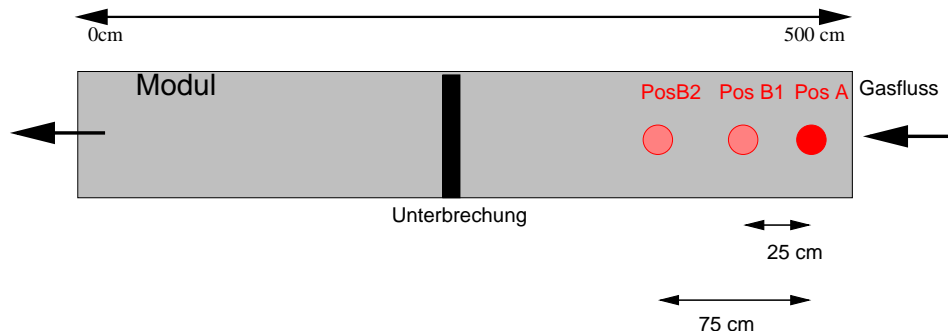


Abbildung 8.20: Für Transportstudien wurden 2 Stellen gleichzeitig bestrahlt. Nahe des Gaseinlasses wurde Pos. A bestrahlt und dazu nacheinander Pos. B1 (25 cm) und PosB2 (75 cm). In einem unabhängigen Test wurde ebenfalls ein Abstand von 180 cm untersucht.

gezeigt. Die Quelle nahe am Gaseinlass (Abb. 8.22(a)) zeigt die erwartete Schädigung, aber auch bei der zweiten Quelle (Abb. 8.22(b)) sieht man wieder das ganze Profil. Nach 180 cm kann keine Beeinflussung aufgrund der ersten Bestrahlung mehr festgestellt werden.

Gasflussgeschwindigkeit

Normalerweise wird während der Bestrahlung das Modul mit Driftgas bei einem Fluss von einem Vol/h gespült. Bei einer Länge von 5 Metern beträgt damit die Flussgeschwindigkeit in den Straws $5 \text{ m/h} \approx 8 \text{ cm/min}$. Zur Untersuchung der Alterung in Abhängigkeit der Gasflussgeschwindigkeit wurden Bestrahlungen bei einem Fluss von $\approx 3,5 \text{ cm/min}$ und $\approx 0,8 \text{ cm/min}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Bestrahlungen mit einer niedrigen Flussgeschwindigkeit sind in Abbildung 8.23 gezeigt. Während bei einer Reduktion der Flussgeschwindigkeit um einen Faktor zwei (Abb. 8.23(a)) noch keine Veränderung gegenüber dem normalen Gasfluss sichtbar ist (Abb. 8.5), zeigt sich bei einem Fluss von $0,8 \text{ cm/min}$ (Abb. 8.23(b)) bei manchen bestrahlten Kanälen keine Alterung. In diesen Kanälen wurden während der Bestrahlung die stärksten Ströme gemessen. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt wird in der Zusammenfassung dieses Kapitels gegeben.

8.7.2 Die Ursache der Alterung

Nachdem externe Ursachen für die Alterung ausgeschlossen werden konnten, da die Alterung sowohl in Heidelberg als auch am NIKHEF mit Modulen von allen Produktionsstätten reproduziert werden konnte, muss die Quelle innerhalb der Module gesucht werden.

Der Bau von Testmodulen

Die Alterung wird vermutlich durch ausgasendes Material verursacht, das sich im Modul befindet. Der verwendete Epoxidkleber ist eine wahrscheinliche Ursache für das Ausgasen. Selbst unter günstigen Bedingungen gasen viele Epoxidkleber aus. Darum wer-

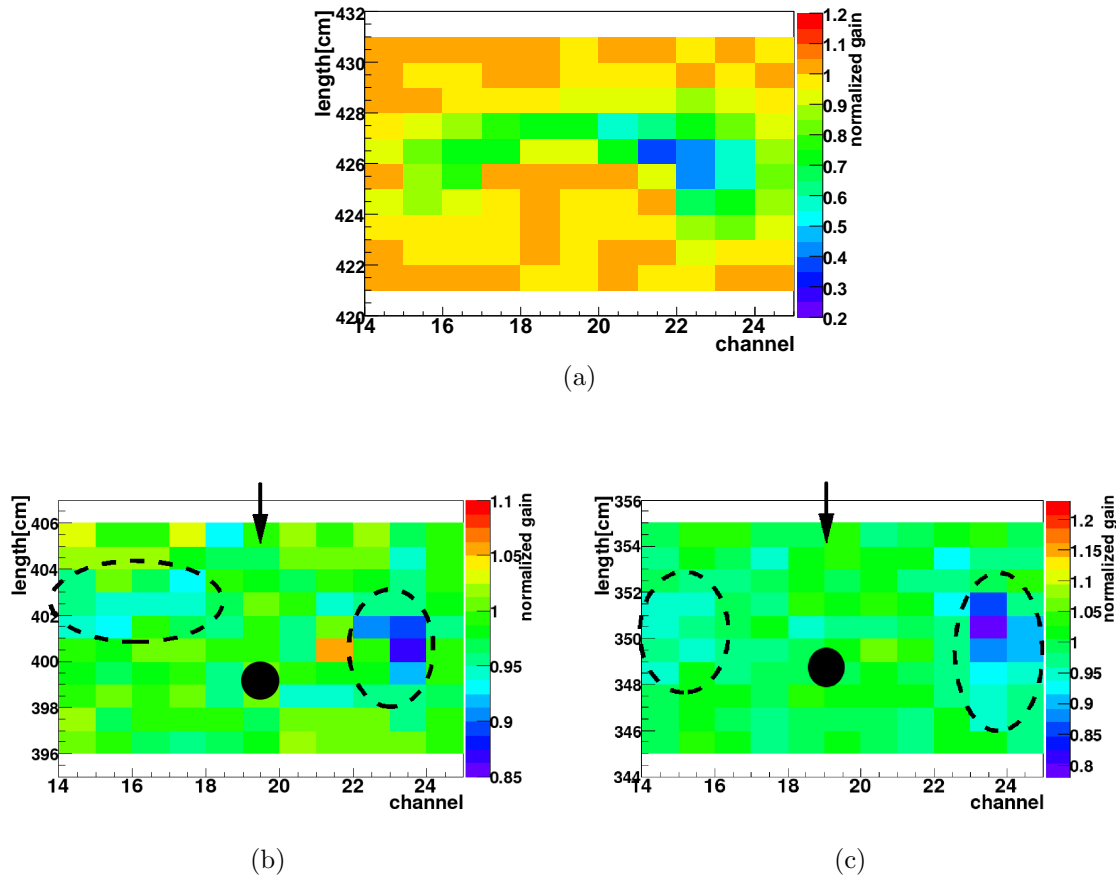


Abbildung 8.21: Die Ergebnisse der Bestrahlungen bei einem Abstand der Quellen von 25 cm und 75 cm. Die Messungen wurden nacheinander ausgeführt, bei beiden Bestrahlungen wurde Pos A bestrahlt und entweder B oder C. Während bei Position A (a) (Modul HD63, 150 h, 2-8 mC/cm) die typische halbmondförmige Schädigung zu erkennen ist, wurde sowohl bei 25 cm (b) (Modul HD63, 75 h, 1,5-5 mC/cm) als auch bei 75 cm (c) (Modul HD63, 75 h, 1,5-5 mC/cm) in den mittleren Kanälen kein Verlust der Gasverstärkung gemessen.

den beim Modulbau nur ausgewählte Kleber verwendet, die bereits getestet wurden. Auch der verwendete Kleber Araldit A103 in Kombination mit dem Härte HY991 wurde bereits getestet [60]. Allerdings wurde dem Kleber beim Modulbau Quarzmehl beige-mischt, um die Fließeigenschaften zu verändern, wobei sich jedoch auch die Aushärtzeiten möglicherweise verlängern können. Bei der Verwendung des Klebers ist es wichtig, die vom Hersteller angegebenen Temperaturvorgaben und die daraus resultierenden Trockenzeiten zu beachten. Sonst polymerisieren die Komponenten möglicherweise nicht vollständig und ein Ausgasen wird wahrscheinlicher.

Aus diesen Gründen soll der Kleber genauer untersucht werden. Dazu wurden drei Testmodule gebaut, vom Aufbau beinahe identisch mit den im Röntgenbunker verwendeten Testmodulen (Kap. 7.1.2), jedoch mit 32 Straws. Für diese Module wurden ver-

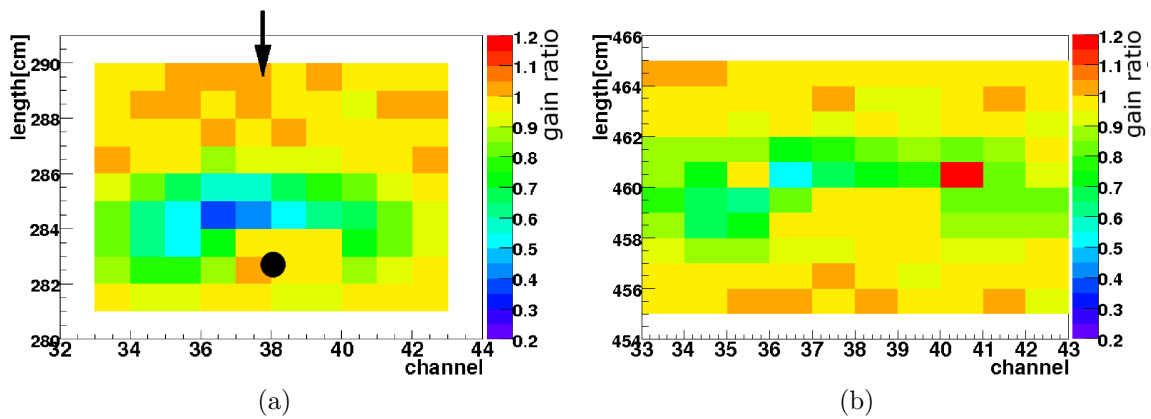


Abbildung 8.22: Bei einem Abstand der beiden Quellen von 180 cm ist auch bei der zweiten Quelle (Abb. (b), Modul HD63, 100 h, 2-6 mC/cm) wieder eine deutliche halbmondförmige Schädigung zu erkennen. Die Bestrahlung in Abb. (a) (Modul HD63, 150 h, 2-8 mC) war wieder näher am Gaseinlass.

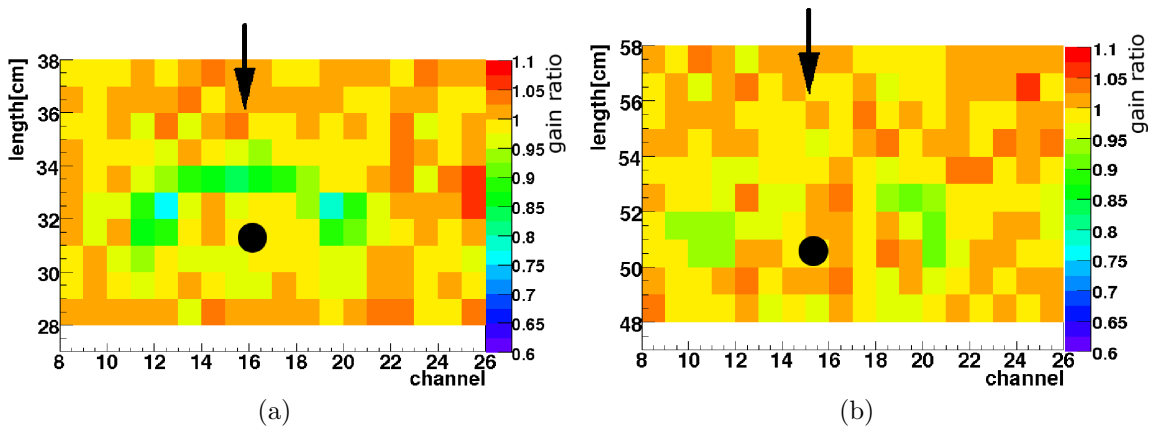


Abbildung 8.23: Alterung in Abhängigkeit der Gasflussgeschwindigkeit. In Abb. (a) (Testmodul 2, 48 h, 1-3 mC/cm) beträgt der Gasfluss etwa 3,5 cm/min, die Hälfte des nominellen Wertes. Man erkennt keinen Unterschied zu einer Messung bei 8 cm/min (Abb. 8.5). In Abbildung (b) (Testmodul 2, 48 h, 1-3 mC/cm) beträgt der Fluss etwa 0,8 cm/min. Man sieht nicht die typische halbmondförmige Schädigung.

schiedene Kleber verwendet. Bei einem wurde die normale Mischung mit Araldit und dem Quarzmehl verwendet, bei dem zweiten wurde reiner Aralditkleber benutzt, für das dritte Modul wurde ein alternativer Kleber, Trabond 2115, verwendet, der ebenfalls in [60] getestet wurde. Bei dem Bau dieser Module wurden die Materialien wieder aus der Produktion entnommen, zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Aushärtzeiten denen der Massenproduktionsmodule entsprechen. In Tabelle 8.5 stehen nochmals die wichtigsten Größen der drei Testmodule.

Alle Module wurden mit der starken Eisenquelle bestrahlt und mit Ar/CO₂ gespült.

Modul	Kleber	Anzahl Straws	Länge Straws
Testmodul 1	Araldit + Quarzmehl	32	83 cm
Testmodul 2	Araldit	32	83 cm
Testmodul 3	Trabond 2115	32	83 cm

Tabelle 8.5: *Eigenschaften der neuen Testmodule*

Der Gasaustausch betrug 1 Vol/h, das entspricht bei einem Volumen von 1,2l und einer Länge von 1 m 0,3 cm/min, ist verglichen mit den großen Modulen also sehr gering (18l/h, 8 cm/min). Aufgrund der Studien der Alterung in Abhängigkeit der Gasflussgeschwindigkeit 8.23(b) erwartet man keine vollständige halbmondförmige Schädigung aufgrund dieser Bestrahlung. Die Ergebnisse der Bestrahlung sind in Abb. 8.24 gezeigt. Abbildung 8.24(a) zeigt das Resultat der Bestrahlung des Araldit-Moduls mit Quarzmehl. Bereits nach 50 h Bestrahlung erkennt man deutliche Anzeichen für Alterung. Ebenso bei dem Araldit-Modul ohne Quarzmehl (Abb. 8.24(b)). Nach einer Bestrahlung von 90 h ist eine Schädigung erkennbar. Das Modul zeigt also auch Alterung. Das Testmodul mit Trabond (Abb. 8.24(c)) zeigt dagegen auch nach einer Bestrahlung von 400 h unter gleichen Bedingungen kein Zeichen von Alterung. Aus dieser Messung kann man schließen, dass der Araldit die Alterung verursacht. Dabei scheint jedoch nicht die Beigabe des Quarzmehls die Alterung verursacht zu haben.

Ausgastests

In einem weiteren Test sollte Araldit als Ursache der Alterung verifiziert werden. Dazu wurde eine Aluminiumbox gebaut, die ein ähnliches Volumen wie die Testmodule besitzt (1l zu 1,2l). Die Box wird vor das Trabondmodul in den Gasfluss eingebaut. In die Box wird eine großflächig mit Kleber bestrichene Kaptonfolie gelegt. Gast der Kleber aus, wird das Material in das bisher nicht alternde Trabondmodul transportiert und verursacht dort Alterung. In Abbildung 8.25 ist ein Foto des Aufbaus gezeigt.

Die Folien wurden mit dem im Modulbau verwendeten Aralditkleber mit Quarzmehl bestrichen. Dabei wurde die etwa 15 cm × 50 cm große Kaptonfolie mit ungefähr 40 g Kleber bestrichen. Das entspricht der Menge Kleber, die auch beim Bau der Testmodule verwendet wurde. Da die Vermutung besteht, dass der Kleber aufgrund einer zu niedrigen Raumtemperatur nicht richtig aushärten konnte, wurde er für den ersten Test bei 30 °C für 16 h getrocknet. Das Ergebnis der folgenden Bestrahlung ist in Abb. 8.26(a) zu sehen. Ebenso wie bei den folgenden Bestrahlungen wurde die starke Eisenquelle verwendet und der Gasfluss betrug 0,6 cm/min. Nach einer Dauer von 140 h ist keine Alterung zu erkennen. Nach diesem Test wurde die Aluminiumbox ausgebaut und das Trabond-Modul für mehrere Tage gespült.

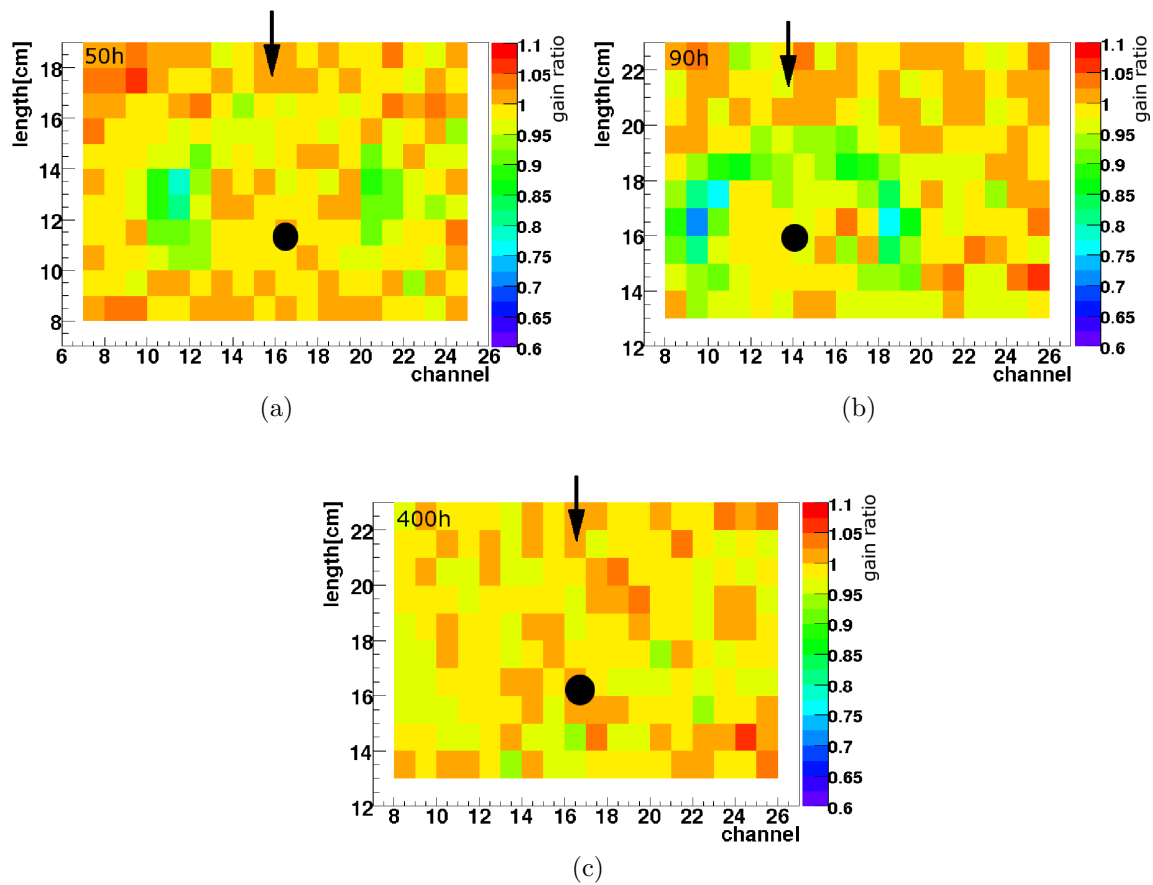


Abbildung 8.24: Sowohl das Modul mit Araldit und Quarzmehl (a) als auch das Modul mit Araldit (b) zeigen bereits nach kurzer Zeit (50 h , 1-3 mC/cm bzw. 90 h, 2-6 mC/cm) deutlich Anzeichen für Alterung, während beim Trabond-Modul auch nach 400 h (6-22 mC/cm) kein Verlust der Gasverstärkung erkennbar ist.

