

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Christian Färber
aus Gifhorn

2008

Alterungsstudien am Outer Tracker des LHCb Experiments

*Die Diplomarbeit wurde von Christian Färber ausgeführt am
Physikalischen Institut Heidelberg
unter der Betreuung von
Prof. Dr. Ulrich Uwer*

Kurzfassung

Der Outer Tracker ist Teil des Spurrekonstruktionssystems des LHCb-Detektors. Der Detektor nutzt zur Ortsmessung Driftröhrchen, die nach dem Driftkammerprinzip arbeiten. Die Röhrchen haben eine Länge von 2,5 m und einen Durchmesser von 5,1 mm. Als Zählgas wird Ar/CO₂ verwendet.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung eines beim Betrieb der Kammern beobachteten Alterungsphänomens. Bereits geringe Bestrahlung mit einer radioaktiven Quelle führt zur Abnahme der Gasverstärkung, die allerdings auf einen halbkreisförmigen Bereich vor der Quelle (relativ zur Gasrichtung) beschränkt ist. Es wurden Indizien für die Bildung von Ozon aufgrund der Bestrahlung gefunden. Messungen der Ozonkonzentration ergaben, dass Ozon in dem Gasverstärkungsprozess in sub-ppm Konzentrationen gebildet wird. Die Abhängigkeit der Ozonproduktion von der Hochspannung, der Gasflussgeschwindigkeit und der Sauerstoffkonzentration wurde untersucht. Zudem wurde die Halbwertszeit des Ozons gemessen. Die Ergebnisse lassen sich mit der Form der Alterung in Verbindung bringen und unterstützen die Annahme, dass das Radikal Ozon in geeigneter Konzentration den beobachteten Alterungsprozess verhindert.

Zum Test dieser Hypothese wurde dem Zählgas Stickstoffdioxid, ein ähnlich starkes Oxidationsmittel wie Ozon, zugefügt. In mindestens zwei Messreihen zeigt sich zweifelsfrei, dass der Zusatz von NO₂ die Änderung der Gasverstärkung verhindert.

Abstract

The Outer Tracker is part of the tracking system of the LHCb detector. The detector uses straw tubes, working like drift chambers, for position measurement. The straws have a length of 2.5 m and a diameter of 5.1 mm. Ar/CO₂ is used as counting gas.

This diploma thesis deals with the examination of an ageing phenomenon, which occurs when operating the chambers. A reduction of the gas amplification is caused already by low irradiation doses. The reduction is restricted to a semicircular area in front of the source (relative to the gas-flow direction)

Indications for ozone production due to irradiation were found. Measurements of the ozone concentration show that ozone is produced at the concentration of sub-ppm level. The dependence of the ozone concentration on the high voltage, the gas-flow intensity and the oxygen concentration were measured. In addition, the half-life of the ozone has been measured. The results can be related to the form of the ageing and support the assumption that ozone in an appropriate concentration suppresses the observed ageing process.

To test this hypothesis nitrogen dioxide was added to the counting gas. Similar to ozone, NO₂ is a strong oxidising agent. At least two test series show without doubt that adding NO₂ suppresses the reduction of the gas amplification.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einführung | 7 |
| 2 | Das LHCb-Experiment | 9 |
| 2.1 | Large Hadron Collider | 9 |
| 2.2 | Der LHCb Detektor | 10 |
| 2.2.1 | Detektoraufbau | 10 |
| 2.2.2 | Outer Tracker | 13 |
| 3 | Gasdetektoren | 17 |
| 3.1 | Energieverlust durch Ionisation und Anregung | 19 |
| 3.1.1 | Primärionisation | 20 |
| 3.2 | Proportionalzähler | 21 |
| 4 | Alterung | 27 |
| 4.1 | Mögliche Ursachen für Alterung | 27 |
| 4.1.1 | Ablagerungen auf der Anode | 28 |
| 4.1.2 | Ablagerungen an der Kathode | 29 |
| 4.2 | Alterungseffekt des Outer Trackers | 29 |
| 4.2.1 | Ursache des Gasverstärkungsverlustes der LHCb OT Module | 32 |
| 4.3 | Untersuchung des Alterungseffektes in Heidelberg | 32 |
| 4.3.1 | Messprinzip | 32 |
| 4.3.2 | Verwendete radioaktive Quellen | 33 |
| 4.3.3 | Messaufbau | 35 |
| 4.3.4 | Automatisierung der Messung | 36 |
| 4.3.5 | Gasverstärkungsverhältnis-Diagramm | 39 |
| 4.3.6 | Quantitative Bewertung der Alterung | 39 |
| 4.3.7 | Problematiken der Alterungsmessungen | 40 |
| 4.4 | Bestätigung früherer Ergebnisse | 41 |
| 4.5 | Modelle der Alterung | 43 |
| 5 | Transportstudien | 45 |
| 5.1 | Transporttests | 45 |
| 5.1.1 | Idee | 45 |
| 5.1.2 | Durchführung | 45 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.3 | Ergebnis der Transporttests | 46 |
| 5.2 | Transporttests mit unterschiedlichen Quellen | 47 |
| 5.2.1 | Idee | 47 |
| 5.2.2 | Durchführung | 47 |
| 5.2.3 | Ergebnis | 47 |
| 5.2.4 | Interpretation der Transporttests mit unterschiedlichen Quellen | 49 |
| 5.3 | Weitere Indizien für das Radikalmodell | 50 |
| 5.3.1 | Interpretation | 51 |
| 5.4 | Zusammenfassung | 52 |
| 5.5 | Abschliessende Bemerkung | 52 |
| 6 | Ozonmessungen | 55 |
| 6.1 | Motivation für die Ozonmessungen | 55 |
| 6.2 | Messaufbau | 56 |
| 6.3 | Ozon in Standardzählgas Ar/CO ₂ (70%/30%) | 57 |
| 6.3.1 | Ozon aus der Bestrahlung | 57 |
| 6.3.2 | Parameter der Ozonproduktion | 59 |
| 6.3.3 | Ergebnis | 59 |
| 6.4 | Ozonproduktion bei Sauerstoffzusatz | 60 |
| 6.4.1 | Ozonmessungen bei 2,5% Sauerstoffanteil | 60 |
| 6.4.2 | Halbwertszeit des Ozons im Modul | 63 |
| 6.4.3 | Änderung der Sauerstoffkonzentration | 65 |
| 6.4.4 | Zusammenfassung der Messungen mit O ₂ | 66 |
| 6.5 | Abschliessende Bemerkung zu den Ozonmessungen | 67 |
| 7 | Alterungsstudie mit NO₂ | 69 |
| 7.1 | Motivation für die Verwendung von NO ₂ | 69 |
| 7.2 | Messaufbau für den NO ₂ Test | 70 |
| 7.3 | Alterungstest mit einem kleinen Testmodul | 70 |
| 7.3.1 | Erstes Testmodul | 71 |
| 7.3.2 | Zweites Testmodul | 71 |
| 7.4 | Alterungstest mit 2,5 m Modul | 72 |
| 7.5 | Zusammenfassung und Interpretation der NO ₂ Tests | 75 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 77 |
| | Literaturverzeichnis | 83 |

Kapitel 1

Einführung

Ziel des LHCb Experimentes ist die genaue Untersuchung seltener B-Mesonzerfälle. Der LHCb Detektor ist für diese Aufgabe spezialisiert. Unter anderem sollen die Impulse und Energien der Zerfallsprodukte der B-Mesonen sehr genau vermessen werden. Die Bestimmung der Teilchenimpulse erfolgt durch die Messung der Spurkrümmung in einem Magnetfeld. Dafür muss die Trajektorie des Teilchens im Spurkammersystem des Detektors genau vermessen werden. Das Spursystem des Detektors wurde für das Erreichen dieses Zieles gebaut. Ein Teil des Spursystems ist der Outer Tracker. Es handelt sich hierbei um einen Straw-Tube Detektor, der nach dem Driftkammerprinzip arbeitet um Teilchendurchgänge mit einer Ortsauflösung von $200\ \mu\text{m}$ nachweisen zu können.

Der Detektor ist während seiner Betriebszeit einer intensiven Bestrahlung ausgesetzt. So erwartet man, dass während der Laufzeit von zehn Jahren eine elektrische Ladung von $1\ \text{C/cm}$ von den Anodendrähten gesammelt wird. Die Bestrahlung sollte jedoch nicht zu einer Änderung der Detektoreigenschaften führen. Aus diesem Grund wurden vor der Produktion der Kammern intensive Alterungsstudien mit allen Modulkomponenten durchgeführt.

Nach der Produktion der Outer Tracker Module beobachtete man jedoch einen bis dahin unbekanntem Alterungseffekt [12]. Dieser trat bei den vor der Produktion intensiv betriebenen Alterungsstudien mit Beschleunigungsfaktoren von 8-180 und Anodenströmen $> 80\ \text{nA/cm}$ nicht auf. Das beobachtete Alterungsphänomen tritt nur bei Anodenströmen $< 15\ \text{nA/cm}$ auf. Nach einer Bestrahlung mit einer Laborquelle (^{55}Fe) von wenigen Tagen, entsprechend einer akkumulierten Ladung von nur $1\text{-}2\ \text{mC/cm}$, zeigt sich eine deutliche Abnahme der Gasverstärkung in einem Bereich um die Bestrahlungsquelle. Diese Alterung entsteht nur in einem Bereich vor der Quelle (relativ zur Gasrichtung). Direkt unter der Quelle sowie hinter der Quelle verändert sich die Gasverstärkung nicht.

Diese Diplomarbeit untersucht die spezielle geometrische Form der Alterung und versucht einen Mechanismus für die Entstehung zu finden. Ziel ist es insbesondere zu verstehen, auf welche Art und Weise die Alterung direkt unter und hinter der Quelle verhindert wird.

Kapitel 2

Das LHCb-Experiment

2.1 Large Hadron Collider

Das LHCb Experiment ist eines von vier Großexperimenten am Large Hadron Collider (LHC) am CERN¹ in Genf. Der LHC wurde in dem schon bei LEP² verwendeten Tunnel mit einem Umfang von 27 km gebaut. Es handelt sich dabei um 2 Ringe, in denen Protonen in entgegengesetzte Richtungen beschleunigt werden. In jedem Ring sollen Protonen bis auf eine Energie von 7 TeV beschleunigt und in den Experimenten zur Kollision gebracht werden (siehe Abb. 2.1).

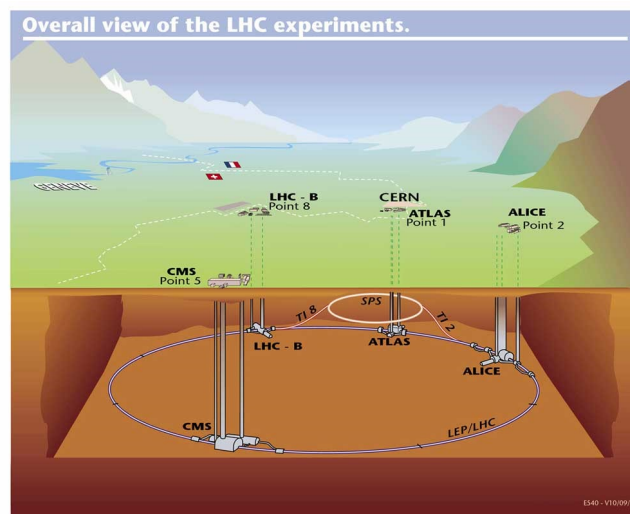


Abbildung 2.1: LHC Tunnel mit den vier Experimenten ATLAS, ALICE, CMS und LHCb (nicht maßstabsgetreu) [8].

In den vier Experimenten soll nach neuer Physik gesucht werden. Dabei decken ATLAS und CMS unter anderem die Suche nach dem Higgs-Boson, supersym-

¹Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire.

²Large Electron-Positron Collider.

metrischen Teilchen und zusätzliche Raumdimensionen ab. Das Higgs-Boson ist ein im Standardmodell der Teilchenphysik vorausgesagtes Austauscheteilchen, das noch nicht gefunden wurde. Supersymmetrische Teilchen werden durch eine Erweiterung des Standardmodells vorausgesagt und bieten Kandidaten für dunkle Materie, welche in der Kosmologie eine entscheidende Rolle spielt.

ALICE soll den Materiezustand des Quark-Gluon-Plasmas untersuchen. Man geht davon aus, dass dieser Zustand kurz nach dem Urknall existiert hat. Am LHC soll dieser Zustand durch Schwerionenkollisionen erzeugt werden.

Das LHCb-Experiment wird seltene B-Zerfälle vermessen. Insbesondere soll die CP Asymmetrie³ vieler B-Zerfälle untersucht werden. Durch den Vergleich mit den Standardmodellvorhersagen können Rückschlüsse auf neue physikalische Phänomene gezogen werden. Zudem wird nach seltenen B-Zerfällen gesucht, deren Raten im Standardmodell unter der Nachweisgrenze liegen. Das LHCb-Experiment nutzt hierbei die große Zahl erzeugter b- und c-Quark-Mesonen in der Akzeptanz des LHCb Detektors im LHC. Man erwartet, dass pro Jahr etwa 10^{12} B-Mesonen produziert werden.

2.2 Der LHCb Detektor

Der LHCb Detektor ist als Vorwärts-Spektrometer konzipiert. Die b-Hadronen entstehen hauptsächlich aus Gluonfusion. Es tragen vor allem Gluonen zur $b\bar{b}$ -Erzeugung bei. Aufgrund der Impulsverteilung der Gluonen im Proton ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass die fusionierenden Gluonen stark unterschiedliche Impulse haben und das erzeugte im Vergleich zur Schwerpunktsenergie relativ leichte $b\bar{b}$ -Paar geboostet ist. Daher fliegen die meisten $b\bar{b}$ -Paar in Vorwärtsrichtung bzw. Rückwärtsrichtung. Aus diesem Grund ist der LHCb Detektor kein 4 π -Detektor. Um Baukosten zu sparen, wird nur eine Richtung abgedeckt. Dadurch verliert man jedoch die Hälfte aller $b\bar{b}$ -Paare.

2.2.1 Detektoraufbau

Der LHCb Detektor besteht aus mehreren Subsystemen, die verschiedene Aufgaben übernehmen. Sie können in das Vertex- und Spursystem, Detektoren zur Teilchenidentifikation und den Magneten unterteilt werden. Abbildung 2.2 zeigt den LHCb Detektor.

Zu dem Spursystem gehören der Vertex Locator (VELO), der Trigger Tracker (TT) sowie der Inner Tracker (IT) und der Outer Tracker (OT).

Die Aufgabe des Vertex Locator [1] ist die präzise Messung der Spuren am Zerfallsvortex. Er befindet sich mit einem minimalen Abstand von 5 mm am Kollisionspunkt und ist aus 42 Modulen in Siliziumstreifentechnologie gebaut. Diese

³CP-Verletzung ist die Asymmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen bei gleichzeitiger Raumspiegelung [18].

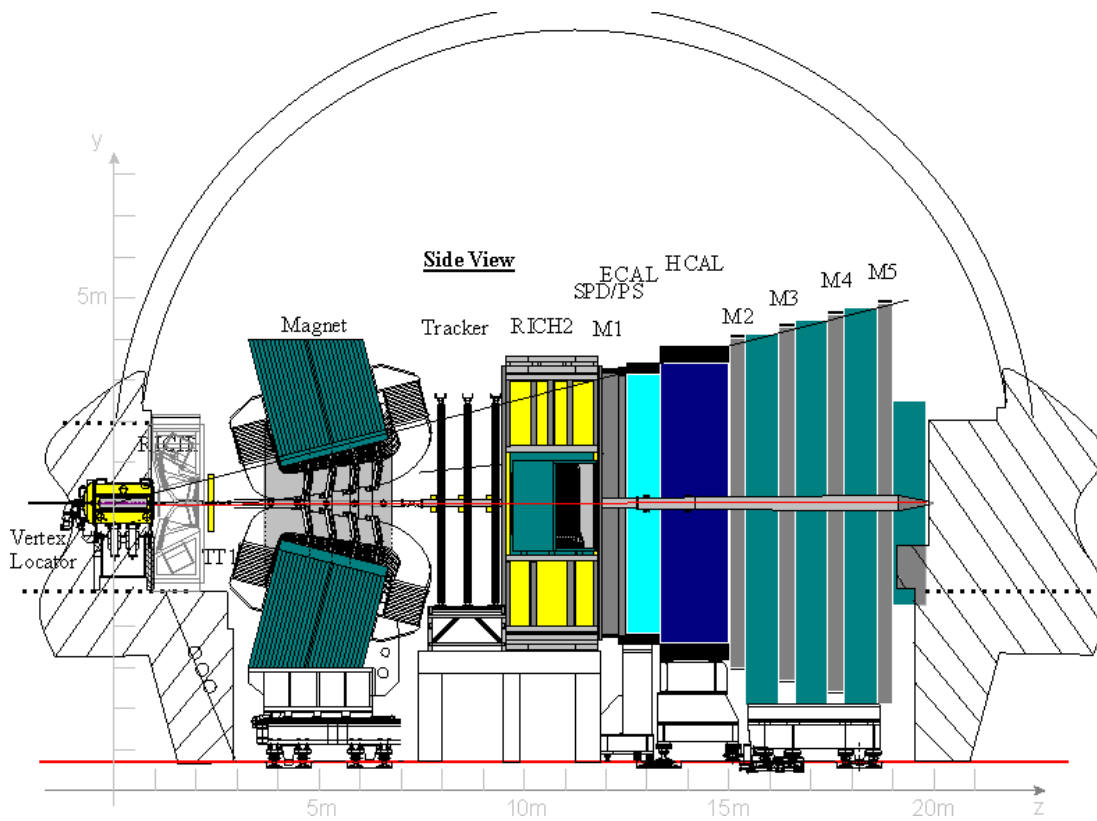


Abbildung 2.2: Seitenansicht des LHCb-Detektors [7].

Module sind entlang des Strahlrohres angebracht. Jedes der Module kann sowohl die radiale als auch die Winkelkomponente mit einer Ortsauflösung von 10-20 μm messen.

Der Trigger Tracker dient zur Spurrekonstruktion sowie zur Impulsmessung niederenergetischer Teilchen, die außerhalb der Akzeptanz des Outer Trackers liegen. Diese niederenergetischen Teilchen werden im Magnetfeld stark gekrümmt. Der Trigger Tracker befindet sich zwischen dem Magneten und dem RICH1⁴ und ist aus Siliziumstreifendetektoren aufgebaut.

Der Inner Tracker [2] und der Outer Tracker befinden sich in den Trackingstationen zwischen Magnet und RICH2. Die Aufgabe der Trackingstationen ist die Spurrekonstruktion zwischen dem Magneten und dem Kalorimeter. Mit dem Magnetfeld und der Spur eines identifizierten Teilchens wird der Impuls des Teilchens gemessen. Der Inner Tracker ist wie der Trigger Tracker aus Siliziumstreifendetektoren aufgebaut. Er überdeckt zwar nur 2% der Akzeptanz, wird jedoch von 20% der Spuren durchquert. Der Outer Tracker ist aus Driftkammern aufgebaut, die mit Straw Tube Technologie arbeiten. Das bedeutet, dass die Kammern sogenannte Straw Tubes beinhalten, die 2,5 m lang sind. Diese zylinderförmigen Röhren haben einen Außendurchmesser von 5,1 mm und im Zentrum des Zylinders ist ein Anodendraht gespannt. Auf die genauere Funktionsweise wird noch eingegangen.

Zu der Teilchenidentifikation werden zwei RICH-Detektoren, ein elektromagnetisches und ein hadronisches Kalorimeter sowie die Myondetektoren genutzt.

Der RICH1 [4] befindet sich zwischen VELO und TT und ist für niederenergetischere Teilchen zuständig. Er besteht aus zwei verschiedenen Radiatormaterialien. Deshalb ist es möglich, Kaonen und Pionen bis zu einem Impuls von 10 GeV bzw. 50 GeV zu separieren. Der RICH2 befindet sich zwischen den Tracking Stationen und der ersten Myonkammer und kann Kaonen und Pionen bis zu einem Impuls von 100 GeV separieren. Die Separation von Kaonen und Pionen ist für die zu untersuchende Physik des LHCb-Experiments sehr wichtig. Das Messprinzip beruht auf dem Cherenkov-Effekt, der bei Teilchengeschwindigkeiten auftritt, die größer sind als die jeweilige Lichtgeschwindigkeit in dem Medium. Diese Teilchen senden Cherenkov-Strahlung in einem bestimmten Kegel unter dem Winkel Θ_c aus:

$$\cos(\Theta_c) = \frac{c_m}{v} = \frac{1}{\beta n}. \quad (2.1)$$

Dabei ist n der Brechungsindex des Mediums und c_m die Lichtgeschwindigkeit im Medium. Die Messung des Winkels Θ_c erlaubt eine Bestimmung der Geschwindigkeit. Kennt man noch die Impulse der Teilchen, kann man auf die Teilchensorte schließen.

Die zwei Kalorimeter [5] sind Sampling-Kalorimeter, was bedeutet, dass unterschiedliche Materialien für Absorber- und Nachweismedium verwendet werden. Das elektromagnetische Kalorimeter verwendet Plastiksintillatoren als aktives

⁴RICH: Ring Imaging Cherenkov Detector.

Medium und Blei als Absorber. Das hadronische Kalorimeter verwendet dagegen als Absorber Eisen. Die Kalorimeter messen die Energie der Teilchen. Das elektromagnetische Kalorimeter misst Schauer von Elektronen, Photonen und π^0 -Mesonen ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$), während das hadronische Kalorimeter Schauer von Hadronen wie Kaonen und Protonen misst.

Die Myonkammern [6] sind, vom Vertex aus gesehen, hinter den anderen Detektoren aufgebaut, da Myonen die einzigen Teilchen sind, die den gesamten Detektor durchqueren. Es gibt fünf Myonstationen M1-M5, von der M1 vor dem elektromagnetischen Kalorimeter aufgestellt ist, um die Ortsinformation für die Spurrekonstruktion zu verbessern. Sie sind hauptsächlich aus Vieldraht-Proportionalzählern⁵ aufgebaut. Nur in der Nähe des Strahlrohrs in M1 wird GEM⁶-Technologie verwendet.

Der Magnet [3] erzeugt ein maximales Feld von 1,1 T und das Integral über das Magnetfeld $\int B dl$ beträgt 4 Tm. Er befindet sich zwischen dem Trigger Tracker und den Tracking Stationen. Das Gewicht des Magneten beläuft sich auf 1600 Tonnen.

2.2.2 Outer Tracker

Der Outer Tracker bildet mit dem Inner Tracker die Spurstationen zwischen dem Magneten und RICH2. Seine Aufgabe ist die Ortsmessung der durchlaufenden Teilchen. Die Ortsauflösung soll einen Wert von $200 \mu\text{m}$ erreichen. Aus Vergleich der Spurbildung vor und nach dem Ablenkmagneten soll der Impuls der Teilchen gemessen werden.

Der Outer Tracker [9] arbeitet als Driftgasdetektor. Geladene Teilchen durchqueren das Zählgas zwischen den Elektroden und ionisieren auf ihrem Weg die Gasatome. Durch ein angelegtes elektrisches Feld driften die Ionen zu den Elektroden. Die gemessene Driftzeit wird in einen Abstand von dem Anodendraht umgerechnet. Dies ermöglicht eine Ortsmessung, um die Trajektorie des geladenen Teilchens zu bestimmen. Um das Signal zu detektieren, muss es zuerst durch Gasverstärkung (siehe Kap. 3.2) verstärkt werden.

Outer Tracker Komponenten

In Abbildung 2.3 ist eine schematische Darstellung mit dem Outer Tracker gezeigt. Man erkennt in violett den Inner Tracker und den Trigger Tracker, die sich beide in der Nähe des Strahlrohres befinden. Der Outer Tracker ist in türkis dargestellt. Er deckt eine Fläche von $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ab und besteht aus drei Stationen, die hintereinander aufgestellt sind. Jede Station besteht jeweils aus zwei c-förmigen Rahmen, die an das Strahlrohr auf Schienen herangefahren werden können. In jedem Rahmen sind zwei Ebenen mit Modulen montiert, von denen

⁵MWCP: Multi Wire Proportional Chambers.

⁶GEM: Gas Electron Multiplier.

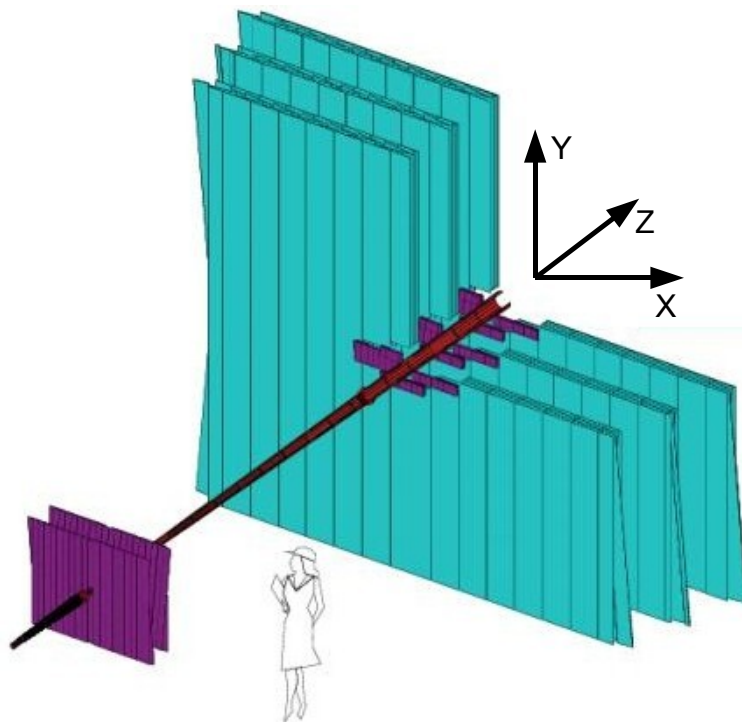


Abbildung 2.3: Darstellung des Outer Trackers (türkis) und des Inner Trackers sowie des Trigger Trackers (violett) [7]. Man erkennt in dem Outer Tracker die Modulstruktur.

jeweils eine Ebene um $\pm 5^\circ$ gegenüber der y -Achse gedreht ist. Mittels dieser Stereolagen erhält man eine Information über die Position des Teilchendurchgangs entlang der y -Achse. Die Module selbst sind aus zwei Lagen Straw Tubes aufgebaut. Diese Straws bilden jeweils einen eigenständigen Detektor und jedes dieser Röhrrchen entspricht jeweils einem Kanal von 53760 Kanälen im Outer Tracker.

