
Fertigung und Inbetriebnahme einer Strohdriftkammerstation

für das COMPASS-Experiment

von

Christoph Joachim Ilgner

aus Bremen

Dissertation der Fakultät für Physik der
Ludwig-Maximilians-Universität München

eingereicht am 11. März 2003

Erster Gutachter: Prof. Dr. M. A. Faessler
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. O. Biebel
Tag der mündlichen Prüfung: 04. Juni 2003

В качестве научного руководителя принимал участие в завершении этой работы и доктор физико-математических наук В. Д. Пешехонов.

Das Entstehen dieser Arbeit begleitete auch Herr Doktor der physikalisch-mathematischen Wissenschaften V. D. Peschechonow als wissenschaftlicher Betreuer.

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen	13
1 Einführung	15
2 COMPASS - Physikalische Zielsetzung	17
2.1 Experimente mit dem Hadronstrahl	17
2.2 Experimente mit dem Myonstrahl	20
3 Das COMPASS-Spektrometer	23
3.1 Target-Systeme für das Hadronprogramm	24
3.2 Target-Systeme für das Myonprogramm	25
3.3 Die Spurverfolgungssysteme	28
3.4 Der erste ringabbildende Tscherenkow-Zähler	28
3.5 Die Kalorimeter	29
3.6 Die Myonfilter	30
3.7 Die Trigger	31
3.8 Ausleseelektronik und Datennahme	31
4 Driftrohr-Detektoren	35
4.1 Gasdetektoren	35
4.1.1 Funktionsweise von Driftkammern und Driftrohren	35
4.1.2 Grenzen der Ortsauflösung von Driftkammern	40
4.2 Driftrohre	43
II Die Spurverfolgungsstation 2	45
5 Anforderungen an das Spurverfolgungssystem	47
5.1 Geometrische Präzision und Ortsauflösung	47
5.1.1 Kinematisches Modell des D^0 -Mesonen-Zerfalls	50
5.1.2 Genauigkeit der Impulsmessung	51
5.1.3 Genauigkeit der Winkelmessung	54
5.1.4 Genauigkeit der Massenbestimmung des D^0 -Mesons	54
5.2 Nachweiseffizienz	54

5.3	Betriebssicherheit	57
6	Bauform	59
6.1	Prototypen und Tests	59
6.2	Festlegung des Konzeptes	64
7	Das Alterungsproblem bei Gasdetektoren	65
7.1	Klassifikation bekannter Alterungsphänomene	66
7.1.1	Ursachen der Detektoralterung	67
7.1.2	Chemische Prozesse	67
7.2	Überlegungen zur Vermeidung von Alterung	67
7.2.1	Auswahl der Strukturmaterialien	67
7.2.2	Zählgas und Strukturmaterialien: Restriktionen	68
7.3	Experimente zum Alterungsverhalten	68
7.3.1	Der Aufbau am Garching Tandem-Beschleuniger	68
7.3.2	Bestimmung der Alterungsrate	69
7.3.3	Mikroskopische Untersuchungen	70
7.3.4	REM- und Elektronenstrahl-Mikroanalyse	73
8	Entwicklung neuartiger Drahtpositionierer	79
8.1	Nachteile der eingesetzten Drahtpositionierer	79
8.2	Alternative Drahtpositionierer	80
8.2.1	Fertigung der Elemente	82
8.2.2	Untersuchungen an den Drahtpositionierern	83
9	In der Fertigung eingesetztes Material	89
9.1	Drahtpositionierer	89
9.2	Endkappen	89
9.3	Eigenschaften des Driftrohrmaterials	90
9.3.1	Anforderungen an das Driftrohrmaterial, Auswahlkriterien	90
9.3.2	Wasseraufnahme durch das Driftrohrmaterial	91
9.3.3	Längenänderung als Funktion von Temperatur und Feuchte	92
10	Untersuchung der ersten Kammer	99
10.1	Teststrahllaufbau	99
10.1.1	Spurverfolgungssystem	99
10.1.2	Der Trigger	101
10.2	Analyse der Ergebnisse	102
10.2.1	Ortsauflösung	102
10.2.2	Nachweiseffizienz	105
10.2.3	Bewertung der Ergebnisse	108
10.3	Röntgen-Präzisionsbestimmung	109
10.4	Weitere Doppelebenen	109

10.4.1 Assemblieren der Submodule und Module 112
 10.4.2 Feuchtigkeitsabhängige Durchbiegung 112

III Produktion und Inbetriebnahme 115

11 Produktionskette und Spezialwerkzeug 117

11.1 Die Produktionsschritte im Einzelnen 117
 11.1.1 Zusammenfassung der Produktionsschritte 117
 11.1.2 Ausführliche Darstellung wichtiger Arbeitsschritte 120
 11.1.3 Verfahren zum Erreichen der geometrischen Präzision 122
 11.1.4 Untersuchung der Drahttriss-Problematik 128
 11.2 Zeitliche Gestaltung der Produktion 136
 11.3 Materialfluss und Transport der Zähler 137

12 Das Gassystem 141

12.1 Auswahl des Zählgases 142
 12.2 Sicherstellung konstanter Gasparameter 143
 12.2.1 Modellrechnung zum Gasstrom durch die Driftröhrchen 144
 12.2.2 Modifikation des Gases durch Diffusion 150
 12.2.3 Das Schutzgasvolumen 153
 12.3 Die technische Gestaltung des Gassystems 154
 12.4 Inbetriebnahme 158
 12.4.1 An- und Herunterfahren des Systems 158
 12.4.2 Prüfung des Kompressors 159
 12.4.3 Prüfung der Druckregelung 160
 12.4.4 Messung von Druckschwankungen in den Zählern 161
 12.4.5 Steuerung der Massenflussregler 162
 12.4.6 Automatische Überwachung des Systems 162
 12.4.7 Verzeichnis häufig auftretender Funktionsfehler 163

13 Ausblick 167

Abbildungsverzeichnis 173

Tabellenverzeichnis 175

Anhang 176

A Abkürzungsverzeichnis 177

B Bildanhang 179

C Zeichnungen zur Zählerproduktion	193
D Ablaufdiagramme zur Zählerproduktion	199
Schulischer und beruflicher Werdegang	210

Zusammenfassung

Das kürzlich am Europäischen Laboratorium für Teilchenphysik (C.E.R.N.) in Genf (Schweiz) in Betrieb genommene Spektrometer „COMPASS“ verwendet Stroh-Driftkammern als ortsauflösende Detektoren zur Spurverfolgung. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit ihrer Auslegung und begleitet Bau und Inbetriebnahme bis zur Untersuchung ihrer Eigenschaften am Teststrahl und ihrer Montage im Spektrometer.

Es konnte gezeigt werden, dass die eingesetzten Detektoren den Anforderungen des mit dem COMPASS-Spektrometer geplanten Experimentierprogrammes genügen, welche vor allem durch die Notwendigkeit eines effizienten Nachweises des D^0 -Mesonen-Zerfalls $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ bedingt sind: Zwischen dem ersten Spektrometernmagneten und dem ringabbildenden Tscherenkow-Zähler benötigt der Aufbau ein System zur Verfolgung der Spuren geladener Teilchen. Es soll - obwohl in Strahlrichtung kompakt - bei hoher Orts- und Zeitauflösung den durch die Apertur des Target-Magneten vorgegebenen vergleichsweise großen Raumwinkel von 180 mrad abdecken, wodurch sich am vorgesehenen Einsatzort aktive Flächen der Größenordnung 10 m^2 ergeben.

Die bei der Zählerproduktion erreichte geometrische Präzision bedingt die Genauigkeit der Messung der Teilchenspurkoordinaten und damit - über die Ermittlung von Energie und Impuls der Zerfallsprodukte - den Fehler der D^0 -Massenbestimmung. Seltene Prozesse wie den erwähnten mit hoher Genauigkeit zu beobachten erfordert die Aufnahme einer große Zahl von Zerfallsereignissen, weswegen die Detektoren hohen Teilchenflüssen ausgesetzt sein werden. Aus diesen Gründen galt besonderes Augenmerk den Experimenten zu Ortsauflösung und Nachweiseffektivität, aber auch zum Alterungsverhalten.

Die Zähler wurden am Vereinigten Institut für Kernforschung (VIK) in Dubna (Russische Föderation) hergestellt, weswegen die Fertigung auch in logistischer Hinsicht eine Herausforderung darstellte. An entsprechender Stelle wird daher nicht nur auf die Produktionstechnologie, sondern auch auf Einzelheiten zur Gestaltung von Arbeitsabläufen und die Materialflüsse eingegangen.

Abstract

The so-called "COMPASS" spectrometer recently put into operation at the European Laboratory for Particle Physics (C.E.R.N.) uses straw drifttubes as space sensitive detectors for tracking purposes. The presented work deals with the specification of these detectors and monitors construction and commissioning up to the investigation of their properties using a testbeam, as well as the installation into the spectrometer.

It could be shown that the detectors meet the requirements of the experimental program the COMPASS spectrometer aims for, in particular determined by the necessity of an efficient detection of the D^0 -meson decay $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$:

Between the first spectrometer magnet and the ring-imaging Cherenkov counter the setup requires a system for the determination of charged-particle tracks. On one hand it has to be compact in the beam direction, on the other it must offer a high time and spatial resolution while covering the relatively large solid angle given by the aperture of the target magnet which amounts to 180 mrad. Due to this the active surface at the foreseen location will be around 10 m².

The geometrical precision reached during production determines the precision of the information obtained on track coordinates of the decay products and thus - having an impact on the measurement of energies and momenta of the reaction products - influences the precision of the D^0 -meson mass measurement. Observing rare processes like the one mentioned above with high accuracy means collecting a huge sample of decay events, making it necessary to expose the detectors to high particle fluxes. Thus, particular attention was paid to the experiments concerning spatial resolution and detection efficiency, but also to the aging behaviour.

The counters were manufactured at the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) at Dubna (Russian Federation), which means that the production was also challenging in terms of logistics. Where necessary not only the production technology but also details concerning the work organization and materials flow are described.

Аннотация

Вступивший недавно в действие в Европейской Лаборатории Физики Частиц (Ц.Е.Р.Н. - С.Е.Р.Н.) в Женеве (Швейцария) спектрометр КОМПАСС (COMPASS) использует камеры на основе тонкостенных дрейфовых трубок "строу" в качестве трекера и координатного детектора. В представленной работе показаны проектирование, сборка, исследование свойств этих камер на опытном пучке и их монтаж в спектрометр.

Было показано, что вступающие в действие детекторы соответствуют требованиям экспериментальной программы, планируемой на спектрометре КОМПАСС, которые главным образом определяются эффективностью детектирования распада мезона $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$: Между первым магнитом спектрометра и Черенковским счётчиком кольцевого отражения установке требуется система для исследования траекторий заряженных частиц. Несмотря на то, что камера должна быть компактна по направлению пучка, требуется высокое разрешение по месту и времени и перекрытие телесного угла, определяемого апертурой магнита мишени, достигающего до $1,80 \cdot 10^{-5}$ рад. Таким образом, получается чувствительная зона порядка 10 м^2 на месте эксплуатации.

Геометрическая точность, полученная при изготовлении, непосредственно влияет на точность измерения массы мезона D^0 . Из-за этого, также как из-за высоких потоков частиц, влияющих на детекторы, особое внимание было обращено на эксперименты по координатному разрешению, эффективности и эффекту старения.

Счётчики были сделаны в Объединённом Институте Ядерных Исследования (ОИЯИ) в Дубне (Российская Федерация) и доставлены в Ц.Е.Р.Н., поэтому на изготовление влияли и транспортные проблемы. В данной работе речь будет идти не только о технологии изготовления, но и об организации проведения работ и доставке материалов и оборудования.