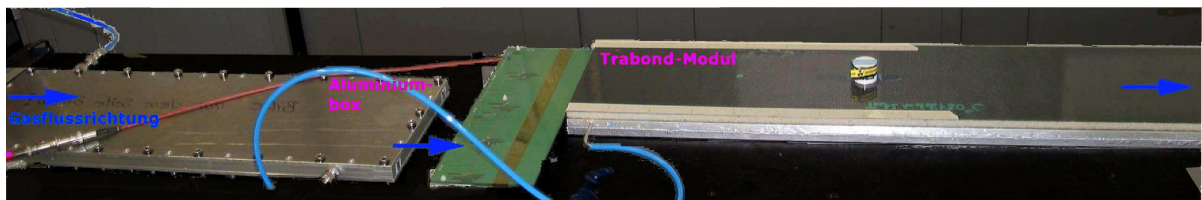


Abbildung 8.25: Setup des Transporttests mit dem Trabond-Modul. Die Aluminiumbox wird mit einer mit Kleber bestrichenen Folie gefüllt. Das ausgasende Material soll Alterung im Trabond-Modul verursachen.

Beim nächsten Test wurde die gleiche Menge Araldit verwendet, diesmal bei Raumtemperatur, 19 °C, für 17 h getrocknet. Die Ergebnisse dieses Tests sind in den Abb. 8.26(b) und 8.26(c) gezeigt. Während sich nach 115 h noch keine Alterung zeigt, ist nach 160 h ein deutlicher Verlust der Gasverstärkung zu sehen.

Nach diesem Test wurde die Aluminiumbox entfernt und das Modul an einer anderen Position erneut bestrahlt, um zu testen, ob das Modul ohne die Box mit dem Araldit immer noch Alterungserscheinungen zeigt, obwohl keine neue Verschmutzung von dieser Seite in das Modul gelangen kann. Bereits nach einer Bestrahlungsdauer von 70 h zeigte das Module einen deutlichen Verlust der Gasverstärkung (Abb. 8.26(d)). Obwohl in dem Modul kein Araldit verwendet wurde und keine andere Quelle der Verschmutzung mehr vorhanden war, alterte das Modul. Die problematische Substanz ist offenbar dauerhaft in das Modul transportiert worden. Da die Alterung direkt nach der Bestrahlung begann, lässt den Schluss zu, dass das Modul dauerhaft verschmutzt wurde. Die Messungen sind nochmals in Tabelle 8.6 zusammengefasst.

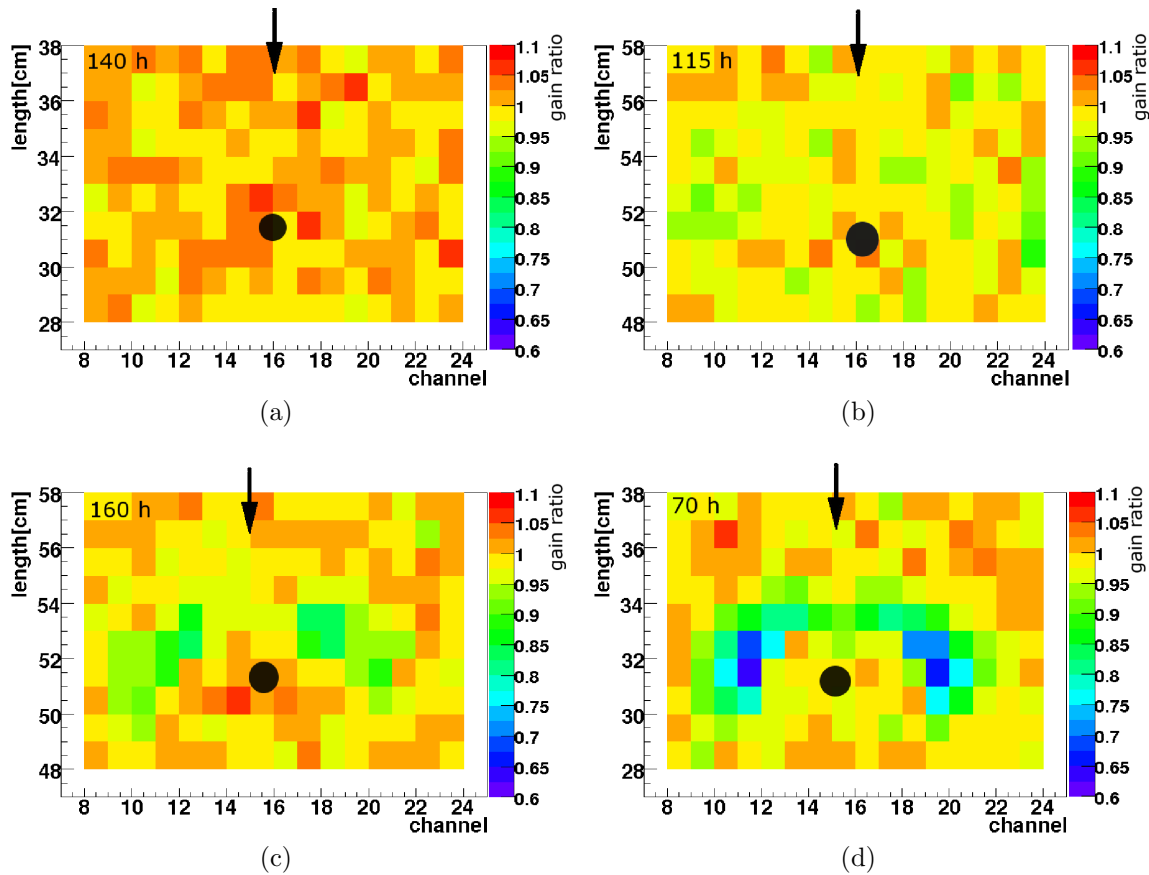


Abbildung 8.26: Ausgastests mit Araldit in der Aluminiumbox vor dem Trabond Modul. In Abb. (a) wurde der Kleber bei 30 °C gehärtet, man sieht nach 140 h (2-8 mC/cm) keine Alterung. Abb. (b) und (c) zeigen die Ergebnisse der Bestrahlung mit einem bei 20 °C gehärteten Araldit. Während nach 115 h (2-7 mC/cm) (b) noch keine Alterung zu sehen ist, erkennt man nach 160 h (2,5-9 mC/cm) (c) deutliche Anzeichen. Auch nach dem Entfernen der Aluminiumbox und dem Beginn einer neuen Bestrahlung altert das Trabond-Modul noch (Abb. (d), 70 h, 1,5-4 mC/cm).

Die Studien mit den Testmodulen ergeben, dass offenbar der Epoxidkleber (Araldit

Modul	Inhalt Aluminiumbox	Bestrahlungs- dauer [h]	akkumulierte Ladung [mC/cm]	Verlust der Gas- verstärkung [%]
Testmodul 3	bei 30 ° C ausgehärteter Araldit mit Quarzmehl	140	2-8	nicht messbar
Testmodul 3	bei 20 ° C ausgehärteter Araldit mit Quarzmehl	115	2-7	nicht messbar
Testmodul 3	bei 20 ° C ausgehärteter Araldit mit Quarzmehl	160	2,5-9	7
Testmodul 3	keine Aluminiumbox	70	1,5-4	18

Tabelle 8.6: *Ausgastest mit Araldit: die Bestrahlung ohne Box wurde durchgeführt, nachdem in vorherigen Tests bereits Alterung bei den Aralditmodulen nachgewiesen wurde.*

A103 + Härter HY 991) ausgast und damit die Alterung verursacht. Möglicherweise war die Temperatur während der Produktion der 5 m-Module zu gering und der Kleber konnte darum nicht vollständig polymerisieren. Um diese These zu überprüfen, werden im Laufe der nächsten Monate nochmals Testmodule bei einer höheren Raumtemperatur produziert und anschließend bestrahlt.

8.8 Zusammenfassung

Die Messungen, die zu einer Beschreibung der Alterung beitragen, sind nochmals in Tabelle 8.7 zusammengefasst.

Eine qualitative Beschreibung der Prozesse bei Alterung ist in der Regel sehr schwer, im vorliegenden Fall wird das ganze noch durch eine Überlagerung verschiedener Effekte zusätzlich erschwert. Da die Alterung in verschiedenen Laboren bei Modulen von allen drei Produktionsstätten gemessen wurde, ist die Ursache des Problems im Modul zu suchen. Verschmutzungen des Gassystems konnten damit ausgeschlossen werden.

Typisch für die hier vorgestellten Messungen ist die Abhängigkeit der Alterung vom Anodenstrom pro Längenheit. Es wird nur ein maximaler Verlust der Gasverstärkung bei Strömen von 3-12 nA/cm gemessen. Da die vorherigen Alterungsstudien darauf ausgelegt waren, eine große Menge an akkumulierter Ladung zu sammeln, wurden die Tests immer bei hohen Beschleunigungsfaktoren im Vergleich zu den erwarteten Werten in LHCb betrieben. Daraus ergaben sich selbst in schwach bestrahlten Bereichen immer Ströme, die deutlich höher als 12 nA/cm waren. Um die Verhinderung der Alterung bei hohen Strömen zu erklären, gibt es verschiedene Thesen.

Test	Modul	Quelle	Gasfluss	Dauer	Resultat
Teilchen-art	63	Strontium- quelle	8 cm/min	280 h	kein Unterschied zwischen β - und γ -Strahler
Fläche	2,5 m-Modul	Röntgen- quelle	4 cm/min	170 h	keine Abhängigkeit von der bestrahlten Fläche
Raten-abhängig- keit	63	2 schwache Eisen- quellen	8 cm/min	70 h– 120 h	keine Alterung bei Strömen > 15 nA/cm, Moleküle transportabel mit einer Lebensdauer von mehreren Minuten
Kleber als Quelle	Araldit-Modul mit Quarzmehl, Araldit-Modul, Trabond-Modul	starke Eisen- quelle	0,3 cm/min	50 h, 90 h, 400 h	Araldit als Ursache identifiziert
Ausgas-test und Trans- port II	Trabond	starke Eisen- quelle	0,6 cm/min	70- 160 h	Araldit verifiziert, Verschmutzung dauerhaft in Modul transportiert (Ablagerung auf Draht)

Tabelle 8.7: Zusammenfassung der wichtigsten Messungen

- Die hohe Teilchendichte am Draht verhindert die Bildung nichtleitender Schichten, die sich sonst auf dem Draht ablagern.
- Die Verschmutzung wird im Gasstrom mittransportiert und die hohen Ströme wirken als Filter, so dass die Partikel danach nicht mehr im Gas vorhanden sind.
- In den stark bestrahlten Bereichen findet eine zweite Reaktion statt. In diesem Bereich entstehen Moleküle, die die Alterung verhindern.

Die erste These kann einfach widerlegt werden. Dieses Verhalten würde nur in den Bereichen auftreten, in denen die Teilchendichte ausreichend hoch ist. Die asymmetrische Form der Alterung und die Abhängigkeit von der Gasflussrichtung widerspricht dem jedoch. Die beiden anderen Theorien sind schwerer zu unterscheiden. Bei beiden ist eine Abhängigkeit der Gasflussrichtung zu erwarten, entweder da aufgrund des Filters keine Verschmutzung mehr vorhanden ist, oder da die hemmenden Moleküle mittransportiert werden. Beide Thesen erklären den halbmondförmigen Bereich, in dem der Verlust der Gasverstärkung auftritt. In den schwächer bestrahlten Straws wirkt der Filter- oder der Produktionsprozess nicht, da die Ströme nicht ausreichend hoch sind und die Alterung tritt für diese Straws im gesamten Bereich der Bestrahlung auf.

Bei beiden Thesen besteht auch die Möglichkeit, dass – in Richtung des Gasflusses – hinter der bestrahlten Position keine Alterung auftritt, da entweder keine Verschmutzung im Gas vorhanden ist oder noch Moleküle existieren, die Alterung verhindern. Ebenso kann nach einer gewissen Wegstrecke die Alterung wieder auftreten, entweder da sich das Gas wieder mit einer Verschmutzung anreichert oder weil die vorhandenen Moleküle reagieren. Anhand der Ergebnisse der Transportstudien (Kap. 8.7.1) kann noch keine der beiden Theorien mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Da der Verlust der Gasverstärkung allerdings wieder zurückkehrt, kommt offensichtlich keine Verschmutzung von außerhalb der Straws. Demzufolge muss sich entweder die Verschmutzung durch Ausgasen im Straw wieder anreichern oder die Alterung hemmenden Moleküle werden über eine längere Strecke transportiert. Gegen die zweite Theorie spricht naiv, dass diese Moleküle wahrscheinlich Radikale wären. Radikale haben eine typische Lebensdauer von 10^{-3} s. Allerdings gibt es auch stabile Radikale mit erheblich längeren Lebensdauern, wie zum Beispiel Ozon, das mehr als 20 min lebt [78].

Aus den Messungen der Alterung in Abhängigkeit der Gasflussgeschwindigkeit (Kap. 8.7.1) ergibt sich jedoch der Schluss, dass bei geringen Gasflussgeschwindigkeiten eine Rückdiffusion von der stark bestrahlten Position stattfindet. Dies favorisiert die Möglichkeit, dass in den stark bestrahlten Regionen des Straws ein zweites Molekül entsteht, welches die Alterung verhindert.

Die Messungen mit den Testmodulen lassen den Schluss zu, dass die Alterung durch ein Ausgasen des Kleber verursacht wird. Bei diesen Molekülen handelt es sich höchstwahrscheinlich um Kohlenwasserstoffverbindungen, die sich aufgrund der Bestrahlung auf dem Anodendraht ablagern und dort nichtleitende Schichten bilden. Es gibt Hinweise, dass der Ausgasungseffekt dadurch hervorgerufen wird, dass der Kleber im Aushärtungsprozess nicht vollständig polymerisiert ist. Die Ursache könnte eine zu geringe Raumtemperatur während der Modulproduktion sein. Die These konnte bisher noch nicht vollständig verifiziert werden, aber in den nächsten Monaten werden weitere Studien durchgeführt.

Während der ersten Messungen der Alterung mit radioaktiven Quellen waren der Mechanismus und die Ursachen völlig unverstanden. Nach mehr als einem Jahr intensiven Studien ergibt sich ein weitgehend konsistentes Bild, das die Effekte erklären kann. Auch wenn noch nicht alle Details gelöst sind, erlaubt die hier vorgestellte Theorie eine Beschreibung der komplexen Vorgänge im Straw. Der Kleber wurde als Ursache der Alterung identifiziert.

Im nächsten Kapitel werden weitere Messungen vorgestellt, die zeigen, wie der Alterungseffekt reduziert werden kann, damit es möglich ist, die Module im LHCb Outer Tracker über längere Zeiträume zu betreiben.

Kapitel 9

Betrieb der Massenproduktionsmodule

Ein Verständnis der Ursachen der Alterung bei niedrigen Raten kann helfen, die Module zu betreiben, aber das Hauptaugenmerk sollte darauf liegen, die Alterung möglichst zu verhindern und den Outer Tracker über einen Zeitraum von mehreren Jahren zu betreiben.

Es wurden unterschiedliche Methoden gefunden, um das Alterungsverhalten der Module zu verbessern. Eine Kombination dieser Methoden sollte einen Betrieb des Outer Tracker im LHCb-Detektor ermöglichen.

Alle in diesem Kapitel folgenden Zahlen für den Verlust der Gasverstärkung wurden nach der in Kapitel 8.3 beschriebenen Methode ermittelt.

9.1 Langzeitspülen der Module

Werden die Verunreinigungen, die Alterung verursachen, durch Ausgasen eines verwendeten Materials (z. B. Kleber) bewirkt, so könnte ein mehrmonatiges Spülen mit Gas die Alterungseigenschaften verbessern, da die Verunreinigungen abtransportiert werden.

Zum Studium dieses Effekts werden mehrere Bestrahlungen, die über einen Zeitraum von einigen Monaten an einem Modul durchgeführt wurden, verglichen. Während dieser Zeit wird das Modul konstant mit Gas gespült. Mit einem Gasfluss von $1 \text{ Vol/h} = 181 \text{ l/h}$ durchfließen dabei jede Woche etwa drei Kubikmeter Gas ein Modul. Zur Untersuchung werden die Ergebnisse der Bestrahlungen eines Moduls gegen die Menge des Gases aufgetragen. Dabei dürfen allerdings nur Messungen direkt verglichen werden, bei denen Gasflussgeschwindigkeit und Bestrahlungsdauer vergleichbar sind. Drei Module (HD63, N3, N2), an denen viele Bestrahlungen durchgeführt wurden, können zum Studium dieses Effekts verwendet werden. In Abb. 9.1 ist der Verlust der Gasverstärkung gegen die Menge des Gases gezeigt. Modul HD63 wurde in Heidelberg bestrahlt, die Studien an den Modulen N2 und N3 wurden am NIKHEF durchgeführt. Fittet man an den Abfall eine Exponentialfunktion, wie in Abb. 9.1 für Modul HD63 gezeigt, ergibt sich für die Module eine Konstante, nach der die Alterung auf den Faktor $1/e$ abgefallen ist. Es ergeben sich die Abfallkonstanten $c_{\text{HD63}} = 18,3 \text{ m}^3$, $c_{\text{N2}} = 22,6 \text{ m}^3$ und $c_{\text{N3}} = 15,7 \text{ m}^3$.

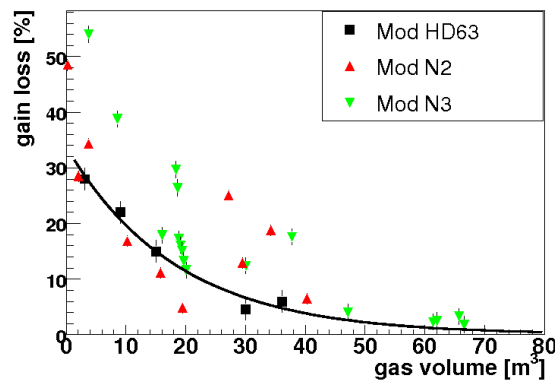


Abbildung 9.1: Konstantes Spülen verringert die Alterung erheblich. Bei den hier gezeigten Messungen sind die anderen Parameter vergleichbar. Der Verlust der Gasverstärkung wurde für ein Modul in Abhängigkeit des durchflossenen Gases untersucht. Ein Fit einer Exponentialfunktion an die Punkte (hier gezeigt für Modul HD63) ergibt eine Abfallkonstante. Gezeigt sind Messungen aus Heidelberg (Mod. HD63) und vom NIKHEF (Mod. N002 und N003).