Bei den Straws handelt es sich um Röhrrchen mit einem Innendurchmesser von 4,9 mm und einer Länge von 2,5 m, welche aus mehreren Schichten von Kapton und Aluminium bestehen. Dies ermöglicht die Nutzung als Kathode und garantiert die Gasdichte des Straws. In der Mitte des Straws wird ein goldbeschichteter Wolframdraht mit Hilfe von Drahtpositionierern gespannt, der einen Durchmesser von $25 \mu\text{m}$ besitzt. Dieser bildet die Anode. Bei 5 m Modulen liegen zwei Straws in Reihe. Auf die Funktionsweise der Straws wird in Kapitel 3 eingegangen.

Kapitel 3

Gasdetektoren

Da das äußere Spurkammersystem des LHCb Experimentes als Gasdetektor, basierend auf Straw Tube Technologie (siehe Kap. 2.2.2) realisiert wurde, soll in diesem Kapitel kurz auf die Funktionsweise von Gasdetektoren, speziell Proportionalzählern, eingegangen werden. Bei Gasdetektoren handelt es sich um einen mit Zählgas, meistens ein Edelgas, gefüllten Körper, in dem Elektroden ein elektrisches Feld erzeugen. Dabei wird ausgenutzt, dass geladene Teilchen die Atome im Zählgas ionisieren und die Elektronen und Ionen in dem Gas eine hohe Mobilität aufweisen. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes werden die entstandenen positiven Ionen und Elektronen von der Rekombination abgehalten, und driften zu den Elektroden. Schon durch die Bewegung der Elektronen und Ionen wird an den Elektroden ein Signal induziert. Dieses Signal muss zum Messen verstärkt werden, z.B. durch Gasverstärkung. Es gibt verschiedene Bauformen von Gasdetektoren wie die Zylinderform, diese wird häufig in Geiger-Müller Zählern und Proportionalzählern genutzt und ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

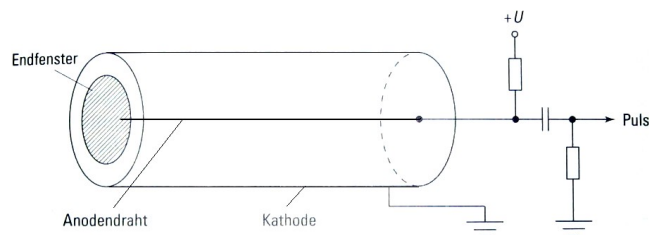


Abbildung 3.1: *Aufbau eines Zählrohres. Der äußere Mantel ist die geerdete Kathode, im Innern verläuft der Anodendraht, der an die Hochspannung angeschlossen ist. Das Signal wird kapazitiv über ein RC-Glied ausgekoppelt [17].*

Gasdetektoren werden in verschiedene Arbeitsbereiche betrieben, die von der Spannung zwischen Anode und Kathode abhängen. Die verschiedenen Arbeitsbereiche sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

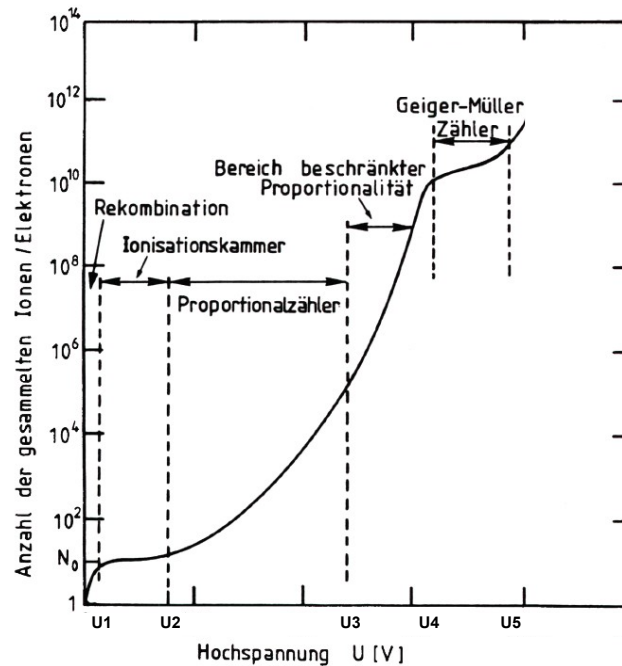


Abbildung 3.2: Strom in Abhängigkeit der Hochspannung bei einem zylindrischen Gasdetektor. Es sind die Arbeitsbereiche der Ionisationskammer, des Proportionalzählers sowie des Geiger-Müller Zählrohrs zu erkennen [16].

Im Rekombinationsbereich ist die angelegte Spannung zu schwach, um die Ionen vom Rekombinieren abzuhalten. Wird die Spannung weiter erhöht, so steigt der Anodenstrom bis zu einem Plateau, dies ist der Bereich, in dem alle erzeugten Ionen die Elektroden erreichen. Bei weiter steigender Spannung setzt Gasverstärkung ein, da die erzeugten Elektronen beim Driften zur Anode weitere Atome ionisieren, was zur Folge hat, dass der Anodenstrom ansteigt. Diesen Bereich nennt man Proportionalbereich, da die Anzahl der primär erzeugten Ionen proportional zum gemessenen Signal ist. Dies bedeutet, dass auch die deponierte Energie im Detektor proportional zum Signal ist. Die Proportionalität bricht jedoch ab einer gewissen Spannung ab, da der Betriebsmodus in den Geiger-Müller Modus übergeht, bei dem die gemessenen Signale nicht mehr von den Primärionisationen abhängen.

3.1 Energieverlust durch Ionisation und Anregung

Teilchen und Photonen verlieren ihre Energie in verschiedenen Prozessen, wenn sie sich durch Materie bewegen. Deshalb soll kurz auf diese Prozesse eingegangen werden. Dabei spielt die Ionisation von Atomen eine wichtige Rolle, um die Teilchen oder Photonen im Gasdetektor zu messen.

Geladene Teilchen

Teilchen verlieren ihre Energie beim Durchgang von Materie durch Ionisation bzw. Anregung von Atomen und Bremsstrahlung. Für den Energieverlust ($-\frac{dE}{dx}$) von schweren Teilchen ($m_0 \gg m_e$) gibt die Bethe Bloch Formel Gl.(3.1) den Energieverlust pro Wegstrecke in einem weiten Energiebereich wieder.

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (3.1)$$

mit:

- z : Ladung des einfallenden Teilchens in Einheiten der Elementarladung,
- Z, A : Kernladungszahl und Massenzahl des Absorbers,
- m_e : Elektronenmasse = 511 keV/c²,
- r_e : klassischer Elektronenradius = 2,817 · 10⁻¹³ cm,
- N_A : Avogadro Zahl = 6,022 · 10²³ Mol⁻¹,
- I : Charakteristische Ionisationskonstante für das bremsende Material,
- δ : Dichtekorrektur,
- $\beta = v/c$ (v : Teilchengeschwindigkeit, c : Lichtgeschwindigkeit),
- $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$,

Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf der Bethe Bloch Formel. Bei niedrigen Energien fällt die Bethe Bloch Formel mit $1/\beta^2$ ab und bildet ein Minimum. Relativistische Teilchen ($\beta \approx 1$) mit $\gamma \approx 4$ verlieren am wenigsten Energie auf einer Strecke. Sie werden als minimalionisierende Teilchen (MIPs) bezeichnet. Bei höheren Energien steigt der Energieverlust durch den logarithmischen Anstieg wieder an. Die Dichtekorrektur senkt den Anstieg ab, ist jedoch erst bei sehr dichten Materialien wie Eisen relevant. Das elektrische Feld einfallender relativistischer Teilchen wird dabei durch die Ladungsdichte der Atomelektronen abgeschirmt (Polarisation). Es bildet sich bei höheren Energien das Fermi Plateau. Bei sehr hohen Energien (1TeV) steigt der Energieverlust weiter an, was die Bethe Bloch Formel nicht beschreibt, und durch Bremsstrahlung verursacht wird.

Elektronen werden von der Bethe Bloch Formel nicht beschrieben. Dies hat mehrere Gründe, so werden unter anderem die Energieverluste von Elektronen schon in geringen Energiebereichen (MeV) von Bremsstrahlung dominiert und die

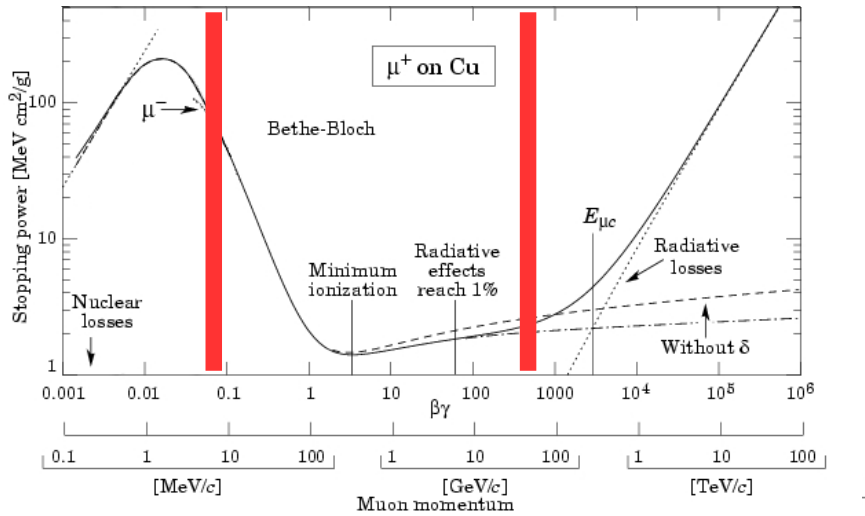


Abbildung 3.3: Die Abbildung stellt den Verlauf des Energieverlustes dE/dx bei positiven Myonen μ^+ gegen die Energie der Myonen dar. Man erkennt, dass die Bethe Bloch Formel für einen breiten Energiebereich (4 Dekaden) gültig ist. Sie kann den Verlauf des Energieverlustes bei niedrigen und hohen Energien nicht beschreiben. Der gültige Bereich ist mit den Balken markiert [15].

Gleichheit der Massen verlangt eine besondere Behandlung der Ionisationsverluste [16]).

Photonen

Photonen verlieren ihre Energie hauptsächlich durch drei Prozesse, siehe dazu Abbildung 3.4. Es handelt sich dabei um den Photoeffekt, der bei niedrigen Photonenenergien dominiert, und bei höheren Energien um den Comptoneffekt, bei dem das Photon an einem Elektron gestreut wird. Ist die Photonenergie höher als die doppelte Massenenergie des Elektrons kommt es auch zur Paarerzeugung, die bei sehr hohen Energien dominierend wird.

3.1.1 Primärionisation

Wird ein Atom ionisiert, kann das Elektron, abhängig von seiner kinetischen Energie, noch weitere Atome ionisieren. Die so erzeugten Elektronen einer Primärionisation werden als Cluster zusammengefasst. Der Unterschied zwischen Teilchen und Photonen besteht darin, dass ein Teilchen viele Atome auf seiner Spur ionisieren kann. Dagegen kann ein Photon nur ein Atom ionisieren. Deshalb erzeugt ein geladenes Teilchen viele Cluster auf seiner Spur, ein Photon nur einen einzigen Cluster. Die mittlere Energie (W) zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares

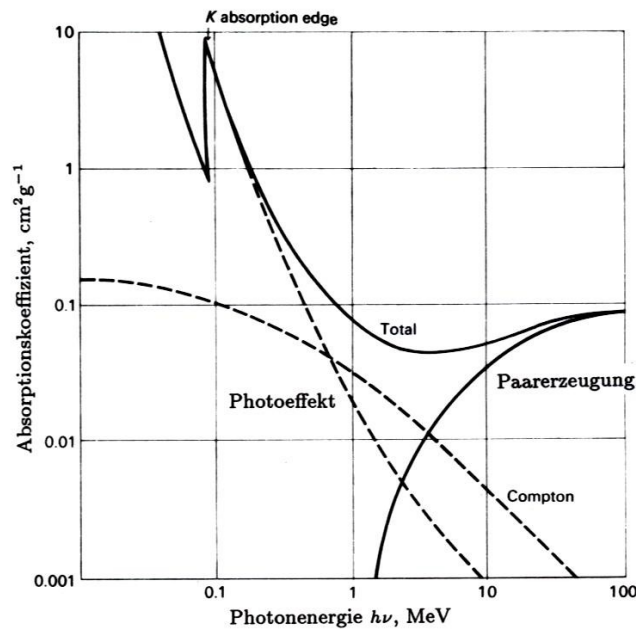


Abbildung 3.4: Absorptionkoeffizient für Photonen aufgetragen gegen die Photonenergie in Blei [18].

ist höher als die Ionisationsenergie des Gases, da Elektronen der inneren Schalen eine Rolle spielen. Sie hängt von der Gassorte ab, und hat etwa den Wert von 30 eV. Mit dem Energieverlust ΔE und W ist es möglich, die Anzahl der gesamten Ionisation n_T zu berechnen.

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

Dabei ist n_T die Summe der primären und der sekundären Ionisation, welche durch hochenergetische Primärelektronen erzeugt wird. Der W -Wert für Argon ist 26 eV und für CO_2 ist er 33 eV. Im Folgenden werden alle Elektronen eines Clusters als Primärelektronen vor der Gasverstärkung zusammengefasst.

3.2 Proportionalzähler

Bei einem Proportionalzähler wird die Anzahl der Primärelektronen durch die Gasverstärkung vergrößert. Die Anzahl der Elektronen nach dem Verstärkungsprozess ist proportional zur Anzahl der Primärelektronen und damit auch proportional zur deponierten Energie im Detektor. Im Folgenden wird eine zylindrische Geometrie angenommen (Abb. 3.1).

Gasverstärkung

Das elektrische Feld wird in der Nähe des Anodendrahtes so groß, dass die driftenden Elektronen auf der Strecke von einer mittleren freien Weglänge genug kinetische Energie aufnehmen, um ein Zählgasatom zu ionisieren. Man erhält durch Anwendung des Gaußschen Satzes folgendes radialsymmetrisches Feld:

$$\left| \vec{E}(r) \right| = \frac{\epsilon \cdot U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \quad (3.3)$$

mit:

- U : Spannung,
- r_a : Innenradius der Kathode,
- r_i : Radius des Anodendrahtes,
- ϵ : Dielektrische Konstante des Gases,

Damit ergibt sich für den Energiegewinn zwischen zwei Stößen

$$\Delta E_{kin} = -e \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(r) \cdot d\vec{r} = \frac{e \cdot U \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.4)$$

Dabei ist r_1 der Radius beim 1. Stoß und r_2 der Radius beim 2. Stoß. Es wird im Folgenden der erste Townsend-Koeffizient α eingeführt, welcher die Zahl der Elektron-Ion-Paare angibt, die ein Elektron pro Längeneinheit beim Lawinenaufbau erzeugt.

$$\alpha = \sigma_{ion} \cdot \frac{N_A}{V_{Mol}} \quad (3.5)$$

mit:

- σ_{ion} : Wirkungsquerschnitt für Stoßionisation,
- N_A : Avogadro Zahl = $6,022 \cdot 10^{23} \text{ Mol}^{-1}$,
- V_{Mol} : Molvolumen für ideale Gase = $22,41/\text{Mol}$,

Nimmt man N_0 Primärelektronen an, und beachtet, dass α von dem elektrischen Feld und damit von dem Radius abhängt, so folgt für die Anzahl der Elektronen beim Radius r ($N(r)$):

$$dN(r) = \alpha N(r) dr, \quad (3.6)$$

$$N(r) = N_0 \cdot e^{\int \alpha(r) dr}. \quad (3.7)$$

Es wird nun die Diethorn Annahme, dass der erste Townsend-Koeffizient α proportional zum elektrischen Feld E ist ($\alpha=K \cdot E$), gemacht. Dabei ist K die Proportionalitätskonstante. Wird dr mit $(dE \cdot dr/dE)$ ersetzt, so ergibt sich für die Gasverstärkung $G=N(r)/N_0$.

$$\ln G = \int_{E_{r_{min}}}^{E_i} \frac{U_0 \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \frac{\alpha(E)}{E^2} dE \quad (3.8)$$

$$G = \exp \left[\frac{k \cdot U_0 \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot \ln \left(\frac{E(r_i)}{E_{r_{min}}} \right) \right] \quad (3.9)$$

Dabei ist $E_{r_{min}}$ das elektrische Feld beim Radius r_{min} , wo die Lawinenbildung beginnt. $E(r_i)$ ist das Feld an der Anodendrahtoberfläche. $E_{r_{min}}$ ist proportional zu der Dichte und somit auch zu dem Luftdruck. Also erhält man für G [21]:

$$G = \exp \left[\frac{k \cdot U_0 \cdot \epsilon}{\ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)} \cdot \ln \left(\frac{E(r_i)}{E_{min}(p_0)} \frac{p}{p_0} \right) \right] \quad (3.10)$$

Fast die gesamte Gasverstärkung findet wenige Drahradien entfernt vom Zentrum des Detektors statt. Da die Elektronen eine etwa um den Faktor 10^3 höhere Mobilität besitzen, bildet die Lawine eine Tropfenform mit den Elektronen im Kopf und den langsamen positiven Ionen im Schwanz des Tropfens. Wird die Intensität der Bestrahlung sehr groß, wird das elektrische Feld durch Raumladungseffekte teilweise abgeschirmt und die Gasverstärkung nimmt ab. Die Raumladungseffekte werden durch die langsamen Ionen verursacht.

Es ist möglich, bei Kenntnis der Anzahl der Primärelektronen, durch messen des Anodenstroms und der Teilchenrate, G_{eff} zu bestimmen. Dafür wird die folgende Formel angewendet.

$$G_{eff} = \frac{I}{R \cdot e \cdot n_T} \quad (3.11)$$

mit:

- I : Anodenstrom
- R : Teilchenrate
- e : Elementarladung
- n_T : Anzahl von Primärelektronen pro Teilchen

UV-Photonen

Für sehr hohe Felder werden UV-Photonen immer entscheidender. Sie werden durch Ionisation von Elektronen aus tiefen Schalen ermöglicht. Das fehlende Elektron wird durch ein Elektron einer höheren Schale ersetzt, weshalb darauf ein

UV-Photon oder Auger Elektron emittiert wird. Das UV-Photon kann eine neue Lawine auslösen. Der zweite Townsend Koeffizient γ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein freies Elektron ein UV-Photon erzeugt [16]. Dies bedeutet, dass die erste Lawine ($N_0 \cdot G \cdot \gamma$) UV-Photonen erzeugt, die wiederum Photoelektronen auslösen. Also hat die zweite Phase ($N_0 \cdot G^2 \cdot \gamma$) Elektronen.

$$N(r) = N_0 G_\gamma = N_0 G + N_0 G^2 \gamma + N_0 G^3 \gamma^2 \dots \quad (3.12)$$

$$= N_0 G \cdot \sum_{k=0}^{\infty} (G\gamma)^k = \frac{N_0 G}{1 - \gamma G} \quad (3.13)$$

Geht $\gamma G \rightarrow 1$ so wird der erzeugte Spannungsimpuls unabhängig von der Primärionisation, die Gasverstärkung kann dabei Werte von $G \approx 10^8$ bis 10^{10} erreichen. Dieser Bereich wird Geiger-Müller-Bereich genannt. Es entsteht nicht nur lokal eine Elektronenlawine, sondern die Lawine breitet sich entlang des Anodendrahtes aus. In diesem Betriebsmodus ist es wichtig die Entladung wieder zu löschen. Dazu werden Ladewiderstände, Absenkung der externen Spannung für die Zeit der Ionenwanderung unter den Schwellwert sowie Vertauschung der Polarität der Elektroden angewendet. Durchgesetzt hat sich die Methode der Selbstlöschung mit Löschgas.

Löschgas

Um die emittierten Photonen zu reduzieren verwendet man als Gasbeimischungen Löschgase (Quencher-Gase) (z.B. $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6, \text{CO}_2$) [14]. Diese mehratomigen Moleküle besitzen Rotations- und Vibrationsfreiheitsgrade, die breite Absorptionsbanden im Bereich von (100-200) nm besitzen. Diese Anregungen werden ohne emittierte Strahlung durch elastische Stöße abgebaut. Durch die Verwendung von Löschgas wird die Reichweite der UV-Photonen auf einige Drahtstrahlen reduziert.

Driftkammerprinzip

Ein Proportionalzähler kann wie beim LHCb Outer Tracker zur Ortmessung verwendet werden. Dazu misst man die Zeitdifferenz zwischen dem Durchgang des ionisierenden Teilchens durch den Detektor und der Registrierung des ersten Signals. Kennt man die Signalgeschwindigkeit im Anodendraht und weiß man die Position entlang des Drahtes, wo das Teilchen durchflog, so kann man den radialen Abstand der Trajektorie bestimmen. Dazu verwendet man die r-t-Relation, welche jedem Radius eine Zeit zuordnet. Gehen Cluster Elektronen beim Driften zur Anode z.B. durch Attachment verloren, kann dies dazu führen, dass die Ausleselektronik den ersten Puls nicht registriert. Dadurch verschlechtert sich die Ortsauflösung.

Attachment

Attachment bedeutet Anlagerung von Elektronen an Moleküle oder dissoziierten Ionen des Zählgases. Elektronen kleiner Energie ($\leq 1\text{eV}$) lagern sich durch inelastische Stöße an elektronegative Gase wie Sauerstoff und Tetrafluormethan an. Die Wahrscheinlichkeit hängt von der Elektronenenergie ab. Elektronen höherer Energie können Moleküle wie CF_4 und O_2 dissoziieren und sich an die resultierenden Ionen anlagern. Dieser Prozess findet eher in Anodendrahtnähe statt.

Das Anlagern der Elektronen hat zur Folge, dass driftende Elektronen aus einem Cluster verlorengehen. Dadurch wird die Gasverstärkung reduziert, was dazu führen kann, dass die Nachweisgrenze der Elektronik unterschritten wird. Dies bewirkt eine Verschlechterung der Ortsauflösung, wenn der Proportionalzähler als Driftgasdetektor verwendet wird.

Kapitel 4

Alterung

Alterung ist ein unerwünschter bei Gasdetektoren häufig auftretender Effekt, der durch dauerhafte Bestrahlung entsteht. Dabei handelt es sich vor allem um die Verschlechterung von Detektoreigenschaften wie Gasverstärkung (siehe Kap. 3.2), Energieauflösung, Effizienz und Ortsauflösung sowie um Dunkelströme. Ein Überblick über die verschiedenen Alterungsphänomene wird in Kap. 4.1 gegeben.

Die genauen Prozesse lassen sich nur schlecht untersuchen, da man nur die Auswirkungen einer Bestrahlung auf die Anode und Kathode untersuchen kann und daraus auf den eigentlichen Prozess schließen muss. So wird z.B. die Anodenoberfläche mit Rastertunnelmikroskopie untersucht, um die Auswirkung der Alterung zu untersuchen. Eine andere Möglichkeit ist die Messung der Gasverstärkung, die es ermöglicht, Aussagen über eine Änderung der Feldkonfiguration zu machen.

Diese Methode wird in diesem Kapitel nach einer kurzen Einleitung in die allgemeinen und die LHCb-Alterungseffekte beschrieben, da sie für die Messung der Alterung der Module des Outer Trackers verwendet wird. Zudem wird der Messaufbau sowie seine Modifikation während der Diplomarbeit beschrieben. Daraufhin wird kurz auf die Bestätigung früherer Alterungsmessungen eingegangen. Zum Schluss des Kapitels werden mögliche Modelle zur Beschreibung des spezifisch Alterungsprofils bei der Alterung des Outer Trackers diskutiert.

4.1 Mögliche Ursachen für Alterung

In diesem Abschnitt werden kurz die häufigsten bekannten Alterungseffekte beschrieben. Dabei handelt es sich um Veränderungen der Anode durch kohlenstoff- oder siliziumhaltige Polymerablagerungen, Veränderungen der Kathode und Dunkelströme. Zudem wird darauf eingegangen, welche Maßnahmen diese verhindern oder abschwächen können.

4.1.1 Ablagerungen auf der Anode

Durch ausgasende Materialien in Driftkammern oder durch die bewusste Zugabe als Löschgas (Quenchgas) können sich Kohlenwasserstoffverbindungen (z.B. CH_4) im Zählgas befinden. Diese Moleküle können aufgrund ihrer niedrigen Bindungsenergie $E_{\text{Bind}} \approx 4 - 8 \text{ eV}$ [11] im Gasverstärkungsprozess aufgespalten werden. Durch Polymerisationsprozesse bilden sich darauf langkettige Moleküle, welche sich auf dem Anodendraht ablagern. Dadurch entstehen leitende und nicht leitende Schichten, welche die Gasverstärkung verändern. Auch leitende Schichten verringern die Gasverstärkung, da die Vergrößerung des Anodendrahtdurchmessers das Feld in dem Zylinder reduziert (siehe Formel 3.3).