Teil I

Grundlagen

Kapitel 1

Einführung

Unter dem Namen COMPASS (**C**ommon **M**uon and **P**roton **A**pparatus for **S**tructure and **S**pectroscopy) wird seit Kurzem am Super-Proton-Synchrotron des Europäischen Laboratoriums für Teilchenphysik (C.E.R.N.) ein neues Spektrometer betrieben, das für Fixed-Target-Experimente zur Untersuchung der Struktur von Hadronen und zur Hadronspektroskopie eingesetzt werden soll. Sein Aufbau wird Experimente sowohl mit Hadronen-, als auch mit polarisierten Myonenstrahlen zulassen. Die Wechselwirkung der polarisierten Strahlmyonen (100-200 GeV/c) mit den ebenfalls polarisierten Protonen und Deuteronen des Targets macht über die Photon-Gluon-Fusion in ein Charm-Anticharm-Quarkpaar die Messung der Polarisation von Gluonen innerhalb der Nukleonen möglich. Dadurch erwartet man Anhaltspunkte zur Lösung des sogenannten „Spin-Puzzles“, der bislang ungeklärten Verteilung der Beiträge der Konstituenten zum Spin der Nukleonen.

Mit dem Hadronenstrahl (Impuls bis zu 300 GeV/c) soll zunächst die Polarisierbarkeit von Hadronen erforscht, und nach exotischen Zuständen, vor allem nach Gluebällen und Hybriden, gesucht werden. Später sollen Untersuchungen zur Produktion von Mesonen und Baryonen mit Charmquarks durchgeführt werden. Weil die wesentlichen Signaturen der Endzustände der mit beiden Strahlarten geplanten Reaktionen jeweils Mesonen mit Charm enthalten, bot sich die gemeinsame Nutzung eines Spektrometers mit den entsprechenden Nachweismöglichkeiten an.

Es wird als zweistufiges magnetisches Spektrometer mit Kalorimetern in beiden Stufen und Teilchenidentifikation in der ersten Stufe ausgeführt werden. Alle Detektorkomponenten müssen der Strahlintensität von $2 \cdot 10^8$ Myonen je Spill¹ von 2,4 Sekunden Länge alle 14,4 Sekunden gewachsen sein.

¹Teilchenstrahlung, wie sie für das mit dem COMPASS-Spektrometer geplante Experimentierprogramm benötigt wird, wird von modernen Beschleunigeranlagen in der Regel nicht kontinuierlich zur Verfügung gestellt, vielmehr werden die Teilchen stoßweise aus dem Speicherring extrahiert. Einen solchen Stoß nennt man „Spill“, den Zeitraum vom Beginn eines Spills bis zum Beginn des folgenden „Duty Cycle“.

Kapitel 2

Physikalische Zielsetzung des COMPASS-Experimentes

Obwohl die meisten Komponenten des COMPASS-Spektrometers gemeinsam benutzt werden können, werden im Experimentierprogramm am Myon- und Hadronstrahl doch weitgehend unterschiedliche physikalische Fragestellungen behandelt, auf die im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

2.1 Experimente mit dem Hadronstrahl

Hadronen mit Charm

Die Produktion von Hadronen mit Charm kann in zwei Subprozesse unterteilt werden, die Produktion von Charm-Quarks und ihre Hadronisierung. Die perturbative Quantenchromodynamik bietet die Grundlage für eine Abschätzung der Produktions-Wirkungsquerschnitte dieser Charm-Quarks.

Ihre anschließende Hadronisierung führt zu verschiedenen Charm-Endzuständen, deren kinematische Verteilung in diesem Modell ausschließlich durch den Prozess der Hadronisierung beschrieben wird.

Die HQET („Heavy Quark Effective Theory“) sagt Produktionsraten und Formfaktoren voraus, welche über die Messung semileptonischer Zerfallsbreiten von Teilchen mit Charm überprüft werden können.

Doppelt-charmhaltige Baryonen, die zwei schwere Charm-Quarks und ein leichtes Up-, Down- oder Strange-Quark enthalten, haben besonders kleine Produktions-Wirkungsquerschnitte¹. Nur ein Hochratenexperiment wie COMPASS mit einer geplanten Strahlrate von bis zu $4 \cdot 10^7$ Protonen pro Sekunde verspricht eine ausreichende Produktionsrate.

¹Erste Hinweise auf die Existenz eines ccd-Zustandes bei (3520 ± 4) MeV/c² kamen kürzlich vom SELEX-Experiment [22].

Bei einem Produktions-Wirkungsquerschnitt für die Charm-Anticharm-Produktion von $\sigma_{c\bar{c}} \approx 10 \mu\text{barn/Nukleon}$ bei einem Strahlteilchenimpuls von 300 GeV/c erhält man je Wechselwirkung im Mittel $0,7 \cdot 10^{-3}$ Ereignisse mit charmhaltigen Mesonen im Endzustand. Mit oben genannter Strahlrate, einer Spilldauer von 2 s (gerundet), bei 5000 Spills pro Tag an 100 Tagen im Jahr und einer Targetdicke von 2,5 % der Hadron-Wechselwirkungslänge finden 10^{12} Wechselwirkungen statt. Es werden somit $0,7 \cdot 10^9$ Charm-Anticharm-Paare pro Jahr produziert.

Mit einem Pionenstrahl mit o.a. Parametern erhält man je Wechselwirkung im Mittel $1,0 \cdot 10^{-3}$ derartige Ereignisse, was zur Produktion von $1,0 \cdot 10^9$ Charm-Anticharm-Paaren pro Jahr führt [21].

Primakoff-Streuung

Abbildung 2.1 zeigt das Feynman-Diagramm einer sogenannten Primakoff-Reaktion, der radiativen Streuung eines Pions im Coulomb-Feld eines Kernes unter Austausch eines virtuellen und Emission eines reellen Photons. Die Reaktion wird oft auch als „inverse Comptonstreuung“ eines quasi-reellen Photons am Pion bezeichnet. Um hohe Produktionsraten zu erreichen, bietet sich für ein solches Experiment die Verwendung von Targetmaterial mit hoher Kernladungszahl an.

Die Signatur der Reaktion ist das koinzidente Auftreten des gestreuten Hadrons und eines reellen Photons γ .

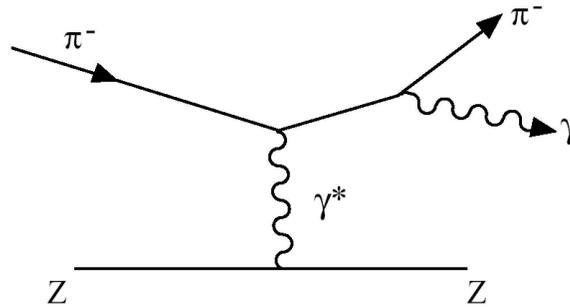


Abbildung 2.1: Radiative Streuung eines Pions im Coulomb-Feld eines Kernes zur Messung der Polarisierbarkeit von π und K.

Im Gegensatz zur Streuung bis zum Erweis des Gegenteils als punktförmig geltender Teilchen, etwa Elektronen, muss für die Streuung zusammengesetzter Systeme, hier Mesonen, deren innere Struktur berücksichtigt werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang ihre elektrische und magnetische Polarisierbarkeit, welche für Pionen von der Chiralen Störungstheorie gut beschrieben wird. Dennoch erbrachten Messungen - die allerdings nur auf Daten mit geringer statistischer Signifikanz zurück greifen konnten - Polarisierbarkeitswerte, die um etwa ein Dreifaches über den theoretisch vorhergesagten lagen.

Es bietet sich an, hier die Möglichkeiten des COMPASS-Spektrometers für eine Präzisionsmessung zu nutzen. Auch über die Polarisierbarkeit des Kaons ist nur wenig bekannt, man kann bislang lediglich eine obere Schranke angeben, die nach [51] für die elektrische Polarisierbarkeit $\bar{\alpha}_{K^-}$ des K^- -Mesons bei $\bar{\alpha}_{K^-} = 200 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^3$ liegt.

Exotische Zustände

Obwohl die Eichtheorie der starken Wechselwirkung, die Quantenchromodynamik, schon von vielen Experimenten getestet und im Rahmen der jeweiligen experimentellen Zielsetzung bestätigt wurde, konnten die von der Theorie vorhergesagten gebundenen Zustände von zwei oder drei Gluonen (gg, ggg) bisher noch nicht sicher nachgewiesen werden. Auch ist die Existenz sogenannter Hybride, in denen die Gluonen zu den Quantenzahlen beitragen, vorstellbar. Ein einfacher Hybridzustand, abgekürzt $q\bar{q}g$, besteht etwa aus einem Quark-Antiquark-Paar $q\bar{q}$ und einem Konstituentgluon g .

Die exotischen Zustände mit der niedrigsten von der Theorie vorhergesagten Masse sollen im Bereich von $1 - 3 \text{ GeV}/c^2$ vorkommen [77]. Speziell aus dem Intervall von 2 bis $3 \text{ GeV}/c^2$ liegen bislang noch keine experimentellen Daten mit ausreichender Statistik vor², obwohl dort angeregte Glueball-Zustände erwartet werden.

So kann das COMPASS-Spektrometer etwa den bei $2,4 \text{ GeV}/c^2$ vermuteten Tensor-Glueball nachweisen oder seine Existenz ausschließen. Es ist geplant, Spektroskopie an leichten Mesonen (d. h. Mesonen, die keine schweren Quarks wie das Charm-Quark enthalten) zu betreiben, wobei man sich der Proton-Proton-Zentralproduktion bedient, die eine gluonenreiche Umgebung erzeugt. Des Weiteren sollen diffraktive Pion- und Kaon-Streuprozesse untersucht werden.

In jedem Fall müssen, auch aufgrund der Erkenntnisse früherer Experimente, zur Untersuchung dieser Reaktionen Datensätze mit hoher Statistik genommen werden, wobei eine ausreichende Rekonstruktion nur möglich ist, wenn in den Endzuständen sowohl geladene als auch ungeladene Teilchen gemessen werden. Jedes zu untersuchende Meson muss in etlichen verschiedenen Zerfallskanälen nachgewiesen werden können und über verschiedene Reaktionen produziert werden.

Vor allem wegen seiner leistungsfähigen Teilchenidentifikationsmöglichkeiten ist das COMPASS-Spektrometer für ein solches Experimentierprogramm höchst geeignet.

²Das Crystal-Barrel-Experiment (C.E.R.N.-Experiment PS197) fand im Bereich von 1 bis $2 \text{ GeV}/c^2$ eine komplexe Überlagerung von f_0 -Mesonen, die auf die Präsenz eines gebundenen Zustandes aus Gluonen, in diesem Fall des Grundzustandes 0^{++} des „skalaren Glueballs“, hinweisen [5], [23].

2.2 Experimente mit dem Myonstrahl

Die Kräfte zwischen den Quarks, aus denen die Nukleonen bestehen, werden durch Gluonen, die Eichbosonen der starken Wechselwirkung, vermittelt. Es stellte sich heraus, dass sie auch Beiträge zu Impuls und Spin der Nukleonen leisten, 50 % im Falle des Impulses. Ergebnisse des EMC-Experimentes³ deuten des Weiteren darauf hin, dass sich auch der Spin eines Nukleons nicht zur Gänze auf den Spin der enthaltenen Quarks zurückführen lässt [6]. Allgemein kann der halbzahlige Proton- oder Neutronspin S folgendermaßen ausgedrückt werden (Ellis-Jaffe-Summenregel [30], [4], [19]):

$$S = \frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + \langle L_z \rangle \quad (2.1)$$

$\Delta\Sigma$ ist der Beitrag der Quark-Spins, also $\Delta d + \Delta s + \Delta u$, $\langle L_z \rangle$ ein möglicher Beitrag des Bahndrehimpulses von Gluonen und Quarks und ΔG der der Gluonen. Der letztere wird einer Relativmessung $\Delta G/G$ mit dem COMPASS-Spektrometer in Gestalt der longitudinalen Gluon-Polarisation in einem longitudinal polarisierten Nukleon zugänglich sein.