Aufgrund dieser Messungen werden ab Dezember 2006 alle für den Einbau im LHCb-Detektor geplanten Module permanent gespült. Wenn das Experiment anläuft, wird jedes Modul bereits über eine Zeitdauer von mehr als einem Jahr von Gas durchflossen sein. Bei einem Gasaustausch von 1 Vol/h wird die Alterung unter Annahme eines exponentiellen Abfalls selbst für die schlechteste Abschwächungskonstante ($c_{N_2} = 22,6 \text{ m}^3$) bereits deutlich gesunken sein.

9.2 Erwärmen von Modulen

Sollte es sich bei den Verunreinigungen um Ausgasungen handeln, kann ein Erwärmen der Module bei gleichzeitigem Spülen den Prozess beschleunigen.

Eine weitere Hypothese ist, dass die Ausgasung durch nicht vollständig polymerisierten Kleber verursacht wird. Möglicherweise hat die Erwärmung auch einen positiven Einfluss auf den Kleber.

9.2.1 Modulverhalten nach Erwärmung

Die Outer Tracker Module bestehen aus unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, die fest miteinander verbunden sind. Darum dürfen sie nicht zu stark erwärmt werden, um mechanische Spannungen zu vermeiden. Diese Spannungen können Gasundichtigkeiten oder Dunkelströme aufgrund von Effekten an Klebestellen verursachen. Außerdem ist eine Änderung der Gasverstärkung möglich. Dehnt sich das Modul mit den darauf festgeklebten Straws bei Erwärmung ungleichmäßig aus, befinden sich die Drähte nicht mehr in der Mitte des Straws, das elektrische Feld ist nicht mehr radialsymmetrisch, was einen starken Einfluss auf die Gasverstärkung hat [66].

Um den Einfluss der erhöhten Temperatur auf die Eigenschaften der Module zu untersuchen, wurden bei einem auf 45 °C erwärmten Module (HD7) eine Reihe von Qualitätstests sowohl vor als auch nach der Erwärmung durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Gemessen wurden

- Gasdichtigkeit,
- Dunkelströme,
- Gasverstärkung in Abhängigkeit der Modulposition,
- Längenänderung.

Für zwei Module (HD7, HD20) wurde die Gasdichtigkeit nach der Erwärmung gemessen und mit den Daten aus der Produktion verglichen. Bei einem wurde ebenfalls die Gasdichtigkeit vor der Erwärmung bestimmt (HD7). Um die Gasdichtigkeit zu bestimmen, wird im Modul ein Überdruck von etwa 5 mbar erzeugt und die Zeitdauer des Druckabfalls gemessen. Tabelle 9.1 zeigt die Ergebnisse. Da während der Produktion und beim Nachtest unterschiedliche Systeme genutzt wurden, um die Gasdichtigkeit zu bestimmen, unterscheiden sich die Ergebnisse leicht. Innerhalb der Messgenauigkeit von ± 1 mbar/min konnte keine Abnahme der Gasdichtigkeit nachgewiesen werden.

Modul Nr.	7	20
Druckabfall bei Produktion [mbar/min]	0,6	0,4
Druckabfall vor Erwärmung [mbar/min]	0,5	–
Druckabfall nach Erwärmung [mbar/min]	0,5	0,3

Tabelle 9.1: *Die Gasdichtigkeit der Module hat sich aufgrund der Erwärmung nicht verschlechtert. Die Messgenauigkeit beträgt 1 mbar/min*

Die Ströme wurden bei einem Modul (HD7) für alle 256 Kanäle sowohl vor als auch nach dem Erwärmen bei einer Spannung von 1550 V gemessen. Signifikante Dunkelströme beim Outer Tracker sind >100 nA/Straw. Bei keiner der beiden Messungen wurde ein Anodenstrom gemessen, der größer als 1 nA/Straw war. Die Erwärmung bewirkt also keine signifikanten Dunkelströme.

Um eine mögliche Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der Strawposition zu messen, wurde diese an jeweils zwei Positionen zwischen den Drahtpositionierern für alle 64 Kanäle sowohl vor der Erwärmung als auch danach bestimmt. Es ergeben sich sechs Messpunkte für einen 2,5 m langen Straw. Sollte sich das Modul dauerhaft verformt haben und die Drähte nicht mehr an ihrer nominellen Position im Mittelpunkt des Straws sein, ist das an der Gasverstärkung deutlich erkennbar [66]. In Abb. 9.2 ist das Ergebnis der Messung gezeigt. Es wurde ein ein Zentimeter breiter Streifen vermessen, zur Übersichtlichkeit wurde der Streifen in dieser Abbildung vergrößert. Gezeigt ist das

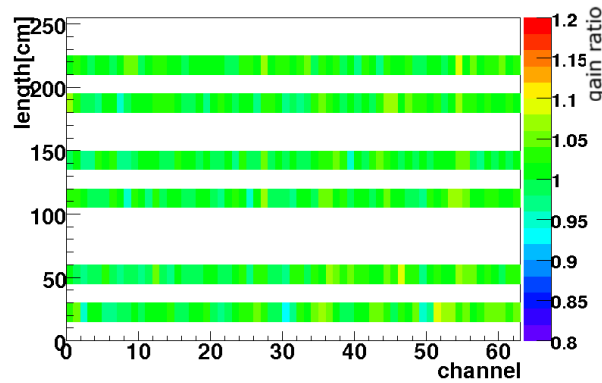


Abbildung 9.2: Variation der Gasverstärkung entlang eines Straws. Die Messungen nach der Erwärmung wurden auf die Messungen vorher normiert. Es wurde immer ein ein Zentimeter breiter Streifen gemessen, der hier zur Übersichtlichkeit vergrößert wurde. Es ergeben sich innerhalb der Messgenauigkeit ($\pm 2,5\%$) keine Änderungen der Gasverstärkung.

Verhältnis der Gasverstärkung des erwärmten Moduls zu der des nicht erwärmten Moduls. Innerhalb der Messgenauigkeit von $\pm 2,5\%$ ist entlang der Straws keine Variation sichtbar.

Ebenfalls wurde die Länge des Moduls bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und bei $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Es wurde festgestellt, dass das Modul bei einer Temperatur von $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ etwa 1 mm kürzer ist als bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieser Effekt wurde bereits zuvor beobachtet [28]. Das Rohacel, aus dem die Außenseiten des Modul bestehen, bindet Wasser. Bei höherer Temperatur verdunstet dieses Wasser und die Paneele schrumpfen. Auch nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur bleiben die Module zuerst kürzer, da das Rohacel die Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum wieder aufnimmt. Da dieser Effekt offenbar keinen Einfluss auf das Modulverhalten hat, wie man an der Gasverstärkung entlang der Straws sehen kann, ist er nicht kritisch.

Am NIKHEF wurden weitere, direkte Messungen zur Verformung der Module durchgeführt. Es wurden die Ebenheit und die Breite der Module untersucht [79]. Auch diese Messungen ergaben keinen nachweisbaren Effekt aufgrund der Erwärmung.

9.2.2 Erwärmung mit Heizdecken

Zur Erwärmung der Module werden vier handelsübliche elektrische Wärmeunterdecken verwendet, die leicht modifiziert wurden. Die Modifikationen sollen einen Dauerbetrieb ermöglichen und erlauben, dass alle Decken gemeinsam mit einer Kontrolle reguliert werden.

Da in diese Decken Heizdrähte eingebaut sind, an welchen eine höhere Temperatur herrscht und somit nicht überall eine konstante Temperaturverteilung gewährleistet ist, wird ein Modul zuerst mit dünnen Aluminiumplatten ($300\text{ }\mu\text{m}$) verkleidet, die die Wärme gleichmäßig verteilen sollen. Danach wird es in die Heizdecken eingepackt. Zur Isolation wird es zusätzlich in eine Luftpolsterfolie gewickelt. Abb. 9.3 zeigt die einzelnen Schritte.

Zur Temperaturregelung werden alle vier Decken an ein Kontrollgerät mit vier Temperatursensoren angeschlossen. Dieses Gerät regelt zum einen gleichzeitig die Temperatur aller vier Decken, um eine gleichmäßige Verteilung zu ermöglichen und dient andererseits als Notfallsystem, falls die Temperatur zu stark ansteigt. Bei einer Temperatur von 50 °C wird der Strom automatisch abgeschaltet. Zur Temperaturmessung wurden drei weitere Sensoren verwendet.

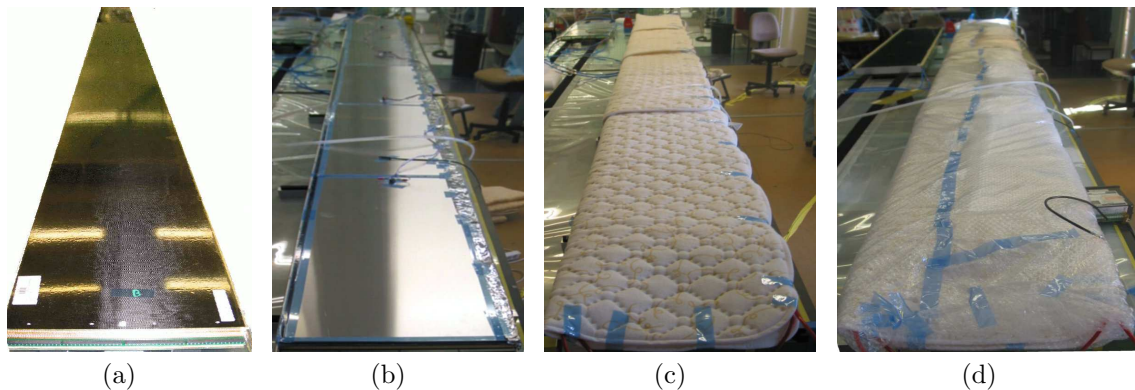


Abbildung 9.3: Ein 5m-Modul (a) wird erst mit dünnen Aluminiumplatten verkleidet (b), bevor es in die Wärmedecken eingepackt (c) und mit Luftpolsterfolie isoliert wird (d).

9.2.3 Einfluss der Erwärmung auf die Alterung

Mehrere Module wurden mit dem hier gezeigten Aufbau erwärmt. Dabei wurde immer dieselbe Prozedur angewandt. Ein neues, bisher noch nicht bestrahltes Modul wurde für mehrere Tage gespült und dann mit den beiden schwachen Eisenquellen (Kap. 8.5) bestrahlt, um eine Referenz für die Alterung des Moduls vor der Erwärmung zu erhalten. Für diese Messungen wurden immer zwei Bestrahlungen gleichzeitig durchgeführt. Damit wurde die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Messung erhöht (Kap. 8.4.2). Nach dem Einpacken wurde das Modul für 10-12 Tage auf 40-45 °C erwärmt. Während dieser Zeit wurde es ständig mit CO₂ mit einem Fluss von 1 Vol/h gespült. Nach einer Abkühlungsphase und dem Wechsel zum Driftgas (1-2 Tage) wurde eine neue Bestrahlung mit den beiden schwachen Eisenquellen begonnen.

Das erste auf diese Weise behandelte Modul ist HD20. Der Vergleich vor und nach der Erwärmung jeweils für eine Bestrahlungsdauer von etwa 200 h ist in Abb. 9.4 gezeigt. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen der Alterung vor der Erwärmung (Abb. 9.4(a)) und danach (Abb. 9.4(b)). Um das Ergebnis zu verifizieren, wurde die Prozedur mit einem zweiten Modul (HD7) wiederholt. Auch dieses Modul zeigt nach der Erwärmung eine erhebliche Verbesserung. Die Ergebnisse der Bestrahlungen vor und nach der Erwärmung sind in Abb. 9.5 gezeigt. Auch hier hat sich das Modulverhalten verbessert, sogar in einem stärkeren Ausmaß als Modul HD20. In Tabelle 9.2 ist der gemessene Verlust der Gasverstärkung vor und nach dem Erwärmen angegeben.

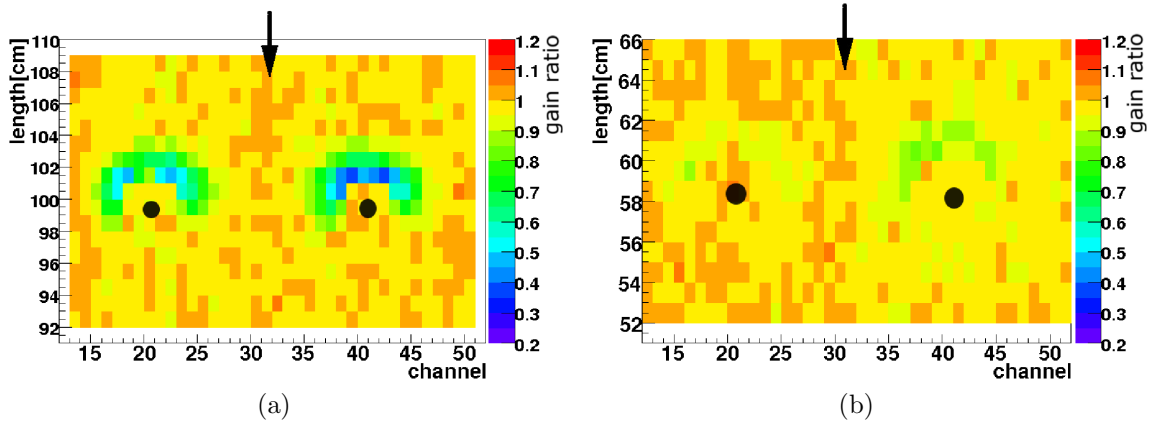


Abbildung 9.4: Nach der Erwärmung für zehn Tage bei etwa 40°C altert das Modul HD20 (b, 230 h, 3-12 mC/cm) deutlich weniger als zuvor (a, 220 h, 3-12 mC/cm).

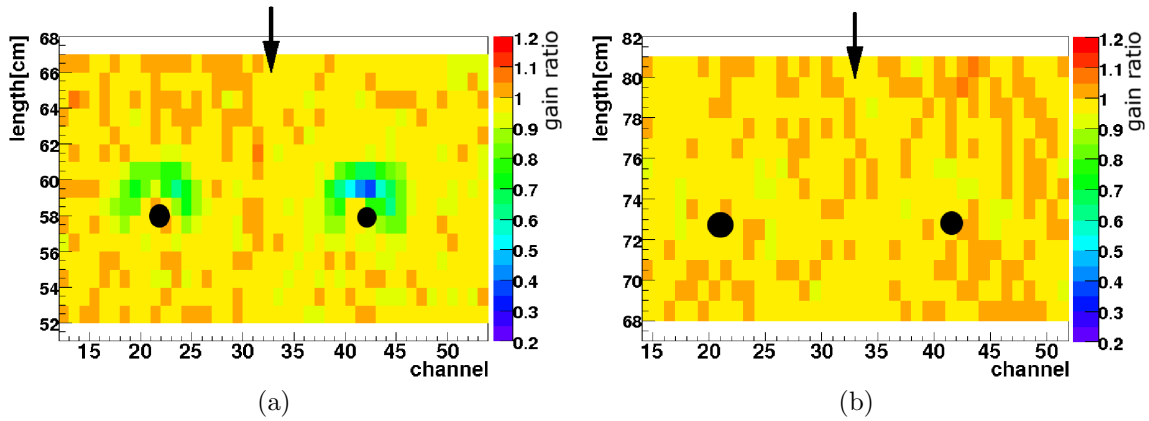


Abbildung 9.5: Nach der Erwärmung für zehn Tage bei etwa 40°C altert das Modul HD7 (b, 180 h, 2,5-10 mC/cm) deutlich weniger als zuvor (a, 160 h, 2,5-9 mC/cm).

Es stellt sich die Frage, ob diese Verbesserung von der Erwärmung des Moduls kommt oder möglicherweise ein alleiniger Effekt des konstanten Spülens während der 10-12 Tage ist. Zum Vergleich werden die Datenpunkte gegen die Menge des durchflossenen Gases aufgetragen (Abb. 9.6), ebenso die Messungen eines Moduls, dass nur gespült wurde. Die Datenpunkte werden ebenso wie bereits bei den gespülten Modulen mit einer Exponentialfunktion gefittet. Die Ergebnisse der Fits sind ebenfalls in der Abbildung gezeigt. Es ergibt sich $c_{\text{HD20}}=5,5 \text{ m}^3$ für Modul HD20 und $c_{\text{HD7}}=3,7 \text{ m}^3$ für Modul 7. Diese Resultate sind nicht allein durch Spülen erklärbar ($c_{\text{Spülen}}=(18\pm3) \text{ m}^3$). Die Erwärmung auf 40°C trägt dazu bei, das Modulverhalten zu verbessern.

Aufgrund dieser Messungen wurde überlegt, alle Outer Tracker Module auf 40°C zu erwärmen. Da zum Zeitpunkt der Diskussion ein großer Teil des Outer Trackers schon im LHCb-Detektor eingebaut war oder sich gerade im Einbau befand, was die Anbringung

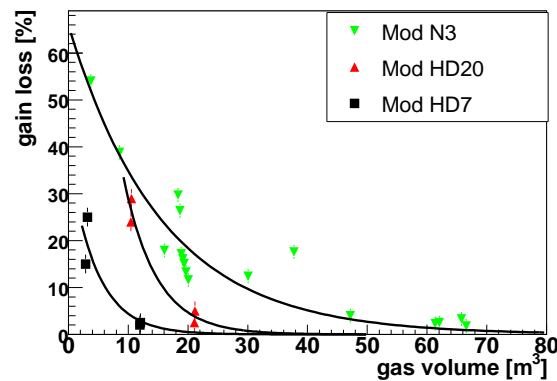


Abbildung 9.6: Vergleich erwärmter und gespülter Module: Es ist der Verlust der Gasverstärkung gegen das Volumen des gespülten Gases aufgetragen. Wie der Exponentialfit zeigt, sind die Ergebnisse der erwärmten Module (HD20 und HD7) nicht allein durch Spülen (N3) erklärbar.

von Wärmedecken erheblich erschwert, wurden die Messungen mit weiteren Modulen wiederholt. Dies geschah, da Messungen am NIKHEF widersprüchliche Ergebnisse im Bezug auf das Erwärmen der Module ergaben. Die Ergebnisse aller in Heidelberg durchgeführten Messungen sind in Tabelle 9.2 gezeigt. Modul N058 wurde bereits am NIKHEF einmal erwärmt, bevor nach Heidelberg versendet wurde. Modul HD29 wurde bereits mit einem Prototypen der speziell für den Einbau in LHCb produzierten Decken erwärmt. Wie man sieht, zeigen alle Module nach dem Erwärmen weniger Alterung als zuvor. Allerdings ist bei manchen Modulen der Effekt deutlicher. Es wurden Verbesserungsfaktoren von 1,5 bis 8 gemessen. Insbesondere die Warschau Module zeigen nur eine geringe Verbesserung.