Ein weiterer Effekt ist die Bildung sogenannter Whiskers in Gasmischungen mit $(\text{CH}_2)_n$ -Verbindungen. Whiskers sind feine Härchen, die von der Elektrode abstehen. An ihnen ist die Feldliniendichte sehr hoch, weshalb es zu Entladungen kommen kann [16]. Dies führt zu Dunkelströmen. Die Gasmischung Ar/CO_2 zeigt keine Bildung von Whiskers, solange keine Verunreinigungen im Zählgas vorhanden sind. Verunreinigungen können z.B. durch ausgasende Materialien in das Zählgas geraten.

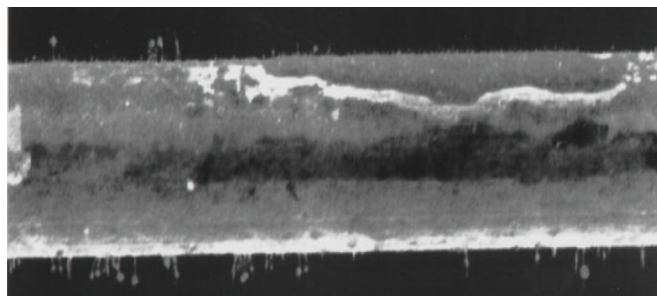


Abbildung 4.1: Foto eines Anodendrahtes mit $25 \mu\text{m}$ Durchmesser aufgenommen mit einem Elektronenmikroskop. Auf der Oberfläche sind Whiskers zu erkennen [20].

Schon geringste Spuren von Silizium (Gasanteil von 10^{-12}) [13] können Alterung hervorrufen. Silizium bildet ähnliche Bindungen wie Kohlenstoff, jedoch bleiben die meisten Verbindungen des Siliziums nicht wie beim Kohlenstoff in der Gasphase (CO , CO_2), sondern lagern sich z.B. auf dem Anodendraht ab. Da in industriellen Gassystemen häufig Materialien wie z.B. O-Ringe, Schmieröle und PVC-Schläuche verwendet werden, die Siliziumverbindungen enthalten, muss beim Detektorbau genau auf die verwendeten Materialien geachtet werden, da sonst Spuren von Silizium in den Detektor geraten können.

Es ist jedoch mittels Ultraschallbad in Isopropylalkohol möglich, Materialien von Siliziumverunreinigungen zu säubern. Zudem hilft es, wenn man dem Zählgas CF_4 hinzufügt, dessen im Gasverstärkungsprozess entstehenden Fluorradikale mit

den Siliziumverunreinigungen reagieren, bevor sie sich ablagern können. Dadurch werden die Verunreinigungen mit dem Gasfluss abtransportiert.

Es kann durch die Reaktivität von Fluorradikale trotz der Goldbeschichtung des Wolframdrahtes zu unerwünschter Korrosion kommen, die schlimmstenfalls zum Reißen des Drahtes führen kann. Ein Anätzen der Anodendrähte durch Fluorradikale, das teilweise zum Reißen der Drähte führte, wurde bei früheren Alterungstest des Outer Trackers festgestellt [10]. Deswegen wurde die zuerst geplante Gasmischung Ar/CO₂/CF₄ (75%/10%/15%) in die jetzt verwendete Zählgasmischung Ar/CO₂ (70%/30%) verändert.

4.1.2 Ablagerungen an der Kathode

Bei Ablagerungen auf der Kathode kommt es teilweise zum Maltereffekt, bei dem es sich um den folgenden Prozess handelt. Durch isolierende Ablagerungen auf der Kathode können die Ionen des Gasverstärkungsprozesses nicht mehr auf die Kathode abfließen, sondern lagern sich auf der isolierenden Schicht an (siehe Abb. 4.2). Diese Ionen erzeugen ein starkes Feld. Wenn das Feld über der isolierenden Schicht groß genug ist, kommt es zur Feldemission von Elektronen aus der Kathode [19]. Diese Elektronen driften zur Anode, wo eine Gasverstärkung einsetzt, die zu neuen positiven Ionen führt, welche sich an der Kathode anlagern. Es entsteht ein sich selbst erhaltender Anodenstrom, der auch nach dem Abschalten der Bestrahlung noch kurze Zeit weiterläuft. Wird die Hochspannung abgeschaltet, erlischt der Anodenstrom sofort.

4.2 Alterungseffekt des Outer Trackers

Bei der Untersuchung von Alterungseffekten lassen sich nicht alle Parameter im Labor den Bedingungen im Experiment nachstellen. Die Strahlungsintensität wird in Alterungstests mit einem Beschleunigungsfaktor versehen, damit die für die erwartete Betriebsdauer akkumulierte Ladung in einer kürzeren Zeit erreicht wird. Dies ist immer ein Kompromiss zwischen den Parametern akkumulierte Ladung (Akkumulierte Ladung bedeutet, wieviel Ladung pro cm Straw gesammelt wird.) und Intensität.

Da Alterungseffekte bei Gasdetektoren nicht ungewöhnlich sind, wurden viele intensive Alterungstests durchgeführt. Die Tests wurden bei hohen Beschleunigungsfaktoren durchgeführt um die beim Outer Tracker innerhalb der geplanten Betriebszeit erwartete akkumulierte Ladung¹on 1 C/cm in einer geringen Zeit zu erreichen. Dies ist ein Standardverfahren für Alterungstest, da die akkumulierte Ladung normalerweise ein guter Indikator für die zu erwartende Alterung ist. Bei diesen Tests wurden keine Hinweise auf Alterung gefunden. Da die Alterung

¹v

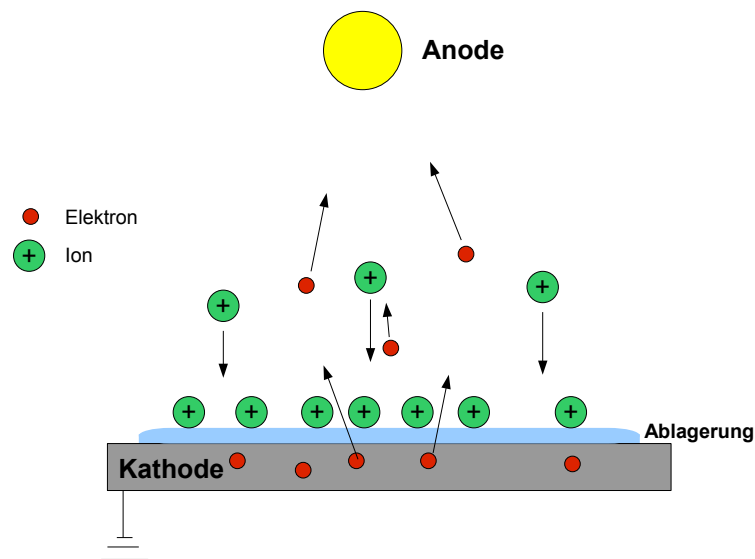


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Maltereffekts. Durch isolierende Ablagerungen (hellblau) sammeln sich positive Ionen an der Kathode. Ist die Flächenladungsdichte groß genug, kommt es zur Feldemission von Elektronen aus der Kathode. Die Elektronen kommen so zwischen die Elektroden und driften zur Anode. Dabei bilden sich durch den Gasverstärkungsprozess weitere positive Ionen, die zur Kathode driften und sich ablagern [12].

des Outer Trackers des LHCb Experiments bei hohen Intensitäten nicht auftritt, wurde sie erst nach dem Ende der Produktion bei niedrigen Intensitäten entdeckt.

Bei der in den Outer Tracker Modulen beobachteten Alterung handelt es sich um eine ungewöhnliche Form der Alterung. Deutliche Gasverstärkungsverluste der LHCb Outer Tracker Module treten schon nach kurzer Bestrahlung (1-2 mC/cm akkumulierte Ladung auf, jedoch nur bei Strömen <15 nA/cm (Beschleunigungsfaktor 1). Dabei bildet sich meistens ein halbmondförmiger Gasverstärkungsverlustbereich stromaufwärts der Bestrahlungsquelle (siehe Abb. 4.3). Direkt unter sowie stromabwärts der Quelle wird kein Effekt beobachtet.

In der Abbildung ist das Verhältnis der Gasverstärkung vor und nach einer 47 h dauernden Bestrahlung mit der ^{90}Sr -Quelle (S8487) dargestellt. Dabei ist jeder Messpunkt das Verhältnis der Gasverstärkung an dieser Position. Dies wird durch einen Farbcode verdeutlicht. Die Straws laufen von oben nach unten. Der rote Punkt symbolisiert die Position der Bestrahlungsquelle und der schwarze Pfeil zeigt die Gasflussrichtung an.

Der Halbmond zeigt gegen die Gasflussrichtung in den Straws. Des Weiteren wird die Alterung von der Intensität der Quelle beeinflusst. Der Radius des Halbmondes wächst mit der Aktivität der Quelle. Dies kann bei stark alternden Modulen dazu führen, dass sich bei einer Bestrahlung mit einer schwachen Quelle der Halbmond nicht mehr ausbildet, sondern nur noch als breiter Fleck zu erkennen ist. Je höher die Gasflussgeschwindigkeit in den Straws ist, desto mehr Gasverstärkungsverluste sind nach einer Bestrahlung zu erkennen. Alterung tritt sowohl mit ^{55}Fe -(γ -Strahler) als auch mit ^{90}Sr -(β -Strahler) auf.

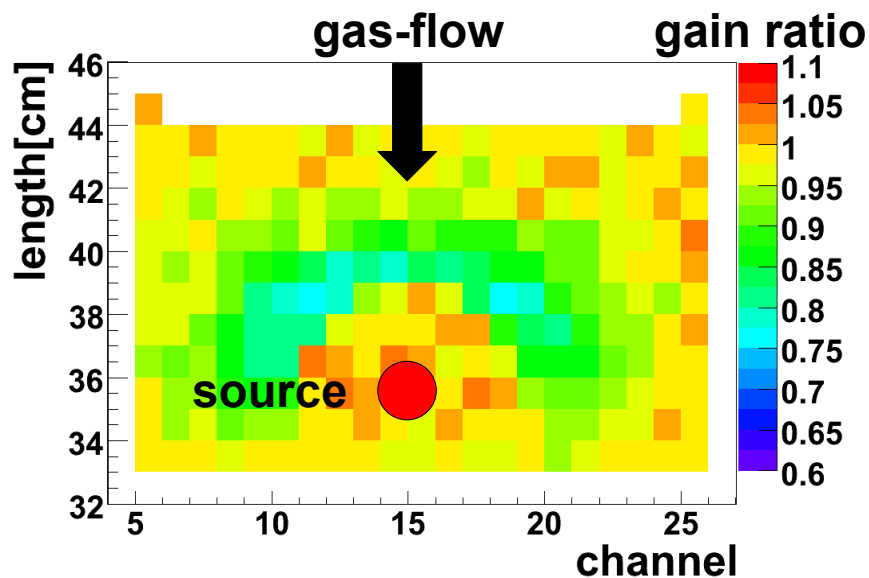


Abbildung 4.3: Gasverstärkungsverhältnis-Diagramm einer Bestrahlung von 47h mit einer ^{90}Sr -Quelle. Die Quelle ist als roter Punkt markiert und die Gasflussrichtung in den einzelnen Straws (Kanälen) ist mit einem schwarzen Pfeil gekennzeichnet. Die Straws laufen von oben nach unten und die Farbcodierung gibt das Gasverstärkungsverhältnis vor und nach der Bestrahlung an der jeweiligen Position an. Deutlich ist der halbmondförmige Gasverstärkungsverlust stromaufwärts der Quelle zu erkennen.

Möglichkeiten, um Alterung zu verhindern

Es wurden verschiedene Methoden gefunden, um die Alterung der Outer Tracker Module zu reduzieren. Durch längeres Spülen der Module mit Gas (siehe Abschnitt 4.4) altern die Module weniger. Dies kann durch gleichzeitiges Erwärmen der Module auf circa 40°C beschleunigt werden [12]. Aus diesem Grund werden die bereits in das LHCb Experiment eingebauten Module durchgehend gespült, und

es wurde versucht, alle Module mindestens einmal für zehn Tage aufzuwärmen, bevor die ersten Kollisionen stattfinden. Des Weiteren zeigen Bestrahlungen mit Gasmischungen, denen 1-4% Sauerstoff hinzugeführt wurden, weniger Alterung als die normale Gasmischung [12, 13].

4.2.1 Ursache des Gasverstärkungsverlustes der LHCb OT Module

Intensive Untersuchungen [12, 13] der gesamten Produktionskomponenten ergaben, dass das für die Modulproduktion verwendete Epoxydharz Araldit AY103-1 die Ursache für die Alterung ist. Dieser Kleber war schon vorher intensiv getestet worden, und wurde als einsatzfähig befunden. Im Gasverstärkungsprozess werden die entwichenen Kohlenwasserstoffverbindungen aufgespalten und lagern sich auf dem Anodendraht ab. Diese Ablagerungen bilden eine mehrere 100 nm dicke [12] fest haftende, gut isolierende Schicht, die das elektrische Feld in dem Bereich abschwächen und so zu einer Reduzierung der Gasverstärkung führen.

4.3 Untersuchung des Alterungseffektes in Heidelberg

Um die durch Bestrahlung erzeugte Veränderung der Gasverstärkung zu messen, wird die Gasverstärkung vor und nach der Bestrahlung bestimmt. Dazu wird die Messung der Gasverstärkung erläutert, welche auf der Messung von Pulsspektren basiert. Des Weiteren wird der Messaufbau der Alterungsmessungen an den Outer Tracker Modulen erklärt und auf deren Analyse eingegangen.

4.3.1 Messprinzip

Die Gasverstärkung ist das Verhältnis der Anzahl der am Anodendraht gemessenen Elektronen zu den erzeugten Primärelektronen. Um dieses Verhältnis effektiv zu bestimmen, wird eine Bestrahlungsart benutzt, die immer die gleiche Anzahl an Primärelektronen erzeugt, damit das gemessene Signal als direkte Messung der Gasverstärkung dienen kann. Um dies zu realisieren, nutzt man Photonen konstanter Energie einer ^{55}Fe -Quelle. ^{55}Fe besitzt eine Halbwertszeit von 2,7 Jahren und wandelt sich durch Elektroneneinfang eines Elektrones aus der K-Schale in ^{55}Mn um. Das neue Manganatom hat ein Elektronloch in der K-Schale, welches durch Emission von K_α Strahlung (80%) oder K_β Strahlung (20%) in seinen Grundzustand übergeht. Die Photonen besitzen eine Energie von $K_\alpha = 5,9\text{ keV}$ und $K_\beta = 6,2\text{ keV}$, weshalb sie mit Materie durch den Photoeffekt wechselwirken. Das Photon erzeugt ein Photoelektron, das in weiteren Ionisationsprozessen seine Energie verliert und zur Bildung eines Elektronenclusters führt. Im Mittel

besteht dieses aus 220 Elektronen. Die Primär- sowie Sekundärelektronen werden als Cluster zusammengefasst. Die Elektronen werden im Bereich der Anode verstärkt.

4.3.2 Verwendete radioaktive Quellen

Für die Bestrahlung wurden verschiedene Quellen benutzt. Es handelte sich dabei um fünf verschiedene Quellen, drei ^{55}Fe -Quellen und zwei ^{90}Sr -Quellen. Zwei ^{55}Fe -Quellen werden als schwache Eisenquellen bezeichnet. Sie haben die gleiche Aktivität und die gleichen Strahlprofile, deshalb werden sie im Folgenden nicht weiter unterschieden. Die dritte ^{55}Fe -Quelle wird als starke Eisenquelle bezeichnet. Bei den ^{90}Sr -Quellen handelt es sich um einen β -Strahler mit der maximalen Energie von 0,546 MeV. Die Strahlprofile aller Quellen sind in Abbildung 4.4 dargestellt, wobei die Rate gegen den jeweiligen Straw/Kanal aufgetragen ist. Die Strahlprofile wurden mit einem Detektormodul aufgenommen. In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Daten nochmals zusammengefasst. Aus den Raten pro Straw wurde unter der Annahme eines radialsymmetrischen gausförmigen Profils die Rate pro cm bestimmt. Die ^{90}Sr -Quellen werden zur Bestrahlung der Module genutzt, jedoch nicht zur Messung der Gasverstärkung.

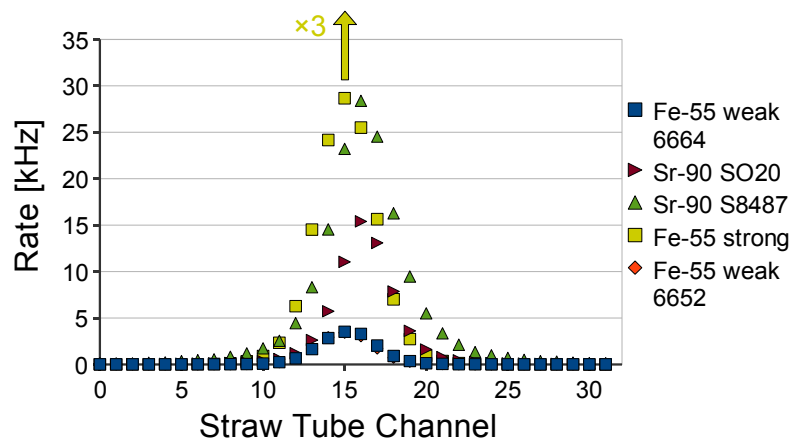


Abbildung 4.4: Strahlprofile der in den Messungen verwendeten radioaktiven Quellen. Die Rate ist gegen die Kanalnummer aufgetragen. Die beiden schwachen ^{55}Fe -Quellen haben das gleiche Profil. Die Rate der starken ^{55}Fe -Quelle wurde aus Darstellungsgründen gedrittelt. Die ^{90}Sr -Quellen waren bei der Messung einen Straws verschoben (1 Straw = 0,5 cm).

| Quelle | Aktivität [Bq] (07.12.2006) | Rate [kHz] | Breite [cm] | Rate im stärksten Bereich [kHz/cm] |
|---------------------------|--------------------------------|------------|-------------|--|
| Starke ^{55}Fe | $8,7 \cdot 10^8$ | 390 | 0,9 | 37 |
| Schwache ^{55}Fe | $3,58 \cdot 10^7$ | 16 | 0,9 | 1,5 |
| ^{90}Sr SO20 | $1,53 \cdot 10^7$ | 66 | 1 | 6 |
| ^{90}Sr S8487 | $2,25 \cdot 10^6$ | 153 | 1,3 | 9 |

Tabelle 4.1: *Aktivität der Bestrahlungsquellen*

Pulsspektrum einer ^{55}Fe -Quelle

Die Abbildung 4.5 zeigt ein typisches ^{55}Fe -Pulsspektrum gemessen in mV, aufgenommen mit einem 5 m Modul. Als Gasmischung wurde Ar/CO₂ (70%/30%) bei einem Gasfluss von 1 Vol/h (300 ml/min) verwendet. Die Hochspannung betrug 1600 V. Deutlich ist der 5,9 keV Peak bei etwa 420 mV zu erkennen, zudem erkennt man den Escapepeak bei etwa 280 mV. Kommt dadurch zustande, dass das letztere 5,9 keV Photon ein K-Schalen-Elektron des Argons ionisiert, wobei das Elektron seine kinetische Energie durch Ionisationen im Detektor verliert. Das angeregte Argonatom emittiert nun K-Strahlung, die ohne weitere Ionisation den Straw verlassen kann, wodurch effektiv die im Detektor deponierten Energie reduziert wird. Deshalb gibt es weniger Primärelektronen und das resultierende Signal ist kleiner. Wenn das 5,9 keV Photon ein Elektron der äußeren Schale ionisiert, so ist die Bindungsenergie von 15,8 eV zu vernachlässigen, und das Elektron deponiert durch Ionisation die gesamten 5,9 keV im Straw.

Vergleich der Gasverstärkung mit Pulsspektren

Zum Vergleich der Gasverstärkung zweier Messungen vergleicht man die Lage der Peaks in den jeweiligen Pulsspektren, die Lage der Peaks ist proportional zur Gasverstärkung. Abbildung 4.6 zeigt zwei Pulsspektren an verschiedenen Positionen des gleichen Kanals bei 1600 V und Gasmischung Ar/CO₂ (70%/30%). Das blaue Spektrum wurde an einer Position ohne Alterung aufgenommen und das rote Spektrum an einer Position mit Alterung. Es ist deutlich zu erkennen, dass das rote Spektrum gegenüber dem blauen zu kleineren Pulshöhen verschoben ist. Beide Messungen wurden mit einem Kollimator direkt nacheinander durchgeführt, so dass sich die Umweltbedingungen (Luftdruck, Temperatur) nicht änderten. Da für diese Messung nur die zwei schwachen ^{55}Fe -Quellen verfügbar waren, mussten die Spektren auf die Hintergrundstrahlung korrigiert werden. Dazu wurde ein Pulsspektrum ohne ^{55}Fe -Quelle unter gleichen Versuchsparametern unter gleichen Umweltbedingungen aufgenommen.

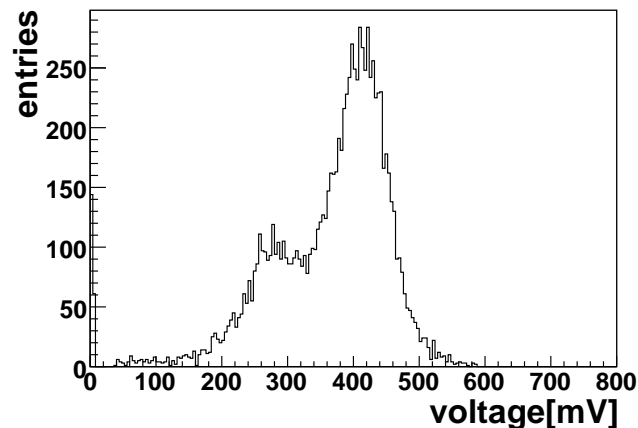


Abbildung 4.5: Normales Pulsspektrum von ^{55}Fe mit Ar/CO_2 (70%/30%), bei 1600 V. Es ist deutlich der Peak sowie der Escapepeak zu erkennen. Der 5,9 keV Peak und der 6,2 keV Peak werden nicht aufgelöst, da die Energieauflösung zu schlecht ist.

4.3.3 Messaufbau

Zur Bestimmung der Gasverstärkung vor und nach der Bestrahlung wird auf dem Modul eine ^{55}Fe -Quelle auf der zu messenden Position plaziert. Um entlang der Straws die Position zu definieren, wird ein Kollimator verwendet (Ausrichtung \perp zum Straw). Über eine Auslesekarte am Ende des Moduls werden die Pulse der Kanäle mit einem Oszilloskop gemessen. Die Pulse werden mit einem (VV50) [22] Vorverstärker auf der Auslesekarte vorverstärkt. Das Oszilloskop ist mit dem PC über eine GPIB² Schnittstelle verbunden, womit sich das Oszilloskop durch senden von ASCII-Befehlen steuern und auslesen lässt. Die Auswahl der Kanäle sowie die Steuerung des Oszilloskops wurden mittels eines LabView Programms durchgeführt [12].

Die Gasverstärkung einer Position auf dem Modul wird bei eingestellter Hochspannung von 1550 V wie folgt gemessen: Es wird ein Kanal über LabView ausgewählt und mit der ^{55}Fe -Quelle bestrahlt. Durch den Kollimator wird jeweils eine Drahtlänge von 4 mm bestrahlt. Die Messung mittelt demnach die Gasverstärkung über eine Anodendrahtlänge von etwa 4 mm. Die Gasverstärkung wird durch die Mittelung von 256 Pulshöhen gemessen, welche der Gasverstärkung proportional sind. Das Oszilloskop führt die Mittelungen durch und gibt den Wert an LabView weiter. Mit dieser Methode ist es möglich, die Gasverstärkung auf 3% genau zu messen.

Genauer als die Mittelung durch das Oszilloskop ist es, die Peaksposition im

²General Purpose Interface Bus, ein internationaler Industriestandard für ein Schnittstellensystem, mit dem Messgeräte mit einem Computer verbunden werden [23].

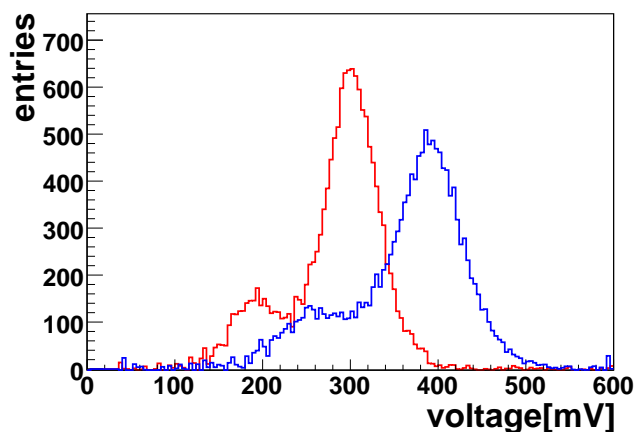


Abbildung 4.6: *Pulsspektrenvergleich an einer unbestrahlten Position (blau) und einer bestrahlten Position die Alterung zeigt (rot). Die Verschiebung der Peakposition zu kleineren Pulshöhen beim roten Spektrum gegenüber dem blauen Spektrum ist deutlich zu erkennen. Die Gasverstärkung ist beim roten Spektrum um 25% kleiner.*

Pulshöhenspektrum zu ermitteln.

Um eine Alterungsmessung einer bestrahlten Fläche durchzuführen (siehe Abb. 4.3), wird für eine bestimmte Zahl von Kanälen (1 Straw = 0,5 cm) der Kollimator entlang jedes Straws in 1 cm Schritten verschoben, und für jede Position wird die mittlere Pulshöhe aufgenommen.