Die Beiträge der einzelnen Quarks Δd , Δs etc., allgemein als Δq_f bezeichnet, bedeuten genauer:

$$\Delta q_f = \int_0^1 ((q_f(x)^{\uparrow\uparrow} + \bar{q}_f(x)^{\uparrow\uparrow}) - (q_f(x)^{\downarrow\uparrow} + \bar{q}_f(x)^{\downarrow\uparrow})) \cdot dx = \int_0^1 \Delta q_f(x) \cdot dx \quad (2.2)$$

Hierbei stehen die Symbole $q_f(x)^{\uparrow\uparrow}$ für die Verteilungsfunktion der Quarks mit Flavour f . Ein waagerechter Strich über dem Symbol bezeichnet das entsprechende Antiquark. Durch gleichgerichtete Pfeile wird ausgedrückt, dass der Quarkspin parallel zu dem des Nukleons steht, in entgegengesetzte Richtungen weisende Pfeile bedeuten entsprechend antiparallelen Spin. Das Zeichen x wird Björken- x genannt – in diesem Zusammenhang genügt es, darunter denjenigen Bruchteil des Impulses des Nukleons zu verstehen, der von dem jeweiligen Quark getragen wird.

Im einfachen Quark-Modell befinden sich die drei Valenzquarks im S-Zustand, sodass $\langle L_z \rangle = 0$ gilt. Der Spin-Summenregel (Gleichung 2.1) wird mit $\Delta\Sigma = 1$ Genüge getan.

Ergebnisse des EMC-Experimentes ($\Delta\Sigma = 0,19 \pm 0,07$ [48]) deuten nun aber darauf hin, dass dieses einfache Bild modifiziert werden muss: Der Beitrag der Valenzquarks zum Nukleonspin ist viel geringer als ehemals angenommen, weswegen die Vorstellung aufkam, dass ein großer Teil etwa des Protonspins von polarisierten Gluonen getragen werden könnte [21].

³European Muon Collaboration, C.E.R.N.-Experiment NA2.

Wie bereits oben erwähnt, kann die Gluon-Verteilung über die Reaktion $\gamma + g \rightarrow c + \bar{c}$, die sogenannte Photon-Gluon-Fusion in ein Charm-Anticharm-Quarkpaar, untersucht werden. Die Signatur dieses Prozesses ist gekennzeichnet durch offene Charm-Produktion. Am häufigsten wird das Paar $D\bar{D}$ erzeugt, wobei D bzw. \bar{D} auch im angeregten Zustand D^* bzw. \bar{D}^* vorkommen. Die so entstandenen D-Mesonen werden über ihre Zerfälle nachgewiesen, etwa $D^0 \rightarrow K\pi$ und $D^* \rightarrow D^0\pi_s \rightarrow K\pi\pi_s$.

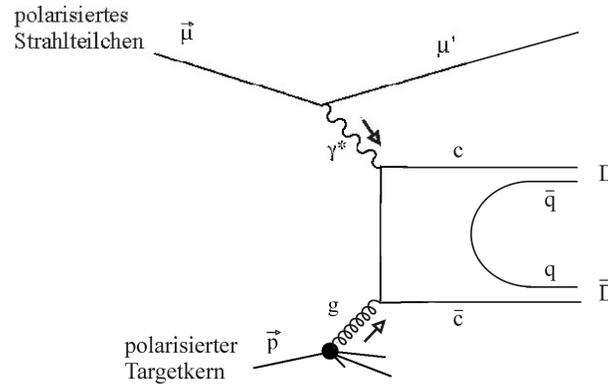


Abbildung 2.2: Photon-Gluon-Fusion: Erzeugung eines Quark-Antiquark-Paares ($c\bar{c}$) und anschließende Hadronisierung in ein Mesonenpaar $D\bar{D}$.

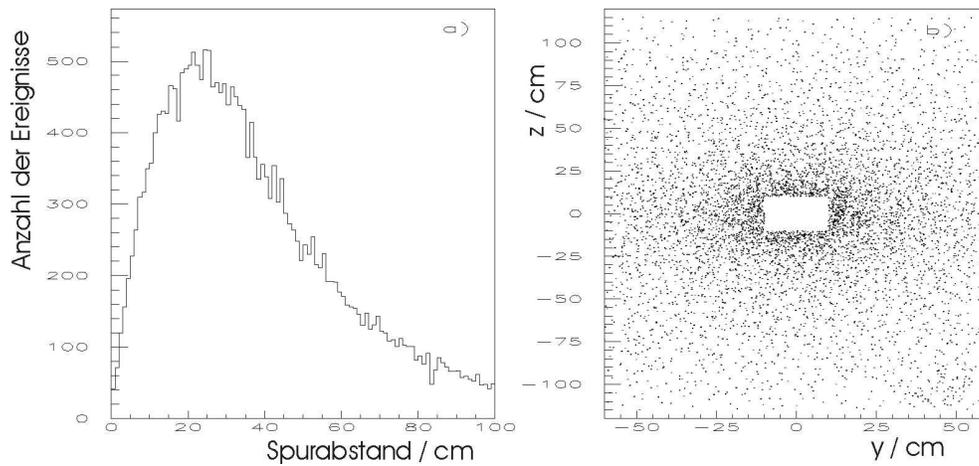


Abbildung 2.3: Simulierte Ereignisse mit einem D^0 -Meson bei einem Strahlteilchenimpuls von $100 \text{ GeV}/c$ [2]:

- Entfernungsverteilung der nächsten Nachbarspuren
- Räumliche Verteilung der Teilchenspuren über den zentralen Bereich der Stroh-kammerfläche.

Kapitel 3

Das COMPASS-Spektrometer

Um im Intervall von wenigen 100 MeV/c bis 150 GeV/c ausreichende Impulsauflösung zu bieten, wurde der COMPASS-Aufbau als zweistufiges magnetisches Spektrometer konzipiert, wobei beide Stufen im Endausbau sowohl hadronische als auch elektromagnetische Kalorimeter erhalten werden. Weiterhin sind in beiden Stufen Detektoren zur Teilchenidentifikation vorgesehen. Zu Beginn des Experimentierprogrammes werden allerdings das elektromagnetische Kalorimeter der ersten sowie der Ring-Imaging-Tscherenkow-Zähler (RICH) der zweiten Stufe noch nicht zur Verfügung stehen.

Zu Beginn der Datennahme sollen darüber hinaus im ersten Spektrometerabschnitt folgende großflächige Spurverfolgungssysteme Verwendung finden:

Flache Driftkammern zwischen dem Target und dem ersten Spektrometermagneten, Stroh-Driftkammern und eine weitere planare Driftkammer zwischen dem Magneten und dem RICH. Dahinter wird die Spurverfolgung voraussichtlich von ebensolchen Stroh- und - weiter strahlabwärts - von Vieldrahtproportionalkammern geleistet werden.

Diese Systeme können sowohl zur Verwirklichung des Hadron-, als auch des Myonprogrammes eingesetzt werden.

Die Verfolgung von unter kleinen Winkeln einfallenden, also strahlnahen Spuren basiert in beiden Physik-Programmen auf Gas-Elektronen-Vervielfachern. Zusätzlich werden Silizium-Mikrostreifendetektoren vor und hinter dem Target im Hadronenprogramm und sogenannte „Micromegas“ (siehe unten) im Myonenprogramm eingesetzt. Eine weitere Siliziumzählerstation wird unmittelbar hinter dem ersten Spektrometermagneten eingesetzt werden.

Spuren, die vom kleinflächigen Spurverfolgungssystem erfasst werden sollen, durchsetzen im Bereich dieses Systems im Mittel eine um den Strahl zentrierte Fläche der Größe $25 \times 25 \text{ cm}^2$.

Zum kleinflächigen Spurverfolgungssystem gehört auch die Strahldefinition mit schnellen szintillierenden Fasern zur Gewinnung von Zeit- und Triggerinformationen.

Der detaillierten Beschreibung der einzelnen Spektrometerkomponenten sei

eine schematische Gesamtansicht des endgültigen Aufbaues, wie er für das Myonenprogramm vorgesehen ist, vorangestellt:

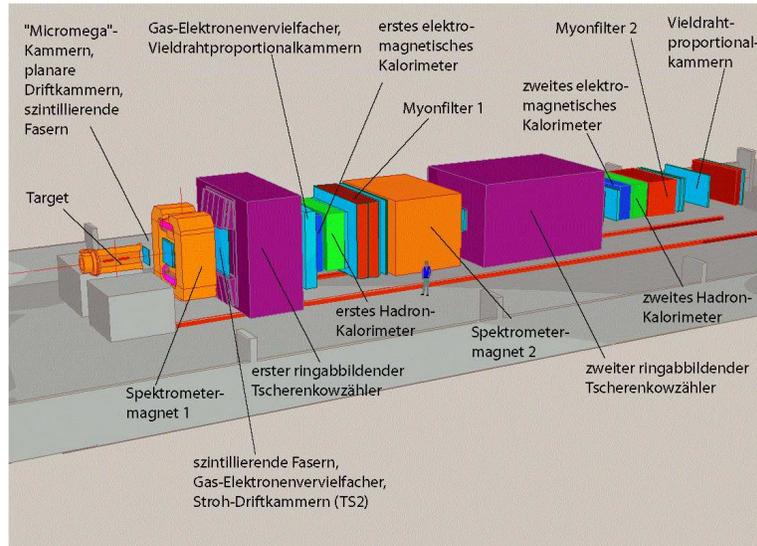


Abbildung 3.1: Der geplante Endausbau des COMPASS-Spektrometers für Experimente mit dem Myonstrahl.

3.1 Target und targetbezogene Systeme für das Hadronstrahl-Programm

Nachdem zur Verwirklichung des Experimentierprogrammes am Hadronstrahl mehrere verschiedene Strahlarten notwendig sind, müssen die targetnahen Detektorsysteme den jeweils zu bewältigenden Aufgaben angepasst werden:

Der negative Hadronstrahl zur Untersuchung der Primakoffstreuung besteht hauptsächlich aus Pionen, enthält aber auch Kaonen und Antiprotonen. Die Untersuchung von Zentralproduktionsreaktionen erfordert einen Hadronstrahl höchstmöglicher Energie. Um in diesen Fällen eine Identifikation der jeweils zur Reaktion kommenden Strahlteilchen zu ermöglichen, werden spezielle Tscherenkow-Zähler, sogenannte CEDARs¹, eingesetzt.

Das Target für das Charm-Programm ist eine dünne Kupferplatte, in deren unmittelbarer Nähe strahlabwärts Trigger-Szintillatoren und Silizium-Mikrostreifendetektoren zur Rekonstruktion von Ereignissen mit Charm angebracht werden.

Das Programm zur zentralen Produktion wird ein Flüssigwasserstofftarget mit Protonen-Rückstoßdetektor benötigen, wohingegen Primakoff-Messungen ein Target aus Material mit hoher Kernladungszahl, etwa Blei, erfordert. Um hierbei

¹CErenkov Differential counters with Achromatic Ring focus [10]

die Winkel des einfallenden und des gestreuten Pions mit ausreichender Genauigkeit und unter hohen Teilchenflüssen bestimmen zu können, wird es Silizium-Mikrostreifenzähler mit einer Ortsauflösung der Größenordnung $10\ \mu\text{m}$ unmittelbar strahlauf- und -abwärts erhalten.

3.2 Target und targetbezogene Systeme für das Myonenstrahl-Programm

Die COMPASS-Kollaboration benötigt zur Realisierung des Experimentierprogrammes mit Myonen eine Strahlintensität von $2 \cdot 10^8$ Myonen je Spill im Energiebereich von 90 bis 200 GeV, bei möglichst hoher longitudinaler Polarisaton. Die Information über den Strahlmyonenimpuls wird von der sogenannten Strahlimpulsstation („Beam Momentum Station - BMS“) generiert, die aus vier Szintillator-Hodoskopen besteht, für die in der Strahlmitte eine Teilchenrate von $15\ \text{MHz}/\text{cm}^2$ erwartet wird.

Um eine eindeutige Beziehung zwischen dem Strahlmyon und einem eventuell gestreuten Myon herzustellen, muss eine Zeitauflösung von besser als 1 ns erreicht werden, weswegen szintillierende Fasern von 0,5 mm Durchmesser gewählt wurden, nicht zuletzt auch wegen der guten Ortsauflösung².

Das polarisierte Target konnte von dem abgebauten SMC-Experiment übernommen werden [28], mithin besteht es aus zwei Targetzellen von je 60 cm Länge, welche entgegengesetzt polarisiert werden können. Die Polarisation wird durch einen supraleitenden Magneten erreicht werden, der wegen der geplanten Apertur von $\pm 180\ \text{mrad}$ einen Innendurchmesser von etwa 60 cm haben muss³.