Die Kombination von langandauerndem Spülen und Erwärmen reduziert die Alterung der Module deutlich. Dies bestätigt die Hypothese, dass die Alterung durch Ausgasung hervorgerufen wird. Um die Alterung der Module bis zum Start von LHCb möglichst stark zu reduzieren, wurde sich entschlossen, sämtliche Outer Tracker Module zu erwärmen.

9.3 Änderung der Driftgasmischung

Eine mögliche Abhängigkeit der Alterung der Module besteht in der Zählgasmischung. Insbesondere radikalbildende Zusätze können Ablagerungen verhindern oder abätzen. Bei den Driftkammern des CDF-Experiments wurde durch Zugabe von geringen Mengen Sauerstoff (100 ppm) die Gasverstärkung in gealterten Modulen wieder verbessert [2].

Aus diesem Grund wurden Alterungsstudien mit verschiedenen radikalbildenden Zusätzen in der Driftgasmischung durchgeführt. Als mögliche Beimischungen wurden Sauerstoff und Tetrafluormethan gewählt. Um bessere Rückschlüsse aus den Alterungen ziehen zu können, wurden während aller Tests wieder 2 Quellen gleichzeitig verwendet. Die Tests wurden in kurzen zeitlichen Abständen an einem Modul durchgeführt, so dass eine

	Vor Erwärmung: Verlust der Gasverstärkung [%]			Nach Erwärmung: Verlust der Gasverstärkung [%]		
Modul Nr.	Bestrahlungsdauer [h]	Position 1	Position 2	Bestrahlungsdauer [h]	Position 1	Position 2
HD20	220	28	40	230	4	8
HD7	160	16	29	186	2	3
HD27	44	4	4	340	5	5
HD29	90	12	8	112	<2,5 %	<2,5 %
N123	115	62	64	110	8	8
N005	43	36	34	45	8	9
N058	96	3	4	323	3	4
W023	96	37	13	90	23	10
S1L	46	50	50	47	30	18

Tabelle 9.2: Erwärmung der Module: Bei allen Modulen hat sich eine Verbesserung des Modulverhaltens nach dem Erwärmen gezeigt. Modul N058 wurde bereits am NIKHEF einmal erwärmt, bevor die Prozedur in Heidelberg wiederholt wurde. Der Fehler einer Messung beträgt $\pm 2,5$ %.

Verbesserung des Modulverhaltens aufgrund des Spülens vernachlässigbar ist.

9.3.1 Ar/CO₂/O₂

Eine mögliche radikalbildende Beimischung ist Sauerstoff. Der Nachteil von Sauerstoff ist, dass er die Elektronen aus dem Gasverstärkungsprozess einfängt (Attachment, Kap. 3.1.3). Darum kann nur ein geringer Prozentsatz an Sauerstoff dem Driftgas beigemischt werden, ohne zuviel an Signalthöhe zu verlieren. Es wurde eine Mischung von Ar/CO₂/O₂ (70 %:27,5 %:2,5 %) gewählt. Vor der eigentlichen Bestrahlung wurde die Gasverstärkung für dieses Driftgas in Abhängigkeit der Hochspannung untersucht sowie die Eisenspektren mit denen von reinem Ar/CO₂ verglichen. Diese Messungen ergaben, dass die Bestrahlung bei beiden Driftgasmischungen mit der gleichen Hochspannung durchgeführt werden kann. Der Unterschied in der Gasverstärkung beträgt etwa 5 % [80] und ist damit für diese Messungen nicht signifikant.

Es wurden für die beiden Driftgasmischungen Ar/CO₂ und Ar/CO₂/O₂ jeweils zwei Bestrahlungen mit den beiden schwachen Eisenquellen durchgeführt. Die Bestrahlungen wurden am selben Modul (S1L) durchgeführt. Die Ergebnisse nach einer Bestrahlungsdauer von etwa 90 h sind sowohl für Ar/CO₂ als auch für Ar/CO₂/O₂ in Abbildung 9.7 gezeigt. Der fehlende Kanal wurde aufgrund hoher Dunkelströme von der Hochspannungsversorgung getrennt, man erwartet dort also kein Signal. In Tabelle 9.3 sind die

Ergebnisse der Analyse für eine Bestrahlungsdauer von 45 h und 90 h gezeigt. Wie man sieht, reduziert der Sauerstoff in der Driftgasmischung den Verlust der Gasverstärkung etwa um einen Faktor 2. Mögliche Sauerstoff- oder Ozonradikale reagieren offenbar mit den Molekülen, die die Alterung verursachen und verhindern so Ablagerungen auf dem Draht.

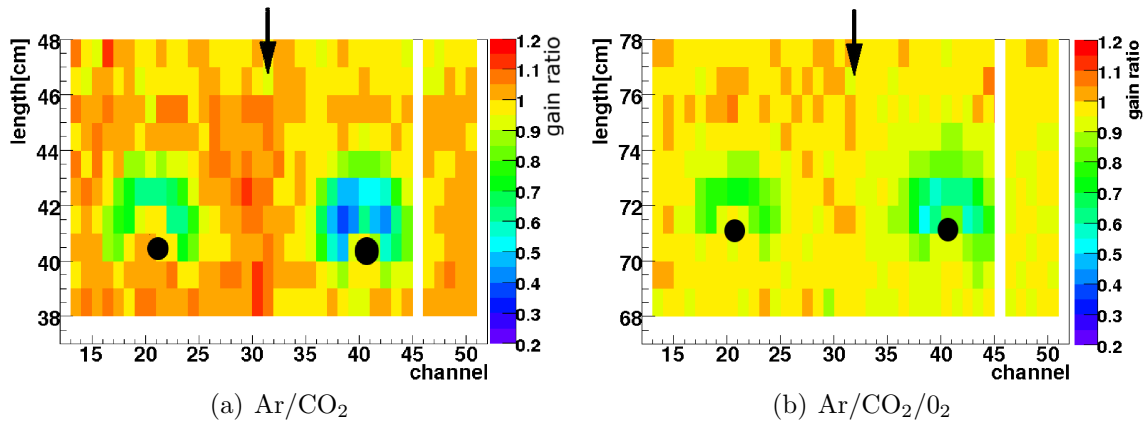


Abbildung 9.7: (a) Ein Modul (S1L, 90 h, 2-6 mC/cm) mit der Standarddriftgasmischung altert deutlich stärker als ein (b) Modul (S1L, 90 h, 2-6 mC/cm) mit Sauerstoff in der Driftgasmischung (Ar/CO₂/O₂ 70 %:27,5 %:2,5 %). Der fehlende Kanal wurde aufgrund hoher Dunkelströme von der Hochspannungsversorgung getrennt (Modul S1L).

Bestrahlungsdauer [h]	Verlust Gasverstärkung			
	Ar/CO ₂		Ar/CO ₂ /O ₂	
	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
45	22 %	32 %	8 %	13 %
90	30 %	42 %	17 %	28 %

Tabelle 9.3: Beimischung von Sauerstoff zur Driftgasmischung: Der Zusatz von Sauerstoff reduziert die Alterung etwa um einen Faktor 2. Der Fehler einer Messung beträgt $\pm 2,5$ %.

9.3.2 Ar/CO₂/CF₄

Eine weitere mögliche Beimischung zur Driftgasmischung ist Tetrafluormethan. Tetrafluormethan galt lange als entscheidend für den sicheren Betrieb von Gasdetektoren, das die freien Radikale, die bei diesem Molekül im Bereich der Ladungslawine entstehen, Ablagerungen verhindern sollen. Auch für den Outer Tracker war Ar/CO₂/CF₄ (75 %/10 %/15 %)

ursprünglich als Driftgasmischung vorgesehen, wurde jedoch verworfen (Kap. 5.5), da Drahtätzungen beobachtet wurden.

Die Messungen mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$ wurden am gleichen Modul (S1L) wie bereits die Messungen mit Ar/CO_2 und $\text{Ar}/\text{CO}_2\text{O}_2$ durchgeführt. Die Resultate wurden wieder mit dem Ergebnis der Bestrahlung mit Ar/CO_2 verglichen. Die Ergebnisse der beiden Bestrahlungen nach einer Dauer von jeweils 90 h sind in Abb. 9.8 zu sehen. Der fehlende Kanal wurde aufgrund hoher Dunkelströme von der Hochspannungsversorgung getrennt, man erwartet dort also kein Signal.

Tabelle 9.4 zeigt das Ergebnis der Analyse der Alterung für beide Bestrahlungen. Hier ist ebenfalls klar zu erkennen, dass es keine Verbesserung aufgrund der geänderten Driftgasmischung gibt. Die Beimischung von Tetrafluormethan hat im Gegensatz zu Sauerstoff offenbar keinen Einfluss auf die Alterung. Offenbar sind die hier entstehenden Radikale nicht in der Lage, mit den Molekülen, die die Alterung verursachen, zu reagieren.

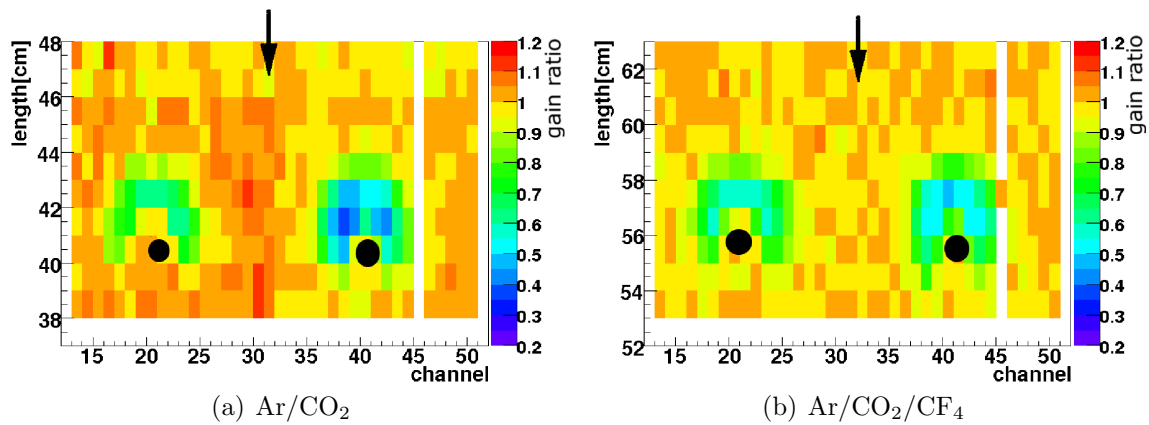


Abbildung 9.8: (a) Kontrollmessung mit der Standarddriftgasmischung Ar/CO_2 . (b) Bestrahlung mit $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$. Beide Scans wurden nach 90 h (2–6 mC/cm) Bestrahlung unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Es ist kein Unterschied zwischen den beiden Gasmischungen zu erkennen. Der fehlende Kanal wurde aufgrund hoher Dunkelströme von der Hochspannungsversorgung getrennt (Modul S1L).

9.4 Konditionierung mit hohen Anodenströmen

Wie in Kap. 8.6.3 gezeigt wurde, ist es durch eine Behandlung mit hohen Anodenströmen möglich, an einer bestrahlten und gealterten Stelle wieder die ursprüngliche Gasverstärkung zu messen. Um hohe Anodenströme zu erreichen gibt es verschiedene Möglichkeiten: eine hohe Teilchenrate pro Strahlänge induziert hohe Ströme. Die nötigen Ströme müssen aber nicht durch Strahlung erreicht werden, auch hohe Spannungen ermöglichen es, die nötigen Werte zu erreichen. Die Spannungen werden so hoch gewählt, dass Dunkelströme durch Funkenentladungen auftreten, es ist also keine Quelle

	Verlust Gasverstärkung			
Bestrahlungsdauer [h]	Ar/CO ₂		Ar/CO ₂ /CF ₄	
	Position 1	Position 2	Position 1	Position 2
45	22 %	32 %	22 %	30 %
90	30 %	42 %	32 %	37 %

Tabelle 9.4: Beimischung von Tetrafluormethan zur Driftgasmischung: Der Zusatz von Tetrafluormethan hat keinen Einfluss auf die Stärke der Alterung. Der Fehler einer Messung beträgt $\pm 2,5\%$.

nötig. Dabei gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: die Verwendung von positiver und negativer Spannung am Anodendraht.

9.4.1 Hohe Anodentröme durch Bestrahlung

Wie bereit bei der Bestrahlung eines 2,5 m-Moduls in der Röntgenanlage (Kap. 8.6.3) gezeigt werden konnte, ist es möglich, ein bestrahltes Areal durch hohe Anodenströme, die durch hohe Teilchenraten bewirkt werden, wieder in den anfängliche Zustand zurück zu führen. Die Messung ist nochmals in Abb. 9.9 zu sehen. Vor dem Test im Röntgenbunker wurde eine Bestrahlung des Moduls mit einer Quelle durchgeführt (Abb. 9.9(a)), die Schädigung ist deutlich sichtbar. Während der folgenden großflächigen Bestrahlung betrugen der Anodenstrom in dieser Region etwa 70 nA/cm. Beim Scan nach dieser Bestrahlung konnte der Verlust der Gasverstärkung in dieser Region nicht mehr nachgewiesen werden (Abb. 9.9(b)).

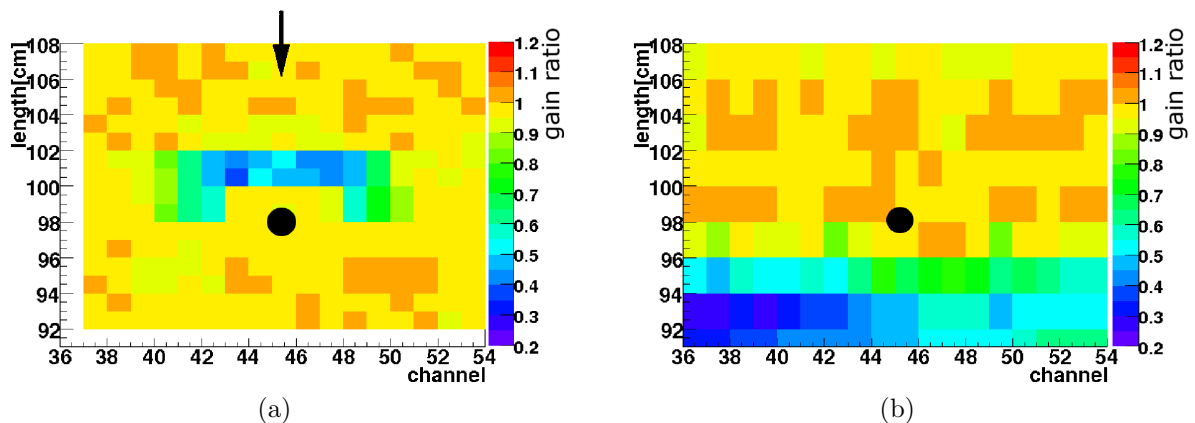


Abbildung 9.9: Die Stelle, die vor der Bestrahlung (58h, 1-4 mC/cm) in der Röntgenanlage Alterung zeigte (a) ist nach dem Test nicht mehr nachweisbar (b). Der Verlust bei 92-96 cm stammt von der Bestrahlung in der Röntgenanlage (siehe Abb. 8.18).

Eine weitere Studie mit hohen Teilchenraten wurde mit der starken Eisenquelle durchgeführt. Nach einer ersten Bestrahlung, deren Resultat die typische halbmondförmige Schädigung war, wurde eine zweite Bestrahlung mit der um 2 cm verschobenen Quelle begonnen. Nun befand sich die Stelle der stärksten Bestrahlung auf der Position des größten Verlusts der Gasverstärkung der vorherigen Bestrahlung. Zusätzlich wurde der Gasfluss umgedreht. Abb. 9.10(a) zeigt den Aufbau der beiden Bestrahlungen. Abb. 9.10(b) zeigt das Resultat der ersten Bestrahlung (Modul HD52, 50 h, 1-3 mC/cm). Danach wurde die Quelle verschoben und eine neue Bestrahlung begonnen (Abb. 9.10(c), Modul HD52, 60 h, 1-4 mC/cm). Man erkennt klar die neue halbmondförmige Abnahme der Gasverstärkung sowie die Alterung aufgrund der ersten Bestrahlung. Direkt unterhalb der Quelle betrugen die Ströme während der zweiten Bestrahlung 20-25 nA/cm. In diesem Bereich ist der Verlust der Gasverstärkung, der von der ersten Bestrahlung stammt, nicht mehr nachweisbar.

Offenbar ist es mit hohen Anodenströmen möglich, die Ablagerungen, die nach den Bestrahlungen auf dem Draht gefunden wurden (Kap. 8.2) zu entfernen, und so die Gasverstärkung wieder zu verbessern. Wie die zweite Studie zeigt, sind etwa 20-25 nA/cm ausreichend, um diese Verbesserung zu erzielen.

9.4.2 Training mit negativer Hochspannung

Die Behandlung sowohl mit negativer als auch mit positiver Spannung (HV-Training) fand ohne radioaktive Quelle statt. Bei den hier angegebenen Anodenströmen handelt es sich demzufolge um Dunkelströme. Beim Betrieb mit negativer Spannung werden die Ionen zum Anodendraht beschleunigt. Erhöht man die Spannung auf mehr als -1100 V steigt der Anodenstrom sprunghaft an und das Verhalten des Moduls ist sehr schwer vorherzusagen.

Es wurde mit dem HV-Training einen einzelnen Kanals begonnen. Bei einem Betrieb mit negativer Hochspannung setzen die Ströme bei einer Schwelle sehr plötzlich ein und steigen bei einer Änderung von 10-20 V auf mehrere Mikroampere pro Straw. Dieser Anodenstrom zeigt auch über eine Dauer von mehreren Tagen keinen Abfall auf einen konstanten Wert, sondern bleibt im Mittel sehr hoch, zeigt dabei aber Schwankungen zwischen 100 nA/Straw und mehrere μ A/Straw in Zeitintervallen von einigen Sekunden. In Abbildung 9.11 ist der Anodenstrom bei konstanter Spannung für zwei Straws über einen Zeitraum von einem Tag gezeigt. Zur Übersichtlichkeit wurden die Werte des zweiten Kanals invertiert, so dass man beide Verläufe sehen kann. Es wurden beide Straws mit der gleichen Spannung versorgt, die Stromauslese erfolgte getrennt. Die Abbildung zeigt zwei Effekte, die bei dem Betrieb mit negativer Anodenspannung auftreten: Zum einen erkennt man sehr große Schwankungen der Anodenströme. Außerdem sieht man, dass die Ströme in den beiden Straws sehr unterschiedlich sind, obwohl die gleiche Spannung anliegt. Das macht den Betrieb mehrerer Module mit einer einzigen Hochspannungsversorgung sehr schwierig.