Die Auswahl des Kanals und die Speicherung der gemittelten Gasverstärkung wird mit einem LabView-Programm realisiert. Dadurch muss der Kollimator mit den ^{55}Fe -Quellen nur von Hand an die zu messende Position entlang platziert werden. Der gesamte Messablauf wurde im Laufe der Diplomarbeit durch eine Konstruktion mit zwei Schrittmotoren automatisiert.

4.3.4 Automatisierung der Messung

Um die Gasverstärkung über ein bestimmtes Kammerareal automatisch zu messen, wurde während dieser Diplomarbeit ein Gestell mit zwei Schrittmotoren konstruiert und gebaut (siehe Abbildung 4.7). Dieser besteht hauptsächlich aus einem Aluminium/Alcoa-Gerüst mit jeweils zwei Führungsstangen sowie einer Gewindestange für den x- und y-Vorschub. Angetrieben wird er von zwei Schrittmotoren (PANdrive 110-42 mit Haltemoment 0,33Nm), die mit ASCII-Befehlen über LabView gesteuert werden. Mit der automatisierten Messmethode ist es möglich eine Fläche von 64 Kanälen \times 25 cm abzuscannen.

Dafür wird das Gestell mit dem X-Motor Richtung Messkarte zeigend, über das Modul positioniert (siehe Abb. 4.7), so dass der Kollimator in seiner Nullpo-

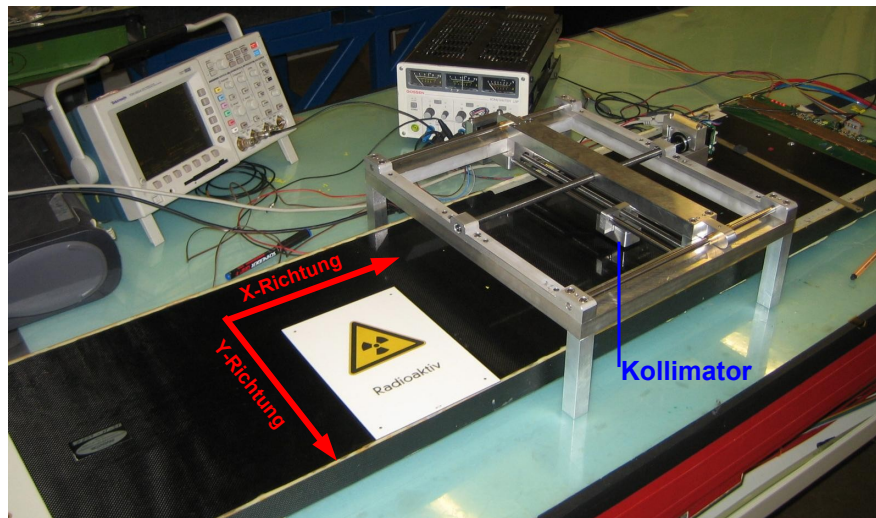


Abbildung 4.7: Messaufbau für automatische Messmethode. Im Innern des Kollimators befinden sich die ^{55}Fe -Quellen, der Bestrahlungsschlitz ist senkrecht zu den Straws in dem Modul gestellt. Am Ende des Moduls (rechts) erkennt man die Auslesekarte, die mit dem Oszilloskop (links oben) verbunden ist. Das Oszilloskop ist über eine GPIB-Schnittstelle mit einem PC verbunden und wird über ein LabView Programm ebenso wie die Auslesekarte und die Schrittmotoren gesteuert.

sition etwa 5 cm in X-Richtung vom Messbereich entfernt ist. Zudem werden die vier FüÙe jeweils ($2,05 \pm 0,05$) cm entfernt von dem Modul ausgerichtet. Sind die FüÙe aligniert, wird die markierte X-Mitte des Kollimators mit der Reflexion des Kollimatorschlitzes von der Moduloberfläche und einer Markierung auf dem Modulrand in Deckung gebracht (siehe Abb. 4.8), indem man die X-Gewindestange etwas nachjustiert.

Dies ist die neue Nullposition des Kollimators. Erst jetzt darf die 12 V-30 V Gleichspannungsquelle für die Schrittmotoren eingeschaltet werden. Für ein 64-Kanal-Modul ist die ins Messprogramm einzutragende Nullposition die X-Länge der Markierung am Modulrand und der Kanal 57.

Die bestrahlte Strahlänge L der automatischen Messung wurde durch den Kollimator und seiner Höhe H über dem Modul $H=(2 \pm 1)$ mm äquivalent zu der bestrahlten Strahlänge der alten Methode gewählt ($L \approx 4$ mm), dies ist wichtig, damit die neuen Messungen mit den alten Messungen vergleichbar sind. Der Kollimator wurde genau für drei ^{55}Fe -Quellen konstruiert, die in ihm durch Vertiefungen gegen Verrutschen gesichert sind (siehe Abbildung 4.9). Da sich die Umweltbedingungen (Luftdruck) während der jeweiligen Messung ändern, sollte der Scan nicht länger als zwei Stunden dauern.

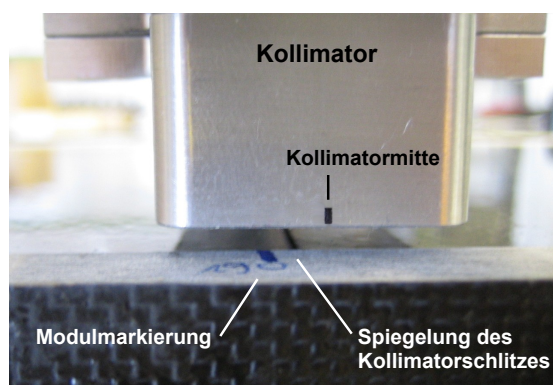


Abbildung 4.8: Kollimator an Gestell befestigt, Blickrichtung entgegen Y-Richtung (siehe Abb. 4.7). Man erkennt die Markierung in der Mitte des Kollimators, die Spiegelung des Kollimatorschlitzes von der Oberfläche des Moduls und die blaue Markierung am Rand des Moduls. Diese drei Striche müssen zur Alinierung zur Deckung gebracht werden. Dazu wird die Y-Gewindestange entsprechend von Hand gedreht.

Um möglichst schnell zu sein, fährt der Kollimator die Fläche in einer Schlangenlinie ab, und überspringt tote Kanäle. Mit ihm ist es möglich die normalen Scanabstände von 1 cm bei den manuellen Scans auf 0,5 cm zu reduzieren, ohne dass die Messung deutlich länger benötigt. Dieser Abstand nutzt die Auflösung des Kollimators besser aus, und sollte deshalb bevorzugt werden.

Vergleich der automatischen Messung mit der Handmessung

Vor dem Einsatz der automatisierten Messmethode für Gasverstärkungsmessungen wurde überprüft, ob die Messergebnisse, die mit ihm ermittelt werden, mit den Ergebnissen der alten Methode vergleichbar sind. Dafür wurde eine Testfläche ausgewählt, die Positionen mit Alterung sowie ohne Alterung aufwies. Diese Fläche wurde zweimal mit der alten und zweimal mit der neuen Methode vermessen. Die Messungen wurden direkt hintereinander bei 1550 V und mit der Gasmischung Ar/CO₂ (70%/30%) durchgeführt, während dieser Zeit änderten sich die Umweltbedingungen nicht. Danach wurden die gemessenen Gasverstärkungen jeweils untereinander sowie mit der anderen Messmethode verglichen. Es zeigte sich, dass die zwei Messmethoden in der gemessenen Gasverstärkung mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ übereinstimmen (siehe Abbildung 4.10). Die Mittelwerte der automatischen Messung sind lediglich 3% kleiner als die Mittelwerte der Handmessung, weil die ⁵⁵Fe-Rate mit dem neuen Kollimator konstruktionsbedingt in den Straws geringer ist, und somit sich die Hintergrundstrahlung mehr auswirkt. Trotzdem kann die neue automatisierte Methode die alte von Hand durchgeführte Methode

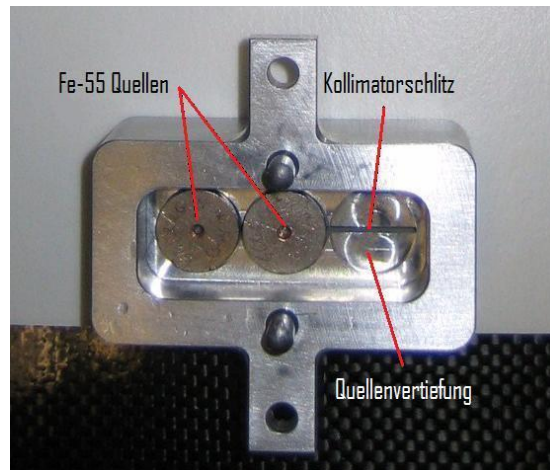


Abbildung 4.9: Kollimator von oben. In der mittleren und linken Quellenvertiefung liegt jeweils eine ^{55}Fe -Quelle. Die rechte Vertiefung ist frei. Man erkennt dort den Kollimatorschlitz, der unter allen drei Vertiefungen verläuft. Der Kollimator wird von unten an den Quellenhalter verschraubt. Das Gegenstück zum Kollimator ist so in der Tiefe konstruiert, dass sich die Quellen aus den Vertiefungen nicht mehr herausbewegen können.

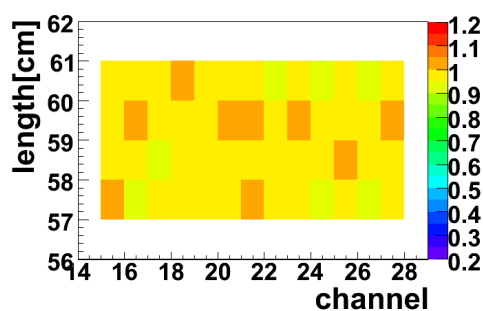
ersetzen und für die Alterungsmessungen benutzt werden.

4.3.5 Gasverstärkungsverhältnis-Diagramm

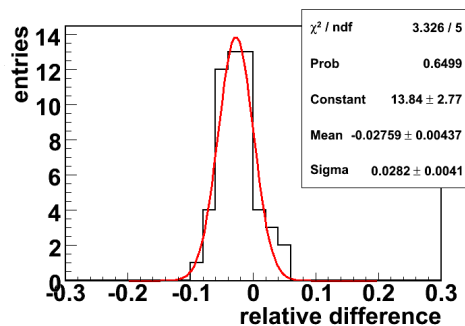
Mit dem Gasverstärkungsverhältnis-Diagramm wird das Verhältnis der Gasverstärkung vor und nach der Bestrahlung an jeder Position dargestellt (siehe Abbildung 4.3). Auf der x-Achse ist die Strawnummer bzw. die Kanalnummer aufgetragen (1 Straw = 0,5 cm), und auf der y-Achse die Position entlang eines Straws in cm. Die Farbcodierung gibt das Gasverstärkungsverhältnis an der jeweiligen Position an. Die Schwankungen der Umweltbedingungen wie Luftdruck und Temperatur zwischen zwei Messungen (zwei Tage Unterschied) verfälschen das Ergebnis. Deshalb wird zusätzlich mit dem Verhältnis der Gasverstärkungen in einem unbestrahlten Bereich korrigiert.

4.3.6 Quantitative Bewertung der Alterung

Um den Gasverstärkungsverlust zu quantifizieren wird eine ROOT-Routine verwendet [12], welche zu Vergleichszwecken eine Messung in einer Zahl zusammenfasst. Dabei werden die Messwerte einzelner Positionen eines Gasverstärkungsverhältnis-Diagramms (siehe Kap. 4.3.5), die sich in einem 1 cm breiten 220° Teil-



(a) Signulpulsverhältnis der zwei Messmethoden an jeder Position des Testgebietes



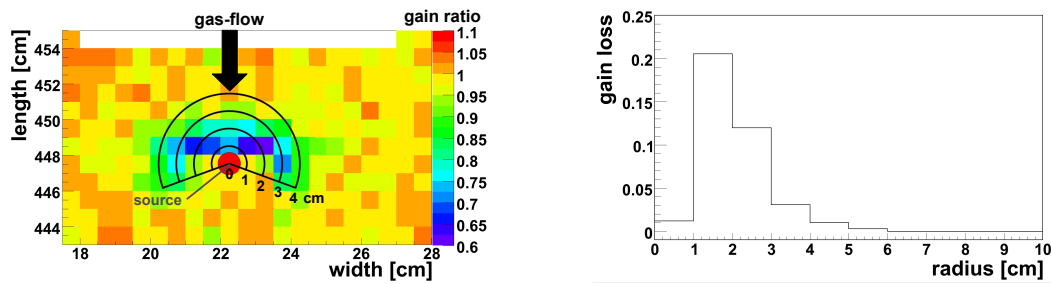
(b) Verteilung der Messabweichungen

Abbildung 4.10: Direkter Vergleich der zwei Messmethoden an jeder Position des Testgebietes, in welchem es Stellen mit und Stellen ohne Gasverstärkungsverluste gibt, dargestellt in Abbildung a). Man erkennt, dass die Verhältnisse nahe bei Eins verteilt sind. Abbildung b) zeigt die Verteilung der Abweichungen der Messungen, der Mittelwert der Gaußverteilung ist um 3% ins negative verschoben, da die Raten der zwei schwachen Quellen zu gering sind um Hintergrundstrahlung zu vernachlässigen. Durch die Hintergrundstrahlung wird das Signal zu kleineren Spannungen verschoben. Die Rate der manuellen Methode ist größer als die Rate der automatischen Methode. Also ist die Auswirkung der Hintergrundstrahlung auf die automatische Methode größer.

ringen um die Quelle befinden, aufaddiert und durch die Anzahl der aufaddierten Punkte geteilt. Die Abweichung von einem unbestrahlten Bereich wird dann als Alterung bezeichnet. Es werden Teilringe von 1 cm bis 5 cm Radius verglichen. Der Teilring mit dem stärksten Gasverstärkungsverlust ist charakteristisch für die verwendete Bestrahlungsquelle und wird zur Quantifizierung der Alterung genutzt. Der Messfehler dieser Alterungsangabe beträgt $\pm 2.5\%$.

4.3.7 Problematiken der Alterungsmessungen

Die Messung des Alterungsverhaltens der Outer Tracker Module bei Bestrahlung ist schwierig, da es viele Effekte gibt, die die Messung beeinflussen. Dabei ist die Gasverstärkungsmessung nicht der limitierende Faktor, es ist viel mehr das Alterungsverhalten der Module selbst. Es ist nicht möglich alle Parameter, die die Alterung beeinflussen, zu kontrollieren. Aus diesem Grund ist die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen nicht einfach gegeben. Dies hat zur Folge, dass eine Bestätigung einer Messung mit viel Arbeits- und Zeitaufwand verbunden ist.



(a) Gasverstärkungsverhältnisdiagramm

(b) Gasverstärkungsverlust in Abhängigkeit des Radius

Abbildung 4.11: a) zeigt ein Gasverstärkungsverhältnis-Diagramm. Der rote Punkt stellt die Position der Bestrahlungsquelle dar. Es sind verschiedene 220° Ringe um die Bestrahlungsposition eingezeichnet. Die Verhältnisse in den Ringen werden zur Quantifizierung der Alterung benutzt. b) zeigt die Gasverstärkungsverluste in den verschiedenen Ringen. Der Ring mit dem größten Verlust an Gasverstärkung wird als gesamte Alterung der Bestrahlung genutzt. Hier sind dies 20% aus dem Ringradius 1-2 cm.

Die Alterung von Modul zu Modul ist sehr unterschiedlich, was unter anderem an der Produktion des jeweiligen Moduls sowie der jeweiligen Historie liegt. Dies macht den Vergleich zweier Alterungsmessungen an verschiedenen Modulen sehr schwer. Des Weiteren führt der normale Gasfluss beim Betrieb der Module zu einer Reduzierung der Alterung der Module (siehe Kap. 4.4). Dies hat zur Folge, dass eine Wiederholung einer Bestrahlung nicht die gleichen Ergebnisse liefert. Dadurch ist es schwierig die Abhängigkeit der Alterung von einem Versuchsparameter zu untersuchen, da man nie nur einen Versuchsparameter verändert.

Aus diesen Gründen kann bei Änderung eines Versuchsparameter von unterschiedlicher Alterung nur ausgegangen werden, wenn es einen sehr deutlichen Effekt gibt.

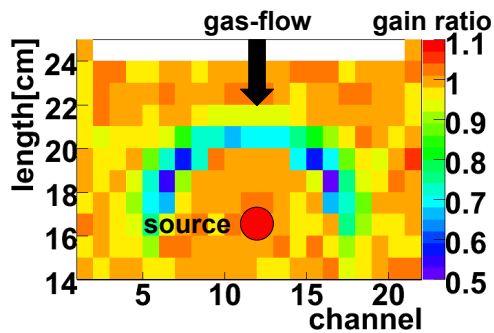
4.4 Bestätigung früherer Ergebnisse

Veränderung der Moduleigenschaften durch Spülen (Flushing-Effekt)

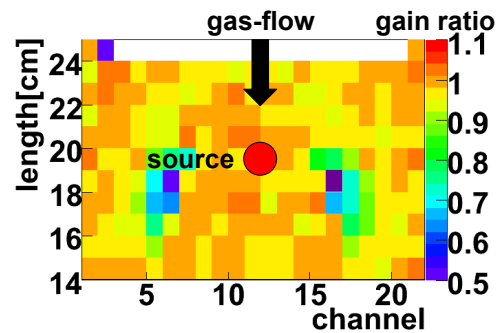
Durch langzeitiges Spülen der Module mit Gas, zeigt sich mit der Zeit immer weniger Alterung nach der gleichen Bestrahlungsdauer [12]. Der Alterungseffekt eines Moduls nimmt mit dem gespülten Gasvolumen ab. Dieser Effekt konnte während der Diplomarbeit in jeder Messreihe beobachtet werden.

Beseitigung der Ablagerungen mit hoher Bestrahlungsintensität

Bei diesem Versuch wurde zuerst eine Position 181 h mit der starken ^{55}Fe -Quelle bestrahlt, worauf sich der typische halbmondförmige Gasverstärkungsverlust zeigte. In Abbildung 4.12(a) kann man die Alterung (26%) erkennen. Danach wurde die Quelle um 3 cm stromaufwärts plaziert und eine erneute Bestrahlung begonnen. Nach 23 h wurde bei dem nächsten Scan kein Gasverstärkungsverlust mehr direkt unter der Quelle, der Position des alten Halbmondes, ausgemacht. Dies kann man in Abbildung 4.12(b) sehen. Die Gasverstärkung ist unter der Quelle wieder auf ihren alten Wert zurückgekehrt, die Alterung ist verschwunden. Es ist 3 cm stromaufwärts der anfänglich schwache Halbmond der 23 h Bestrahlung zu erkennen. Die gesamten Bestrahlungen dieser Messreihe wurden bei einem Gasfluss von 1 Vol/h (30 ml/min) und der typischen Hochspannung von 1600 V an einem kleinen Testmodul durchgeführt. Dieses Ergebnis wurde schon früher beschrieben [12].



(a) Alterung nach 181 h mit starker ^{55}Fe -Quelle



(b) Alterung nach 3 cm Verschiebung der starken ^{55}Fe -Quelle stromaufwärts und 23 h Bestrahlung.

Abbildung 4.12: In Abbildung a) sieht man deutliche Alterung (26%) nach 181 h Bestrahlung mit der starken ^{55}Fe -Quelle. Nach der Neuplazierung der Quelle 3 cm stromaufwärts direkt auf dem Halbmond und einer 23 stündigen Bestrahlung dieser Position ist der Teil direkt unter der Quelle des alten Halbmondes auf Abbildung b) nicht mehr zu erkennen. 3 cm weiter stromaufwärts dieser Position ist ein sehr schwacher Halbmond der 23 h Bestrahlung erkennbar.

Alterungstest mit Trabondmodul

Es konnte während dieser Diplomarbeit bestätigt werden, dass Module, die anstatt mit dem Epoxidharz Araldite AY103-1 mit dem Epoxidharz Tra-Bond 2115 geklebt sind, den typischen Alterungseffekt nicht aufweisen [12]. Dazu wurde ein

1 m Testmodul mit 32 Kanälen gebaut. Verwendet wurden alle Standardmaterialien, bis auf den Austausch der Epoxidharze. Nach einer Bestrahlung von 477,5 h mit der starken ^{55}Fe -Quelle konnte an diesem Testmodul keine Alterung festgestellt werden (siehe Abb. 4.13). Auch eine zweite Bestrahlung mit einer schwachen ^{55}Fe -Quelle zeigte nach 400 h keine Hinweise auf Alterung.

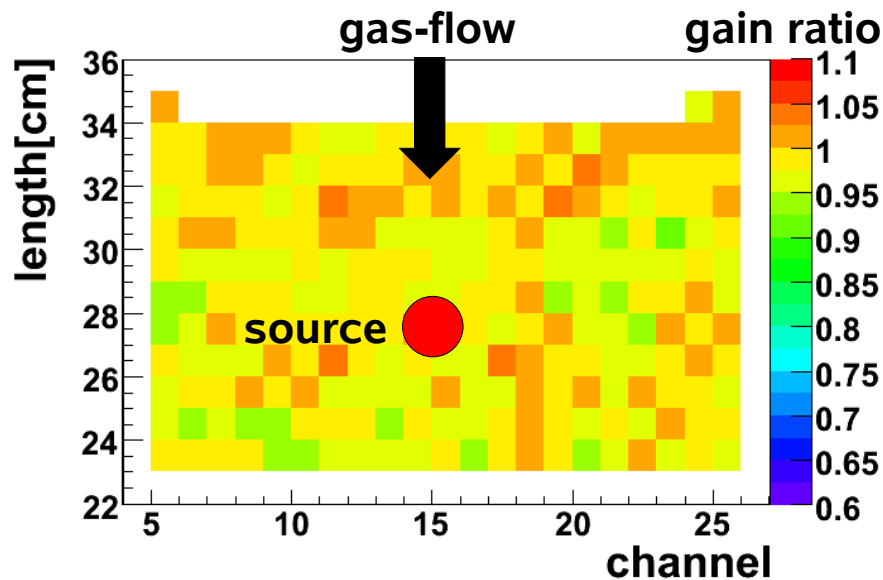


Abbildung 4.13: Alterungstest mit TraBond Modul zeigt keine Alterung nach 477,5 h Bestrahlung mit starker ^{55}Fe -Quelle.

4.5 Modelle der Alterung

Durch die Erkenntnisse, die schon vor Beginn der Diplomarbeit bekannt waren, entstanden zwei Modelle, die die Halbmondform der Alterung zu erklären versuchten. Diese zwei Modelle sollen im Folgenden erläutert werden [12],[13].

Die Alterung wird durch das ausgasende Epoxydharz Araldit AY103-1 + Härter HY991 verursacht. Die Kohlenwasserstoffverbindungen werden in dem Gasverstärkungsprozess aufgespalten und können sich dann auf dem Anodendraht ablagern. Sie bilden dort eine sehr feste und gut isolierende Schicht. Dies führt an der Ablagerungsposition zu einer Reduzierung der Gasverstärkung.

Reinigungsmodell

Im "Reinigungsmodell" lagern sich die Kohlenwasserstoffe aus dem Epoxydharz schon vor Erreichen der Quelle komplett auf dem Draht ab. Das Zählgas ist ab der

Ablagerungsposition sauber. Deshalb wird direkt unter und in Gasflussrichtung hinter der Quelle keine Alterung mehr festgestellt. Da die Ablagerung von der Rate abhängt, ist das Gas in den Straws weiter außerhalb der Quelle erst nach einer längeren Strecke stromabwärts sauber als das Gas in den Straws in der Mitte der Quelle. Deshalb entsteht ein Halbmond.

Radikalmodell

Im "Radikalmodell" wird davon ausgegangen, dass durch die Bestrahlung und den Gasverstärkungsprozess Radikale³ entstehen, die ab einer gewissen Konzentration im Zählgas die Ablagerung der Kohlenwasserstoffe verhindert, indem sie mit ihnen reagieren. Wenn sich das Zählgasgemisch der Quelle nähert, steigt die Konzentration der Radikale, so dass ab einer gewissen Position die Ablagerung verhindert wird. Die Rückdiffusion der Radikale wird durch Gasstrom verhindert. Da die Konzentration der Radikale von der Rate in den Straws abhängt, kann die Ablagerung in den Straws weiter außerhalb der Quellenmitte für eine längere Strecke stromabwärts Richtung Quelle stattfinden. Ist die nötige Konzentration um Alterung zu verhindern erreicht, bilden sich keine Ablagerungen mehr. Deshalb entsteht ein Halbmond.

Wenn Alterung stromabwärts hinter der Quelle wieder auftritt, könnte dies daran liegen, dass die Radikale nur eine bestimmte Lebensdauer im Gas besitzen, nach der sie wieder zerfallen. Dadurch sinkt die Konzentration stromabwärts der Quelle in den Straws wieder.

³Radikale sind Atome oder Moleküle mit mindestens einem ungepaarten Elektron

Kapitel 5

Transportstudien

Es wurde beobachtet, dass Alterung in Gasflussrichtung nur vor der Quelle auftritt (Halbmondform des Gasverstärkungsverlustes). Da es Modelle (siehe Kap. 4.5) für die Bildung des Halbmondes gibt, die auf einen transportierbaren Effekt schliessen lassen, stellte sich die Frage, ob eine zeitgleiche Bestrahlung derselben Straws an zwei voneinander abweichenden Positionen einen Unterschied im jeweiligen Alterungsverhalten erkennen lässt. Es also möglich ist, mit dem Gasfluss einen Effekt einer Quelle zu einer anderen zu transportieren. Dies führt zu dem Begriff Transportstudien.

Zu Beginn der Diplomarbeit waren die Ergebnisse einer Messreihe [12], die mit zwei gleichen Bestrahlungsquellen durchgeführt wurden, schon vorhanden. Diese Messreihe wird kurz beschrieben. Danach wird auf die während dieser Diplomarbeit durchgeführten Transporttests eingegangen, welche verschiedene Bestrahlungsquellen nutzten.