Der Targetmagnet muss sowohl ein Solenoidfeld von 2,5 T als auch ein Dipolfeld von 0,5 T erzeugen können, um eine Polarisation des Targets sowohl longitudinal als auch transversal zur Strahlrichtung zu ermöglichen. Des weiteren dient das Dipolfeld dazu, die Polarisation während der Feldrotation zu halten. Beim SMC-Experiment gelang es auf diese Weise, den Verlust an Polarisation dabei auf 0,3 % zu beschränken [28]. Für das Protonentarget aus NH_3 wird eine Polarisation von 85 %, für das Deuterontarget aus ${}^6\text{LiD}$ eine solche von 50 % erwartet⁴. Die erforderliche Temperatur von etwa 0,1 K erreicht man mit einem ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ -Entmischungskryostaten, der kontinuierlich eine Wärmeleistung von 1 W abführen kann.

²Aufgrund dieser Eigenschaften wurden die Szintillatorfaserdetektoren auch als Spurverfolgungssystem zum Test der ersten Stroh-Doppelebene eingesetzt. Näheres hierzu im Abschnitt 10.1.1.

³In der Anfangsphase des Experiments findet mangels Verfügbarkeit des für den Aufbau vorgesehenen Magneten vorübergehend der Targetmagnet des SMC-Experimentes Verwendung, was die Apertur von $\pm 180\ \text{mrad}$ (geplant) auf $\pm 65\ \text{mrad}$ einschränkt.

⁴Die zum jetzigen Zeitpunkt (Juli 2002) bereits erreichte Polarisation des ${}^6\text{LiD}$ -Targets beträgt +58 % und -48 % [42].

Abbildung 3.2 zeigt einen Schnitt durch das polarisierte Target mit den beiden entgegengesetzt polarisierten Zellen.

Polarisierung und Messung der Polarisation

Die Polarisierung des Targetmaterials erfolgt über die so genannte dynamische Kernpolarisation („Dynamic Nuclear Polarization“ - DNP): Ein dem Targetmaterial beigemischter paramagnetischer Bestandteil stellt freie Elektronen zur Verfügung, die im thermodynamischen Gleichgewicht bei einer Temperatur von 1 K und einem Magnetfeld von 2,5 T nach dem Curieschen Gesetz nahezu vollständig polarisiert sind:

$$P = \tanh\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right) \quad (3.1)$$

Hierbei bedeuten k_B die Boltzmannsche Konstante, B die Magnetfeldstärke und μ das magnetischen Moment des Teilchens.

Wegen ihres um einen Faktor von etwa 1800 geringeren magnetischen Moments liegt die Polarisation der Nukleonen unter diesen Bedingungen nur bei etwa 1 %.

Über die Spin-Spin-Wechselwirkung können die Elektronen jedoch ihre Polarisation auf die Nukleonen übertragen, wenn gebundene Elektron-Nukleon-Paare durch die Einstrahlung von Mikrowellen in der Nähe der Larmor-Frequenz⁵ dazu angeregt werden. Da aber die Relaxationszeit der polarisierten Elektronen kürzer ist als die der polarisierten Nukleonen, findet der Spinflip der Elektronen im Mittel früher statt als der der Nukleonen, weswegen sie ihre Spinausrichtung erneut auf andere Nukleonen übertragen können.

Die Übergänge zwischen den Energieniveaus der Spinzustände $|S_e S_p\rangle$ von Elektron (S_e) und Proton (S_p) sind in Abbildung 3.3 dargestellt. In energetisch absteigender Richtung wären sie in folgender Reihenfolge anzuordnen: $|++\rangle$, $|+-\rangle$, $|-\rangle$ und $|--\rangle$. „+“ und „-“ stehen hier für eine Spinausrichtung antiparallel und parallel zum Magnetfeld.

Eine Dipol-Wechselwirkung [1] zwischen Protonen und freien Elektronen führt zu einer Mischung dieser vier Zustände. Selbst kleine Beimischungen (hier gilt: $|q| \ll 1$) ermöglichen die eigentlich verbotenen Übergänge etwa zwischen |c) (der sich näherungsweise mit dem Zustand $|-\rangle$ identifizieren lässt) und |b) (näherungsweise: $|+-\rangle$).

Zur Messung der zu einem gegebenen Zeitpunkt erreichten Polarisation bedient man sich des Phänomens der kernmagnetischen Resonanz, führt also eine Messung der magnetischen Suszeptibilität, die sich als Funktion der Polarisation ändert, aus. Praktisch überlagert man dem statischen Magnetfeld eine

⁵Die Larmor-Frequenz ω_e liegt bei 2,5 T bei etwa $2\pi \cdot 70$ GHz. Die beiden Polarisationsrichtungen lassen sich einstellen, indem man Mikrowellen einstrahlt, deren Frequenz sich um etwa ± 10 MHz von der Larmor-Frequenz unterscheidet.

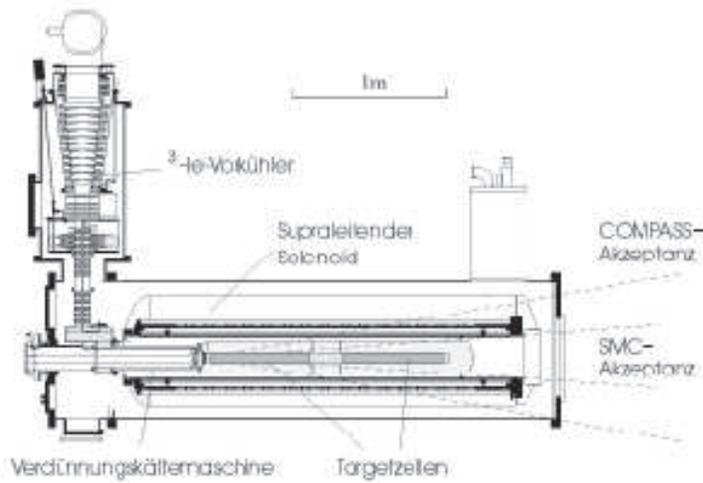


Abbildung 3.2: Schnitt durch das polarisierte Target. Die beiden Zellen werden entgegengesetzt polarisiert. Weiterhin sind die Aperturen der beiden Targetmagneten eingezeichnet. Der SMC-Magnet wird unter Inkaufnahme von Raumwinkel-Akzeptanzverlust bis zur Lieferung des COMPASS-Magneten eingesetzt [45].

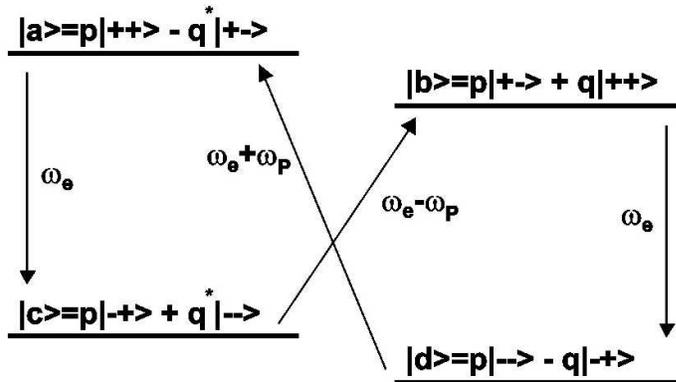


Abbildung 3.3: Energieniveaus im polarisierten Target: Die vier Mischzustände und ihre Energieaufspaltung im Magnetfeld. Durch Einstrahlung von Mikrowellen werden die Übergänge $|d\rangle \rightarrow |a\rangle$ und $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$ induziert. Es gilt: $p \approx 1$, $|q|^2 \ll 1$. Die Relaxation der angeregten Zustände geschieht über die Übergänge $|a\rangle \rightarrow |c\rangle$ und $|b\rangle \rightarrow |d\rangle$ [45].

Transversalkomponente, die sich mit einer Frequenz im Bereich der Larmorfrequenz ändert. Unter diesen Umständen ändern die Dipole ihre (hinsichtlich der Komponente parallel zum Magnetfeld) diskreten Einstellungen im Magnetfeld und absorbieren oder emittieren Photonen. Ist das System im Mittel polarisiert, so schlägt sich der dann damit verbundene Netto-Energieeintrag, respektive die Netto-Energiefreisetzung, in einer Änderung der Induktivität der das Material umgebenden Spule nieder, welche gemessen werden kann.

3.3 Die Spurverfolgungssysteme

Abgesehen von den in dieser Arbeit an anderer Stelle ausführlich beschriebenen Stroh-Driftkammern wird im COMPASS-Spektrometer eine Vielzahl weiterer ortsauflösender Detektoren verwendet:

In Abhängigkeit von Ratenbelastung und Anforderungen an die Ortsauflösung werden für das Myonenprogramm oben erwähnte Micromega-Zähler verwendet. Im Hadronen- und zum Teil auch im Myonenprogramm werden Siliziumzähler benutzt. Auch Gas-Elektronenvervielfacher werden als ortsauflösende Zähler eingesetzt. Bislang konnte gezeigt werden, dass die Micromega-Zähler eine Ortsauflösung von unter $70\ \mu\text{m}$ erreichen, die Gas-Elektronenvervielfacher (GEMs) eine solche von etwa $50\ \mu\text{m}$ [70].

Wegen der hohen Teilchenflüsse in unmittelbarer Strahlnähe werden dort Hodoskope aus szintillierenden Fasern verschiedener Durchmesser ($0,5$ bis $1,0\ \text{mm}$) verwendet. Sie erreichen eine Nachweiseffizienz von $97\ \%$ und eine Zeitauflösung besser als $400\ \text{ps}$ [70].

Im Großwinkelbereich, also außerhalb einer zur Strahlrichtung senkrecht stehenden Fläche von $25 \times 25\ \text{cm}^2$ im mittleren Bereich der ersten Spektrometerstufe, basiert die Spurverfolgung neben Stroh-Driftkammern auf planaren Driftkammern mit kurzer Driftstrecke - 3 bis $5\ \text{mm}$ - sowie Vieldraht-Proportionalkammern. Tests der planaren Driftkammern mit einer auf Argon und $\text{C}_2\text{H}_6\text{-CF}_4$ basierenden Gasmischung erbrachten Ortsauflösungen von $170\ \mu\text{m}$ und Nachweiseffizienzen von 95 bis $99,8\ \%$ [70]. Der Drahtabstand in den Vieldrahtproportionalkammern beträgt $2\ \text{mm}$, ihre aktive Fläche bis zu $1520 \times 1200\ \text{mm}^2$.

3.4 Der erste ringabbildende Tscherenkow-Zähler

Zur Teilchenidentifikation werden häufig so genannte ringabbildende Tscherenkow-Zähler („Ring Imaging Cherenkov Counters“ - „RICHs“) eingesetzt, da sie die Geschwindigkeit geladener Teilchen unter nur geringem Materieeintrag in den Strahlengang bestimmen können. Das mit dem COMPASS-Spektrometer geplante Experimentierprogramm verlangt etwa nach effizienter Unterscheidung von

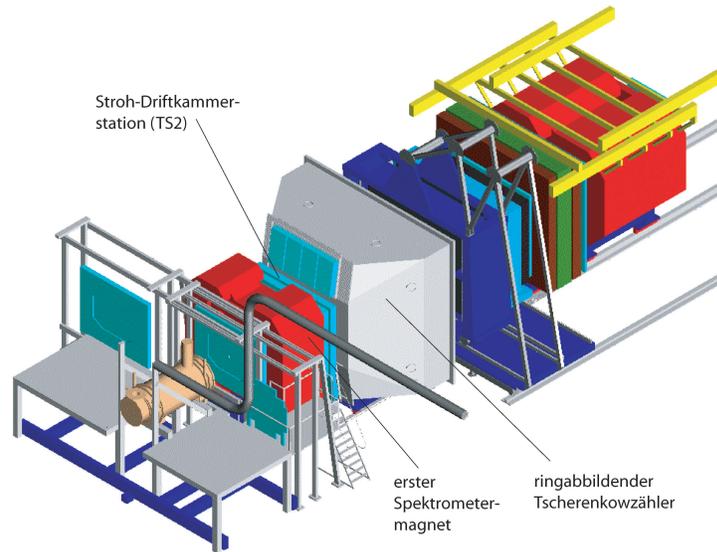


Abbildung 3.4: Der erste Spektrometerabschnitt mit der Position der ersten Stroh-Driftkammerstation (Spurverfolgungsstation 2 - „TS2“).