Nacheinander wurden mehrere Kanäle des in der Röntgenanlage bestrahlten und geschädigten Moduls (Kap. 8.6.3) trainiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9.12 gezeigt. Es wurde nochmals der Bereich vermessen, der aufgrund der großflächigen Bestrahlung einen Verlust der Gasverstärkung gezeigt hatte. Man erkennt, dass die trainierten

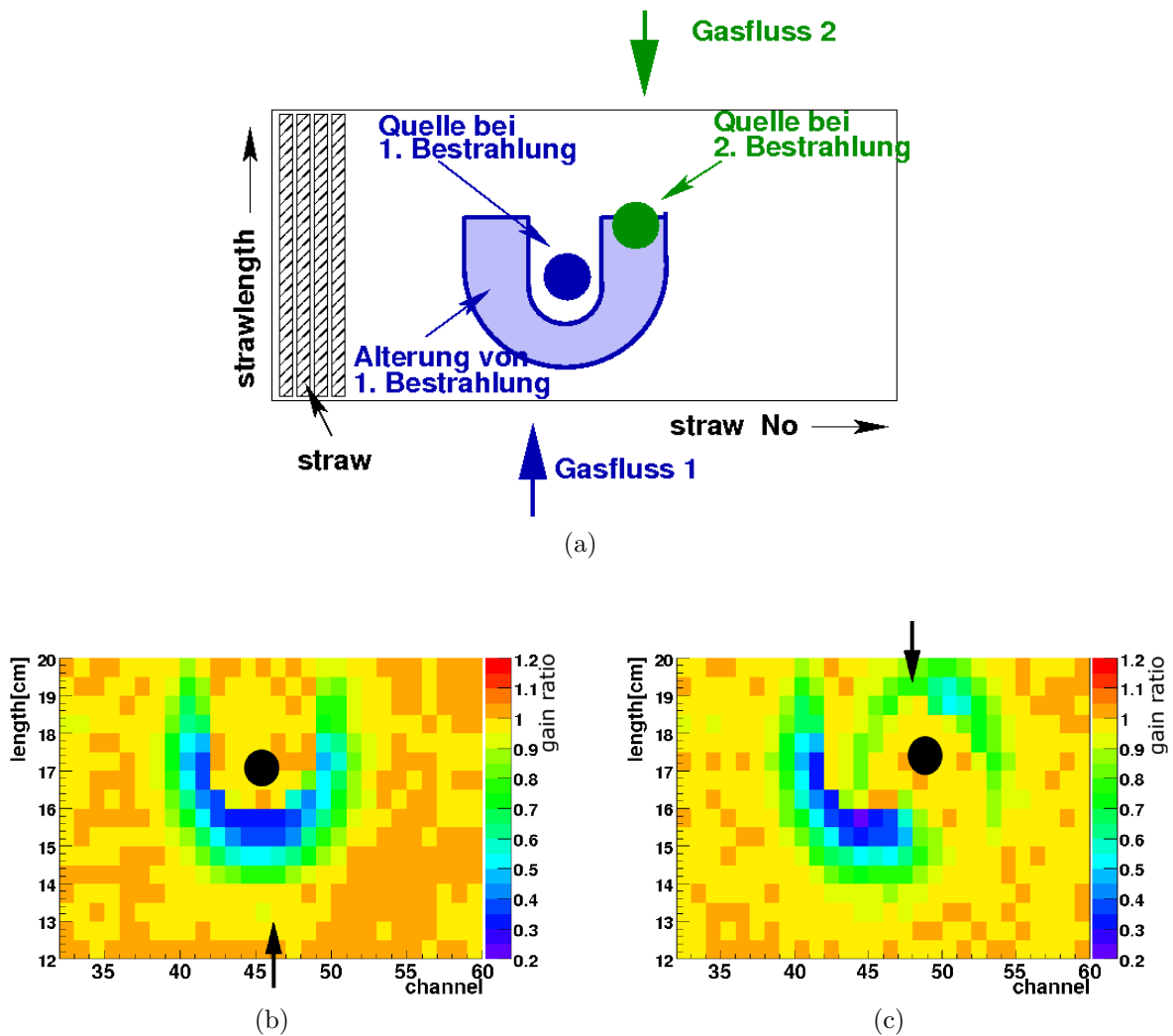


Abbildung 9.10: (a) Test mit hohen Strömen mit der starken Eisenquelle: nach der ersten Bestrahlung (blau) wird die Quelle für eine zweite Bestrahlung (grün), die im Anschluss durchgeführt wird, verschoben, so dass die Region mit dem größten Abnahme der Gasverstärkung den größten Anodenstrom sieht. Zusätzlich wurde die Gasflussrichtung umgedreht. Die Straws links im Bild deuten die Ausrichtung des Moduls an. (b) zeigt das Ergebnis der ersten Bestrahlung (Mod. HD52, 50 h, 1-3 mC/cm), in Abb. (c) sieht man das Ergebnis der zweiten Bestrahlung. In dem Bereich mit dem höchsten Anodenstrom hat sich die Gasverstärkung wieder verbessert.

Kanäle (rot gekennzeichnet) wieder die ursprüngliche Gasverstärkung haben (vergleiche Abb. 8.18).

Im nächsten Schritt wurde ein Bereich des Moduls bestrahlt, in welchem sich auch mit negativer Hochspannung behandelten Drähte¹ befanden. Es wurde untersucht, ob sich deren Verhalten unter Bestrahlung verändert hat. Abb. 9.13 zeigt das Ergebnis nach

¹Trainingsdauer >20 h, Anodenstrom >1 μ A/Straw.

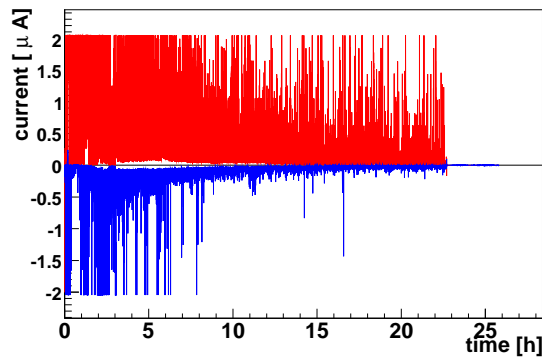


Abbildung 9.11: Anodenströme während des HV-Trainings mit negativer Anodenspannung für zwei Kanäle. Zur Übersichtlichkeit wurden die Werte eines Kanals invertiert, so dass man beide Verläufe sehen kann. Der maximal messbare Anodenstrom beträgt hier $2\mu\text{A}$. Obwohl an beiden Straws dieselbe Spannung anliegt, fällt der Anodenstrom in einem Kanal ab, während er im anderen sehr hoch bleibt. In beiden Kanälen gibt es immer wieder Stromspitzen.

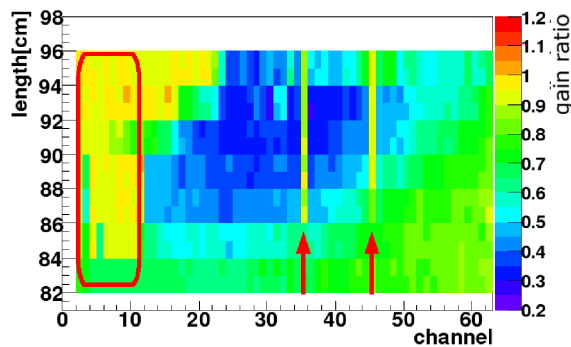


Abbildung 9.12: Beim HV-Training eines im Röntgenbucker geschädigten Moduls (Modul S1U) wurden einzelne Kanäle mit negativer Hochspannung betrieben. Man sieht in den rot gekennzeichneten Bereichen, dass die Gasverstärkung durch das HV-Training den ursprünglichen Wert wieder angenommen hat (vergleiche Abb. 8.18).

einer Bestrahlungsdauer von 400 h ($6\text{--}22\text{ mC/cm}$). Der rote Pfeil markiert den trainierten Straw. Man sieht keinen Unterschied zu den untrainierten Straws, die Alterung ist vergleichbar stark.

Auch bei der Behandlung mit negativer Hochspannung ist es möglich, in einem bestrahlten und geschädigten Bereich die ursprüngliche Hochspannung wieder zu erreichen. Dieses Resultat stimmt mit dem Ergebnis in Kap. 9.4.1 überein. Mit dieser Behandlung war es allerdings nicht möglich, das Verhalten noch nicht bestrahlter Straws zu verbessern. Ein Straw, der mit HV-Training behandelt wurde, zeigt bei einer Bestrahlung das gleich Verhalten wie ein untrainierter Straw. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass sich

vor der Bestrahlung noch keine Ablagerungen auf dem Draht befinden.

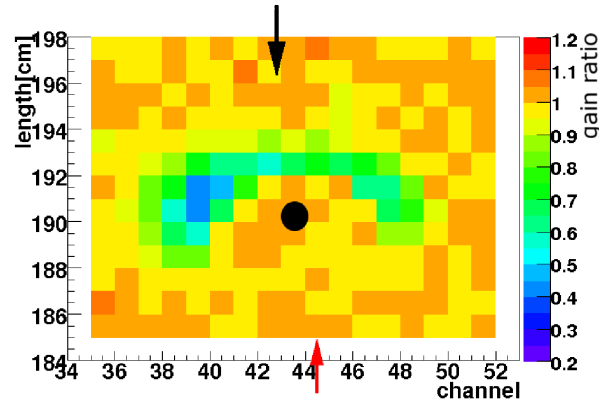


Abbildung 9.13: *Bestrahlung eines Moduls nach Konditionierung mit negativer Spannung (Modul S1U, 400h, 6-22 mC/cm): der rote Pfeil zeigt den trainierten Straw. Wie man sieht, zeigt dieser Kanal die gleiche Alterung wie die nicht trainierten Kanäle.*

9.4.3 Training mit positiver Hochspannung

Erhöht man die positive Hochspannung über den nominellen Wert, während das Modul mit Driftgas gespült wird, werden ab ungefähr 1850 V große Ströme im Bereich von mehreren $\mu\text{A}/\text{Straw}$ gemessen. Diese Konditionierungsmethode wurde für die Outer Tracker Module erstmals am NIKHEF getestet und etabliert [81]. Die Module wurden für einen Tag bei durchschnittlich 10 $\mu\text{A}/\text{Straw}$ trainiert, die Maximalwerte konnten kurzfristig auch höher liegen. Dabei wurde ebenfalls die Wiederherstellung der Gasverstärkung festgestellt.

Diese Methode hat gegenüber der Konditionierung mit negativer Spannung den Vorteil, dass der Anodenstrom leichter zu kontrollieren ist. Aus diesem Grund wurde diese Methode auch in Heidelberg getestet. Für alle in Heidelberg durchgeführten Studien mit positiver Hochspannung wurde immer das gleiche Modul (N005) verwendet.

Es wurden 28 Kanäle des Moduls N005² unter Hochspannung trainiert. Die restlichen 36 Straws dienten als Referenz. Der Aufbau erlaubte einen maximalen Anodenstrom von 200 μA für 16 Straws, der durchschnittliche Anodenstrom während des eintägigen Trainings betrug etwa 70 μA für 16 Straws. Als Driftgas wurde Ar/CO₂ verwendet, damit konnten Spannungen von etwa 1840 V erreicht werden. Nach der Konditionierung wurde zur Kontrolle eine bereits bestrahlte und gealterte Stelle vermessen, um zu überprüfen, ob die Gasverstärkung dort verbessert wurde. Abbildung 9.14(a) zeigt zwei bestrahlte Regionen vor der Behandlung mit hohen Strömen. Nach dem Training der Kanäle 32-59 (pinkfarbener Rahmen) ist der Verlust der Gasverstärkung in diesem Bereich nicht mehr nachweisbar³ (Abb. 9.14(b)).

²Modul N005 wurde zuvor bereits erwärmt.

³Bei dieser Bestrahlung (Referenzbestrahlung vor dem Heizen) ist die Halbmondform nicht klar zu erkennen, sondern die Form ist verschmiert. Dieser Effekt wurde beobachtet, wenn ein Modul sehr stark

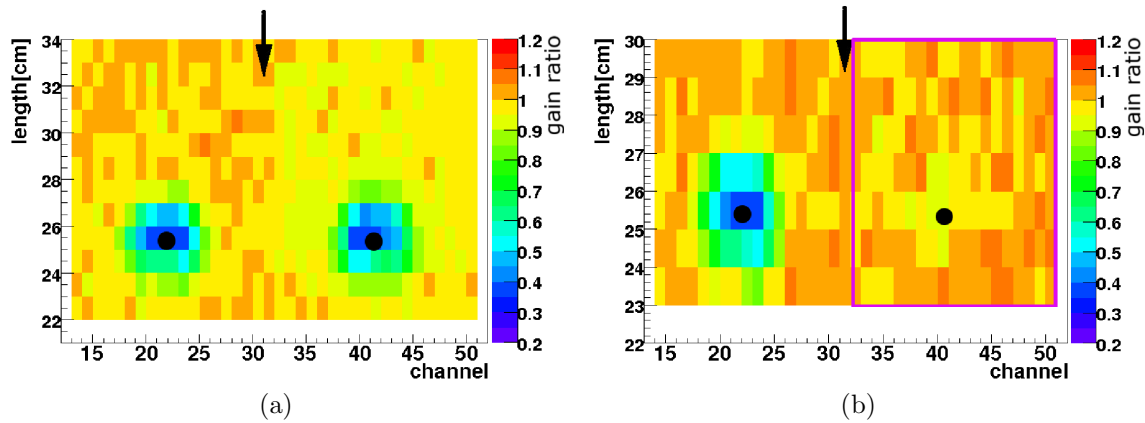


Abbildung 9.14: Konditionierung des Moduls N005 mit positiver Hochspannung. In Abbildung (a) sieht man das Resultat zweier Bestrahlungen (85 h, 2-5 mC/cm). Nach der Konditionierung der Kanäle 32-57 sieht man nur noch die Schädigung im nicht trainierten Bereich. Im trainierten Bereich (pinkfarbener Rahmen) ist der Verlust der Gasverstärkung nicht mehr nachweisbar.

Danach wurden sowohl die trainierten als auch die untrainierten Straws mit einer schwachen Eisenquelle an einer anderen Position entlang des Straws bestrahlt. Das Ergebnis dieser Bestrahlung ist in Abb. 9.15 zu sehen. Die pinkfarbenen umrahmten Straws wurden trainiert. Man sieht zwischen den bestrahlten Positionen nur einen geringfügigen Unterschied, der noch innerhalb der Reproduzierbarkeit der Messungen (Kap. 8.4.2) liegt. Es wird also signifikanter Unterschied zwischen trainierten und untrainierten Straws festgestellt.

Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu Messungen am NIKHEF. Dort wurde bei einem HV-Training⁴ mit positiver Spannung festgestellt, dass bei einer erneuten Bestrahlung die trainierten Straws im Gegensatz zu den untrainierten für 100-200 h keine Alterung zeigen. Um diese Beobachtung zu testen, wurden die Ströme nochmals erhöht und das Training unter Verwendung von Ar/CO₂/O₂ durchgeführt. Durch die Zugabe Sauerstoff während des HV-Trainings soll die Bildung von Radikalen erleichtert werden, die Ablagerungen verhindern oder vom Draht ätzen können. Während des Trainings wurden kurzzeitig Ströme von bis zu 200 μ A für vier Straws erreicht, das Ziel war ein Training über 20 h bei ungefähr 40 μ A für vier Straws. Dies ist etwa ein Faktor 3 höher als beim vorherigen Training. Die Bestrahlung nach dem Training wurde wieder mit reinem Ar/CO₂ als Driftgas durchgeführt, die Ergebnisse dieses Tests sind in Abb. 9.16 zu sehen, wieder nach einer Dauer von 90 h und 235 h. Der blaue Rahmen markiert den trainierten Bereich⁵. Man kann keinen signifikanten Unterschied zwischen den trainierten und untrainierten Straws feststellen, beide zeigen einen vergleichbaren Verlust der Gasverstärkung. Allerdings fällt auf, dass die Alterung im Vergleich zu der vorherigen

altert.

⁴Dauer: ca. 20 h, Strom: 10 μ A/Straw, Zählgas: ArCO₂.

⁵In der Mitte fehlt ein Straw, der aufgrund von Dunkelströmen nicht mit Hochspannung versorgt wurde.

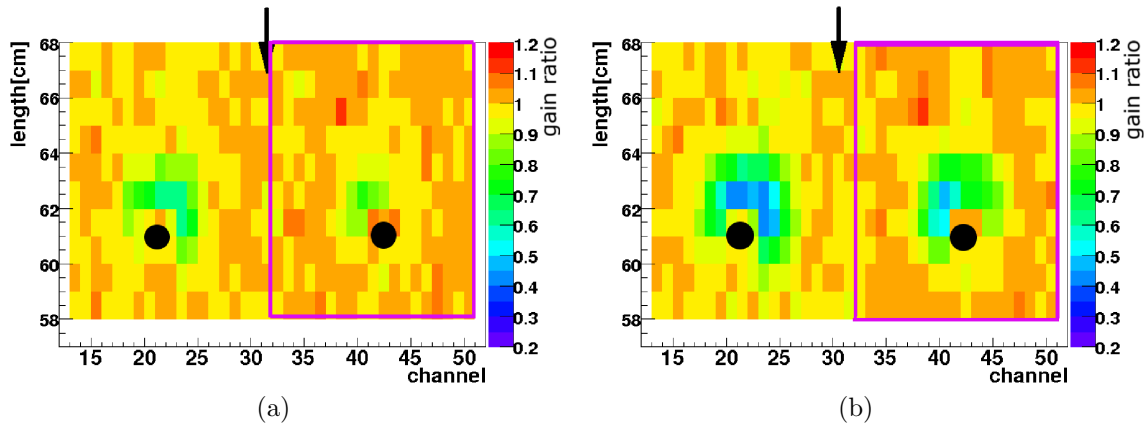


Abbildung 9.15: Bestrahlung des Moduls N005 nach Konditionierung mit positiver Hochspannung: die pink umrahmten Kanäle wurden trainiert. Der erste Scan wurde nach 90 h (2-5 mC/cm) Bestrahlung durchgeführt, der zweite nach 230 h (3-12 mC/cm). Zwischen den beiden bestrahlten Positionen ist kein signifikanter Unterschied sichtbar. Eine Verhinderung der Alterung für einen gewissen Zeitraum, wie dies bei Messungen, die am NIKHEF stattfanden, gefunden wurde, konnte nicht reproduziert werden.

Messung (Abb. 9.15) wesentlich kleiner ist, außerdem ist der Unterschied zwischen den inneren und den äußeren Kanälen sehr stark ausgeprägt (Kap. 8.4.2).