5.1 Transporttests

5.1.1 Idee

Es werden dieselben Straws gleichzeitig mit zwei Quellen an verschiedenen Längenschnitten auf dem Modul bestrahlt und die Alterung an beiden Positionen beobachtet [12]. Im folgenden wird, wie in Abbildung 5.1 gezeigt, die stromaufwärts liegende Quelle als Bestrahlungsquelle eins und die stromabwärts liegende Quelle als Bestrahlungsquelle zwei oder Testquelle bezeichnet.

5.1.2 Durchführung

Es wurden drei Einzelmessungen durchgeführt, bei denen die Entfernung zu den Quellen jeweils 25 cm, 75 cm oder 180 cm betrug [12]. Der Versuch wurde mit zwei ^{55}Fe -Quellen durchgeführt. Dabei wurden jeweils dieselben Kanäle bestrahlt, siehe dazu Abbildung 5.1. Der Mittelpunkt beider Quellen befand sich auf dem

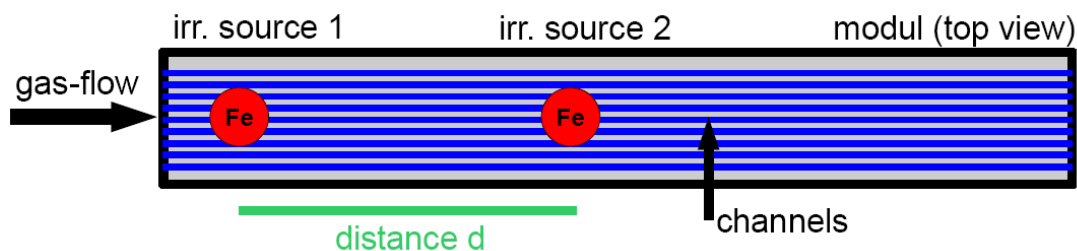


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Quellenposition in den Transporttests in Aufsicht. Die Straws sind blau dargestellt und die roten Punkte symbolisieren die radioaktiven Quellen (nicht maßstabsgetreu). Zur gleichen Zeit werden dieselben Kanäle mit zwei radioaktiven Quellen an zwei verschiedenen Positionen bestrahlt. Es wird die Auswirkung der Quelle eins auf die Alterung der stromabwärts liegenden Quelle zwei (Testquelle) beobachtet. Die Distanz zwischen den Quellen wird für die einzelnen Messungen geändert.

gleichen Straw. Es wurde ein 5 m Modul aus Heidelberger Produktion verwendet. Die Bestrahlungszeit betrug jeweils 75 h.

5.1.3 Ergebnis der Transporttests

Die Tests zeigen, dass die erste Bestrahlung einen Einfluss auf die Alterung der zweiten Bestrahlung stromabwärts hat. Dieses Ergebnis lässt sich mit unseren beiden Alterungsmodellen (siehe Kap. 4.5) erklären. Jedoch scheint die Wirkung lokal begrenzt, da bei einer Distanz von 180 cm kein Einfluss der ersten auf die zweite Quelle erkannt wurde [12]. Dieses Ergebnis lässt sich mit beiden Modellen erklären. Bei dem Radikalmodell kann es sich um Radikale mit einer Halbwertszeit von Minuten handeln, sodass die erzeugte Radikalkonzentration in den Straws wieder abnimmt, bevor die Radikale die Testbestrahlung bei 180 cm erreicht hat. Mit dem Reinigungsmodell könnten durch die Straws Verunreinigungen stromabwärts der ersten Quelle wieder in das Zählgas geraten. Beide Modelle können die Ergebnisse erklären, jedoch scheint das Radikalmodell wahrscheinlicher, da die Straws gasdicht sind.

5.2 Transporttests mit unterschiedlichen Quellen

5.2.1 Idee

Ziel der während der Diplomarbeit durchgeführten Transporttests ist eine Validierung der Ergebnisse des bereits durchgeführten Transporttests. Zudem sollen die Messungen ein tieferes Verständnis des Mechanismus hinter dem besonderen Schädigungsprofil liefern. Dazu werden für Bestrahlungsquelle eins (siehe Abb.5.1) Quellen mit unterschiedlicher Intensität genutzt, die sich nach dem Radikalmodell in den Konzentrationen der möglicherweise produzierten Radikale unterscheiden würden. Dies würde sich in einer unterschiedlich langen Distanz der Alterungsunterdrückung stromabwärts der starken und der schwachen Quellen auswirken, da die Radikale nur eine endliche Lebensdauer haben. Diese Beobachtung würde man beim Zutreffen des Reinigungsmodells nicht erwarten, da die Alterung nach der gleichen Strecke wieder einsetzen müsste. Dabei wird vorausgesetzt, dass das Gas vollständig an der ersten Quelle gesäubert wurde.

5.2.2 Durchführung

Bei diesen Transporttest wurden für die Bestrahlungsquelle eins zwei ^{55}Fe -Quellen mit verschiedenen Intensitäten verwendet. Für die Testquellen wurden auf den gleichen Straws, auf denen die Bestrahlungsquellen eins liegen, die schwache ^{55}Fe -Quelle und die starke ^{90}Sr -Quelle plaziert. Die Testquellen erzeugen vergleichbare Alterung wie die Quellen eins. Die zwei Versuche wurden parallel und zeitgleich auf einem 2,5 m Modul durchgeführt, um die Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Abbildung 5.2 zeigt den Versuchsaufbau schematisch. Die Messungen wurde für die Distanzen 8 cm und 25 cm zwischen der ersten und der zweiten Quelle durchgeführt. Der Gasfluss durch das Modul war für beide Versuche 150 ml/min (1 Vol/h) Ar/CO₂ (70%/30%) und die Bestrahlungsdauer betrug jeweils 68 h.

5.2.3 Ergebnis

Distanz 8 cm

Abbildung 5.3 zeigt den relativen Gasverstärkungsverlust durch Alterung als Funktion der Strawnummer und der Position entlang des Straws. Die schwache ^{55}Fe -Quelle an der ersten Bestrahlungsposition (66 cm) zeigt starke Alterung ohne Halbmondform. Dies ist typisch für ein stark alterndes Modul. Die starke ^{55}Fe -Quelle an der ersten Bestrahlungsposition (66 cm) erzeugt Alterung in Form eines Halbmondes, der auf seiner rechten Seite (Kanäle ≥ 45) nur schwach ausgebildet ist. Die zweiten stromabwärts liegenden Quellen zeigen in der Mitte

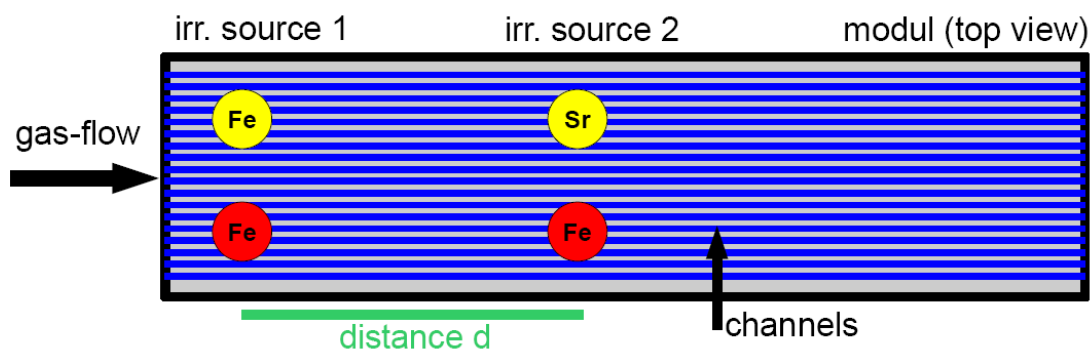


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Quellenposition in den Transporttests in Aufsicht. Die Straws sind blau dargestellt und die roten/gelben Punkte symbolisieren die radioaktiven Quellen (nicht maßstabsgetreu). Die roten Punkte sind die schwachen Quellen und die gelben Punkte die starken Quellen. Zur gleichen Zeit werden dieselben Kanäle mit zwei radioaktiven Quellen an zwei verschiedenen Positionen bestrahlt. Es wird die Auswirkung der Quellen eins auf die Alterung der stromabwärts liegenden Quellen zwei (Testquellen) beobachtet. Die Distanz zwischen den Quellen wird für die einzelnen Messungen geändert.

ihres Halbmondbogens keine Anzeichen von Alterung. Tabelle 5.1 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Angabe über Alterung bezieht sich nur auf den direkt stromaufwärts liegenden Bereich der Straws, auf denen die jeweilige Quelle direkt liegt.

| | erste Quelle | zweite Quelle | Alterung erste Quelle | Alterung zweite Quelle |
|------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. Messung | Schwache ^{55}Fe | Schwache ^{55}Fe | ja | nein |
| 2. Messung | Starke ^{55}Fe | Starke ^{90}Sr SO20 | ja | nein |

Tabelle 5.1: Ergebnis des Transporttests mit Distanz 8 cm. Die Angabe über Alterung bezieht sich nur auf den direkt stromaufwärts liegenden Bereich der Straws, auf denen die jeweilige Quelle direkt liegt.

Distanz 25 cm

In Abbildung 5.4 sieht man den relativen Gasverstärkungsverlust aus dieser Messung analog zur Abbildung 5.3. Bei den zwei Bestrahlungspositionen eins (22 cm)

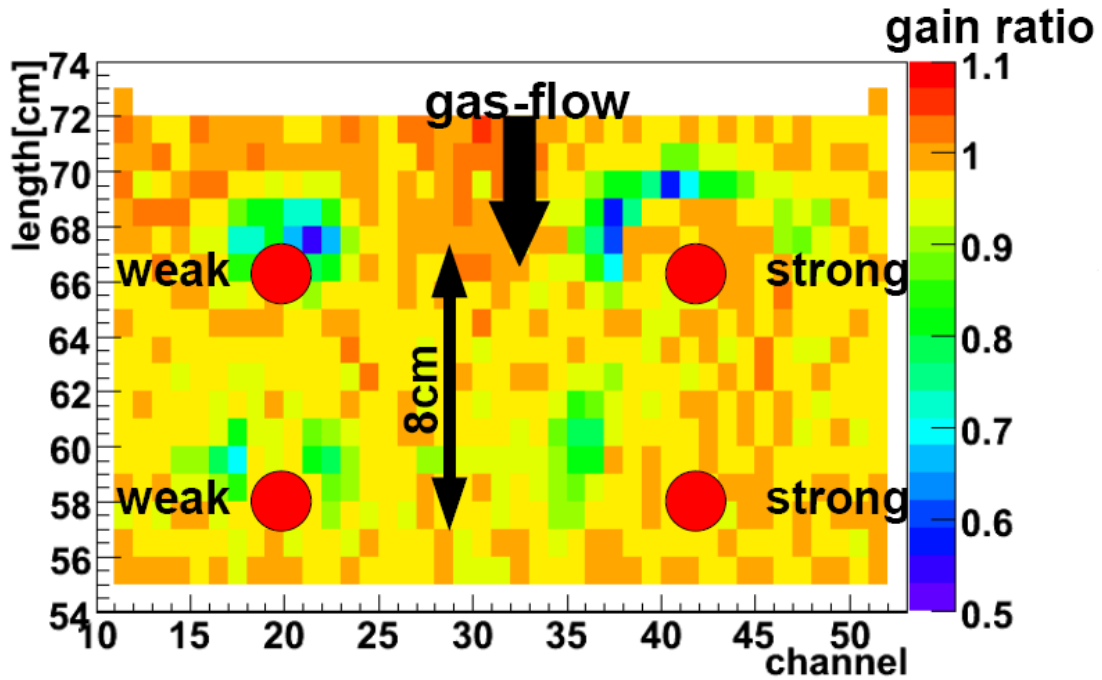


Abbildung 5.3: Relativer Gasverstärkungsverlust durch Bestrahlung als Funktion der Strawnummer und der Länge entlang der Straws. Die roten Punkte symbolisieren die Position der radioaktiven Quellen (nicht maßstabgetreu). Die schwache und starke ^{55}Fe -Quelle bei der Position 66 cm zeigen jeweils normale Alterung. Jedoch erkennt man bei den Quellen der Position 58 cm die fehlende Alterung in den Kanälen. Bei der schwachen ^{55}Fe -Quelle sind dies die Kanäle 18-20 und bei der starken ^{90}Sr -Quelle die Kanäle größer Kanal 37.

ist der Gasverstärkungsverlust vergleichbar mit der 8 cm Messung¹. Stromabwärts hinter der ersten schwachen ^{55}Fe -Quelle zeigen alle Kanäle der Bestrahlungsposition zwei (47 cm) starke Alterung, jedoch zeigen sich hinter der starken ^{55}Fe -Quelle sieben Kanäle im Halbmondbogen der Bestrahlungsposition zwei (47 cm), die keine Alterungseffekte aufweisen. Tabelle 5.2 fasst die Ergebnisse zusammen.

5.2.4 Interpretation der Transporttests mit unterschiedlichen Quellen

Es zeigt sich, dass stromabwärts der starken Quelle für eine längere Distanz weniger Alterung auftritt als stromabwärts der schwachen Quelle. Das Radi-

¹ Die Alterung ist jedoch stärker, was daran liegt, dass die 8 cm Messung zeitlich nach der 25 cm Messung durchgeführt wurde (siehe Kap. 4.4) und demnach weniger Gasverstärkungsverluste zeigt.

| | erste Quelle | zweite Quelle | Alterung erste Quelle | Alterung zweite Quelle |
|------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1. Messung | Schwache ^{55}Fe | Schwache ^{55}Fe | ja | ja |
| 2. Messung | Starke ^{55}Fe | Starke ^{90}Sr SO20 | ja | nein |

Tabelle 5.2: *Ergebnis des Transporttests mit Distanz 25 cm. Die Angabe über Alterung bezieht sich nur auf den direkt stromaufwärts liegenden Bereich der Straws, auf denen die jeweilige Quelle direkt liegt.*

kalmodell kann diese Beobachtung mit unterschiedlichen Radikalkonzentrationen hinter der starken und der schwachen ^{55}Fe -Quelle erklären. Die starke Quelle produziert wahrscheinlich eine höhere Konzentration der Radikale, die den Gasverstärkungsverlust verhindern. Da die Radikale nur eine endliche Lebensdauer haben, resultiert dies in einer unterschiedlich langen Distanz der Alterungsreduktion.

5.3 Weitere Indizien für das Radikalmodell

Ausgehend von einer Bestrahlungsquelle wird Alterung in Gasflussrichtung verhindert. Versuche mit diesem Transporteffekt die Gasverstärkung einer schon gealterten Position wieder herzustellen, indem eine Quelle stromaufwärts der gealterten Position plaziert wird

In dieser Messreihe wurde ein 5 m Modul (M213) verwendet, wie für die anderen Transporttests. Der Gasfluss betrug 300 ml/min (1 Vol/h) Ar/CO₂ (70%/30%). Es wurde die starke ^{55}Fe -Quelle 10 cm stromaufwärts einer schon in früheren Messungen durch eine schwache ^{55}Fe -Quelle verursachten Alterung plaziert. Das Modul wurde mit der starken Quelle 86 h bei 1600 V bestrahlt. Es zeigte sich an dem stromabwärts liegenden Gasverstärkungsverlust keine Veränderung. Darauf wurde zusätzlich zu der starken ^{55}Fe -Quelle eine schwache ^{55}Fe -Quelle genau auf die frühere Bestrahlungsposition 10 cm stromabwärts der starken ^{55}Fe -Quelle gesetzt. Es handelte sich dabei um genau die gleiche Quellenposition, bei der die Alterung erzeugt wurde. Ein Platzieren der Quelle direkt auf den Halbmond, und ein damit verbundener Rückgang der Alterung durch hohe Bestrahlung (siehe Kapitel 4.4), kann ausgeschlossen werden. Die Alterung mit der schwachen ^{55}Fe -Quelle, die sich in früheren Messungen in 117,5 h entwickelt hatte, halbierte sich innerhalb von 20 h von 20,5% auf 11% bei Bestrahlungsintensitäten, die vorher Alterung verursacht hatten.

Dieses Ergebnis wurde in einer zweiten Messung mit gleichem Aufbau bestätigt, in welcher der Abstand der starken ^{55}Fe -Quelle und der schwachen ^{55}Fe -Quelle 75 cm betrug. Bei dieser Messung wurde die Alterung einer schwachen ^{55}Fe -Quelle innerhalb von 105 h von 11,5% (Abb. 5.5(a)) auf 2,5% (Abb. 5.5(b)) reduziert.

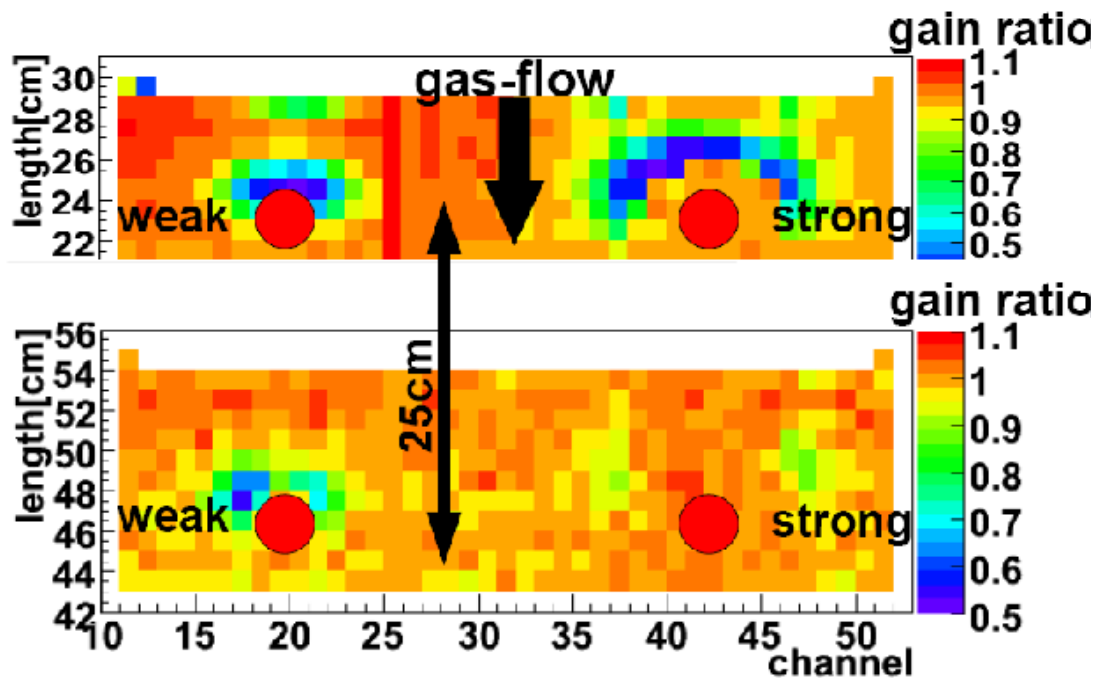
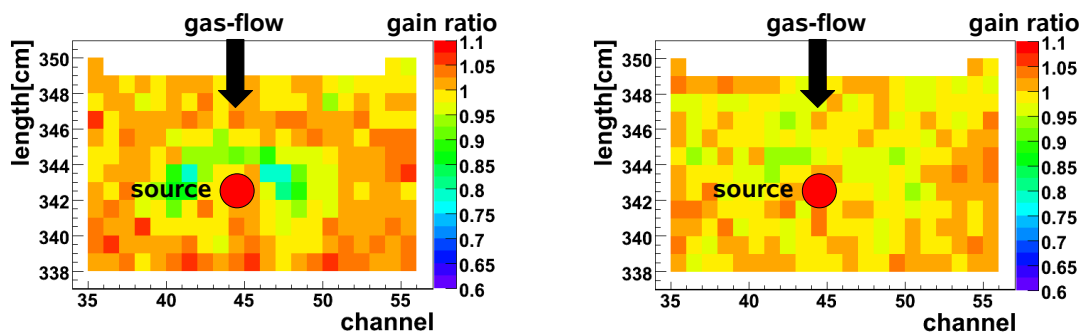


Abbildung 5.4: *Relativer Gasverstärkungsverlust durch Bestrahlung als Funktion der Strawnummer und der Länge entlang der Straws. Die roten Punkte symbolisieren die Position der radioaktiven Quellen (nicht maßstabsgetreu). Die schwachen und die starken ^{55}Fe -Quellen bei der Position 22 cm zeigen normale Alterung. Bei den stromabwärts liegenden Quellen der Position 47 cm zeigt die schwache ^{55}Fe -Quelle die normale Alterung, jedoch bei der starken ^{90}Sr -Quelle zeigen die Kanäle 38-44 keine Alterung.*

Es handelte sich dabei um eine Alterung einer anderen Position als im ersten Teil dieser Messreihe.

5.3.1 Interpretation

Diese Beobachtung lässt sich eher mit dem Radikalmodell erklären, da sich nach dem Reinigungsmodell die Gasverstärkung bei der zweiten Bestrahlung nicht verändern sollte. Jedoch könnte mit Radikalen im Gas die Ablagerungen auf dem Anodendraht, durch den Gasverstärkungsprozess induziert, mit den Radikalen reagieren, und so zum Abtransport der Ablagerungen führen. Dies ist denkbar, da die Ablagerungen auf dem Anodendraht sehr dünn sind ($\mathcal{O}(100\text{ nm})$) [12].



(a) Position mit Alterung vor dem Versuch. Platziere gleiche Bestrahlungsquelle an derselben Position mit der die Alterung erzeugt wurde.

(b) Gleiche Position ohne Alterung nach 105 h Bestrahlung.

Abbildung 5.5: Veränderung einer schon gealterten Position nach weiterer Bestrahlung und Platzierung der starken ^{55}Fe -Quelle 75 cm stromaufwärts. Abbildung a) zeigt die Alterung der zweiten Position beim Beginn der zweiten Bestrahlung. Abbildung b) zeigt die Alterung nach 105 h Bestrahlung, die Reduktion der Alterung im Vergleich zu Abbildung a) ist deutlich zu erkennen.

5.4 Zusammenfassung

Es war möglich die Transporttestergebnisse zu bestätigen, dass stromabwärts einer Bestrahlungsquelle Alterung verhindert werden kann. Des Weiteren wurde mit einer starken Quelle eine längere Distanz stromabwärts die Alterung verhindert als mit einer schwachen Quelle. Zudem war es möglich mit Bestrahlungsintensitäten, die normalerweise Alterung verursachen, schon existierende Beschädigungen rückgängig zu machen, sobald diese Bestrahlungsquelle stromabwärts einer Quelle lag.

5.5 Abschliessende Bemerkung

Es wäre denkbar, dass die in den Messungen verwendeten Quellen Radikale mit einer Halbwertszeit im Bereich von Minuten produzieren. Auf die Größenordnung kommt man durch die Gasflussgeschwindigkeit² in den Straws, die etwa 4 cm/min beträgt. Bis zu einer minimalen Konzentration verhindern diese Radikale möglich-

²Die Gasflussgeschwindigkeit in den Straws läßt sich mit den Gasvolumen pro Stunde, die durch das Modul strömen, und der Länge des Moduls abschätzen.

$$\text{Gasflussgeschwindigkeit} = \frac{\text{Modullänge}}{\text{Flussdauer für ein Modulvolumen}}$$

erweise die Ablagerung der Kohlenwasserstoffverbindungen, die aus dem ausgasenden Epoxidharzklebstoff Araldit stammen. Die starke ^{55}Fe -Quelle bildet eine höhere Konzentration dieser Radikale als die schwache ^{55}Fe -Quelle. Deshalb ist es hinter der starken Quelle für eine längere Distanz möglich, die Alterung zu verhindern oder zu schwächen.

Ein weiterer Punkt für das Radikalmodell ist, dass die Alterung von der Gasflussgeschwindigkeit abhängt [12, 13]. Bei niedrigem Gasfluss ist der Gasverstärkungsverlust geringer, da eine kleinere Gasflussgeschwindigkeit zu einer höheren Radikalkonzentration führt.

Diese Ergebnisse zeigen Indizien für die Produktion von Radikalen bei den Bestrahlungsquellen, die Alterung verhindern können. Dies ist eine mögliche Erklärung für das besondere Beschädigungsprofil, dem Halbmond.

Kapitel 6

Ozonmessungen

6.1 Motivation für die Ozonmessungen

Die Transporttests deuten auf Radikale hin, die im Bereich der Bestrahlung erzeugt werden und im Gasfluss transportiert werden können. Desweiteren können sie mögliche Ablagerungen verhindern. Damit sie transportierbar sind müssen sie eine Lebensdauer der Größenordnung von Minuten besitzen (siehe dazu Kapitel 5.5). Dieses Kriterium führt bereits zum Ausschluss vieler Radikale, da typische Lebensdauern von Radikalen im Subsekunden-Bereich liegen. Das Radikal Ozon (O_3) hat nicht nur eine Halbwertszeit von Minuten [24],[25], seine Produktion während des Gasverstärkungsprozesses ist auch wahrscheinlich, da im Zählgas geringe Sauerstoffkonzentrationen (O_2) vorhanden sind, dessen Bindungen in dem Gasverstärkungsprozess aufgebrochen werden können. Die erzeugten Sauerstoffradikale können mit Sauerstoffmolekülen zu Ozon reagieren. Der Sauerstoff kommt durch undichte Stellen im Modul und Gassystem in das Zählgas. Ein weiterer Hinweis ist, dass in der Industrie Ozon unter ähnlichen Bedingungen erzeugt wird. Die Geometrie einiger Ozongeneratoren entspricht der Zylindergeometrie der Straws. Diese Ozongeneratoren bestehen aus zwei Elektroden, an die Hochspannung angelegt ist. Zwischen die Elektroden leitet man sauerstoffhaltiges Gas, in welchem sich durch Gasentladungen Ozon bildet. Ozon könnte also ein Kandidat für ein mögliches Radikal sein.