Kaon- und Pionspuren im Impulsbereich von wenigen GeV/c bis etwa 60 GeV/c, unabhängig von der Lage der Spuren in dem vom Spurverfolgungssystem abgedeckten Raumbereich und der Multiplizität des Ereignisses.

Ein ringabbildender Tscherenkow-Zähler bildet alle Photonen, die unter einem gegebenen Tscherenkow-Winkel von der Teilcentrajektorie ausgehen, auf einem Kreisring ab. Der Radius dieses Kreisringes ist ein eindeutiges Maß für den Tscherenkow-Winkel, also letztlich für das Verhältnis aus Teilchen- und Lichtgeschwindigkeit im Radiatormedium.

Der erste RICH des COMPASS-Spektrometers hat ein 3 m langes Radiatorgefäß, das mit C_4F_{10} -Gas gefüllt ist. Der Brechungsindex dieses Gases von 1,00153 [70] ergibt folgende Schwellenenergien für die Emission von Tscherenkow-Licht: 2,5 GeV für Pionen, 8,9 GeV für Kaonen und 17 GeV für Protonen.

Der Reflektor aus zwei sphärischen Spiegeln ist so gestaltet, dass die Cäsiumiodid-Photokathoden mit anschließendem Elektronennachweis in Vieldrahtkammern außerhalb des Akzeptanzbereiches des Zählers positioniert werden können. Eine Pixelgröße von $8 \times 8 \text{ mm}^2$ bei 80 000 Kanälen erlaubt es, die oben genannten Hadronen in einem Energiebereich von 3 bis 55 GeV sicher zu trennen [45].

3.5 Die Kalorimeter

Zur Rekonstruktion von Endzuständen, welche einzelne Photonen und Photonen von Hadronenzerfällen umfassen, muss für ausreichende Photon-Nachweiseffizienz gesorgt werden. Im mit COMPASS geplanten Programm reichen die Photonen-

energien von einigen 10 MeV bis zu 100 GeV. Zur Bestimmung der Photonenimpulse und zur eindeutigen Zwei-Photonen-Separation bei hohen Multiplizitäten wird ein schnelles, zellulär aufgebautes, elektromagnetisches Bleiglas-Kalorimeter verwendet, welches mit Photokathoden-Sekundärelektronenvervielfachern ausgelesen wird.

Ein Hadronkalorimeter weist in der ersten Spektrometerstufe Neutronen aus den Zerfällen von Baryonen mit Charm nach. Der Trigger auf diese Zerfälle soll sich auf Informationen aus diesem Kalorimeter stützen. Wegen der relativ geringen Energie der nachzuweisenden Teilchen wurde größerer Wert auf die Ortsdenn auf die Energieauflösung des Hadronkalorimeters gelegt. Man erreicht dies mit Mehrfachlagen aus Eisen und Szintillatormaterial. Im zweiten Hadronkalorimeter wird Blei statt des Eisens zum Einsatz kommen, was der Energieauflösung zugute kommt. Zur Auslese werden in die Szintillatorplatten Fasern aus Wellenlängenschieber-Material eingebracht, bzw. Platten aus diesem Material verwendet. Der Wellenlängenschieber ist ein Farbstoff, der das vom Szintillator vornehmlich im blauen Spektralbereich emittierte Licht absorbiert und im grünen Spektralbereich reemittiert. Die Emission erfolgt isotrop, weswegen das Theorem von Liouville nicht beachtet zu werden braucht, das den Lichtverlust im Verhältnis der Flächen an Eintritts- und Ausleseseite beschreibt. Es ist so also möglich, einen größeren Teil des Lichtes im Wellenlängenschieber über Totalreflexion zum Photokathoden-Sekundärelektronenvervielfacher zu leiten, als wenn das ursprünglich vom Szintillator erzeugte Licht gesammelt werden würde.

3.6 Die Myonfilter

Sowohl im Hadronen-, als auch im Myonenprogramm ist entscheidend, Myonen aus semileptonischen Zerfällen identifizieren zu können. Dazu macht man sich die stark unterschiedlichen Reichweiten von Myonen und Hadronen in Materie zu Nutze, indem sogenannte „Myonwände“ hinter den Hadronkalorimetern einer jeden Spektrometerstufe platziert werden.

In der ersten Stufe durchsetzen die Teilchen (Hadronen oder Myonen) 1 m Eisen, bevor die darin nicht zur Reaktion gekommenen Myonen von - wegen der hohen Raten - im Proportionalbereich betriebenen Kunststoff-Iarocci-Röhren („Planar Iarocci Tubes“ - PITs) nachgewiesen werden.

Auch die für die zweite Spektrometerstufe vorgesehene Myonwand besteht aus Eisen, hier werden die Myonen erneut hinter zwei Wänden von je einem Meter Ausdehnung in Strahlrichtung von Edelstahl-Driftrohren nachgewiesen, die aus dem oben genannten Grund ebenfalls im Proportionalbereich arbeiten.

3.7 Die Trigger

Um Ereignisse aus dem für die $\Delta G/G$ -Messung (vgl. Abschnitt 2.2) erforderlichen kinematischen Bereich rasch identifizieren zu können, bedient man sich im Experimentierprogramm mit dem Myonstrahl der Bestimmung des Energieverlustes des gestreuten Myons. Zwei Szintillatorzähler-Hodoskop-Paare im Abstand von 35 und 50 m vom Target messen den Streuwinkel als Funktion des Gesamtimpulses, wobei eine festverdrahtete Koinzidenzschaltung die Information schnell zur Verfügung stellt.

Ein ähnlich einfacher Trigger wird zur Untersuchung der Primakoff-Reaktionen eingesetzt, die eine Messung der elektromagnetischen Polarisierbarkeit und chiraler Anomalien zum Ziel haben: Hier wird eine Schwelle auf die Energiedeposition im zweiten elektromagnetischen Kalorimeter gesetzt und eine Koinzidenz mit dem Nachweis geladener Teilchen im entsprechenden Raumwinkelbereich gefordert.

3.8 Ausleseelektronik und Datennahme

Die mit modernen Experimenten mit feststehenden Targets erreichten Flüsse gestreuter Teilchen bedingen eine hohe Ereignisrate und erhebliche Größe des einer Reaktion jeweils zugeordneten Datensatzes - salopp oft als „Event“ bezeichnet. Um diesen Erfordernissen Rechnung zu tragen und darüber hinaus elektronische Komponenten vielseitig einsetzen zu können, wurden TDC- und ADC-Schaltkreise entwickelt - beispielhaft sei hier der F1-Chip genannt -, die die Datenauslese an verschiedenen Detektorsystemen bewältigen und vor allem mit möglichst geringer Totzeit behaftet sind. Der erwähnte TDC-Baustein F1 ist in der Lage, die von ihm gemessene Zeit vollkommen totzeitfrei zu digitalisieren⁶ [33]. Er wird auch zur Messung der Driftzeit in den Stroh-Driftkammern eingesetzt.

Das Ausleesesystem selbst basiert auf sogenannten CATCHes (Compass Data Accumulation, Transfer and Control Hardware - COMPASS-Baugruppen für Datensammlung, Übertragung und Steuerung), nach dem VME-Standard arbeitenden Modulen, die aus den von den Detektoren gelieferten Daten sogenannte Sub-Events (Unterereignisse) bilden. Umgekehrt wird die Initialisierung - etwa das Setzen von Triggerschwellen - der an den Detektoren eingesetzten Elektronik ebenfalls über eine standardisierte Schnittstelle vorgenommen.

Diese und andere Detektoreigenschaften werden über das „COMPASS DCS“ (COMPASS-Detektor-Kontrollsystem) eingestellt, es vereint die üblicherweise als

⁶Zum Zeitpunkt des Eintreffens des Stoppsignals wird ein Bild der Registerinhalte erstellt, die Register selbst bleiben aber aufnahmefähig. Die Digitalisierung der gemessenen Zeit kann dann vergleichsweise langsam erfolgen. Lediglich das Register, das den Stoppeintrag enthält, wird aktiv für 20 ns gesperrt, damit eventuell durch die Elektronik hervorgerufene Nachpulse nicht als Signale registriert werden.

Slow Control (langsame Steuereinrichtungen) bezeichneten Systeme zur Steuerung und Auslese der Zählerelektronik, soweit sie nicht die physikalische Datennahme selbst betreffen. Nachdem eine Triggerrate von 10^5 Hz und eine Rate zu speichernder Ereignisse von 10^4 Hz erwartet werden, ergibt sich mit der typischen Ereignis-Datensatzgröße von 30 kB ein Datenvolumen von etwa 300 TB/a. COMPASS setzt zentrale Datenaufnahme („CDR“ - „Central Data Recording“) ein, weswegen die Daten ohne längerfristige Zwischenspeicherung über eine Glasfaserleitung unmittelbar an das Rechenzentrum gesandt werden. Dort werden sie von zehn Servern empfangen und aufgezeichnet. Abbildung 3.5 zeigt eine schematische Darstellung des Zusammenwirkens der Systeme. Für die DST- und μ DST-Produktion („Data Summary Tape“ bzw. Mikro-DST, also (Mikro-)Summen-Datenband) laufen bis zu 200 parallele Analysevorgänge auf dem zentralen Computerverbund des C.E.R.N.⁷.

⁷Im Einzelnen speichern die Daten-Server die Daten auf ihren lokalen Festplatten, konvertieren sie in das „Objectivity“-Datenbankformat und verbinden Datensätze. Anschließend werden diese Datensätze von den unter dem Betriebssystem Linux laufenden Personalcomputern gelesen, die eine vorläufige Analyse und Spurrekonstruktion vornehmen. Sodann werden die Daten auf Magnetbänder geschrieben, welche vom zentralen Magnetbanddienst des C.E.R.N. verwahrt werden.

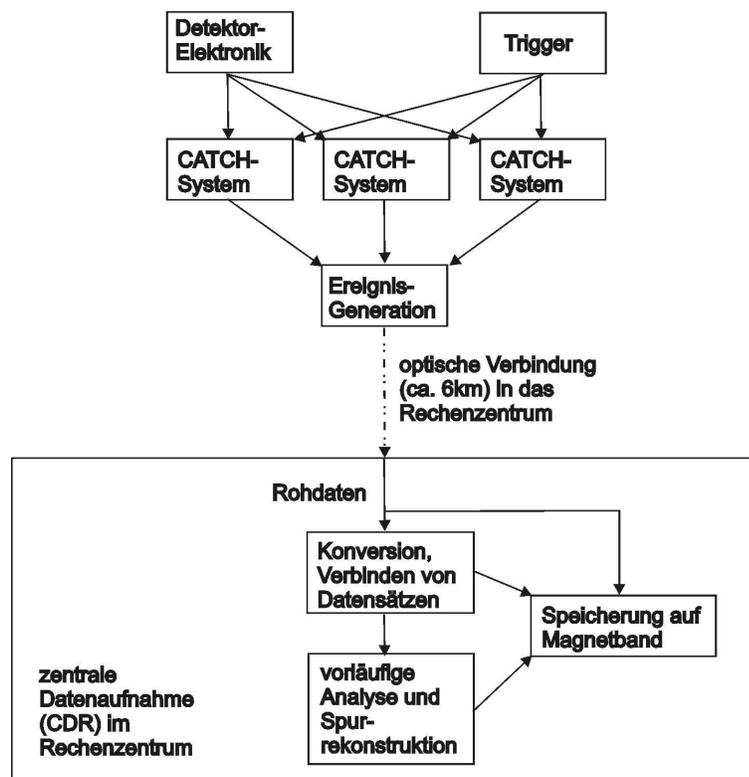


Abbildung 3.5: Schema der Datennahme und zentralen Speicherung.