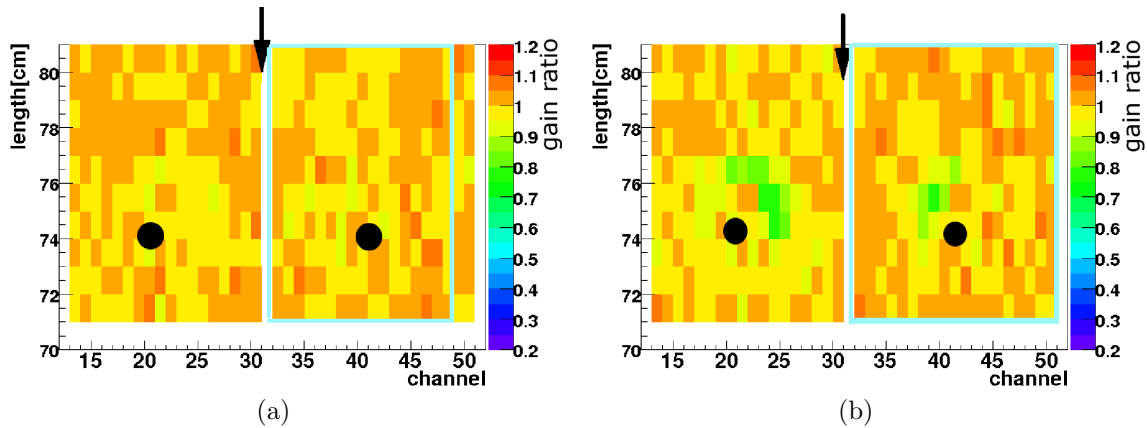


Abbildung 9.16: Bestrahlung nach Konditionierung mit positiver Hochspannung und Sauerstoff in der Driftgasmischung (Modul N005): die blau umrahmten Kanäle wurden trainiert. Der erste Scan wurde nach 90 h (2-5 mC/cm) Bestrahlung durchgeführt, der zweite nach 235 h (3-13 mC/cm). Zwischen den beiden bestrahlten Positionen ist kein großer Unterschied sichtbar. Auch die Verhinderung der Alterung über einen gewissen Zeitraum konnte nicht nachgewiesen werden.

Tabelle 9.5 zeigt den Verlust der Gasverstärkung nach den beiden HV-Behandlungen mit positiver Hochspannung. Die Analyse zeigt keinen signifikanten Unterschied zwi-

schen den trainierten und den untrainierten Kanälen. Der in NIKHEF gefundene Effekt konnte mit diesen Messungen nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse des HV-Trainings mit positiver Hochspannung deuten ebenso wie die Ergebnisse des HV-Trainings mit negativer Hochspannung darauf hin, dass die Alterung durch hohe Anodenströme nicht reduziert werden kann. Allerdings sind in den folgenden Monaten weitere Studien nötig, um die Unterschiede der am NIKHEF und in Heidelberg durchgeführten Messungen zu verstehen.

	Verlust der Gasverstärkung [%]							
	untrainiert				trainiert			
Training	90 h	160 h	230 h	350 h	90 h	160 h	230 h	350 h
Ar/CO ₂	20		35	41	7		23	34
Ar/CO ₂ /O ₂	–	7	12		–	8	11	

Tabelle 9.5: *Ergebnisse des Trainings mit positiver Hochspannung. Der Fehler einer Messung beträgt 2,5 %, der Unterschied zwischen zwei Messungen ist aufgrund der Reproduzierbarkeit nicht signifikant (Kap. 8.4.2).*

Sowohl die Studien mit einem hohen Anodenstrom aufgrund hoher Raten, als auch die Studien mit positiver und negativer Hochspannung deuten auf die gleichen Resultate hin. Es ist möglich, mit hohen Strömen ($> 20\text{--}25\text{ nA/cm}$) in einem bestrahlten und geschädigten Bereich die Gasverstärkung wieder zu verbessern. Ablagerungen auf dem Draht, die aufgrund der Bestrahlung entstanden sind, könne offenbar mit hohen Strömen entfernt werden. Es gibt in diesen Messungen keine Anzeichen, dass es möglich ist, die Alterung bei zukünftigen Bestrahlungen durch HV-Training zu reduzieren.

Falls es nicht gelingen sollte, die Module durch langdauerndes Spülen und Erwärmen ausreichend zu verbessern, bietet dieses Training mit hohen Strömen die Möglichkeit, die Gasverstärkung in einem gealterten Bereich wieder zu verbessern. Sollte diese Prozedur nötig werden, bietet sich eine Behandlung mit hohen positiven Strömen an, da diese Methode am einfachsten durchzuführen ist.

9.5 Alterung des Outer Trackers im LHCb-Detektor

Wie gezeigt wurde, wird der Verlust der Gasverstärkung durch eine Kombination von langandauerndem Spülen und Erwärmen stark reduziert. Allerdings ist das Verhalten der Gasverstärkung bei langen Bestrahlungszeiten ($> 500\text{ h}$) über die gesamte Detektorfläche ($5\text{ m} \times 6\text{ m}$) noch nicht endgültig untersucht.

Trotzdem ist es wichtig, die mögliche Alterung im LHCb Outer Tracker zu extrapolieren, um eine Abschätzung des Effekts auf den Detektorbetrieb zu erhalten. Deswegen wird versucht, den Verlust der Gasverstärkung im Detektor bis zu einer Betriebsdauer des LHCb-Detektors von $5 \times 10^7\text{ s} \approx 14000\text{ h} \hat{=} 5\text{ Jahre}$ zu simulieren.

Um die Alterung zu simulieren, wird der erwartete Anodenstrom pro Längeneinheit im Outer Tracker benötigt. Um die Anodenströme in Abhängigkeit des Ortes im Outer Tracker zu erhalten, wurde die Simulation von Jan Amoraal verwendet (Kap. 2.4) [34].

Abbildung 9.17 zeigt den erwarteten Anodenstrom im Detektor bei einer Hochspannung von 1520 V, einer daraus resultierenden Gasverstärkung von 45000 und 30 Primärelektronen. Wie man sieht, wird maximal ein Anodenstrom von 12-14 nA/cm erwartet, der innerhalb weniger Zentimeter auf einen Anodenstrom von weniger als 3 nA/cm abfällt. Damit ist der Bereich der größten Alterung (3-12 nA/cm) (Kap. 8.6.2) klein, liegt allerdings in der Region des Outer Tracker durch die die meisten Spuren gehen.

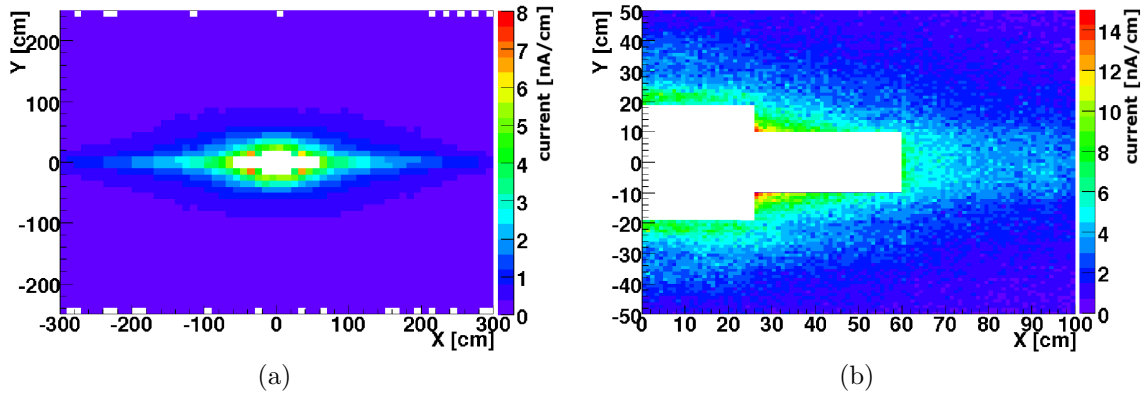


Abbildung 9.17: Anodenstrom im LHCb Outer Tracker: (a) zeigt den gesamten Outer Tracker mit einer Auflösung von $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$. In Abb. (b) ist der innere Bereich mit einer Auflösung von $1\text{ cm} \times 0,5\text{ cm}$ (Strawbreite) gezeigt. Der Bereich in der Mitte wird im Experiment vom Inner Tracker überdeckt.

Die hier gezeigten Abbildungen wurden für die erste Lage der ersten Station (T1) berechnet. Der Abstand vom nominellen Wechselwirkungspunkt beträgt 7860,5 mm. Die letzte Lage ist 9402,5 mm vom Wechselwirkungspunkt entfernt. Abbildung 9.18 zeigt nochmals den Anodenstrom für den inneren Bereich der ersten Lage und zum Vergleich den Anodenstrom in der letzten Lage. Es bestehen nur geringfügige Unterschiede, darum wird im weiteren nur die erste Lage betrachtet.

Die Erkenntnisse aus den Alterungsstudien werden in der Simulation verwendet. Die maximale Alterung tritt bei Strömen von 3-12 nA/cm auf. Bei höheren Strömen wird keine Alterung gemessen, bei kleineren Strömen nimmt die Alterung ab (Kap. 8.6.2). Weiterhin nimmt die Alterung nicht linear mit der Bestrahlungsdauer zu, sondern die Steigung wird geringer. Es wird angenommen, dass die Gasverstärkung exponentiell abnimmt.

Um den Verlust der Gasverstärkung zu quantifizieren, werden die Ergebnisse von zwei erwärmten und gespülten Modulen verwendet und die gemessene Alterung auf 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) extrapoliert.

- Im ersten Fall wird angenommen, dass alle erwärmten und gespülten Module so wenig Alterung zeigen wie Modul HD20. Dieses Modul wurde in Heidelberg erwärmt

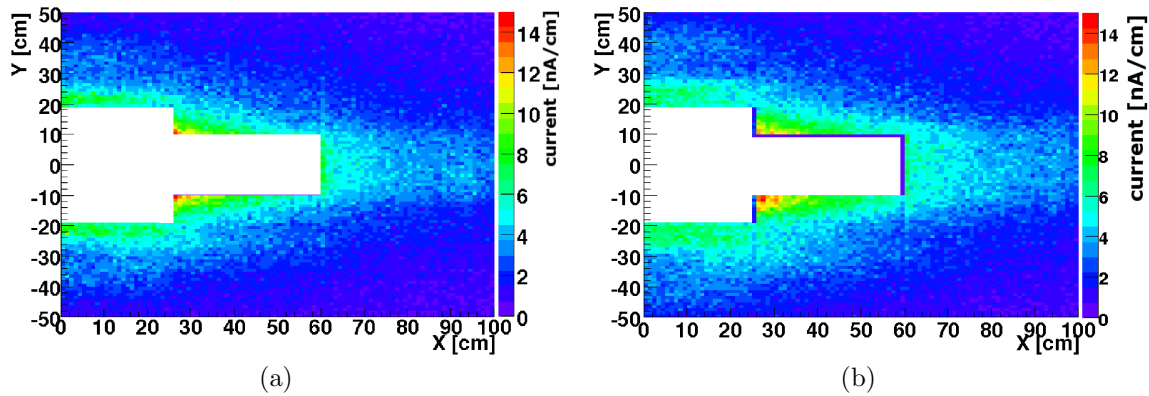


Abbildung 9.18: Anodenstrom im LHCb Outer Tracker: Der Unterschied der Ströme in der ersten Lage (a, 7860,5 mm vom Wechselwirkungspunkt) und der letzten Lage (b, 9402,5 mm) ist gering. Im weiteren wird darum nur die erste Lage studiert.

und danach für einen längeren Zeitraum gepült. Nach dieser Behandlung wurde ein Verlust der Gasverstärkung von 3 % nach einer Bestrahlungsdauer von 350 h (5–19 mC/cm) gemessen. Dieses Modul hat bisher nach allen bisherigen Bestahlungen der Massenproduktionsmodule die geringste Alterung gezeigt. Das NIKHEF Modul N058 zeigt nach einer mehrmaligen Erwärmung am CERN und in Heidelberg und langandauerndem Spülen ein vergleichbares Verhalten. Es wurde in Heidelberg ein Verlust der Gasverstärkung von 4,5 % nach einer Bestrahlungsdauer von 320 h (5–17 mC/cm) gemessen. Da Module von zwei unterschiedlichen Produktionsstätten einen so geringen Verlust der Gasverstärkung zeigen, scheint es möglich, dass die Behandlung die Alterung aller Module auf den gleichen Faktor reduziert.

- Im zweiten Fall wird ein Modul vom NIKHEF gewählt, dass zu Beginn starke Alterung (60 % Verlust der Gasverstärkung nach 90 h (2–6 mC/cm) Bestrahlung) gezeigt hat. Nach der Erwärmung und Spülen ist ebenfalls eine deutliche Verbesserung der Alterung zu sehen. Nach einer Bestrahlungsdauer von 230 h (3–12 mC/cm) wurde ein Verlust der Gasverstärkung von 10 % gemessen.

Die Ergebnisse für den ersten Fall (Modul 20) sind in Abbildung 9.19 jeweils für den inneren Bereich des Detektors und den gesamten Outer Tracker nach einer Bestrahlungsdauer von 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) gezeigt. Wie man sieht, ist die Gasverstärkung selbst nach einer Bestrahlungsdauer von 14000 h nicht unter 50 % des anfänglichen Wertes gefallen. Mit dieser Gasverstärkung wäre es möglich, den Detektor ohne signifikante Probleme zu betreiben. Zudem besteht die Möglichkeit, die Hochspannung ohne signifikanten Einfluss auf Ortsauflösung und Effizienz um 70 V (entspricht einem Faktor 2 in der Gasverstärkung) zu erhöhen (Kap. 4.3) und damit das Ladungssignal zu erhöhen.

Im zweiten Fall, dass die Alterung deutlich abnimmt, aber nicht so stark reduziert wird wie im ersten Fall, sind die Ergebnisse in Abb. 9.20 gezeigt. Die Abbildungen

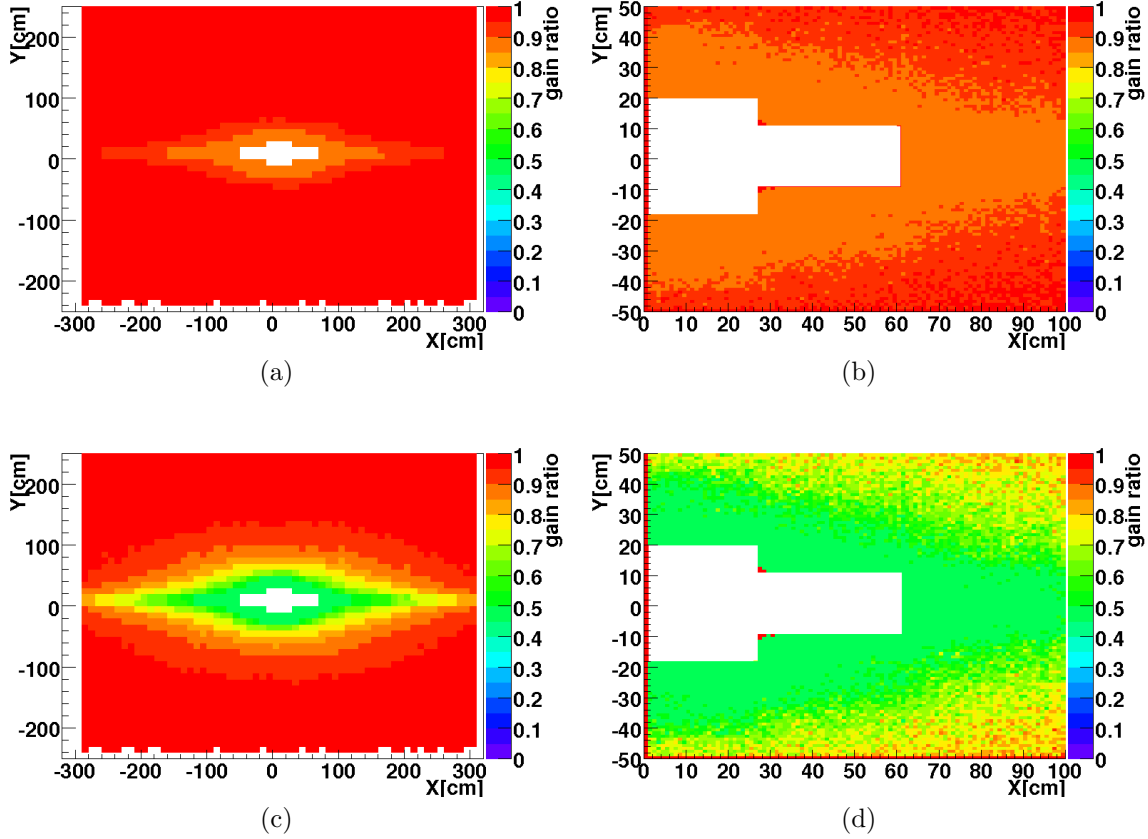


Abbildung 9.19: Alterung im LHCb Outer Tracker für Modul HD20. Gezeigt ist der Verlust der Gasverstärkung für den innersten Bereich des Detektors und den gesamten Outer Tracker nach 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) Bestrahlung.

sind wieder für den inneren Bereich des Detektors und den gesamten Outer Tracker nach einer Bestrahlungsdauer von 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) gezeigt. In diesem Fall ist die Gasverstärkung bereits nach 2800 h im inneren Bereich auf weniger als 30 % des ursprünglichen Wertes gefallen, nach 14000 h ist die Gasverstärkung im gesamten inneren Bereich des Outer Trackers so weit gefallen, dass man auch mit einer Erhöhung der Hochspannung nicht mehr in der Lage wäre, den Outer Tracker zu betreiben.

Allerdings ist in keine der bisher gezeigten Analysen der positive Effekt des Sauerstoffs auf die Alterung eingeflossen. Unter der Annahme, dass die Alterung durch Beigabe von 2,5 % Sauerstoff zur Zählgas Mischung um einen Faktor zwei reduziert wird, ergibt sich die in Abbildung 9.21 gezeigte Alterung für Modul N005. Aufgrund der Beigabe des Sauerstoffs ist die Alterung nochmals deutlich reduziert. Der Bereich, dessen Gasverstärkung der nach einer Bestrahlungsdauer von 14000 h kleiner als 20 % ist, umfasst nur noch einen geringen Teil des Detektors.