Befindet sich Ozon in dem Zählgas des bestrahlten Moduls, das von der Bestrahlungsquelle produziert wird, so wäre dies ein weiterer Indikator für das Radikalmodell. Zudem würde dies eine Erklärung dafür sein, warum Sauerstoffzugabe zum Zählgas zu geringerer Alterung führt, da mit mehr Sauerstoff im Zählgas auch mehr Ozon erwartet wird.

Ziel ist es daher, die Ozonkonzentration (Ozonwert) in den Modulen zu messen. Da der Sauerstoffgehalt in dem normalen Zählgas etwa 20 ppm¹ beträgt und das Modul nur in einem kleinen Bereich von unseren ⁵⁵Fe-Quellen bestrahlt wird,

¹Die Sauerstoffkonzentration wurde mit einem Sauerstoffmessgerät gemessen (siehe Kapitel 6.8).

sollte das zu wählende Ozonmessgerät Ozonkonzentrationen im ppb-Bereich zuverlässig messen können.

6.2 Messaufbau

Der Messaufbau der Ozonmessungen ist schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt. Der Gasausgang eines normalen 5 m Modules wurde mit einem Ozonmonitor (APOA-360 von HORIBA Ltd.) verbunden. Da das Modul mit dem Standardgasfluss von 1 Vol/h (300 ml/min) betrieben werden sollte und der Ozonmonitor mindestens einen Gasfluss von 800 ml/min braucht, wurde eine Bypasslösung mit einem Gasfluss von 500 ml/min Stickstoff realisiert. Raumluft konnte zu diesem Zweck nicht verwendet werden, da die Konzentration des Luftozons mit der Tageszeit schwankt, was die Messergebnisse verfälschen würde.

Das Messprinzip des Ozonmonitors basiert auf der Absorption von Licht der Wellenlänge 253,7 nm aus einer Niederdruck-Quecksilberdampflampe [27]. Die Intensität des UV-Lichtes, welche von der Ozonkonzentration abhängt, wird hinter einer Messküvette mit einer Photodiode gemessen. Das Messgas wird in diese Messküvette geleitet. Um Einflüsse anderer Gase auszuschließen, wird es alle zwei Sekunden vor der Messküvette durch einen Ozonzerstörer geleitet, was einen Nullwert liefert. Dieser Nullwert wird mit dem normalen Messwert zur Berechnung der Ozonkonzentration in dem Messgas genutzt. Die Messgenauigkeit des Ozonmonitors beträgt nach Herstellerangaben 0,5 ppb. Um den Ozonverlauf während einer Messung besser protokollieren zu können, wurde eine LabView-Routine geschrieben, die die Ozonkonzentration jede Sekunde ausliest und mit dem genauen Datum sowie der Uhrzeit in eine Textdatei schreibt.

Zur Bestrahlung wurde die starke ^{55}Fe -Quelle am Ende des Moduls vor dem Gasausgang plaziert (Abb.6.1). Wenn nicht anders angegeben, wurde mit einer Hochspannung von 1600 V gearbeitet. Die Ozonkonzentration wurden jeweils auf den Gasfluss des Bypasses korrigiert, da der Ozonmonitor die Ozonkonzentration der gesamten Gasmischung der Bypasslösung misst.

$$C_{mod} = C_{mess} \cdot \frac{F_1 + F_2}{F_1}$$

mit:

| | | |
|------------|---|--|
| C_{mod} | : | mittlere Ozonkonzentration des Moduls |
| C_{mess} | : | gemessene Ozonkonzentration des Ozonmonitors |
| F_1 | : | Gasfluss durch das Modul |
| F_2 | : | Gasfluss durch die Bypassleitung |

Die korrigierten Messwerte entsprechen also der Ozonkonzentration des Gases hinter dem Gasausgang des Moduls, was im folgenden nur noch mit Messwert

bezeichnet wird. Es ist weiterhin zu bemerken, dass die Konzentration in den bestrahlten Straws deutlich höher als der Messwert ist, da die Ozonproduktion nur in den bestrahlten Straws stattfindet.

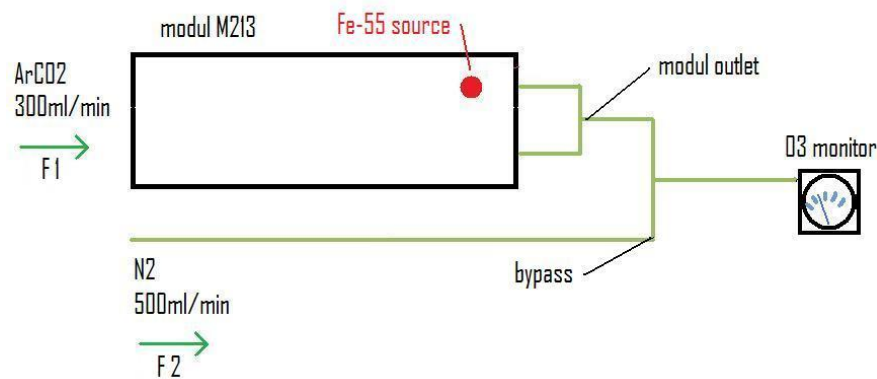


Abbildung 6.1: Schematischer Aufbau der Ozonmessung mit Bypasslösung. Das schwarze Rechteck stellt das Modul in Draufsicht dar, die Gasleitungen sind hellgrün sowie die Bestrahlungsquelle als roter Punkt am Modulende symbolisiert. Der Gasfluss durch das Modul betrug 300 ml/min Ar/CO₂. Da das Ozonmessgerät einen Mindestgasfluss von 800 ml/min benötigt, wurden nach dem Modul 500 ml/min N₂ durch den Bypass eingespeist. Der Ozonmonitor wurde zur Sauerstoffmessung kurzzeitig durch das Sauerstoffmessgerät ersetzt.

6.3 Ozon in Standardzählgas Ar/CO₂ (70%/30%)

Da nach dem Radikalmodell ein Radikal gesucht wird, welches direkt bei der Bestrahlungsquelle erzeugt wird, wurde nach Ozon gesucht, welches von der Bestrahlungsquelle ausgeht. Trifft dieses zu, so sollte sich der gemessene Ozonwert beim Entfernen der Quelle sowie beim Abschalten der Hochspannung reduzieren, da die Produktion des Ozons in den Lawinen der Gasverstärkung stattfinden sollte. Zudem ist es von Interesse herauszufinden, von welchen Parametern eine mögliche Ozonproduktion abhängt bzw. wie groß die Halbwertszeit von Ozon in dem Modul ist.

6.3.1 Ozon aus der Bestrahlung

Es wurde in den ersten Messungen kontrolliert (siehe Abb. 6.2), ob Ozon direkt in der Bestrahlungsposition erzeugt wird. Dazu wurde zunächst die starke ⁵⁵Fe-

Quelle ohne Hochspannung auf ihre Position in der Nähe des Gasausgangs auf das Modul gelegt. Es zeigte sich auch nach 20 Minuten Messzeit keine Änderung des Ozonwertes im Vergleich zum Startwert. Als die Hochspannung jedoch von 0 V auf 1700 V gestellt wurde, stieg der gemessene Ozonwert innerhalb von 2 Minuten von 2,3 ppb auf 10,3 ppb. Die Differenz von 8,0 ppb entspricht der produzierten Ozonkonzentration. Diese wird auf den Gasfluss des Bypasses, wie in Abschnitt 6.2 gezeigt, korrigiert. Was einer mittleren produzierten Ozonkonzentration im Modul von 21,3 ppb entspricht. Als die Quelle vom Modul genommen wurde, sank der Ozonwert wieder auf seinen Anfangswert. Diese Wechsel wurden mehrmals in verschiedener Reihenfolge durchgeführt. Der Ozonwert stieg auf den Plateauwert, wenn die Quelle auf dem Modul lag und die Hochspannung eingeschaltet war. War eins der beiden Kriterien nicht erfüllt, so ging der Ozonwert auf den Anfangswert zurück. Es ist also deutlich erkennbar, dass das Ozon im Gasverstärkungsprozess der Bestrahlungsposition erzeugt wird.

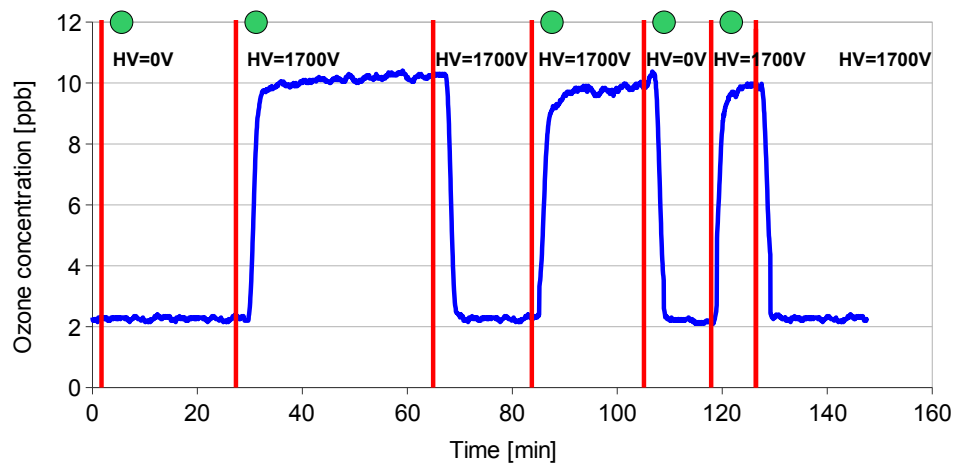


Abbildung 6.2: Ozonkonzentration C_{mess} in ppb aufgetragen gegen die Zeit in Minuten. Die roten Balken symbolisieren eine Änderung von Quellenposition oder Hochspannung. Ein grüner Kreis zwischen zwei roten Balken bedeutet, dass die Quelle auf dem Modul lag. Die eingestellte Hochspannung ist in jedem Bereich angegeben, und wurde nur zwischen den Werten 0 V und 1700 V gewechselt. Man erkennt, dass die Ozonkonzentration nur steigt und ein Plateau bei etwa 10,3 ppb bildet, wenn die Quelle auf dem Modul liegt und die Hochspannung eingeschaltet ist. Ansonsten bildete sich ein unterer konstanter Wert von 2,3 ppb. Dies zeigt, dass das Ozon in dem Gasverstärkungsprozess erzeugt wird.

6.3.2 Parameter der Ozonproduktion

Zuerst wird eine allgemeine Beschreibung der Ozonkonzentrationsbestimmung gegeben, die bei jedem Ozonwert angewendet wird. Danach soll auf Messungen der Abhängigkeit der Ozonkonzentration von der Hochspannung eingegangen werden.

Vorgang zur Bestimmung eines Ozonmesswertes

Zu Beginn jeder Messung wird gewartet, bis die Ozonkonzentration konstant bleibt, da erst die Raumluft aus der Bypassgasleitung gespült werden muss. Der konstante Ozonwert ist nicht Null, da durch das Gassystem und das Modul Ozon aus der Raumluft in den Messaufbau geraten kann. Es befindet sich also immer ein Ozonhintergrund in der Messung, auf den korrigiert wird. Daraufhin wird die starke ⁵⁵Fe-Quelle auf ihre Bestrahlungsposition gesetzt und alle Versuchsparameter auf die vorliegende Messung eingestellt. Es wird wieder auf einen konstanten Ozonwert gewartet. Als letzter Versuchsparameter wird die Hochspannung auf den geplanten Wert gesetzt.

Nach einer kurzen Reaktionszeit steigt der Ozonwert. Man wartet bis sich erneut ein Gleichgewicht eingestellt hat, dies kann teilweise bis zu 40 min in Anspruch nehmen. Ist das Plateau deutlich zu erkennen wird die Hochspannung abgeschaltet, worauf der Ozonwert wieder fällt. Es bildet sich erneut ein Gleichgewicht, welches mit dem Gleichgewicht vor dem Anschalten der Hochspannung verglichen wird. Ist der Unterschied zwischen den zwei unteren Gleichgewichten nicht größer als 5%, wird angenommen, dass sich die Versuchsparameter wie Luftdruck und Gasfluss während der Messung nicht geändert haben. Die Differenz des Plateauwertes zu den unteren Gleichgewichtswerten entspricht dem produzierten Ozon. Dieser Wert wird noch, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben ist, auf den Bypassgasfluss korrigiert.

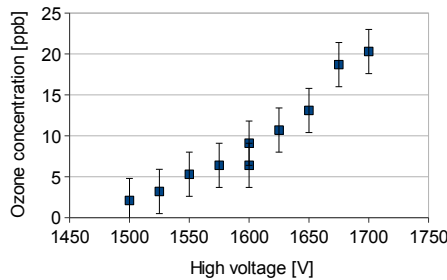
Änderung der Hochspannung

Es wurde wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben von 1500 V bis 1700 V in 25 V Schritten der Ozonwert bestimmt. Zudem wurde der Anodenstrom protokolliert. Die starke ⁵⁵Fe-Quelle wurde auf einem 5 m Modul verwendet. Der Gasfluss durch das Modul betrug 300 ml/min (1 Vol/h) Ar/CO₂ (70%/30%).

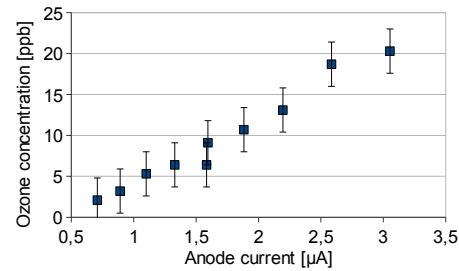
Abbildung 6.3(a) zeigt, dass der Ozonwert mit der Hochspannung steigt. Aus den Messdaten wird von einem exponentiellen Anstieg der Ozonkonzentration als Funktion der Hochspannung ausgegangen. In Abbildung 6.3(b) ist eine lineare Abhängigkeit des Ozonwertes von dem Anodenstrom zu erkennen.

6.3.3 Ergebnis

In dem von der radioaktiven Quelle induzierten Gasverstärkungsprozess wird Ozon produziert. Die gemessenen Werte liegen alle im sub-ppm Bereich, je-



(a) Abb. der Ozonkonzentration C_{mod} von der Hochspannung.



(b) Abb. der Ozonkonzentration C_{mod} von dem Anodenstrom.

Abbildung 6.3: Ozonkonzentration C_{mod} als Funktion der Hochspannung (a) und des Anodenstroms (b) bei den verschiedenen Spannungswerten. Der Ozonwert steigt mit der Hochspannung, wobei von einem exponentiellen Anstieg ausgegangen wird. Der Verlauf der Ozonkonzentration mit dem Anodenstrom hingegen ist bei den verschiedenen Spannungen eher linear.

doch sollten die Konzentrationen in den bestrahlten Straws höher liegen. Die Ozonkonzentration hängt von der Hochspannung bzw. dem Anodenstrom ab. Da die gemessenen Konzentrationen sehr klein sind, werden weitere Messungen der Abhängigkeiten von Versuchsparametern bei höheren Sauerstoffkonzentrationen durchgeführt.

6.4 Ozonproduktion bei Sauerstoffzusatz

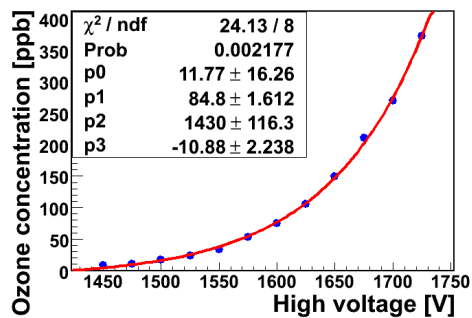
Zuerst wurden Ozonmessungen bei einer festen Gasmischung von (70%/27,5%/2,5%) Ar/CO₂/O₂ durchgeführt. Dabei wurde die Abhängigkeit von der Hochspannung und der Gasflussgeschwindigkeit gemessen. Nach diesen Messungen wurde die Lebensdauer des Ozons in dem Modul bestimmt, welche zum Vergleich mit den Transporttests wichtig ist, da die Radikale, welche die Alterung verhindern, eine Halbwertszeit von einigen Minuten haben müssen. Schließlich wurde die Ozonkonzentration bei verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen im Zählgasgemisch ermittelt. Dafür wurde eine Ar/CO₂/O₂ (70%/26%/4%) Gasmischung mit Ar/CO₂ (70%/30%) zu verschiedenen Anteilen gemischt.

6.4.1 Ozonmessungen bei 2,5% Sauerstoffanteil

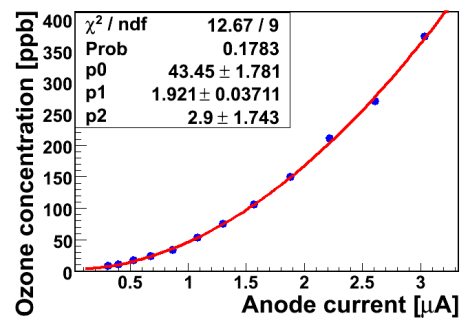
Änderung der Hochspannung

Die Durchführung der Messung ist bis auf die verwendete Gasmischung Ar/CO₂/O₂ (70%/27,5%/2,5%) äquivalent zu der Messung mit dem Standardzählgas (siehe

Kap. 6.3.2).



(a) Abh. der Ozonkonzentration C_{mod} von der Hochspannung.



(b) Abh. der Ozonkonzentration C_{mod} von dem Anodenstrom bei verschiedenen Spannungswerten.

Abbildung 6.4: Gemessene Ozonkonzentration als Funktion der (a) Hochspannung und des (b) Anodenstroms bei den verschiedenen Spannungswerten. Die gemessenen Ozonwerte sind deutlich größer als im Standardzählgas. Der Ozonwert steigt exponentiell mit der Hochspannung (Fitfunktion: $p_0 \cdot \exp((x - p_2)/p_1) + p_3$). Der Verlauf der Ozonkonzentration mit dem Anodenstrom bei den verschiedenen Spannungen ist quadratisch (Fitfunktion: $p_0 \cdot x^{(p_1)} + p_2$).

Die gemessenen Ozonwerte sind in Abbildung 6.4 als Funktion der Hochspannung und des Anodenstroms dargestellt. Sie sind deutlich größer als bei reinem Ar/CO₂ (70%/30%), zudem steigt die Ozonkonzentration gegen den Anodenstrom steiler an. In Abbildung 6.4(a) deutet sich ein exponentieller Verlauf der Ozonkonzentration als Funktion der Hochspannung an. Außerdem beobachtet man in Abbildung 6.4(b) einen wahrscheinlich quadratischen Verlauf des Ozonwertes gegen den Anodenstrom.

Änderung der Gasflussgeschwindigkeit

Eine Änderung der Gasflussgeschwindigkeit sollte sich in einer Konzentrationsänderung des Ozons zeigen, da durch diese Änderung die Bestrahlungsdauer des Gasflussvolumens geändert wird, und damit auch die Ozonkonzentration. Bei der Änderung der Gasflussgeschwindigkeit durch das Modul musste auch der Bypassgasfluss mit dem Stickstoff angepasst werden. Dazu wurde der Stickstoff mit 800 ml/min in ein abgedichtetes Becherglas gelassen und der Bypass zum Ozonmonitor mit dem Becherglas verbunden. Zusätzlich war in dem Becherglas eine kleine Öffnung, damit das überschüssige Stickstoff keinen Druck aufbaut und abströmen kann. Mit dieser Konfiguration brauchte man nur den Gasfluss durch das Modul zu ändern. Es wurde bei einer Hochspannung von 1600 V gearbeitet.

Es war zu erwarten, dass die Ozonkonzentration umgekehrt proportional zum Gasfluss ist².

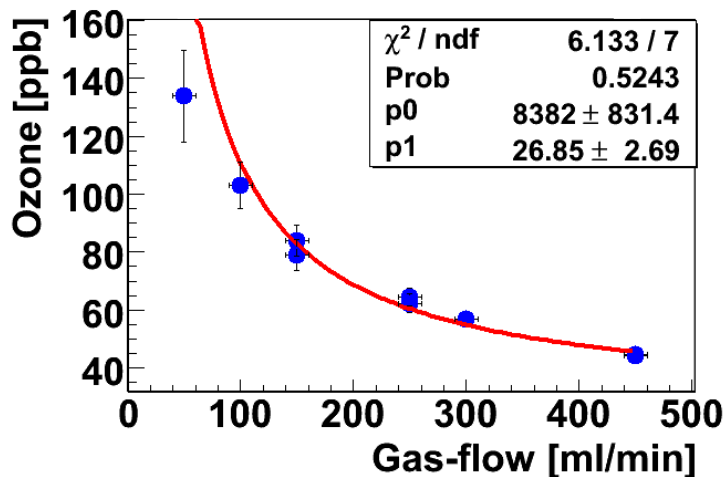


Abbildung 6.5: Ozonkonzentration C_{mod} in Abhängigkeit des Gasflusses durch das Modul. Die umgekehrte Proportionalität ist deutlich erkennbar und der Fit beschreibt die Daten sehr gut. Fitfunktion: $p_0 \cdot x^{-1} + p_1$.

Die Messergebnisse, die in Abbildung 6.5 abgebildet sind, passen sehr gut zu einer umgekehrten Proportionalität. Diese wird durch den Fit mit $p_0 \cdot x^{-1} + p_1$ illustriert, welcher nicht die Lebensdauer des Ozons berücksichtigt. Der niedrige Messwert bei 50 ml/min kann damit erklärt werden, dass das Ozon nur eine endliche Lebensdauer in dem Modul hat und damit schon wieder teilweise zerfallen war, bevor es gemessen wurde.

Modulvergleich

Um den Einfluss der Module auf die Ozonkonzentration zu bestimmen, wurde die Ozonkonzentration mit einem zweiten 5 m Modul bei einem Gasfluss von 300 ml/min Ar/CO₂ (70%/27,5%/2,5%) bei verschiedenen Hochspannungen gemessen. Die Messungen des zweiten und des ersten 5 m Moduls wurden verglichen. Wurden die Ozonwerte gegen den Anodenstrom aufgetragen, siehe Abbildung

²Es wird angenommen, dass jedes Photon mit seiner folgenden Elektronenlawine im Durchschnitt eine bestimmte Anzahl von Ozonmolekülen erzeugt. Damit ist die Ozonkonzentration O_3 proportional zu der Rate der Quelle R und der Bestrahlungszeit t : $O_3 \propto R \cdot t$. Ein Gasvolumen bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v durch ein Bestrahlungsgebiet mit der Länge L . Die Zeit, die das Gasvolumen bestrahlt wird, ist also $t = L/v$. Daraus folgt für die Ozonkonzentration: $O_3 \propto 1/v$.

6.6, ließen sich die zwei Messungen nicht voneinander unterscheiden. Die Bedingungen in beiden Modulen lassen eine vergleichbare Ozonproduktion zu, da der Strom der entscheidende Parameter für den Vergleich der Ozonkonzentrationen ist. Dies ist damit zu begründen, dass sich zwischen den zwei Messungen der zwei Module die Umweltbedingungen wie Luftdruck und Temperatur ändern, und damit herrschen bei einer bestimmten Hochspannung unterschiedliche Ströme und damit unterschiedliche Ozonwerte. Die Anzahl der in dem Gasverstärkungsprozess erzeugten Elektronen (Anodenstrom) ist von der Gasverstärkung abhängig. Diese ist (siehe Formel 3.10) unter anderem vom Luftdruck abhängig. Mit einer höheren Anzahl von Elektronen werden mehr Sauerstoffmoleküle gespalten, deren Sauerstoffradikale mit Sauerstoffmolekülen Ozon bilden. Es wird also mit höherer Gasverstärkung mehr Ozon gebildet. Dies hat wichtige Konsequenzen für Messreihen, die über einen Zeitraum von mehreren Tagen gehen. Sie müssen auf den Strom korrigiert werden.

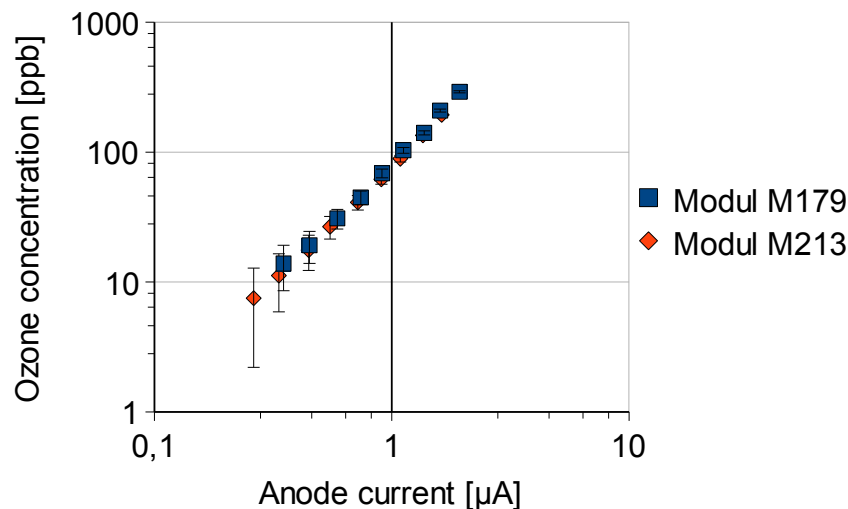


Abbildung 6.6: Gemessene Ozonkonzentration zweier 5 m Module als Funktion des Anodenstroms bei den verschiedenen Spannungswerten. Die Ozonmesswerte der zwei Module sind vergleichbar.