Kapitel 4

Driftrohr-Detektoren

4.1 Gasdetektoren

Kaum ein zeitgenössisches Experiment im Bereich der Teilchenphysik kommt ohne den Einsatz von Gasdetektoren aus, die einen großen Raumbereich bei nur geringem Materieeintrag abdecken können. Sie finden in erster Linie als ortsauflösende Zähler Verwendung, können aber auch energiesensitiv gestaltet werden und so zur Teilchenidentifikation benutzt werden.

4.1.1 Prinzipielle Funktionsweise von Driftkammern und Driftrohren

Das grundlegende Funktionsprinzip beruht auf der Ionisation des Zählgases durch die nachzuweisende Strahlung:

Ein geladenes Teilchen, das das sensitive Kammervolumen durchsetzt, tritt mit ausreichender Wahrscheinlichkeit mit dem Zählgas in Wechselwirkung, es kommt zur so genannten Primäriionisation [54], der Erzeugung von Elektron-Ionen-Paaren entlang der Trajektorie. In Argon, dem Hauptbestandteil des COMPASS-Strohdetektor-Gases, sind für minimalionisierende Teilchen unter Normalbedingungen im Mittel 30 Ionisationen je cm Weglänge zu erwarten [15]. Ein Teil der freigesetzten Elektronen kann wegen seiner ausreichenden Energie weitere Gasatome bzw. Moleküle ionisieren, in Argon entstehen so etwa 90 Elektron-Ion-Paare je cm Teilchentrajektorie im Gas. Mithin wird das Kammergas nicht gleichmäßig entlang der Spur ionisiert, vielmehr finden sich mehrere, im zitierten Beispiel im Mittel 3, Ionisationen in einem eng begrenzten Raumbereich, einem so genannten „Cluster“. Die mit diesen Phänomenen zusammenhängenden Eigenschaften einiger Gase sind in Tabelle 4.1. zusammengefasst.

Beachtenswert ist noch der Prozess der Freisetzung so genannter Delta-Elektronen, die ausreichend energiereich sind, um sich signifikant vom Ort der Primäriionisation zu entfernen, meist in einer Raumrichtung orthogonal zur Trajektorie

Tabelle 4.1: Ionisierungs- und damit zusammenhängende Eigenschaften einiger Gase [62] mit:

Z: Summe der Kernladungszahlen

A: Atom- bzw. Molekülmasse in atomaren Masseneinheiten

ρ : Gasdichte

E_{ex} : Anregungsenergie

E_i : Ionisationsenergie

$I_0 = I/Z$, I bezeichnet das effektive Ionisationspotenzial des Gases

W_i : mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron-Ion-Paares

n_p : Anzahl der primär erzeugten Elektron-Ion-Paare je Weglänge

n_t : Gesamtzahl der erzeugten Elektron-Ion-Paare je Weglänge.

Gas	Z	A	$\frac{\rho}{\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}}$	$\frac{E_{ex}}{\text{eV}}$	$\frac{E_i}{\text{eV}}$	$\frac{I_0}{\text{eV}}$	$\frac{W_i}{\text{eV}}$	$\frac{n_p}{\text{cm}^{-1}}$	$\frac{n_t}{\text{cm}^{-1}}$
H ₂	2	2	$8,38 \cdot 10^{-5}$	10,8	15,9	15,4	37	5,2	9,2
He	2	4	$1,66 \cdot 10^{-4}$	19-8	24,5	24,6	41	5,9	5,7
N ₂	14	28	$1,17 \cdot 10^{-3}$	8,1	16,7	15,5	35	(10)	56
O ₂	16	32	$1,33 \cdot 10^{-3}$	7,9	12,8	12,2	31	22	73
Ne	10	20,2	$8,39 \cdot 10^{-4}$	16,6	21,5	21,6	36	12	39
Ar	18	39,9	$1,66 \cdot 10^{-3}$	11,6	17,7	15,8	26	29,4	94
Kr	36	83,8	$3,49 \cdot 10^{-3}$	10,0	13,9	14,0	24	(22)	192
Xe	54	131,3	$5,49 \cdot 10^{-3}$	8,4	12,1	12,1	22	44	307
CO ₂	22	44	$1,86 \cdot 10^{-3}$	5,2	13,7	13,7	33	(34)	91
CH ₄	10	16	$6,70 \cdot 10^{-4}$		15,2	13,1	28	16	53
C ₄ H ₁₀	34	58	$2,42 \cdot 10^{-3}$		10,6	10,8	23	(46)	193

des nachzuweisenden Teilchens. Diese Delta-Elektronen ionisieren das Zählgas erneut an anderer Stelle und verschlechtern so die Ortsauflösung des Detektors.

Im Falle lediglich ortsauflösender Zähler (denkbar wäre noch eine Messung der Teilchenenergie oder -art über dessen spezifischen Energieverlust im Gas) muss nun der Ort der Primärionisation bestimmt werden. Zwischen einem als Kathode fungierenden Draht, Drahtnetz oder einer leitenden Fläche einerseits und so genannten Anodendrähten andererseits wird dazu ein elektrisches Feld aufrecht erhalten. Es kann für Driftrohre von kreiszylindrischem Querschnitt, also auch für die COMPASS-Stroh-Driftröhrchen, durch die Beziehung

$$E(r) = \frac{C \cdot V_0}{2\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \quad (4.1)$$

beschrieben werden, wobei C die Kapazität des Zählers pro Länge bedeutet, V_0 die Potentialdifferenz zwischen Anodenfläche und Kathodendraht, ϵ die Permittivitätszahl des Dielektrikums (also des Zählgases), ϵ_0 die elektrische Feldkonstante und r den Abstand zum Draht.

Driftgeschwindigkeit

Die im Gas freigesetzten Elektronen und Ionen erfahren nun durch das elektrische Feld eine Beschleunigung und driften entlang der elektrischen Feldlinien¹ zur Anode bzw. Kathode. Durch Kollisionen mit Gasatomen und -molekülen geben sie kinetische Energie auch wieder ab, weswegen sich eine feldabhängig konstante so genannte Driftgeschwindigkeit einstellt. Es gibt Gasmischungen, in denen diese Driftgeschwindigkeit sogar in bestimmten Grenzen feldunabhängig ist, weswegen diese Mischungen gemeinhin als „linear“ bezeichnet werden.

Aufgrund quantenmechanischer Prozesse bei der Streuung von Elektronen an Gas-Molekeln [58] hat der Streu-Wirkungsquerschnitt für jedes Gas bei einer bestimmten Elektronenenergie ein Minimum, weswegen der durch Stöße bedingte Energieverlust von Elektronen dieser Energie besonders gering ist. Umgekehrt hat die mittlere Driftgeschwindigkeit der Elektronen dort ein Maximum, das so genannte Ramsauer-Maximum der Driftgeschwindigkeit. Ändern sich Zusammensetzung und Druck des Zählgases räumlich und zeitlich nicht, so kann die Driftgeschwindigkeit durch geeignete Wahl des elektrischen Feldes in weiten Bereichen des Driftkammervolumens in der Nähe dieses Maximums gehalten werden, was zu näherungsweise konstanter Driftgeschwindigkeit entlang der Driftstrecke führt.

Hauptsächlich wird die Wahl des Zählgases von der mittleren freien Weglänge und damit der Geschwindigkeit von Elektronen und Ionen beeinflusst.

Gleichung 4.1 macht bereits deutlich, dass der Betrag der Feldstärke im sensitiven Volumen des Zählers zum Draht hin zunimmt. Mit Drähten von geringem

¹Magnetfelder stören die Funktion von Driftkammern in dieser Hinsicht erheblich, ihr Einfluss muss gesondert betrachtet werden.

Durchmesser, $30\ \mu\text{m}$ bei den COMPASS-Stroh-Driftkammern, und, damit verbunden, kleinem Krümmungsradius der Oberfläche lassen sich im unmittelbaren Nahbereich, etwa bis zu Abständen von einigen Drahradien, Feldstärken in der Größenordnung von $2 \cdot 10^5\ \text{V/cm}$ erzeugen.

In Feldern dieser Größenordnung werden den freien Elektronen Energien mitgeteilt, mit denen sie weitere Gasbestandteile zu ionisieren vermögen (vgl. Tabelle 4.1.). Es kommt zur lawinenartigen Vervielfachung der Zahl der freien Elektronen um Faktoren von 10^4 bis 10^5 , sodass die nunmehr zum Anodendraht driftende Ladung ausreicht, mittels eines ladungsempfindlichen (Vor-)Verstärkers nachgewiesen zu werden. Es darf in diesem Zusammenhang noch bemerkt werden, dass der weitaus größte Beitrag zum Entstehen des Ladungssignals, etwa 99,9 %, von den zur Kathodenfläche driftenden Ionen geleistet wird, auch wenn sie erheblich später als die Elektronen an der Kathode ankommen. Von Bedeutung ist die Verschiebung der Ladungen im Kammervolumen. Der kürzeste Abstand zwischen Teilchentrajektorie und Signaldraht wird mit Driftkammern und -rohren über die Zeit, die die Elektronen vom Ort der Primärionisation bis zum Draht brauchen, die so genannte Driftzeit, bestimmt.

Entscheidend dafür ist, dass die Zeitspanne zwischen dem Auftreten der Primärionisation und der Ankunft der Lawine am Draht möglichst genau bestimmt werden kann. Aus der Kenntnis der Beziehung zwischen der Lage des Ortes der Primärionisation und der Driftzeit von dort zum Draht lässt sich ein Raumbereich bestimmen, in dem die Primärionisation stattgefunden, den also die Trajektorie des nachzuweisenden Teilchens durchsetzt hat.

Für Driftrohre mit kreisförmigem Querschnitt wie die COMPASS-Strohdriftkammern wird diese Orts-Driftzeit-Relation besonders einfach, da die Flächen gleicher Driftzeit, die so genannten Isochronen, zylindrische Gestalt haben und sich um den Signaldraht zentrieren.

Zur Messung dieser Driftzeit benötigt man neben einem Chronometer eine Einrichtung, die den Beginn des Zeitlaufs, also etwa das Eintreffen des im Target zur Reaktion kommenden Teilchens, bestimmt, einen so genannten Trigger. Statt des im Grunde naheliegenderen so genannten „Common-Start-Triggers“ wird aus praktischen Gründen in der Regel ein „Common-Stop-Trigger“ verwendet. Das Chronometer („TDC“, s. Abschnitt 10.1.2), beginnt zu laufen, wenn der ladungsempfindliche Vorverstärker am Anodendraht ein Signal registriert, das seine Triggerschwelle überschreitet. Sie endet, wenn der Strahltrigger einen Teilchendurchgang meldet. Auf diese Weise wird die Driftzeit gewissermaßen negativ gezählt, was aber bedeutungslos ist, da es nur auf ihren Betrag ankommt. Weiterhin gehen noch die Flugzeit der nachzuweisenden Teilchen und eine eigens geschaltete Verzögerungszeit ein, die aber für ein gegebenes Ereignis als Konstanten leicht berücksichtigt werden können.

Weitere Einzelheiten hierzu finden sich im Abschnitt 4.2.

Die Gasverstärkung

Die Zunahme der Zahl freier Elektronen N im Zählgas, die den Nachweis der Ladung mittels eines ladungsempfindlichen Vorverstärkers überhaupt erst ermöglicht, ist durch den ersten Townsend-Koeffizienten α gegeben [8]. Dabei steht dN für die Zunahme ihrer Zahl N je Wegstück ds :

$$dN/dS = N \cdot \alpha \quad (4.2)$$

Der Koeffizient α ist durch die Wirkungsquerschnitte der Gasatome bzw. -moleküle für Anregung und Ionisation bestimmt und darüber hinaus wegen der Feldabhängigkeit dieser Parameter seinerseits eine Funktion des elektrischen Feldes. Aus diesem Grunde muss er für jede Gasmischung empirisch bestimmt werden.