Diese Beispiele zeigen die erwartete Alterung im LHCb Outer Tracker, wenn man den

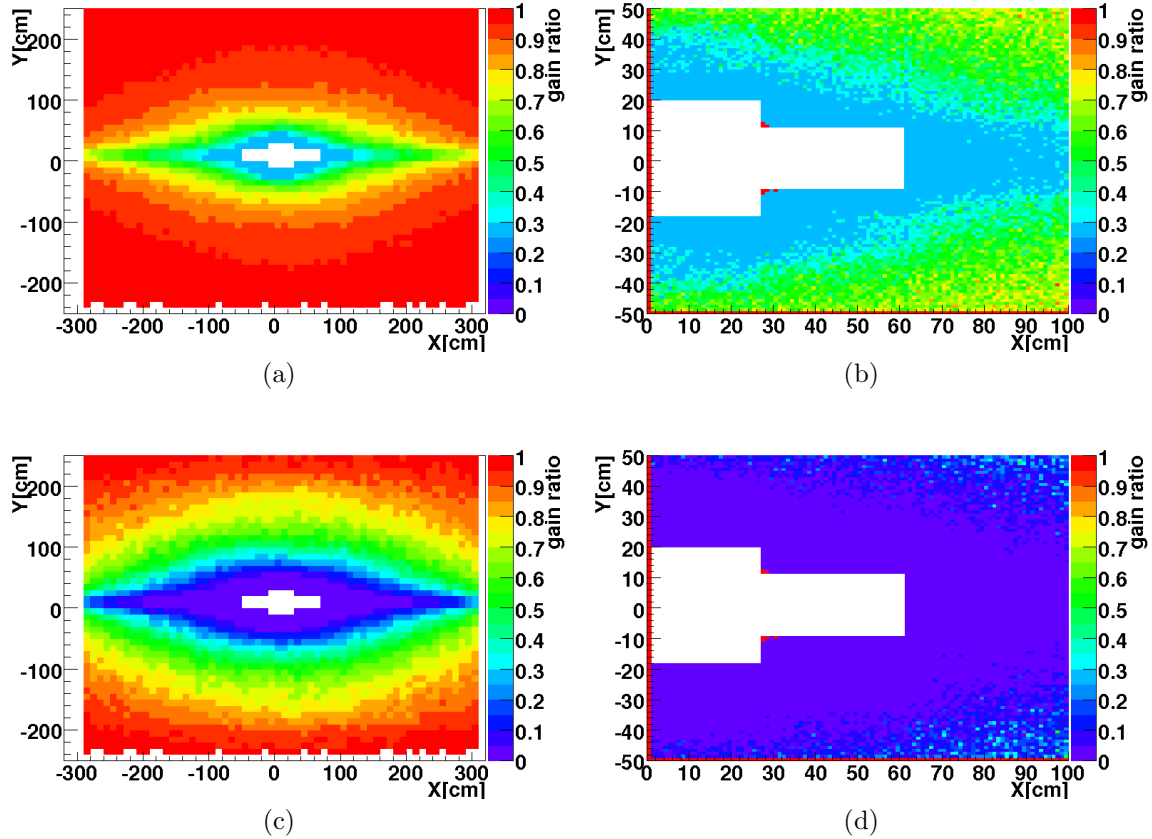


Abbildung 9.20: Alterung im LHCb Outer Tracker für Modul N005. Gezeigt ist der Verlust der Gasverstärkung für den innersten Bereich des Detektors und den gesamten Outer Tracker nach 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) Bestrahlung.

tatsächlich gemessenen Verlust an Gasverstärkung extrapoliert. Obwohl in der Extrapolation Annahmen stecken wie z.B. Abnahme der Gasverstärkung bei einer Bestrahlungsdauer >500 h, kann man daraus doch Schlüsse über das Verhalten der Outer Tracker Module in LHCb ziehen.

Bei dieser Simulation muss weiterhin bedacht werden, dass die ausgewählten Module neben dem Erwärmen etwa 10-12 Wochen gespült wurden. Die Module, die im Detektor eingebaut sind, werden hingegen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme mehr als ein Jahr mit vergleichbaren Flüssen gespült worden sein. Dieses Spülen sollte die Alterung zusätzlich reduzieren. Die Module werden ebenfalls im Laufe der nächsten Monate erwärmt werden. Darum ist es gerechtfertigt, zum Vergleich der Simulation der Alterung die Module mit dem geringsten Verlust der Gasverstärkung zu verwenden. Selbst wenn die Reduktion der Alterung nach dem Spülen und Erwärmen noch nicht ausreichend ist, bestehen weitere Möglichkeiten, das Modulverhalten zu verbessern, wie anhand der Beigabe des Sauerstoffs zur Zählgas Mischung gezeigt ist. In den nächsten Monaten werden weitere Studien zur Abhängigkeit der Alterung von der Driftgas Mischung stattfinden,

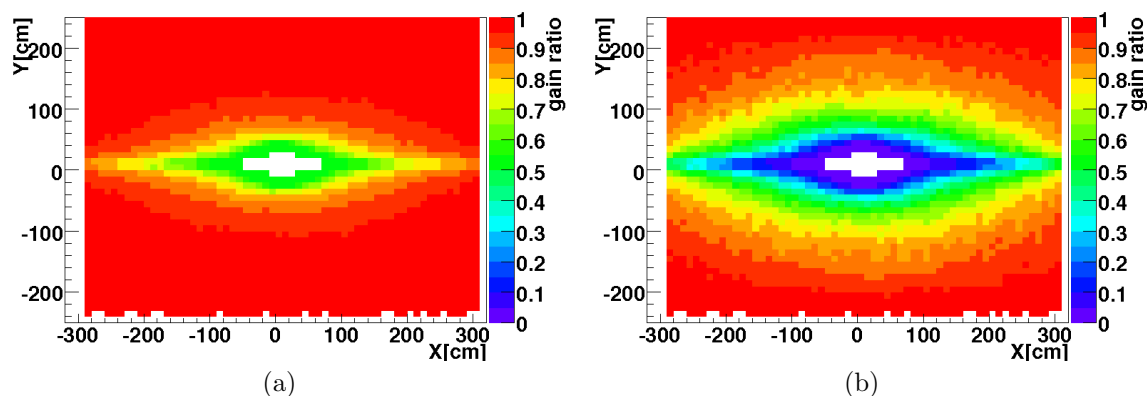


Abbildung 9.21: Alterung im LHCb Outer Tracker für Modul N005 unter Verwendung von Sauerstoff in der Zählgas Mischung. Gezeigt ist der Verlust der Gasverstärkung für den gesamten Outer Tracker nach 2800 h (1 Jahr LHCb) und 14000 h (5 Jahre LHCb) Bestrahlung.

um mögliche Zusätze zu finden, die die Alterung weiter reduzieren.

Wie man sieht, kann das Verhalten des Outer Trackers mit den bekannten Methoden des Spülens und Erwärmens sowie einer eventuellen Beigabe von Sauerstoff zum Driftgas erheblich verbessert werden.

9.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Möglichkeiten gezeigt, dass Modulverhalten bei Bestrahlung zu verbessern und damit den Verlust der Gasverstärkung zu reduzieren. Insbesondere langandauerndes Spülen der Module ist ohne Probleme umzusetzen und bringt deutliche Verbesserungen. Studien haben gezeigt, dass der Verlust der Gasverstärkung pro Zeiteinheit (unter der Annahme einer exponentiellen Abhängigkeit von der Menge des ausgetauschten Gases) nach einem Gasaustausch von $(18 \pm 3) \text{ m}^3$ (entspricht 6 Wochen bei einem Fluss von 1 Vol/h) auf einen Faktor $1/e$ gesunken ist. Darum wurden die Module bereits zu einem frühestmöglichen Zeitpunkt mit Gas versorgt und werden bei dem Start von LHC bereits mehr als ein Jahr gespült worden sein, das entspricht einem Gasaustausch von etwa 150 m^3 .

Auch das Erwärmen der Module auf 40-45 °C verbessert ihr Verhalten deutlich. Darum ist geplant, im Herbst 2007 alle im Detektor eingebauten Module zu erwärmen, um die Alterung weiter zu reduzieren.

Beide Effekte deuten (wie auch schon Studien in Kap. 8) darauf hin, dass Ausgasung eines im Modul befindlichen Materials die Alterung verursacht. Da die Menge des ausgasenden Materials begrenzt ist, wird dieses durch den ständigen Gasfluss aus dem Modul gespült. Erwärmung beschleunigt den Prozess des Ausgasens und das Material wird somit schneller aus dem Modul gespült.

Die Beimischung eines radikalbildenden Gases, insbesondere Sauerstoff (im Gegen-

satz zu Tetrafluormethan) hat ebenfalls positive Effekt auf das Detektorverhalten. Ein kleiner Prozentsatz an Sauerstoff (2,5 %) in der Driftgasmischung hat dabei nur geringe Auswirkungen auf die Signalthöhe. Die Reduktion der Alterung durch Sauerstoff wird wahrscheinlich durch Radikale bewirkt, die im Gasverstärkungsprozess nahe des Anodendrahtes entstehen und die Ablagerungen verhindern und reduzieren. Es können sowohl Sauerstoff- als auch Ozonradikale entstehen. Die beiden Radikale unterscheiden sich deutlich in ihrer Lebensdauer. Während ein Sauerstoffradikal durchschnittlich nur 10^{-6} s lebt [82], leben Ozonradikale im Schnitt 20 min [78]. Die Transportstudien in Kap. 8.8 lassen den Schluss zu, dass die Entstehung von langlebigen Ozon wahrscheinlicher ist.

Eine Konditionierung der Straws mit hohen Strömen (> 20 nA/cm) ermöglicht es, die Gasverstärkung in bereits bestrahlten und geschädigten Bereichen wieder herzustellen. Dabei ist die Quelle der Ströme unerheblich, der Effekt kann sowohl mit hohen Raten als auch mit hoher positiver oder negativer Spannung und den daraus resultierenden Dunkelströmen erreicht werden. Dies bietet die Möglichkeit, die Gasverstärkung in bereits bestrahlten und gealterten Modulen wieder zu verbessern.

Werden die hier vorgestellten Methoden zur Reduktion der Alterung im Outer Tracker konsequent angewandt, scheint ein Betrieb im LHCb Detektor für mehrere Jahre möglich. Eine Simulation der Alterung im Outer Tracker mit den zu erwartenden Strömen und den Daten aus den Bestrahlungstests hat gezeigt, dass die Alterung so weit reduziert werden kann, dass ein Betrieb über 14000 h (5 Jahre LHCb) möglich ist. Die Module, auf die sich die Simulation bezieht, wurden dabei im Gegensatz zu den im LHCb Detektor eingebauten Modulen im Schnitt nur 10-12 Wochen gespült. Der Gasaustausch über ein Jahr sollte die Alterung zusätzlich reduzieren.

Weiterhin werden noch Studien mit anderen Zählgaszusätzen stattfinden, um mögliche weiter radikalbildende Moleküle zu finden, die die Alterung reduzieren.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die einzelnen Driftkammermodule des LHCb Outer Tracker die an sie gestellten Forderungen bezüglich Ortsauflösung und Effizienz erfüllen kann. Bei einem Arbeitspunkt mit einer Hochspannung von 1550 V und einer Vorverstärkerschwelle von 3 fC wurde eine Residuenauflösung von $180\text{ }\mu\text{m}$ gemessen, die sich unter Berücksichtigung der Spurauflösung in eine Auflösung der einzelnen Treffer von $150\text{ }\mu\text{m}$ umrechnen lässt. Die Zelleffizienz fällt zur Kathode hin ab, beträgt aber im Plateaubereich in der Mitte des Straws 98-99 %.

Der Hauptteil dieser Arbeit beschäftigte sich mit Alterungsstudien für den Outer Tracker. Dabei wurde auch ein bisher in dieser Form unbekannter Effekt intensiv untersucht und Möglichkeiten zur Reduktion dieses Alterungseffektes gefunden.

Bei Alterungsstudien mit 8 keV Röntgenquanten wurde gezeigt, dass der Detektor bei hohen Raten und daraus resultierenden hohen Anodenströmen (Beschleunigungsfaktor 8-50 im Vergleich zu LHCb) keine Alterung zeigt. Weder wurde ein Verlust der Gasverstärkung gemessen, noch konnten massive Ablagerungen gefunden werden. Auch bei einer Bestrahlung mit dem beim LHCb-Detektor verwendeten Gas Mixing Rack wurden keine Probleme gefunden. Bei diesen Studien wurde eine akkumulierte Ladung von $0,8\text{-}3\text{ C/cm}$ im am stärksten bestrahlten Bereich gesammelt.

Auch bei Studien mit stark ionisierenden Teilchen (Protonenbestrahlung) mit einer Primärionisation von durchschnittlich 3500 Elektronen/Straw (MIP: 30 Elektronen/Straw) wurden keine Hinweise auf Alterung gefunden. Trotz einer kurzen Bestrahlungsdauer von etwa 90 h wurde dabei eine akkumulierte Ladung von $30\text{-}550\text{ mC/cm}$ im am stärksten bestrahlten Bereich gesammelt. Dabei wurden Beschleunigungsfaktoren von 15-185 erreicht. Insbesondere gab es keine Hinweise auf Kathodenprobleme wie z.B. Maltereffekt.

Für die bereits produzierten Module wurde aber bei kleinen Anodenströmen ($<15\text{ nA/cm}$) Alterung festgestellt. Bei diesen Strömen wird bereits nach einer kurzen Zeit und geringer akkumulierter Ladung ($1\text{-}2\text{ mC/cm}$) ein starker Verlust der Gasverstärkung gemessen. Die Alterung tritt bereits bei Bestrahlung mit "schwachen" radioaktiven ($3,7 \times 10^7\text{ Bq}$ ^{55}Fe -Quelle) Quellen auf. Sie zeichnet sich durch eine hohe qualitative Reproduzierbarkeit aus. Die Alterung ist gekennzeichnet durch ein halbmondförmiges, vom Gasfluss abhängiges Schädigungsprofil. Aufgrund des radialsymmetrischen Strahlungsprofils der radioaktiven Quellen wäre eine radialsymmetrische Schädigung zu erwarten.

Bei dem beobachteten Alterungseffekt tritt der maximale Verlust der Gasverstärkung bei Anodenströmen von 3-12 nA/cm auf. Bei höheren Anodenströme wird keine Alterung mehr gemessen, bei kleineren nimmt die Alterung mit dem Anodenstrom ab. Beim Betrieb des Outer Tracker in LHCb wird im Bereich nahe des Strahlrohrs ein Anodenstrom von 12-14 nA/cm erwartet, der innerhalb weniger Zentimeter auf einen Anodenstrom < 3 nA/cm abfällt. Ursache der Alterung sind sehr dünne ($< 1 \mu\text{m}$) nichtleitende Ablagerungen auf dem Anodendraht. Diese werden durch ein ausgasendes Material verursacht und lagern sich im Laufe der Bestrahlung auf den Anodendrähten ab. Der beim Kammerbau verwendete Epoxidkleber wurde in dieser Arbeit als Ursache des Ausgasens identifiziert. Zwar wurde der Kleber vor der Verwendung auf Ausgasen getestet. Möglicherweise konnte er aufgrund einer vielleicht zu geringen Temperatur während der Modulproduktion nicht vollständig aushärten. Der Epoxidkleber könnte dadurch eine Quelle von Kohlenwasserstoffmolekülen sein. Weitere Messungen zu dieser These werden in den nächsten Monaten durchgeführt.

In den stark bestrahlten Bereichen (Anodenstrom > 12 nA/cm) verhindern offenbar Radikale die Ablagerung der Moleküle auf dem Anodendraht. Da diese Radikale im Gasstrom über eine Länge von wenigstens 80 cm transportiert werden können, müssen sie eine Lebensdauer von einigen Minuten besitzen. Dadurch erklärt sich auch das halbmondförmige Schädigungsprofil. Weiterhin wird die Alterung durch Beigabe von Sauerstoff zur Driftgasmischung reduziert. Hier können im bestrahlten Bereich sowohl Sauerstoff- als auch Ozonradikale entstehen, die die Alterung reduzieren. Da allerdings Ozonradikale im Gegensatz zu Sauerstoffradikalen eine Lebenszeit von etwa 20 min [78] haben (Sauerstoffradikal: 10^{-6} s [82]), scheint aufgrund des Transporteffekts die Entstehung von Ozonradikalen wahrscheinlicher.

Um das Modulverhalten zu verbessern und den Outer Tracker über einen Zeitraum von mehreren Jahren im LHCb-Detektor zu betreiben, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Möglichkeiten gefunden. Besonders erfolgsversprechend scheint ein langandauerndes Spülen über mehrere Monate sowie ein Erwärmen der Module auf 40°C für etwa 10 Tage bei gleichzeitigem Spülen zu sein. Um den Verlust der Gasverstärkung pro Zeiteinheit auf einen Faktor $1/e$ zu senken, muss ein 5 m-Modul mit einem Gasvolumen von $(18 \pm 3) \text{ m}^3$ (entspricht bei einem Fluss von 1 Vol/h der Dauer von sechs Wochen) gespült werden.

Das Spülen der im LHCb-Detektor eingebauten Module wird deshalb bereits seit mehreren Monaten durchgeführt. Wenn der Detektor in Betrieb geht, werden die Module länger als ein Jahr (150 m^3) gespült worden sein. Auch das Erwärmen der Module ist für den Herbst des Jahres 2007 geplant und in Vorbereitung. In den nächsten Monaten werden weitere Studien zur Driftgasmischung stattfinden, um mögliche Zusätze zu finden, die das Verhalten des Outer Tracker darüber hinaus verbessern können.

Mit all diesen Maßnahmen scheint es möglich, den Outer Tracker effizient über mehrere Jahre zu betreiben.