6.4.2 Halbwertszeit des Ozons im Modul

Zur Bestimmung der Halbwertszeit des Ozons in den Modulen wurde die Quelle an verschiedenen Positionen entlang des Moduls positioniert. Da der Gasfluss und somit die Gasflussgeschwindigkeit (Kapitel 5.5) in den Straws bekannt war, konnte man berechnen, in welcher Zeit das Ozon die Strecke bis zum Gasausgang des Moduls zurückgelegt hat. Je weiter die Quellenposition von dem Gasausgang

des Moduls entfernt war, desto länger brauchte der Ozonwert scheinbar, um sein Plateau zu erreichen. Diese Zeitspanne betrug bis zu fünf Stunden. Aus diesem Grund war die automatische Ozonanalyse aus Kapitel 6.2 sehr hilfreich, da ein sehr langgestrecktes Plateau mit diesem Hilfsmittel besser zu erkennen ist. Da sich die Umweltbedingungen während der langen Messungen veränderten, mussten die gemessenen Ozonkonzentrationen auf den gemessenen Strom korrigiert werden. Dazu wurde die quadratische Ozon-Anodenstrom Kurve aus Abbildung 6.4(b) benutzt, da sie die Ozonwerte bei verschiedenen Gasverstärkungen repräsentiert, die sich durch Luftdruck und Temperatur veränderten. Zu jedem Ozonwert wurde der Anodenstrom notiert. Zur Korrektur wurde zu jedem Messwert an der Stelle des zugehörigen Anodenstroms der Ozonwert aus der Ozon-Anodenstrom Kurve aus Abbildung 6.4(b) bestimmt. Die Ozonwerte aus der Ozon-Anodenstrom Kurve wurden dann alle durch einen festen Ozonwert aus der Ozon-Anodenstrom Kurve geteilt. Mit diesem Verhältnis wurde der zu diesem Anodenstrom gehörige gemessene Ozonwert multipliziert. Damit ist es möglich, die Änderung der Umweltbedingungen zu kompensieren.

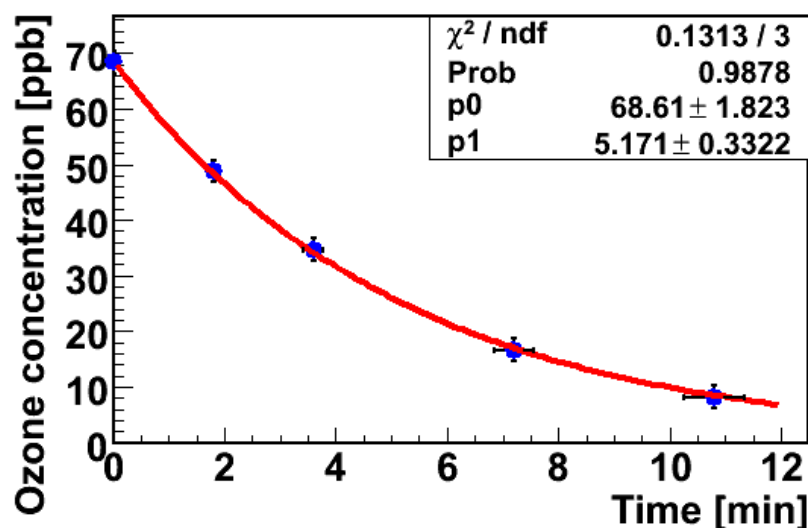


Abbildung 6.7: Ozonkonzentration als Funktion der Zeit, die von der Produktion des Ozons bis zu der Messung des Ozons vergeht. Es wurde für diese Messung Ar/CO₂/O₂ (70%/27,5%/2,5%) benutzt. Das exponentielle Verhalten ist deutlich erkennbar und der Fit beschreibt die Daten sehr gut. Fitfunktion: $p_0 \cdot \exp(-x/p_1)$. Mit diesem Verlauf lässt sich die Halbwertszeit des Ozons zu: $T_{\frac{1}{2}} = (3,6 \pm 0,3) \text{ min}$ bestimmen.

Abbildung 6.7 zeigt die Ozonkonzentration als Funktion der Zeit, die von

der Ozonproduktion bis zur Messung vergangen ist. Der Verlauf ist exponentiell fallend. Die aus diesen Daten erhaltene Halbwertszeit beträgt: $(3,6 \pm 0,3)$ min. Dieser Wert befindet sich in der Größenordnung von 2-7 Minuten die auch in der Literatur angegeben werden [25]. Es ist dabei zu beachten, dass die Halbwertszeit von Ozon von viele Paramatern abhängt, und es deshalb schwierig ist, auf die Versuchsbedingungen zutreffende Literaturwerte zu finden. Es kann jedoch ausgesagt werden, dass die gemessene Halbwertszeit in der erwarteten Größenordnung von Minuten liegt. Desweiteren stimmt die Halbwertszeit mit der Bedingung an mögliche Radikale, die Alterung verhindern sollen, überein. Es ist zu bemerken, dass ein Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die Halbwertszeit nicht auszuschliessen ist. Dies ist also nur eine Abschätzung der Halbwertszeit des Ozons in Standardzählgas.

6.4.3 Änderung der Sauerstoffkonzentration

Um die Abhängigkeit der Ozonkonzentration vom Sauerstoffgehalt des Zählgases zu bestimmen, wurden für zehn Sauerstoffkonzentrationen Ozon-Hochspannungskurven aufgenommen. Die verschiedenen Sauerstoffkonzentrationen wurden durch Mischen von Ar/CO₂ (70%/30%) und Ar/CO₂/O₂ (70%/26%/4%) mit zwei Gasflussreglern realisiert. Zur Kontrolle des Sauerstoffgehaltes wurde die Sauerstoffkonzentration des Zählgases mit einem Sauerstoffmessgerät vor und nach der Messreihe bestimmt. Dafür wurde das Sauerstoffmessgerät jeweils an den Gasausgang des Modules gehängt (Abbildung 6.1). Die gesamte Messreihe einer Ozon-Hochspannungskurve wurde weiterverwendet, wenn sich die Sauerstoffkonzentration über den Zeitraum der Messreihe um nicht mehr als 2% verändert hatte. Die Messgenauigkeit des Sauerstoffmessgerätes beträgt nach Herstellerangaben ± 1 ppm. Es wurde wie der Ozonmonitor über ein selbstgeschriebenes LabView Programm ausgelesen. Dieses Programm schreibt jede Sekunde die Sauerstoffkonzentration mit Datum und Uhrzeit in ein Textfile. Die Ozonkonzentration der jeweiligen Sauerstoffkonzentration wurde aus der zur Ozon-Hochspannungskurve gehörigen Ozon-Anodenstromkurve ausgelesen (siehe Kapitel 6.4.1). Dabei wurde jeweils die Ozonkonzentration bei einem festen Anodenstrom von $2,5 \mu\text{A}$ und nicht bei fester Hochspannung verwendet. Dieses Verfahren vermeidet Fehler durch die Änderung der Umweltbedingungen, da die Bestimmung der zehn Messreihen zwei Wochen in Anspruch nahm.

Abbildung 6.8 zeigt die Ozonkonzentration als Funktion der Sauerstoffkonzentration im Zählgas. Die Ozonkonzentration steigt wie erwartet mit dem Sauerstoffgehalt an und erreicht ab einer Sauerstoffkonzentration von 0,3% ein Plateau. Der Messpunkt bei 20 ppm O₂ wurde mit dem reinen Ar/CO₂ (70%/30%) Gasgemisch gemessen. Da die Module und das Gassystem nicht vollständig gasdicht sind, kann es in den Modulen zu einem geringen Sauerstoffgehalt kommen. Dieser Sauerstoffgehalt ist für den Betrieb der Module im LHCb-Detektor realistisch.

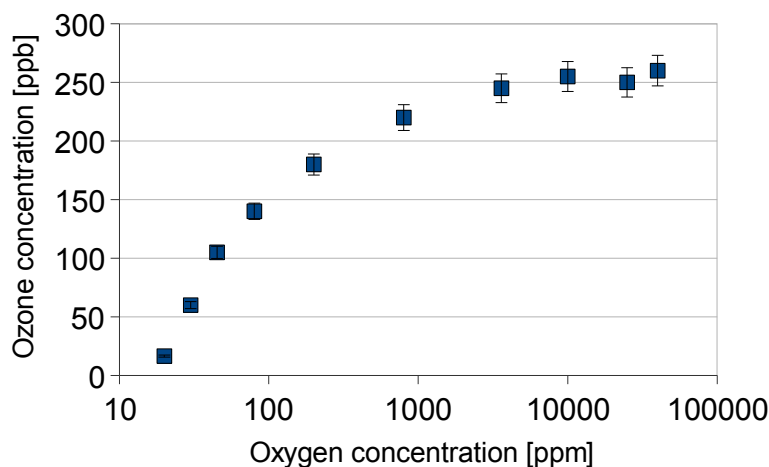


Abbildung 6.8: Ozonkonzentration als Funktion der Sauerstoffkonzentration im Zählgas. Die Ozonkonzentration steigt bis zu einer Sauerstoffkonzentration von 0,3% O_2 an, und bildet bei höheren Sauerstoffkonzentrationen ein Plateau.

6.4.4 Zusammenfassung der Messungen mit O_2

Die Messungen mit zusätzlichem Sauerstoff im Zählgas zeigen eine höhere Ozonproduktion als das Standardzählgas. Mit der höheren Ozonkonzentration ist die exponentielle Abhängigkeit des Ozons von der Hochspannung deutlich zu erkennen, zudem hängt der Ozonwert quadratisch von dem Anodenstrom bei diesen Hochspannungswerten ab. Es konnte die erwartete umgekehrte Proportionalität der Ozonkonzentration zum Gasfluss gezeigt werden. Zudem war es möglich, auch in einem zweiten Modul äquivalente Ozonwerte zu messen. Die Lebensdauer des Ozons in einem Modul konnte zu $(3,8 \pm 1,6)$ min bestimmt werden. Dies stimmt mit der erwarteten Halbwertszeit für ein mögliches Radikal, welches Alterung verhindert, überein. Des Weiteren wurde die Abhängigkeit des Ozonwertes von der Sauerstoffkonzentration bestimmt. Erhöht man die Sauerstoffkonzentration, steigt die Ozonkonzentration zunächst an, sie bildet jedoch ab 0,3% Sauerstoff ein Plateau. Dazu sollte man wissen, dass Alterungsmessungen mit 1%-4% Sauerstoff keinen signifikanten Unterschied untereinander in der Alterung zeigen, jedoch um einen Faktor zwei weniger Alterung zum Standardzählgas [12],[13]. Dies könnte daran liegen, dass im Falle von Ozon als gesuchtes Radikal der Ozonwert ab einer Sauerstoffkonzentration von 0,3% keine Abhängigkeit mehr vom Sauerstoffgehalt zeigt. Es würde also keinen Sinn machen, mehr als 0,3% Sauerstoff in das Zählgas zu mischen, um die Alterung der Module zu verringern.

6.5 Abschliessende Bemerkung zu den Ozonmessungen

Die Halbmondform der Alterung wird in Kapitel 5 auf die Produktion von Radikalen zurückgeführt, die den Gasverstärkungsverlust verhindern. Ein möglicher Kandidat für diese Radikale ist Ozon, welches, wie in diesem Kapitel beschrieben, in Konzentrationen im sub-ppm Bereich gefunden wurde. Die Ozonmessungen lassen sich mit den Abhängigkeiten der speziellen Form der Schädigung in Verbindung bringen.

Das Ozon, das im Gasverstärkungsprozess erzeugt wird, hat eine Halbwertszeit von $(3,6 \pm 0,3)$ min. Dieser Wert ist in der Größenordnung, in der die erwartete Halbwertszeit der Radikale aus Kapitel 5.5 liegt.

Zudem zeigt eine geringere Gasflussgeschwindigkeit eine höhere Ozonproduktion, was erklären könnte, warum es weniger Alterung bei geringerem Gasfluss gibt [12],[13]. Dabei führen die höhere Ozonkonzentration und die geringere Gasflussgeschwindigkeit zu einer höheren Wahrscheinlichkeit von Rückdiffusion des Ozons gegen den Gasfluss. Dieses rückdiffundierende Ozon würde, falls es das gesuchte Radikal ist, die Alterung im Halbmond reduzieren. Man muss dazu erwähnen, dass ein anderes Radikal wahrscheinlich genauso wie Ozon auf den Gasfluss reagieren würde und zurück diffundieren könnte. Da die meisten anderen Radikale jedoch Halbwertszeiten von 10^{-3} s haben, ist die Rückdiffusion für die kurzlebigen Radikale eher unwahrscheinlich.

Die Form des Gasverstärkungsverlustes ist von Quellen mit unterschiedlichem Strahlungsprofil verschieden. Für die starke ^{55}Fe -Quelle ist der Radius des Halbkreises größer als für die schwache ^{55}Fe -Quelle. Die starke ^{55}Fe -Quelle erzeugt deutlich mehr Ozon als die schwache ^{55}Fe -Quelle³, was dazu führen kann, dass eine mögliche Ozonkonzentration, um Alterung zu verhindern, schon weiter vor der Quelle (relativ zur Gasrichtung) erreicht wird. Der Halbmond könnte aus diesem Grund einen größeren Radius haben.

Des weiteren steigt die Ozonkonzentration mit höherer Sauerstoffkonzentration, was zu den Alterungsmessungen mit Sauerstoffzugabe passt, die weniger Alterung zeigen als die normale Gasmischung Ar/CO₂ (70%/30%) [12],[13]. Zudem unterscheiden sich die Alterungsmessungen mit Zugabe von Sauerstoffkonzentrationen $> 1\%$ nicht, was mit dem Plateau aus Abb. 6.8 deckt.

Die Übereinstimmungen zwischen Alterungsmessungen bzw. Transportmessungen und den Ozonmessungen lassen den Schluss zu, dass es sich bei den Radikalen, die die Alterung verhindern, um Ozon handelt.

³Diese Messung wurde in dieser Arbeit nicht beschrieben, sie zeigte jedoch einen Unterschied in der Ozonproduktion um den Faktor 13.

Kapitel 7

Alterungsstudie mit NO_2

7.1 Motivation für die Verwendung von NO_2

Die Transporttests aus Kap. 5 weisen auf die Bildung eines Radikals mit einer endlichen Lebensdauer hin, das transportierbar ist und die Reduzierung der Gasverstärkung verhindert. Zudem lassen die Ozonmessungen aus Kap. 6 vermuten, dass dieses Radikal Ozon ist. Um dies zu bestätigen würde man gerne Ozon direkt dem Zählgas zumischen, was aber aufwendig ist. Da Ozon instabil ist, müsste man einen Ozongenerator an das Gassystem anschliessen. Stattdessen wird der Einfluß eines anderen vergleichbar reaktiven Radikals untersucht. Ein solches stark oxidierendes stabiles Radikal ist beispielsweise NO_2 , das zudem den Vorteil hat kommerziell erhältlich zu sein.

Da die gemessenen Ozonkonzentrationen alle im sub-ppm Bereich liegen, sollte eine Konzentration des zugefügten Oxidationsmittels von einigen ppm ausreichen, um einen möglichen Effekt zu bewirken. Es wurde sich entschieden, 100 ppm NO_2 dem Zählgas zu zumischen, da dies technisch realisierbar ist, über der gemessenen Ozonkonzentration liegt und der Messaufbau mit dieser Konzentration nicht gefährlich ist. Eine Bestrahlung mit diesem Zählgasgemisch, die eine Reduktion bzw. keine Gasverstärkungsverluste zeigt, würde das Radikalmodell (Kap. 4.5) unterstützen.

Stickstoffdioxid

Bei Stickstoffdioxid handelt es sich um ein rotbraunes, stechend chlorähnlich riechendes Gas, das ein sehr starkes Oxidationsmittel ist. Es steht mit seinem Dimer¹ Distickstofftetroxid N_2O_4 in einem temperatur- und druckabhängigen Gleichgewicht und bildet mit Wasser Salpetersäure HNO_3 . Schon in sehr geringen Konzentrationen verursacht es Kopfschmerzen sowie Schwindel, ist jedoch noch nicht

¹Dimer bilden sich durch die Vereinigung zweier gleicher Moleküle zu einem Molekül durch eine Additionsreaktion [26].

wahrnehmbar. Sind die Konzentrationen größer kann es zu Atemnot und Lungenödemen kommen. Daher ist es unabdingbar, dass der Umgang mit diesem Gas sorgfältig geplant und durchgeführt wird. Es ist möglich Gasmischungen mit Stickstoffdioxid und Argon kommerziell zu beziehen, dies reduziert die Gefahr, die von der Gasflasche ausgeht. Für unseren Messaufbau ist die Verwendung unproblematisch, da kein reines Stickstoffdioxid benutzt wird. Wäre es zu einem unbeabsichtigten Auslaufen der Gasflasche gekommen, hätte die Laborluft die Maximale Arbeitskonzentration (MAK)² von 5 ppm [28] nicht überschritten!

7.2 Messaufbau für den NO₂ Test

NO₂ wurde als Ar/NO₂ (99,9%/0,1%) Gasmischung kommerziell bezogen und mit der Standardgasmischung Ar/CO₂ (70%/30%) gemischt. Die Gasflaschen waren je über einen Gasflussregler an ein Ventilsystem angeschlossen, indem sich die Gase vermischten. Mit diesen Reglern, die einen variablen Gasdurchfluss von 0 ml/min bis 200 ml/min bzw. von 0 ml/min bis 20 ml/min besitzen, wurde die NO₂ Konzentration gesteuert. Die Genauigkeit der so eingestellten NO₂ Konzentration lag bei 10% (relativ).

Der Ausgang des Ventilsystems wurde an den Gaseingang des Moduls angeschlossen. Aufgrund der Reaktivität des NO₂ wurden für die Zuführung kleine Edelstahlrohre verwendet. Diese wurden vor der Nutzung mit Ar/CO₂ gespült, um die Luftfeuchtigkeit aus den Schläuchen zu entfernen, da Stickstoffdioxid mit Wasser Salpetersäure bildet. Alle Dichtungen wurden mit einem Gasprüfer kontrolliert, um ein Ausströmen des Gasgemisches, besonders des Stickstoffdioxides, auszuschließen.

7.3 Alterungstest mit einem kleinen Testmodul

Da nicht bekannt war, ob die Module mit dem NO₂-Gasgemisch beschädigt werden, wurde zunächst zwei Testmodul verwendet, die mit dem Epoxydharz Araldit 103-1 und Härter HY991 gebaut wurde. Diese zeigten in der Vergangenheit starke Alterung. Die Testmodul haben eine Länge von 1 m und besitzt 32 Kanäle. Um Effekte wie eine Verbesserung durch Spülen (siehe Kap. 4.4) auszuschließen, wurde vor und nach der Alterungsmessung mit NO₂ jeweils Referenzmessungen mit Standardzählgas durchgeführt. Alle Bestrahlungen dieser Messreihe wurden mit der ⁹⁰Sr-Quelle (S8487) durchgeführt. Die Bestrahlungsdauer in jeder Messung betrug etwa 46 h. Der gesamte Gasfluss durch das Testmodul war während der Versuchsabfolge konstant bei 3 Vol/h (100 ml/min). Durch die Wahl dieses Gasflusses sind die Strömungsbedingungen in den Straws äquivalent zu den

²MAK ist die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei der im allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird (3 Abs. 5 GefStoffV)

Verhältnissen in den 2,5 m Detektormodulen. Bei denen beträgt die Gasflussgeschwindigkeit in den Straws etwa 5 cm/min (siehe Kapitel 5.5).

7.3.1 Erstes Testmodul

Es wurden vier Messungen durchgeführt. Drei mit Standardzählgas und eine mit einer 100 ppm NO₂ Gasmischung. Die drei Referenzmessungen zeigten jeweils deutliche Alterung (siehe Tabelle 7.1 sowie Abbildung: 7.1). Die zweite Bestrahlung mit einer NO₂ Gasmischung zeigte keine Alterung. Diese Messreihe zeigt eine deutlich Verhinderung der Alterung durch die Zugabe von Stickstoffdioxid in das Zählgas.

| | Länge | Kanal | Gasmischung | Bestrahlungsdauer | Alterung |
|-----------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------|----------|
| 1.Messung | 36 cm | 15 | Ar/CO ₂ | 47 h | 17 % |
| 2.Messung | 56 cm | 15 | Ar/CO ₂ /NO ₂ | 46 h | - |
| 3.Messung | 56 cm | 15 | Ar/CO ₂ | 46,5 h | 6 % |
| 4.Messung | 66 cm | 15 | Ar/CO ₂ | 48 h | 7 % |

Tabelle 7.1: NO₂ Messreihe mit erstem Testmodul. Mit der ersten und der zweiten Spalte wird Bestrahlungsposition auf dem Modul angegeben. Die zweite Spalte zeigt die für diese Messung benutzte Gasmischung. In der dritten Spalte sieht man die Bestrahlungsdauer und in der vierten Spalte erkennt man die gemessene Alterung nach der jeweiligen Bestrahlung.

7.3.2 Zweites Testmodul

In dieser Messreihe zeigten sich in der ersten Referenzmessung deutlich Alterung (siehe Tabelle 7.2). Die darauf folgende NO₂ Messung zeigte wie die zweite Referenzmessung keine erkennbaren Alterungserscheinungen. Es ist deutlich weniger Alterung mit der NO₂ Gasmischung zu erkennen, was jedoch von einer Verbesserung durch Spülen (siehe Kap. 4.4) des Moduls nicht unterschieden werden kann, da die zweite Referenzmessung auch keine Alterung zeigt.

Die Ergebnisse des Alterungstests mit dem ersten Testmodul zeigen eine Verhinderung des Gasverstärkungsverlustes mit dem Gasgemisch Ar/CO₂/NO₂ (73%/27%/0.01%) im Vergleich zu der normalen Gasmischung Ar/CO₂ (70%/30%). Das Spülen des Moduls (siehe Kap. 4.4) ist als Grund, dass bei der zweiten Messung keine Alterung auftrat, auszuschließen, da die zwei darauf folgenden Messungen mit dem normalen Gasgemisch wieder Alterung zeigten. Es kann jedoch damit begründet werden, dass die dritte und vierte Messung deutlich weniger Alterung zeigen, als die erste Messung. Es ist aus den Daten nicht ersichtlich, ob das Spülen mit der Ar/CO₂/NO₂ Gasmischung einen stärkere Reduzierung der Alterung bewirkt, als ein Spülen mit der normalen Gasmischung.

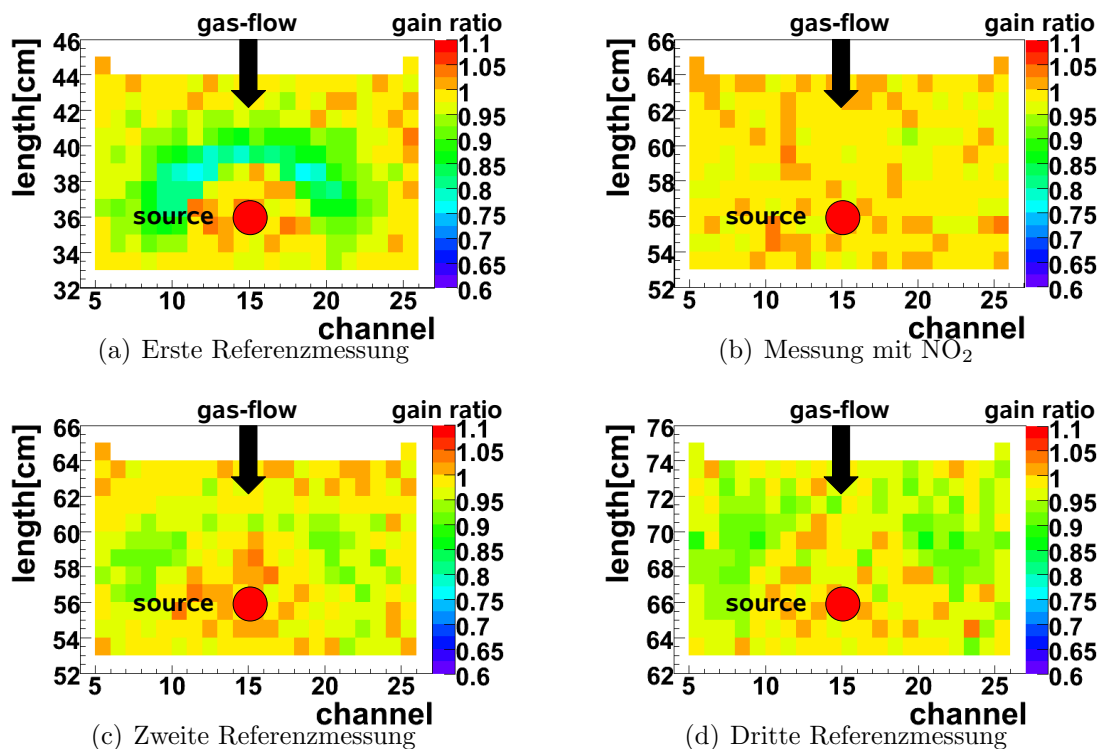


Abbildung 7.1: Es sind die vier Gasverstärkungsverhältnis-Diagramme der ersten Testmodul Messreihe dargestellt. Jede Bestrahlung wurde mit der ⁹⁰Sr-Quelle (S8487) bei einem Gasfluss von 100 ml/min durchgeführt. Die Bestrahlungsdauer betrug jeweils 47h. Abbildung a) zeigt starke Alterung in der ersten Referenzmessung. Dagegen zeigt b) keine Alterung mit der NO₂ Gasmischung. Die zwei folgenden Referenzmessungen c) und d) zeigen wieder Alterung.

Die Ergebnisse des Alterungstests mit dem zweiten Testmodul zeigt deutlich weniger Alterung mit der NO₂ Gasmischung, können diesen Effekt jedoch von der Verbesserung durch Spülen nicht unterscheiden.