Das Verhältnis der Zahlen der am Signaldraht ankommenden Elektronen N zur Zahl der durch Primäriodisation freigesetzten N_0 wird Gasverstärkung $G = \frac{N}{N_0}$ genannt. Nach der Formel von Diethorn [26] hängt sie folgendermaßen von Potentialdifferenz V , Drahradius a , Röhrradius b und Gasdichte ρ ab:

$$\log G = \frac{\log 2}{\log\left(\frac{b}{a}\right)} \frac{V}{\Delta\Phi} \log \frac{V}{\log\left(\frac{b}{a}\right) \cdot a \cdot E_{min}(\rho) \frac{\rho}{\rho_0}} \quad (4.3)$$

$\Delta\Phi$ und E_{min} sind charakteristische Konstanten der jeweiligen Gasmischung (siehe unten), für einige Gase sind sie in Tabelle 4.2 zusammengestellt. ρ_0 bezeichnet die Gasdichte unter Normalbedingungen.

Die Gleichung erhält man, wenn man das Integral

$$G = \frac{N}{N_0} = \exp \int_{E_{min}}^{E_a} \frac{\lambda \cdot \alpha(E)}{2\pi\epsilon_0 E^2} dE \quad (4.4)$$

über das elektrische Feld im Driftrohr (Gleichung 4.1) mit der für schwere Edelgase gültigen Näherung $\alpha \propto E$ ausgewertet [37]. ϵ_0 steht für die elektrische Feldkonstante ($8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ C}/(\text{Vm})$), E_{min} für das elektrische Feld am Beginn des Bereichs, in dem die Lawinenbildung einsetzt, und E_a für das Feld am Draht. λ bezeichnet die elektrische Ladung des Drahtes je Einheitslänge. Die anderen Formelzeichen haben dieselbe Bedeutung wie oben.

Im Grunde genommen funktioniert das Driftkammerprinzip mit beliebigen Gasen. Allerdings ist es in der Praxis wünschenswert, den Zähler unter möglichst geringer Hochspannung zu betreiben, da die Anforderungen an die elektrische Isolierung und die elektrostatischen Kräfte auf die Signal-, Feld- und Potentialdrähte dann geringer sind. Es bieten sich also vor allem Edelgase an. Obwohl sie höhere Ionisierungsenergien als molekulare Gase aufweisen, setzt bei ihnen die Gasverstärkung bereits bei geringeren Feldstärken ein, da keine Rotations- oder Schwingungszustände angeregt werden können. Umgekehrt kann aus ebendiesem Grund mit Edelgasen nur eine Gasverstärkung von etwa 10^4 erreicht werden.

Gasmischung	$\frac{E_{min}(\rho_0)}{\text{kV/cm}}$	$\frac{\Delta\Phi}{\text{V}}$
Ar:CO ₂ =90:10	48 ± 3	23,6 ± 5,4
Ar:CO ₂ =95:5	45 ± 4	21,8 ± 4,4
CH ₄	69 ± 5	36,5 ± 5,0
C ₃ H ₈	100 ± 4	29,5 ± 2,0
He:(CH ₃) ₂ CHCH ₃ =96:4	148 ± 2	27,6 ± 3,0

Tabelle 4.2: Diethorn-Parameter einiger typischer Zählgase [8]. Siehe Gleichungen 4.3 und 4.4; $\Delta\Phi$: mittlere effektive Ionisationsenergie in Einheiten der Elementarladung e , wie sie in Gleichung 4.5 benötigt wird, es gilt also: Effektive Ionisationsenergie = $e \cdot \Phi$. Erklärung der anderen Formelzeichen bei den Gleichungen. Zur Klarstellung: $V(\text{Volt})=[\Phi]$.

Die Rekombination der Gasionen führt nicht immer in den Grundzustand, weswegen es mitunter zur Emission von Photonen von einigen eV kommt, die an den Kammerwänden Photoelektronen freisetzen können, die wiederum zum Auftreten von Nachfolgepulsen oder einer Dauerentladung führen. Beimengungen von Stoffen mit vielen anregbaren Freiheitsgraden, so genannten Löschgasen („Quencher“), etwa Methylal, können diese Photonen absorbieren.

Daneben bestimmen Überlegungen zum so genannten Alterungsphänomen (vgl. Abschnitt 7) die Wahl der Zählgasmischung.

4.1.2 Grenzen der Ortsauflösung von Driftkammern

In diesem Abschnitt soll kurz auf Einflüsse eingegangen werden, die die Ortsauflösung von Driftkammern, insbesondere Driftrohren, verschlechtern, auch wenn sie zum Teil in der vorliegenden Arbeit im Einzelnen nicht mehr diskutiert werden, sondern einer später durchzuführenden Analyse vorbehalten bleiben.

Raumladungseffekte

Sind Driftkammern hohen Teilchenflüssen ausgesetzt (zu den Teilchenflüssen im strahlnächsten Bereich des Myonenhalo, der noch von aktiver Strohkammerfläche abgedeckt wird, vgl. Abschnitt 5), so wirkt sich das von den driftenden Ionen erzeugte elektrische Feld in zweifacher Hinsicht störend auf die Funktion des Zählers aus:

1. Das auf diese Weise verringerte elektrische Feld beeinflusst die Driftzeit der Elektronen.
2. Die Gasverstärkung wird aus demselben Grund geringer, was auch Auswirkungen auf das Ansprechen des Triggers am ladungsempfindlichen Vorverstärker hat (siehe unten).

Der Einfluss von Raumladungseffekten war bei den Experimenten zum Aging-Phänomen (Abschnitt 7) deutlich zu bemerken.

Temperatureinfluss

Unter der Voraussetzung konstanten Druckes (das Gassystem für die COMPASS-Strohkammern kann den Gasdruck auf ± 2 hPa konstant halten, vgl. Abschnitt 12) ist die Gasdichte umgekehrt proportional zur Temperatur, weswegen sich die Gasverstärkung unter Benutzung von Gleichung 4.3 als Funktion der Temperatur folgendermaßen schreiben lässt:

$$\log \frac{G}{G_0} = \frac{\log 2}{\log \frac{b}{a}} \frac{V}{\Delta\Phi} \log \frac{T}{T_0} \quad (4.5)$$

Hierbei steht G_0 für die Gasverstärkung bei der Temperatur T_0 . Riegler [59] gibt für Gasmischungen, die einen der in Aussicht genommenen Mischung für die COMPASS-Strohkammern vergleichbaren Argonanteil haben, eine Änderung der Gasverstärkung um etwa 15 % je 5 K Temperaturdifferenz an.

Einfluss der Triggerschwelle

Wesentliche Bedeutung kommt der weitgehenden Absenkung der Triggerschwelle am ladungsempfindlichen Vorverstärker zu. Je geringer die Amplitude des nachzuweisenden Signals, desto später überschreitet es selbst bei gleicher Anstiegszeit die Triggerschwelle. Da aber die Driftzeit zwischen Start- und Stoppsignal gezählt wird, wirkt sich dieser Effekt unmittelbar als systematischer Fehler der Ortsmessung aus. Es kommt zu ähnlichen Fehlern, wenn die Schwelle des ladungsempfindlichen Vorverstärkers etwa wegen Rauschens nicht ausreichend niedrig gesetzt werden kann.

Abbildung 4.1 illustriert diesen Effekt: Der Trigger wird bei Schwellensetzung S_1 von Signal A und B zu den Zeiten t_A und t_B ausgelöst, eine Auslösung zum Zeitpunkt t_B resp. t_{A2} kann aber auch mit Signal A und Schwellensetzung S_2 erreicht werden.

Grundlinienverschiebung

Bedenkt man, dass die Ladung, die durch Ionisation und Gasverstärkung auf dem Signaldraht deponiert wird, von der Hochspannungsversorgung über den Ladewiderstand wieder zugeführt wird, so ist einsichtig, dass der vom ladungsempfindlichen Vorverstärker gemessene Strom sich über die Zeit gemittelt zu null aufintegrieren muss, weswegen sich das mittlere Potenzial am Signaldraht und somit am Eingang des ladungsempfindlichen Vorverstärkers im Mittel während der Pausen zwischen den Signaleingängen verschiebt. Zusammen mit dem oben dargestellten Einfluss der Triggerschwelle kommt es bei hohen Raten, denn nur in diesem

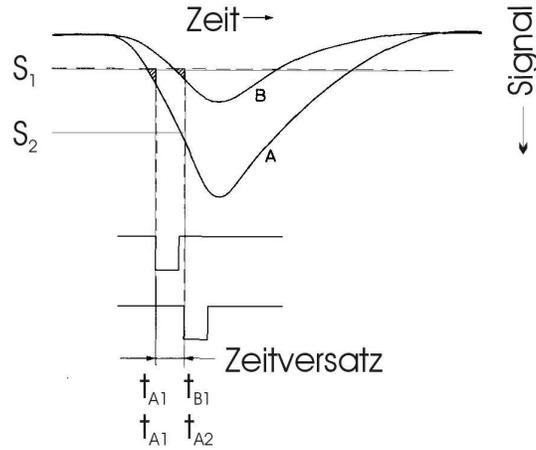


Abbildung 4.1: Systematischer Fehler, bedingt durch den Einfluss der Triggerschwelle. S_1 und S_2 bezeichnen die beiden betrachteten Schwellenwerte. Nach [46], modifiziert.

Fall kommt ein merklicher Effekt zu Stande, zu einer scheinbaren Erhöhung des Signals und somit zu einem früheren Auslösen des Triggers².

Mechanische Drahtschwingungen

Nachdem der Abstand des Ortes der Primärionisation zum Draht gemessen wird, wirken sich mechanische Schwingungen desselben als statistische Fehler aus. Einerseits beeinflusst ein Draht, der sich nicht auf der Röhrenachse befindet, die Orts-Driftzeit-Beziehung, andererseits wirkt sich ein Versatz auch unmittelbar auf die gemessene Driftstrecke aus, da die Zeitmessung mit der Ankunft der Lawine am Ort des Drahtes gestartet bzw. gestoppt wird. Der dadurch bedingte Messfehler ist in diesem Fall gleich dem Betrag des Drahtversatzes, da die Driftzeiten deutlich unter der Periode einer mechanischen Drahtschwingung liegen [59].

Induziert werden diese mechanischen Drahtschwingungen unter anderem durch die unter Bestrahlung vom Signaldraht wegdriftenden Ionen, die - wie der Draht selbst - positiv geladen sind und ihn daher abstoßen. Beschrieben wurde dieses Phänomen von Boyko et al. [11], es wurde bei Versuchen mit der ^{55}Fe -Röntgenquelle auch an den COMPASS-Strohhalnkammern bemerkt.

²Betrachtet man etwa den zeitlich gleichverteilten Eingang rechteckiger Impulse, die beispielsweise eine Okkupanz von 25 % zur Folge haben, so verschiebt sich das Ruhepotenzial am Signaldraht ebenfalls um 25 % der Höhe dieser Pulse, da der so während dieser Zeit (vereinfacht dargestellt) konstant fließende Strom im Mittel einen Ausgleich der mit den Signaleingängen abgeführten Ladung bewirken muss. Aus diesem Grund muss das Integral $\int_t q dt'$ über die fließende Ladung q für lange Zeiten t über die Pulse gleich dem über den über den Signaldraht fließenden Strom sein.

4.2 Driftrohre

Nicht zuletzt aus Gründen der Fertigungsökonomie und Betriebssicherheit wird die Kathode häufig als zylindrische Fläche ausgeführt, die den Anodendraht konzentrisch umschließt.

Weitere Vorteile gegenüber konventionellen Driftkammern sind die geringeren elektrostatischen Kräfte auf die Drähte, die einfache Erzeugung einer vorteilhaften, radialsymmetrischen Feldgeometrie und die Tatsache, dass nach einem Drahttrass nur einen Kanal ausfällt, wohingegen ein gebrochener Draht einer konventionellen Kammer weitere Kanäle kurzschließen kann. Auch unter dem Gesichtspunkt der Detektoralterung haben Zähler mit flächenhaften Kathoden, wozu auch Driftrohre zählen, Vorteile. Siehe hierzu Abschnitt 7.1.1.

Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die räumliche Ausdehnung eines solchen Driftrohres in Richtung der Teilchentrajektorie vernachlässigt werden kann, oder nicht, da das Gas überall entlang der Trajektorie, u. U. also nah und fern vom Signaldraht, ionisiert wird.