Abbildungsverzeichnis

1.1	LHC-Ring	14
1.2	Unitaritätsdreieck	16
1.3	Stand der Messung des Unitaritätsdreiecks	16
1.4	Feynmangraphen für B_s^0 -Mischung	17
1.5	Feynmangraphen $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$	18
1.6	Feynmangraphen $B_s^0 \rightarrow D^\mp K^\pm$	18
1.7	Feynmangraphen $B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^+$	19
1.8	Feynmangraphen $B_{d/s}^0 \rightarrow \pi\pi(KK)$	20
1.9	Zerfall $B_s \rightarrow \mu\mu$	21
1.10	Winkelverteilung der b und \bar{b} Hadronen	22
1.11	Zerfall eines B_s^0 -Mesons	23
1.12	Der LHCb Detektor	23
2.1	Schematische Darstellung des Outer Trackers	28
2.2	Straw und Drahtpositionierer	29
2.3	Modulaufbau	29
2.4	Outer Tracker Modullage	30
2.5	Auslese des Outer Trackers	32
2.6	Outer Tracker im Koordinatensystem des LHCb Detektors	32
2.7	Teilchenrate im LHCb Outer Trackers	33
2.8	Anodenstrom im LHCb Outer Tracker	33
3.1	Strawtube	35
3.2	Arbeitsbereiche eines Gasdetektors	36
3.3	Energieverlust in Materie für schwere geladene Teilchen	38
3.4	Totaler Energieverlust eines Teilchens	39
3.5	Ionisationscluster für geladene Teilchen und Photonen	39
3.6	Driftgeschwindigkeit	41
3.7	Feldstärke im Outer Tracker	42
3.8	Der Gasverstärkungsprozess	44
3.9	Raumladungseffekt	45
4.1	Setup	50
4.2	Ausleseelektronik	51
4.3	Zeitdifferenz der Szintillatoren	52

4.4	Strahlprofil	53
4.5	T0 Korrektur	54
4.6	Korrigiertes Driftzeitspektrum	55
4.7	Residuenkombination für Alignment	57
4.8	Residuen eines nicht ausgerichteten Detektors	58
4.9	Residuen eines ausgerichteten Detektors	59
4.10	Korrelation von r_{spur} und gemessener Zeit	60
4.11	Verbesserung der $r(t)$ -Relation	60
4.12	Iterierte Residuen	61
4.13	Residuenbreite in Abhängigkeit des Zellradius	62
4.14	χ^2 -Verteilung	63
4.15	Intrinsische Zellauflösung	64
4.16	Abhängigkeit der Auflösung von Hochspannung und Schwelle	66
4.17	Theoretische Zelleffizienz	67
4.18	Bestimmung der Plateau-effizienz	68
4.19	Abhängigkeit der Plateau-effizienz von Hochspannung und Schwelle	69
4.20	Abhängigkeit des Crosstalks von Hochspannung und Schwelle	70
4.21	Abhängigkeit des Rauschens von Hochspannung und Schwelle)	71
5.1	Polymerisationseffekte	73
5.2	Alterung des Anodendrahtes	75
5.3	Alterung des Anodendrahtes–Beispiele vom ATLAS TRT	76
5.4	Maltereffekt	77
5.5	Eisenspektren	79
6.1	schematischer Aufbau	84
6.2	Modulaufbau	84
6.3	Primärionisation	85
6.4	Beamprofile des Protonstrahls	86
6.5	Ergebnisse der beiden Strahltests	89
6.6	Anodenstrom über Rate	90
6.7	Streamer	90
6.8	Nachweis von Streamern	91
6.9	Streamerhäufigkeit	92
7.1	Testmodul	96
7.2	Messung des Strahlprofils	97
7.3	Strahlprofil der Röntgenquelle	98
7.4	Setup Langzeitstudie	99
7.5	Vergleich der im Laufe der Bestrahlung gemessenen Gaverstärkung	100
7.6	Gasverstärkung entlang der Straws 1, 4, 6 und 10	102
7.7	Gasverstärkung entlang der Straws 8,9, 14, und 15	103
7.8	Beispiele unbestrahlter Drähte	103
7.9	Beispiele bestrahlter Drähte	104
7.10	Setup mit Gas Mixing Rack	105

7.11	Ergebnisse des Strahltests der Gasleitungen	106
7.12	Ergebnisse des Strahltests der Gasleitungen	106
7.13	Ergebnisse des Strahltests des Gas Mixing Racks	107
7.14	Ergebnisse des Strahltests unter Verwendung des Gas Mixing Racks . . .	108
8.1	Gasverstärkung nach der ersten Bestrahlung	110
8.2	Skizze der Bestrahlung und Messung Modul N123	110
8.3	Erste Messungen in Heidelberg	111
8.4	Skizze der Bestrahlung und Messung Modul HD52	112
8.5	Erste Alterungsmessungen in Heidelberg	112
8.6	Bestrahlter Draht unter dem Mikroskop	113
8.7	Bestrahlter Draht unter dem Mikroskop	113
8.8	Ergebnisse der Röntgenspektralanalyse	114
8.9	Ergebnis einer typischen Bestrahlung	116
8.10	Analysemethode	117
8.11	Alterung in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer	119
8.12	Reproduzierbarkeit der Messung	120
8.13	Strahlprofil der radioaktiven Quellen	122
8.14	Strahlprofil der am NIKHEF verwendeten Quellen	122
8.15	Bestrahlung mit einer Strontiumquelle	124
8.16	Alterung in Abhängigkeit des Stroms	125
8.17	Strahlprofil der Röntgenanlage	125
8.18	Ergebnis der Bestrahlung in der Röntgenanlage	126
8.19	Alterung vor der Bestrahlung	127
8.20	Testaufbau zur Untersuchung des Transports	129
8.21	Zwei Bestrahlungen im Abstand von 25 cm bzw. 75 cm	130
8.22	Bestrahlungen im Abstand von 180 cm	131
8.23	Alterung in Abhängigkeit der Gasflussgeschwindigkeit	131
8.24	Bestrahlung der Testmodule mit verschiedenen Klebern	133
8.25	Setup des Transporttests mit dem Trabond-Modul	133
8.26	Ausgastests mit Araldit	134
9.1	Effekt einer konstanten Spülung der Module	140
9.2	Variation der Gasverstärkung entlang eines Straws	142
9.3	Erwärmen der Module: Setup	143
9.4	Ergebnis der ersten Erwärmung eines Moduls	144
9.5	Ergebnis der ersten Erwärmung eines Moduls	144
9.6	Vergleich erwärmter und gespülter Module	145
9.7	Beimischung von Sauerstoff zur Driftgasmischung	147
9.8	Beimischung von Tetrafluormethan zur Driftgasmischung	148
9.9	Modulkonditionierung mit starken Quellen	149
9.10	Große Ströme mit Quellen	151
9.11	Anodenströme bei negativer Hochspannung	152
9.12	HV-Training mit negativer Hochspannung	152
9.13	Bestrahlung eines Moduls nach Konditionierung mit negativer Spannung	153

9.14	Konditionierung mit positiver Hochspannung	154
9.15	Bestrahlung nach Konditionierung mit positiver Hochspannung	155
9.16	Bestrahlung nach Konditionierung mit positiver Hochspannung und Sauerstoff	155
9.17	Anodenstrom im LHCb Outer Tracker	157
9.18	Anodenstrom im LHCb Outer Tracker: erste und letzte Lage	158
9.19	Alterung im LHCb Outer Tracker: Modul HD20	159
9.20	Alterung im LHCb Outer Tracker: Modul N005	160
9.21	Alterung im LHCb Outer Tracker: Modul N005	161

Tabellenverzeichnis

1.1	Seltene Zerfälle	20
1.2	Seltene Zerfälle	21
3.1	Gaseigenschaften	40
4.1	T0 Korrektur	55
4.2	Residuenauflösung	62
4.3	Intrinsische Auflösung	65
4.4	Plateaueffizienz	68
4.5	Lageneffizienz	69
5.1	Im Outer Tracker verwendete Materialien	80
5.2	Frühere Alterungsmessungen am LHCb OT in Heidelberg	80
6.1	Primärionisation	86
6.2	Bestrahlung	88
7.1	Parameter der Langzeitstudie	100
7.2	Parameter der Bestrahlung des Gas Mixing Racks	107
8.1	Typische Bestrahlungszeiten für Alterung	118
8.2	Vergleich der Module verschiedener Produktionsstätten	121
8.3	Aktivität der Heidelberger Quellen	123
8.4	Weitere Abhängigkeiten	128
8.5	Testmodule	132
8.6	Ausgastest mit Araldit	135
8.7	Zusammenfassung der wichtigsten Messungen	136
9.1	Gasdichtigkeit der Module	141
9.2	Zusammenfassung: Erwärmung der Module	146
9.3	Beimischung von Sauerstoff zur Driftgasmischung	147
9.4	Beimischung von Tetrafluormethan zur Driftgasmischung	149
9.5	Ergebnisse des Trainings	156

Literaturverzeichnis

- [1] H. Albrecht et al. *Aging studies for the large honeycomb drift tube system of the Outer Tracker of HERA-B* Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 155-165
- [2] D. Allspach et al. *Aging in the large CDF axial drift chamber* FERMILAB-CONF-04-449-E, Dec 2004
- [3] Michael H. Kelsey *Performance and aging of the BaBar Drift Chamber* Nucl. Inst. and Meth. A 535 (2004) 206-211
- [4] LHC Machine Outreach <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach>
- [5] L. Wolfenstein *Parametrization of the Kobayashi-Maskawa Matrix* Phys. Rev. Lett. 51 (1983) 1945
- [6] CKM Fitter http://www.slac.stanford.edu/xorg/ckmfitter/ckm_welcome.html
- [7] A. Abulencia et al. *Measurement of the B_s^0 - \bar{B}_s^0 Oscillation Frequency* Phys. Rev. Lett. 97, (2006) 062003
- [8] V.M. Abazov et al. *Direct Limits on the B_s^0 Oscillation Frequency* Phys. Rev. Lett. 97, (2006) 021802
- [9] V.M. Abazov et al. *Combined D^0 Measurements Constraining the CP-violating Phase and Width Difference in the B_s System* arXiv:hep-ex/0702030v1
- [10] Robert Fleischer *New Strategies to Obtain Insights into CP Violation Through $B_s \rightarrow D_s^\pm K^\mp, D_s^{*\pm} K^\mp, \dots$ and $B_d \rightarrow D^\pm \pi^\mp, D^{*\pm} \pi^\mp, \dots$ Decays* Nucl.Phys. B671 (2003) 459-482
- [11] David Atwood, Isard Dunietz, Amarjit Soni *Enhanced CP Violation with $B \rightarrow K D^0$ (\bar{D}^0) Modes and Extraction of the Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Angle γ* Phys. Rev. Lett. 78, 3257 - 3260 (1997)
- [12] Anjan Giri, Yuval Grossman, Abner Soffer, Jure Zupan *Determining γ using $B^\pm \rightarrow DK^\pm$ with multibody D decays* Phys. Rev. D 68, 054018 (2003)

- [13] Andrzej J. Buras, Robert Fleischer, Stefan Recksiegel, Felix Schwab *$B \rightarrow \pi\pi$, New Physics in $B \rightarrow \pi K$, and Implications for Rare K and B Decays* Phys. Rev. Lett. 92, 101804 (2004)
- [14] Michael Gronau, Jonathan L. Rosner *Strong and weak phases from time-dependent measurements of $B \rightarrow \pi\pi$* Phys. Rev. D 65, 093012 (2002)
- [15] V.M. Abazov, et al *A Search for the Flavor-Changing Neutral Current Decay $B_0^s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV with the D0 Detector* Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 071802
- [16] *LHCb Reoptimized Detector Design and Performance: Technical Design Report* CERN.LHCC 2003-030
- [17] P.F. Harrison, ed. et al. *The Babar Physics Book* SLAC-R-504, Oct 1998
- [18] *LHCb: Technical proposal* CERN-LHCC-98-004
- [19] *LHCb Velo: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-011
- [20] *LHCb Inner Tracker Technical Design Report* CERN/LHCC 2002-29
- [21] *LHCb magnet: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-007
- [22] *LHCb RICH Technical Design Report* CERN/LHCC 2000-037
- [23] *LHCb Calorimeters: Technical Design Report* CERN/LHCC 2000-036
- [24] *LHCb muon system: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-010
- [25] E. Rodrigues *The LHCb Trigger System* LHCb Note 2006-065
- [26] LHCb Outer Tracker Home Page <http://www.nikhef.nl/pub/experiments/bfys/lhcb/outerTracker/>
- [27] *LHCb Outer Tracker Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-024
- [28] Sebastian Bachmann et al. *Mechanical properties of the module boxes used for the LHCb outer tracking system* LHCb-2002-046
- [29] Michael Walter *Entwicklung, Bau und Alterungstudien von Straw Tube Driftkammern für das Äussere Spurkammersystem von LHCb* Dissertation, 2004 <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/walter04.pdf>
- [30] Uwe Stange *Development and Characterisation of a Radiation Hard Readout Chip for the LHCb Outer Tracker Detector* Dissertation, 2005 <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=977077624>
- [31] Dirk Wiedner *Aufbau der Ausleseelektronik für das äussere Spurkammersystem des LHCb-Detektors* Dissertation, 2004 <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/wiedner04.pdf>

- [32] Jan Knopf *Aufbau eines Auslesesystems für die inneren Spurkammern des LHCb-Detektors* Diplomarbeit, 2004 <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/knopf04.pdf>
- [33] Jan Knopf *LHCb Outer Tracker readout electronic* Talk
- [34] Jan Amoraal *How much is the current in the OT? Predictions of current density in detector from simulation* <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=5&resId=1&materialId=slides&confId=8973>
- [35] Fabio Sauli *Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers* CERN 77-09
- [36] W.R. Leo *Techniques for nuclear and particle physics experiments* Springer Verlag, ISBN 3-540-57280-5
- [37] *Review of Particle Physics* J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33 (2006)
- [38] Claus Grupen *Teilchendetektoren* Wissenschaftsverlag, ISBN 3-411-16571-5
- [39] S.C. Brown *Basic data of plasma physics* MIT Press, Cambridge, Mass. 1959
- [40] T. Zhao, Y. Chen, S. Han, J. Hersch *A study of electron drift velocity in Ar-CO₂ and Ar-CO₂-CF₄ gas mixtures* Nucl. Inst. and Meth. A 340 (1994) 485-490
- [41] Hoite Tolsma *The honeycomb strip chamber: A two coordinate and high precision muon detector* Dissertation, 1996
- [42] M. Matoba, T. Hirose, T. Sakae, H. Kametani, H. Ijiri, T. Shintake *Three dimensional Monte Carlo Simulation of the electron avalanche around a anode wire of a proportional counter* IEEE Transactions on Nuclear Science NS 32 1 (1985) 541-544
- [43] Kapton *DuPont* http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/index.html
- [44] Redondo Fernandez *Charm Electroproduction at HERA* Dissertation, 2001
- [45] Mirco Nedos *Programmierung des FPGA* Universität Dortmund
- [46] *Beam Test of the final modules and Electronics of the LHCb Outer Tracker in 2005* LHCb2005-076
- [47] Tanja Haas *Bau und Inbetriebnahme eines Teststandes zur Untersuchung von Straw-Kammern mittels kosmischer Myonen* Diplomarbeit, 2003 <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/haas03.pdf>
- [48] Louis Lyons *Statistics for nuclear and particle physicists* Cambridge University Press, ISBN 0-521-37934-2
- [49] *Gespräch mit Jan Knopf*
- [50] Sebastian Bachmann *An improved model for the OT digitisation*

- [51] G. Charpak, H. Fischer, G.R. Gruhn, A. Minten, F. Sauli, G. Pich, G. Flugge *Time degeneracy of multiwire proportional chambers* Nucl. Inst. and Meth. A 99(1972)279
- [52] Hirotugu Yasuda *New insights into aging phenomena from plasma chemistry* Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 15-30
- [53] J. Va'vra *Physics and chemistry of aging - early developments* Nucl. Instr. and Meth. A 515 (2003) 1-14
- [54] Carsten Niebuhr *Aging effects in gas detectors* Nucl. Inst. and Meth. A 566 (2006) 118-122
- [55] Carsten Niebuhr *Aging effects in the Central Drift Chamber of the H1 Experiment* Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 43-49
- [56] T. Ferguson et al. *Anode wire swelling - a possible phenomenon in anode wire aging under high-accumulated dose* Nucl. Inst. and Meth. A 483, (2002), 698-712
- [57] A. Romaniouk *Aging studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT)* Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 166 -179
- [58] L. Malter *Thin Film Field Emission* Phys Rev. 50 (1936) 48
- [59] Homepage Michael Walter http://www.physi.uni-heidelberg.de/~mwalter/index_files/aged_wires.html
- [60] Mar Capeans *Aging and materials: lessons for detectors and gas systems* Nucl. Inst. and Meth. A 515 (2003) 73-88
- [61] <http://outgassing.nasa.gov/>
- [62] John A. Kadyk *Wire chamber aging* Nucl. Instr. and Meth. A 300 (1991) 436-479
- [63] *Max Planck Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg*, <http://www.mpi-hd.mpg.de>
- [64] Raimund Ruschmann *Entwicklung und Untersuchung von Straw Tubes fuer den LHCb Detektor* Diplomarbeit, 2002
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/ruschmann02.ps>
- [65] Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/ew/Geraete/>
- [66] P. Cwetanski, A. Romaniouk, V. Sosnovtsev *Studies of wire offset effect on gas gain in the ATLAS TRT straw chamber* ATL-INDET-200-016
- [67] FeinFocus Röntgen System GmbH www.feinfocus.de
- [68] *Gas Quality Control Component Validation* <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=s1t3&resId=1&materialId=0&confId=a041327>

- [69] *LHCb Outer Tracker Gas System* EDMS No. 414246.v4.0
- [70] Niels Tuning http://www.nikhef.nl/%7Eh71/Irr/IrradiationTests_2005.ppt
- [71] Sebastian Bachmann *Messung*
- [72] Niels Tuning <http://www.nikhef.nl/%7Eh71/Irr/Microscope.ppt>
- [73] Niels Tuning http://www.nikhef.nl/%7Eh71/Irr/Microscope_VU.ppt
- [74] Niels Tuning <http://www.nikhef.nl/%7Eh71/Irr/Wire-Analysis.ppt>
- [75] Information über Modulproduktion <http://www.nikhef.nl/pub/experiments/bfys/lhcb/outerTracker/Quality/Summary-Quality-All-110107.xls>
- [76] N. Tuning et al. *Gas Propagation Studies in the Outer Tracker* LHCb- 2007-066
- [77] Niels Tuning <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=3&resId=5&materialId=slides&confId=3128>
- [78] Richard M. Todaro et al. *Stratospheric Ozone: An Electronic Textbook* http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz_class.htm
- [79] Edwin Bos *Effects of heating on module geometry* <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=0&resId=1&materialId=slides&confId=8973>
- [80] Tanja Haas *New Results on aging* <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=2&resId=4&materialId=slides&confId=3128>
- [81] Gras van Apeldoorn *Ageing or how to clean modules and to keep them clean* <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=6&resId=1&materialId=slides&confId=3886>
- [82] H. Sies, W. Stahl *Vitamins E and C, beta-carotene, and other carotenoids as anti-oxidants* Am. J. Clinical Nutrition, Dec 1995; 62: 1315 - 1321

Danksagung

Zu Beginn möchte ich Prof. Uwer danken, der mir diese Arbeit ermöglicht hat. Auch wenn der Effekt nicht unbedingt gewollt war, es war “die interessanteste Physik, die wir bisher mit dem Outer Tracker gemessen haben”. Besonderen Dank für die gute Betreuung. Ich danke Prof. Knöpfle für die Bereitschaft, diese Arbeit zu korrigieren.

Vielen Dank an die Kollegen, die alten und die neuen. Auch wenn sich in den letzten Jahren einiges geändert hat, konnte man sich immer auf angeregte Diskussionen verlassen. Besonders danken möchte ich denen, die mich in meiner Arbeit begleitet haben und von denen ich viel lernen konnte, Michael Walter, Sebastian Bachmann und Juri Bagaturia. Ebenso Johannes Albrecht und Marc Deissenroth, die auch ihren Beitrag zu den Messungen geleistet haben. Nicht zu vergessen Christian Färber, auf den ich mich wirklich verlassen kann, für sein Interesse an unseren Messungen. Danke auch an meine Kollegen vom NIKHEF, die in Amsterdam alles daran gesetzt haben, die Alterung unter Kontrolle zu bringen, insbesondere Niels Tuning, der die Messungen dort dirigiert hat. Auch wenn die Arbeit auf deutsch geschrieben wurde, können sie vielleicht etwas damit anfangen.

Vielen Dank an die Korrekturleser, Johannes, Sebastian, Marc, Christoph und Stephanie und nicht zu vergessen Stefan, der wollte, aber nicht durfte.

Und dann wäre da noch Jens, mein Mitstreiter, bei dem ich immer auf Verständnis und vor allem auf Verstehen hoffen konnte... Danke!

Danken möchte ich auch meinen Eltern, meiner Mutter und Gerd, die überhaupt erst ermöglicht haben, dass ich hier bin und Physik studieren konnte, insbesondere meiner Mutter, die heute so stolz ist.

Last, but not least Danke Stefan, dass Du mich immer unterstützt und an mich geglaubt hast. Danke für Deine guten Nerven und Deine Geduld. Danke für die Bereitschaft, mir immer zu helfen, auch wenn du mehr als genug zu tun hattest. Ich denke, ich kann mich in den nächsten Wochen revanchieren.

Ich hoffe, ich habe niemanden vergessen... falls doch: entschuldigung.