7.4 Alterungstest mit 2,5 m Modul

Um die verhindernde Wirkung auf den Gasverstärkungsverlust von Stickstoffdioxid zu reproduzieren, wurden drei Messreihen an zwei 2,5 m Modulen durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Konzentrationen an NO₂ verwendet. Der Gasfluss durch das jeweilige Modul betrug 150 ml/min (1 Vol/h). Als Bestrahlungsquellen dienten die zwei schwachen ⁵⁵Fe-Quellen bzw. die ⁹⁰Sr-Quelle (S8487). Es wurden zwei Bestrahlungen auf parallelen Straws durchgeführt, und in je-

| | Länge | Kanal | Gasmischung | Bestrahlungsdauer | Alterung |
|-----------|-------|-------|-------------------------------------|-------------------|----------|
| 1.Messung | 26 cm | 17 | Ar/CO ₂ | 45 h | 20 % |
| 2.Messung | 41 cm | 17 | Ar/CO ₂ /NO ₂ | 43,5 h | - |
| 3.Messung | 41 cm | 17 | Ar/CO ₂ | 46,5 h | - |

Tabelle 7.2: NO₂ Messreihe mit erstem Testmodul. Mit der ersten und der zweiten Spalte wird Bestrahlungsposition auf dem Modul angegeben. Die zweite Spalte zeigt die für diese Messung benutzte Gasmischung. In der dritten Spalte sieht man die Bestrahlungsdauer und in der vierten Spalte erkennt man die gemessene Alterung nach der jeweiligen Bestrahlung.

der Messung wurden beiden Quellen auf eine unbestrahlte Position gesetzt. Die Bestrahlungsdauer betrug jeweils 45 h. Wurde das Zählgasgemisch geändert, so wurde das Modul mit der neuen Gasmischung für 24 h gespült, bevor die nächste Bestrahlung begonnen wurde.

Das entscheidende in diesen Messreihen war, dass man die NO₂ Messung mit zwei Referenzmessungen zeitlich einrahmt, bzw. dass die Alterung der Referenzmessung nach der NO₂ Messung signifikant größer als die Alterung der NO₂ Messung ist, um einen Effekt des Spülens (siehe Kap. 4.4) auszuschliessen. Im folgenden werden die Messergebnisse der jeweiligen Messreihen kurz in Tabellenform dargestellt.

| | NO ₂ Konzentration [ppm] | Quelle eins | Alterung Quelle eins | Quelle zwei | Alterung Quelle zwei |
|-----------|-------------------------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| 1.Messung | 0 | ⁵⁵ Fe schwach | 37% | ⁵⁵ Fe schwach | 40% |
| 2.Messung | 100 | ⁵⁵ Fe schwach | 11% | ⁵⁵ Fe schwach | 17% |
| 3.Messung | 200 | ⁵⁵ Fe schwach | - | ⁹⁰ Sr S8487 | - |
| 4.Messung | 0 | ⁵⁵ Fe schwach | - | ⁹⁰ Sr S8487 | - |

Tabelle 7.3: NO₂ Messreihe mit Modul War002. Die erste Spalte gibt die NO₂ Konzentration während der Bestrahlung an. Die zweite Spalte und dritte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle eins und die gemessene Alterung an. Die dritte und vierte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle zwei und die gemessene Alterung an.

Tabelle 7.3 zeigt die Ergebnisse der Messreihe des War002 Moduls. Man sieht mit 100 ppm NO₂ deutlich weniger Alterung als mit dem Standardzählgas. Um eine mögliche stärkere Reduzierung der Alterung zu erhalten, wurde die NO₂

Konzentration verdoppelt. Mit einer Konzentration von 200 ppm erkennt man keine Alterung mehr, jedoch zeigt auch die Referenzmessung nach den NO₂ Tests keine Alterung mehr. Der Einfluss des Stickstoffdioxids lässt sich nicht von einer Verbesserung durch Spülen unterscheiden.

| | NO ₂ Konzentration [ppm] | Quelle eins | Alterung Quelle eins | Quelle zwei | Alterung Quelle zwei |
|-----------|--|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1.Messung | 0 | ⁵⁵ Fe schwach | 37% | ⁵⁵ Fe schwach | 40% |
| 2.Messung | 200 | ⁵⁵ Fe schwach | - | ⁵⁵ Fe schwach | - |
| 3.Messung | 0 | ⁵⁵ Fe schwach | - | ⁵⁵ Fe schwach | - |

Tabelle 7.4: NO₂ Messreihe mit Modul War002. Die erste Spalte gibt die NO₂ Konzentration während der Bestrahlung an. Die zweite Spalte und dritte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle eins und die gemessene Alterung an. Die dritte und vierte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle zwei und die gemessene Alterung an.

Um den Einfluss des Spülens zu Reduzieren wird mit dem Modul War023 eine erneute Messreihe gestartet, die eine kürzere Laufzeit hat, als die vorhergehende Messreihe. Es wird mit 200 ppm Stickstoff gearbeitet, da diese Konzentration keine Alterung in der letzten NO₂ Messung zeigte. In Tabelle 7.4 sind die Messergebnisse der Messreihe dargestellt. Man sieht mit 200 ppm Stickstoffdioxid keine Anzeichen für Alterung mehr, jedoch zeigt die Referenzmessung nach dem NO₂ Test auch keine Alterung mehr. Der Einfluss des Stickstoffdioxids lässt sich nicht von einer Verbesserung durch Spülen unterscheiden. Die Messreihe widerspricht einer Verhinderung von Alterung durch NO₂ jedoch auch nicht, da die NO₂ Messung deutlich weniger Alterung zeigte, als die erste Referenzmessung.

Da die Module durch das Spülen während der jeweiligen Messreihe bei der letzten Referenzmessung keine Alterung mehr zeigen, lässt sich das Verhindern der Alterung durch Stickstoffdioxid nicht eindeutig klären. Diese Problematik wird umgangen, indem die erste Referenzmessung ausgelassen wird. Es folgte eine weitere Messreihe mit dem Modul War002³. Die Ergebnisse aus der Messreihe (siehe Tabelle 7.5) zeigen mit 700 ppm NO₂⁴ keine Anzeichen von Alterung (siehe Abb. 7.2(a)). Die Referenzmessung danach zeigt an der ⁹⁰Sr-Quelle (S8487) deutliche Alterung (siehe Abb. 7.2(b)). In diesem Fall kann die Reduktion der Alterung mit NO₂ Zugabe nicht alleinig durch Spülen erklärt werden. Diese Messreihe zeigt, dass NO₂ die Änderung der Gasverstärkung verhindert.

³Module die nach dem Betrieb mehrere Wochen ohne Gasfluss bleiben, zeigen wieder stärkere Alterung als am Ende des vorhergehenden Betriebs. Deshalb wird Modul War002 erneut benutzt.

⁴Für diese Messung wurde das Ar/NO₂ Gasmisch mit CO₂ vermengt.

| | NO ₂ Konzentration [ppm] | Quelle eins | Alterung Quelle eins | Quelle zwei | Alterung Quelle zwei |
|-----------|--|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1.Messung | 700 | ⁹⁰ Sr S8487 | - | ⁵⁵ Fe schwach | - |
| 2.Messung | 0 | ⁹⁰ Sr S8487 | 10% | ⁵⁵ Fe schwach | - |

Tabelle 7.5: NO₂ Messreihe mit Modul War002 ohne erste Referenzmessung. Die erste Spalte gibt die NO₂ Konzentration während der Bestrahlung an. Die zweite Spalte und dritte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle eins und die gemessene Alterung an. Die dritte und vierte Spalte zeigt die Bestrahlungsquelle zwei und die gemessene Alterung an.

7.5 Zusammenfassung und Interpretation der NO₂ Tests

Alle Messungen mit NO₂ zeigen keine oder signifikant weniger Alterung. In zwei Messungen kann die Verhinderung der Änderung der Gasverstärkung dem NO₂ zweifelfrei zugeordnet werden. Die drei Messreihen, in denen der Einfluss des Stickstoffdioxids und des Spülens nicht unterschieden werden können, widerlegen die Reduzierung der Alterung mit der Zugabe von NO₂ in das Zählgas nicht. Die Ergebnisse unterstützen die Vermutung, dass Ozon ein Kandidat für das Radikal ist, welches die Alterung verhindert.

Ob Stickstoffdioxid eine Anwendung im LHCb Outer Tracker findet, müsste genau untersucht werden, da nicht gekannt ist, wie sich langfristig das Stickstoffdioxid in sehr geringen Konzentrationen auf die Module auswirkt. Zudem muss auf Sicherheit geachtet werden, da Stickstoffdioxid ein nicht unerhebliches Sicherheitsrisiko darstellt.

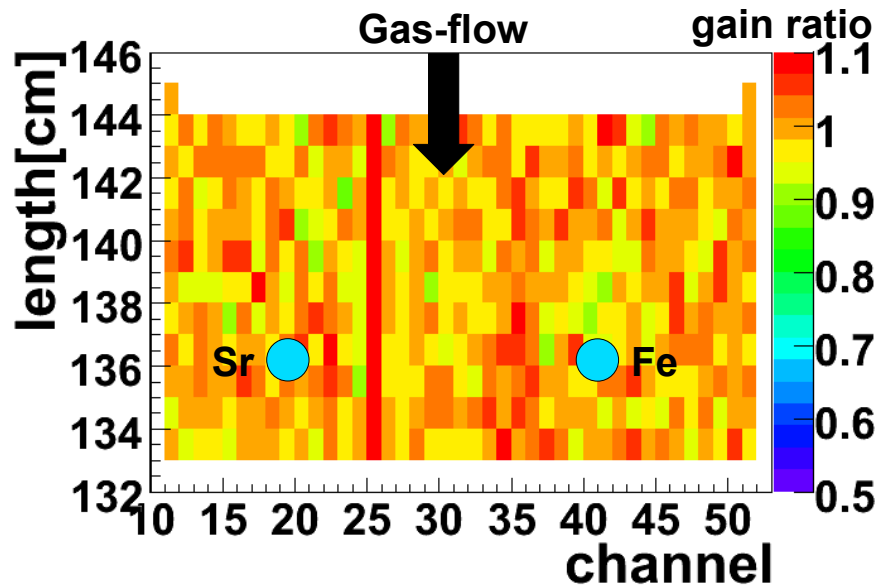
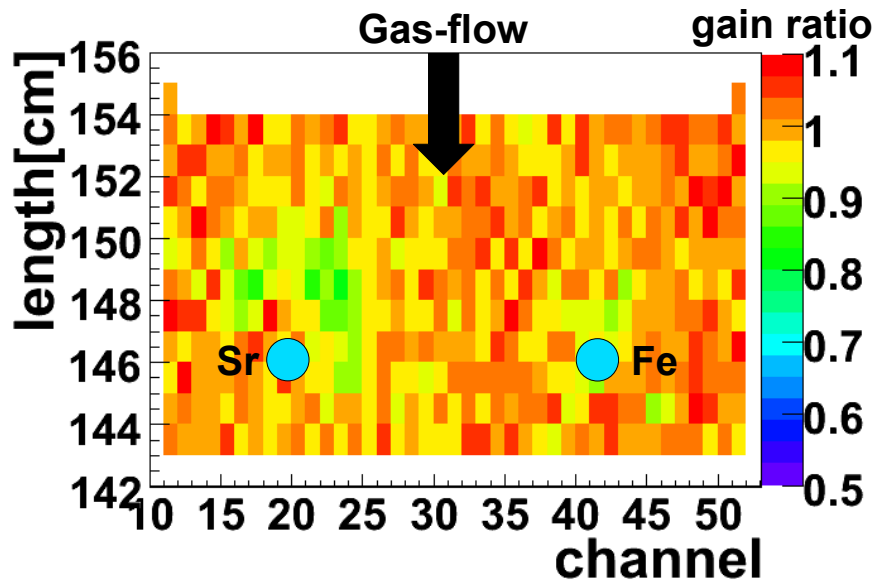
(a) Messergebnis mit 700 ppm NO₂.(b) Messergebnis mit Standardzählgas Ar/CO₂ (70%/30%).

Abbildung 7.2: Ergebnisse der Messreihe ohne erste Referenzmessung mit 2,5 m Modul. Die Messung mit 700 ppm NO₂ zeigt keine Alterung an beiden Bestrahlungspositionen, dargestellt mit hellblauen Punkten in Abbildung a). Die Bestrahlung mit dem Standardzählgas erzeugt an der ⁹⁰Sr-Quelle deutliche Alterung, wie in Abbildung b) deutlich zu erkennen. Diese Messung zeigt, dass NO₂ die Alterung verhindert.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurde ein Alterungsphänomen im LHCb Outer Tracker, das mit einer starken Abnahme der Gasverstärkung verbunden ist, untersucht. Die Alterung zeichnet sich durch eine starke Ratenabhängigkeit aus. So treten signifikante Veränderungen der Gasverstärkung schon nach einer Bestrahlung, die einer akkumulierten Ladung von nur 1-2 mC/cm entspricht, auf. Die Veränderungen sind aber auf Bereiche beschränkt, die während der Bestrahlung Anodenströme < 15 nA/cm aufweisen. In stärker bestrahlten Regionen tritt keine Änderung der Gasverstärkung auf. Die Schädigung ist nicht symmetrisch um die Bestrahlungsquelle, sondern vom Gasfluss abhängig und bildet sich nur in einem halbmondförmigen Bereich vor der Bestrahlungsquelle (relativ zur Gasrichtung).

Zum Anfang der Diplomarbeit wurde die bestehende manuelle Methode zur Messung der Gasverstärkung über einen großen Kammerbereich automatisiert. Dazu wurde eine Konstruktion mit zwei Schrittmotoren zum Bewegen der Bestrahlungsquellen entwickelt. Diese neue Methode macht die Bewegung des Kollimators von Hand unnötig und erleichtert so die Untersuchung der Alterung. Die Messgenauigkeit der neuen Methode ist mit der alten vergleichbar.

Der Hauptteil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der ungewöhnlichen geometrischen Form der Alterung. Dazu wurden Transportstudien durchgeführt, die Indizien liefern, dass im Gebiet der Bestrahlung Radikale mit einer Lebensdauer im Bereich von Minuten erzeugt werden. Diese werden mit dem Gasfluss transportiert und verhindern die Alterung direkt unter der Bestrahlungsquelle sowie hinter ihr (relativ zur Gasrichtung). Die Wirkung auf die Alterung hinter der Quelle ist von der Intensität der verwendeten Bestrahlungsquelle abhängig. Je höher die Bestrahlungsintensität desto länger ist die Distanz, über die Alterung verhindert wird. Zudem scheint die geometrische Form der Alterung durch die Produktion von Radikalen erklärt zu werden.

Ein möglicherweise bei Bestrahlung im Zählgas produziertes Radikal ist Ozon. Dieses wurde in Konzentrationen im sub-ppm Bereich gefunden. Die Parameter der Ozonproduktion wurden untersucht. Bei höheren Anodenströmen wird mehr Ozon gebildet. Zudem wurde die Ozonproduktion in Abhängigkeit von der

Gasflussgeschwindigkeit gemessen. Dazu wurde ein Zählgas mit 2,5% Sauerstoff verwendet. Es zeigt sich eine umgekehrte Proportionalität der Ozonkonzentration zur Gasflussgeschwindigkeit. Dies ist kompatibel mit der Beobachtung, dass Alterungsmessungen mit geringem Gasfluss eine geringere Veränderung der Gasverstärkung zeigen. Auch eine Messung der Halbwertszeit des Ozons in Zählgas mit 2,5% Sauerstoffanteil wurde durchgeführt. Die gemessene Halbwertszeit von $(3,6 \pm 0,3)$ min liegt in der Größenordnung, die notwendig ist, um das besondere Schädigungsprofil mit der Wirkung von Radikalen zu erklären. Außerdem wurde die Abhängigkeit der Ozonproduktion von der Sauerstoffkonzentration gemessen. Die Ozonkonzentration steigt mit der Sauerstoffkonzentration und erreicht bei 0,3% ein Plateau. Diese Messung ist kompatibel mit der Beobachtung, dass man bei Zusatz von O_2 zum Zählgas deutlich weniger Alterung findet. Bei den untersuchten O_2 Konzentrationen ($> 1\%$) war aber keine Abhängigkeit der Alterung vom Wert der O_2 Konzentration festzustellen. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, dass Ozon ein möglicher Kandidat für ein die Alterung verhandelndes langlebiges Radikal ist.

Um die Radikalhypothese zu testen, wurde dem Zählgas statt Ozon (technisch schwierig) NO_2 zugegeben. Es zeigt sich in mindestens zwei Messreihen zweifelsfrei, dass der Zusatz von NO_2 die Veränderung der Gasverstärkung verhindert. Dieses Ergebnis unterstützt die Radikalhypothese.

Die Studien dieser Diplomarbeit konnten zu einem besseren Verständnis des ungewöhnlichen Alterungsphänomens im LHCb Outer Tracker beitragen. Es ergibt sich eine mögliche Erklärung für die Entstehung der halbmondförmigen Alterung. Derzeit wird über den Zusatz von wenigen Prozent O_2 bzw. wenigen ppm NO_2 zum Driftgas nachgedacht.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | LHC mit den vier Experimenten | 9 |
| 2.2 | Seitenansicht des LHCb-Detektors | 11 |
| 2.3 | Outer Tracker Darstellung | 14 |
| 3.1 | Aufbau Zählrohr | 17 |
| 3.2 | Arbeitsbereiche von zylindrischen Gasdetektor | 18 |
| 3.3 | Bethe Bloch Kurvenverlauf | 20 |
| 3.4 | Absorptionkoeffizient für Photonen gegen Photonenergie in Blei | 21 |
| 4.1 | Elektronenmikroskopaufnahme von Whiskers | 28 |
| 4.2 | Schematische Darstellung des Maltereffekts | 30 |
| 4.3 | Beispiel für LHCb Outer Tracker Alterung | 31 |
| 4.4 | Strahlprofile der Bestrahlungsquellen | 33 |
| 4.5 | Normales Pulsspektrum von ^{55}Fe mit Ar/CO ₂ | 35 |
| 4.6 | Pulsspektrenvergleich von Pos. mit Alterung und Pos. ohne Alterung | 36 |
| 4.7 | Messaufbau für automatische Messmethode | 37 |
| 4.8 | Justieren der automatischen Messmethode | 38 |
| 4.9 | Foto von Kollimator | 39 |
| 4.10 | Vergleich der zwei Messmethoden | 40 |
| 4.11 | Quantifizierung der Alterung | 41 |
| 4.12 | Beseitigung der Alterung mit hoher Rate | 42 |
| 4.13 | Alterungstest mit TraBond Modul | 43 |
| 5.1 | Idee von Transporttest | 46 |
| 5.2 | Idee von Transporttest mit unterschiedlichen Quellen | 48 |
| 5.3 | Ergebnis der Transporttests mit Quellendistanz 8cm | 49 |
| 5.4 | Ergebnis der Transporttests mit Quellendistanz 25cm | 51 |
| 5.5 | Weitere Indizien für Radikale | 52 |
| 6.1 | Aufbau der Ozonmessungen | 57 |
| 6.2 | Ozon aus dem Gasverstärkungsprozess | 58 |
| 6.3 | Hochspannungsabhängigkeit des Ozons mit Ar/CO ₂ | 60 |
| 6.4 | Hochspannungsabhängigkeit des Ozons mit Ar/CO ₂ /O ₂ | 61 |
| 6.5 | Gasflussabhängigkeit der Ozonkonzentration | 62 |

| | | |
|-----|---|----|
| 6.6 | Modulvergleich der Ozonproduktion | 63 |
| 6.7 | Halbwertszeit des Ozons | 64 |
| 6.8 | Sauerstoffabhängigkeit der Ozonkonzentration | 66 |
| 7.1 | Ergebnisse der ersten Messreihe mit NO ₂ | 72 |
| 7.2 | Messergebnisse NO ₂ Test mit 2,5 m Modul | 76 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Aktivität der Bestrahlungsquellen | 34 |
| 5.1 | Ergebnis der Transporttests mit Distanz 8 cm | 48 |
| 5.2 | Ergebnis der Transporttests mit Distanz 25 cm | 50 |
| 7.1 | NO ₂ Messreihe mit ersten Testmodul | 71 |
| 7.2 | NO ₂ Messreihe mit zweitem Testmodul | 73 |
| 7.3 | NO ₂ Messreihe mit Modul War002 | 73 |
| 7.4 | NO ₂ Messreihe mit Modul War023 | 74 |
| 7.5 | NO ₂ Messreihe mit Modul War023 ohne erste Ref. Messung . . . | 75 |

Literaturverzeichnis

- [1] *LHCb Velo: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-011
- [2] *LHCb Inner Tracker Technical Design Report* CERN/LHCC 2002-29
- [3] *LHCb magnet: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-007
- [4] *LHCb RICH Technical Design Report* CERN/LHCC 2000-037
- [5] *LHCb Calorimeters: Technical Design Report* CERN/LHCC 2000-036
- [6] *LHCb muon system: Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-010
- [7] LHCb Outer Tracker Home Page <http://www.nikhef.nl/pub/experiments/bfys/lhcb/outerTracker/>
- [8] University Tokyo ICEPP ATLAS Home Page <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/atlas/public/lhc/>
- [9] *LHCb Outer Tracker Technical Design Report* CERN/LHCC 2001-024
- [10] 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>
- [11] Stefan König *Ageing studies for the ATLAS MDT Muonchambers and development of a gas filter to prevent drift tube ageing* Dissertation, 2008
http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/4493/pdf/dissertation_stefankoenig.pdf
- [12] Tanja Haas *Alterungsstudien und Studium der Betriebseigenschaften des Outer Trackers des LHCb Detektors* Dissertation, 2007
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/Publications/HaasDiss07.pdf>
- [13] Ivan Mous *Aging in the LHCb Outer Tracker* Master Thesis, 2007

- [14] Fabio Sauli *Principles of operation of multiwire proportional and drift chambers* CERN 77-09
- [15] *Review of Particle Physics* J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 33 (2006)
- [16] Claus Grupen *Teilchendetektoren* Wissenschaftsverlag, ISBN 3-411-16571-5
- [17] Wilhelm Raith *Bergmann Schaefer Band 2 Elektro-Magnetismus* de Gruyter, ISBN 3-11-016097-8
- [18] Donald W. Perkins *Hochenergiephysik* Addison-Wesley, ISBN 3-89319-111-9
- [19] L. Malter *Thin Film Field Emission* Phys Rev. 50 (1936) 48
- [20] Homepage Michael Walter http://www.physi.uni-heidelberg.de/~mwalter/index_files/aged_wires.html
- [21] Raimund Ruschmann *Entwicklung und Untersuchung von Straw Tubes fuer den LHCb Detektor* Diplomarbeit, 2002
<http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/publications/ruschmann02.ps>
- [22] Elektronikwerkstatt des Physikalischen Instituts Heidelberg <http://www.physi.uni-heidelberg.de/physi/ew/Geraete/>
- [23] National Instruments Home Page http://www.ni.com/gpib/d/what_is.htm
- [24] Richard M. Todaro et al. *Stratospheric Ozone: An Electronic Textbook* http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz_class.htm
- [25] Powertron Home page <http://www.ozonate.co.za/ozinfo.html>
- [26] C. Eulitz S. Scheuermann H. Thier *ABC Chemie* Harri Deutsch,
- [27] Horiba Ltd. *Ambient Ozon Monitor APOA-360 Anleitung*
- [28] Air Liquide EG-Sicherheitsdatenblatt Stickstoffdioxid http://gasekatalog.airliquide.de/sdb/090__stickstoffdioxid.pdf

Erklärung

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

Heidelberg, den 19. Dezember 2008

-

Danksagung

Viele Menschen haben zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen. Denen möchte ich kurz meinen Dank ausdrücken.

Ich danke Herrn Prof. Uwer für die Möglichkeit über ein Thema meine Diplomarbeit zu schreiben, das mich seit meiner Miniforschung interessiert. Zudem für die vielen interessanten Einblicke und Erfahrungen, die ich machen durfte, und ich viel dabei gelernt habe. Danke für die gute Betreuung.

Ich danke Herrn Prof. Knöpfle für die Bereitschaft die Zweitkorrektur dieser Arbeit zu übernehmen.

Ich danke meinen Kollegen aus den LHCb/Barbar Gruppen für die tolle Atmosphäre. Ich habe mich in der LHCb Gruppe immer wohl gefühlt. Besonderem Dank gebührt meiner Miniforschungsbetreuerin und späteren Kollegin Frau Dr. Tanja Haas für die gute Betreuung und Zusammenarbeit während Miniforschung und Diplomarbeit. Man konnte zu ihr wegen jeder Angelegenheit kommen und hat immer Rat bekommen.

Ich danke Herrn Dr. Sebastian Bachmann für die vielen aufschlussreichen Gespräche/Diskussionen und die tolle Zusammenarbeit in und außerhalb der Schweiz. Dazu gehört natürlich auch Dr. Juri Bagaturia.

Ich danke meinen Korrekturlesern Aleksandra Adametz, Stefan Schenk, Tanja Haas, Sebastian Bachmann, Manuel Schiller, Jan Knopf, Nina Krieger und Herrn Prof. Uwer für die kritischen Bemerkungen.

Ich danke meinen ganzen Bürokollegen Alex, Stefan, Pavel, Tanja, Manuel und Reiner für die netten Gespräche zwischen der Arbeit und der schnellen Hilfe bei Problemen.

Ich danke Frau Dr. Lindauer für die Zusammenarbeit in Fragen des Ozonmonitors.

Ich danke Herrn Hetzel für die gute Zusammenarbeit und Konstruktion in Fragen der automatisierten Messmethode.

Ich entschuldige mich bei allen, denen ich zu danken vergessen habe, mein Dank sei ihnen hiermit nachgereicht.

Ich danke meiner Familie, die immer hinter mir stand, und mir dieses Studium ermöglicht hat.

Ich danke meinen Freunden für das Verständnis, dass ich für sie zum Ende dieser Arbeit keine Zeit mehr hatte, sie mich aber trotzdem unterstützten.