Deswegen ist ein Driftrohr nicht a priori ein „ortsauflösender“ Detektor, vielmehr kann es in Verbindung mit einem geeigneten Trigger (siehe Abschnitt 4.1.1) lediglich einen Raumbereich angeben, innerhalb dessen die Teilchentrajektorie ein Volumen durchsetzt, das durch die Projektion einer Isochronenfläche auf eine zur Trajektorienrichtung senkrechte Ebene und die räumliche Ausdehnung des Driftrohres in Trajektorienrichtung gegeben ist. Siehe hierzu die Abbildungen 4.2 und 4.3.

Diese Eigenschaft der Orts-Driftzeit-Beziehung wird deutlicher, wenn man stattdessen den Ausdruck „Volumen-Driftzeit-Relation“ verwendet.

Sie wird mit dem oft zu hörenden Ausdruck „Rechts-Links-Ambiguität“ daher allenfalls unvollständig beschrieben, der impliziert, dass die nachzuweisenden Spuren gerade und orthogonal zu der Ebene verlaufen, in der die Driftrohre angeordnet sind.

Wird ein Driftrohr in einem Magnetfeld eingesetzt, so wird auch die Lage der Isochronenflächen beeinflusst. Ist das Magnetfeld allerdings homogen, so behalten die Isochronenflächen ihre kreiszylindrische Gestalt, auch wenn sie vom Magnetfeld in radialer Richtung verschoben werden, da die Elektronen je nach Lage der magnetischen Feldlinien aufgrund der Lorentz-Kraft unter Umständen nicht mehr radial zum Signaldraht driften.

In realen Spektrometern gelingt es jedoch, die geschilderten Nachteile der Driftrohre durch geeignete Kombination mehrerer Zähler zu überwinden und Nutzen aus den ansonsten hervorragenden Eigenschaften dieser Detektortechnologie zu ziehen, zumal oben genannte Bedingungen oftmals in guter Näherung erfüllt sind und es oft gelingt, auf die aus dem ersten Primärelektron hervorgehenden Lawinenelektronen zu triggern; in diesem Fall kann der Abstand des Ortes der drahtnächsten Primärionisation vom Signaldraht bestimmt werden.

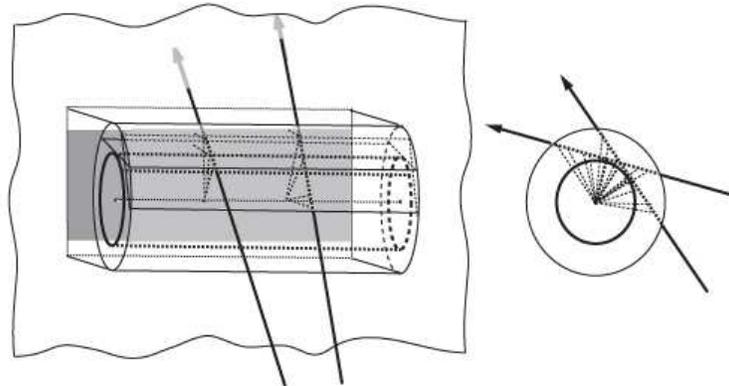


Abbildung 4.2: Ortskoordinatenmessung mit einem einzelnen Driftrohr: Der graue Bereich stellt die Projektion des dick eingezeichneten Zylinders auf diejenige Ebene dar, die den Richtungsvektor der mit dem Driftrohr gemessenen Koordinatenrichtung enthält. Die beiden Teilchentrajektorien sind Tangenten dieses Zylinders. Im Gegensatz zur in Abbildung 4.3 dargestellten Situation seien keine weiteren Punkte auf der Trajektorie oder ihre Richtung bekannt, weswegen sie sich, wie auch alle möglichen anderen die Mantelfläche des Zylinders tangierenden Trajektorien, anhand des vom Zähler gelieferten Signals nicht unterscheiden lassen.

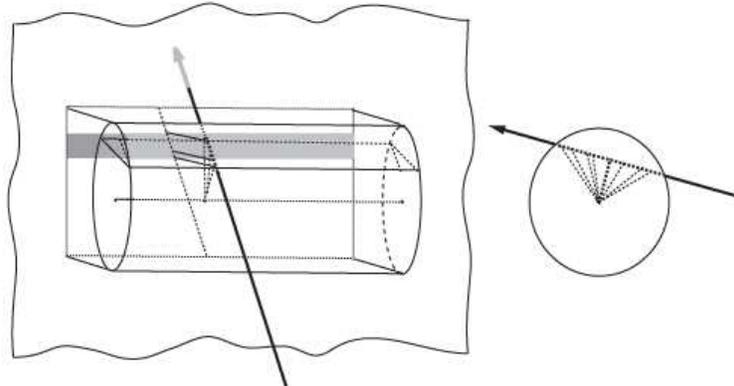


Abbildung 4.3: Ortskoordinatenmessung mit einem einzelnen Driftrohr: Anders als in Abbildung 4.2 sei hier die Trajektorienrichtung aufgrund von mit anderen Detektoren erhaltenen Informationen innerhalb bestimmter Grenzen bekannt. Der graue Bereich gibt die Projektion des von dem nachzuweisenden Teilchen durchsetzten Kammervolumens analog zu Abbildung 4.2 an. Im Idealfall wird der kürzeste Abstand zwischen der Trajektorie und dem Signaldraht gemessen. Er entspricht der im rechten Teil dick gestrichelt gezeichneten Driftstrecke.

Teil II

Die Spurverfolgungsstation 2

Kapitel 5

Anforderungen an das Großwinkel- Spurverfolgungssystem

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an ein Spurverfolgungssystem zwischen dem ersten Spektrometermagneten und dem ersten ringabbildenden Tscherenkow-Zähler dargestellt und motiviert, mit dem sich die Parameter von Teilchentrajektorien in im Hinblick auf das mit dem COMPASS-Spektrometer bislang geplante Experimentierprogramm ausreichender Weise messen lassen.

Wichtige Aspekte sind neben der Ortsauflösung auch die Nachweiseffizienz, das Verhalten unter hohen Teilchenflüssen (etwa $3 \cdot 10^5$ Halo-Myonen je 10^8 Strahlmyonen treffen im Myonenprogramm im Abstand von 10 cm von der Strahlachse auf den zentralen Abschnitt (100 cm) der 6-mm-Strohhalme [39]). Ferner ist der Materieeintrag in das von Teilchenspuren durchsetzte Volumen zu bedenken - selbstverständlich im Hinblick auf seine Minimierung.

5.1 Geometrische Präzision und Ortsauflösung

Von den im Abschnitt 2 dargestellten Fragestellungen, die mit dem am COMPASS-Spektrometer geplanten Experimentierprogramm bearbeitet werden sollen, stellen diejenigen die höchsten Anforderungen an das Großwinkel-Spurverfolgungssystem, zu dem auch die Stroh-Driftkammerstation 2 gehört, bei denen es auf die Bestimmung der D^0 -Masse ankommt:

Für das Quadrat der invarianten Masse des D^0 -Mesons $m_{D^0}^2$ gilt:

$$m_{D^0}^2 = (p_{K^\pm} + p_{\pi^\mp})^2 = m_K^2 + m_\pi^2 + 2 \cdot (E_K \cdot E_\pi - \vec{p}_K \cdot \vec{p}_\pi). \quad (5.1)$$

E_K, E_π, \vec{p}_K und \vec{p}_π stehen für die Energien bzw. Impulse des Kaons und Pions. Somit näherungsweise (für $|\vec{p}| \approx E$):

$$m_{D^0}^2 = m_K^2 + m_\pi^2 + 2 \cdot |\vec{p}_K| \cdot |\vec{p}_\pi| \cdot (1 - \cos \vartheta) \quad (5.2)$$

Um die Masse des D^0 -Mesons bestimmen zu können, müssen vom Spektrometer mithin die Impulse des beim Zerfall entstehenden Kaons und Pions sowie der Winkel ϑ zwischen ihren Spuren gemessen werden.

Simulationsrechnungen [35] zu Folge beträgt der Beitrag der Vielfachstreuung im Target zur Reduktion der D^0 -Massenaufösung im Übrigen bereits $4 \text{ MeV}/c^2$ [35].

Für den Fehler der Massenbestimmung gilt:

$$\Delta(m_{D^0}^2) = 2 \cdot (\Delta m_{D^0}) \cdot m_{D^0} \quad (5.3)$$

$$\Delta(m_{D^0}^2) = \sqrt{\left(\frac{\partial m_{D^0}^2}{\partial p_K}\right)^2 \cdot \Delta p_K^2 + \left(\frac{\partial m_{D^0}^2}{\partial p_\pi}\right)^2 \cdot \Delta p_\pi^2 + \left(\frac{\partial m_{D^0}^2}{\partial \vartheta}\right)^2 \cdot \Delta \vartheta^2} \quad (5.4)$$

Die Auswertung dieses Ausdrucks ergibt:

$$\Delta(m_{D^0}) = \frac{1}{2m_{D^0}} \cdot \quad (5.5)$$

$$\cdot \sqrt{(2p_\pi(1 - \cos \vartheta))^2 \cdot \Delta p_K^2 + (2p_K(1 - \cos \vartheta))^2 \cdot \Delta p_\pi^2 + (2p_\pi p_K \sin \vartheta)^2 \Delta \vartheta^2}$$

Die weiteren Überlegungen beruhen auf den vereinfachenden Annahmen, dass die Messung eines Raumpunktes durch die konventionellen, planaren Driftkammern fehlerfrei ist (angedeutet durch das verschwindende Fehlerkreuz in Abbildung 5.1.), und dass mit dem ersten Stroh-Driftkammermodul genau ein weiterer Raumpunkt gemessen wird. Das inhomogene Streufeld des ersten Spektrometernagnetes, in dem sich die Strohdiftkammerstation befindet, ist eine weitere Quelle systematischer Fehler, die hier vernachlässigt wird. Auf die Auswirkungen dieses Magnetfeldes wird etwa in [44] eingegangen.

Die Häufigkeit, mit der der betrachtete Zerfall $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$ auftritt, liegt bei $(3,80 \pm 0,09) \%$ [21].

Über die Messung des Winkels, um den die Spuren im Feld des ersten Spektrometernagnetes abgelenkt werden, erhält man den Impuls der Teilchen, wobei zur Bestimmung der gekrümmten Spuren weiter angenommen werde, dass alle von einem punktförmigen Target ausgehen und ein weiterer fehlerfrei gemessener Raumpunkt - etwa geliefert von einer planaren Driftkammer - zur Verfügung steht. Der Ablenkwinkel ϵ ist proportional zum Kehrwert derjenigen Komponente des Teilchenimpulses p_\perp , die senkrecht zu den magnetischen Feldlinien steht: $\epsilon \propto \frac{1}{p_\perp}$.

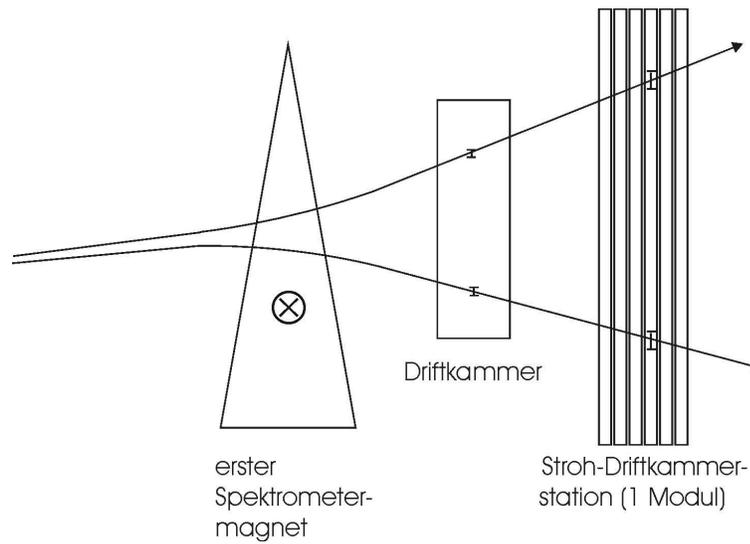


Abbildung 5.1: Zu den Anforderungen an die Ortsauflösung der Strohdriftkammerstation zur Bestimmung der Masse des D^0 -Mesons: Gezeigt sind zwei Spuren aus dem D^0 -Zerfall.

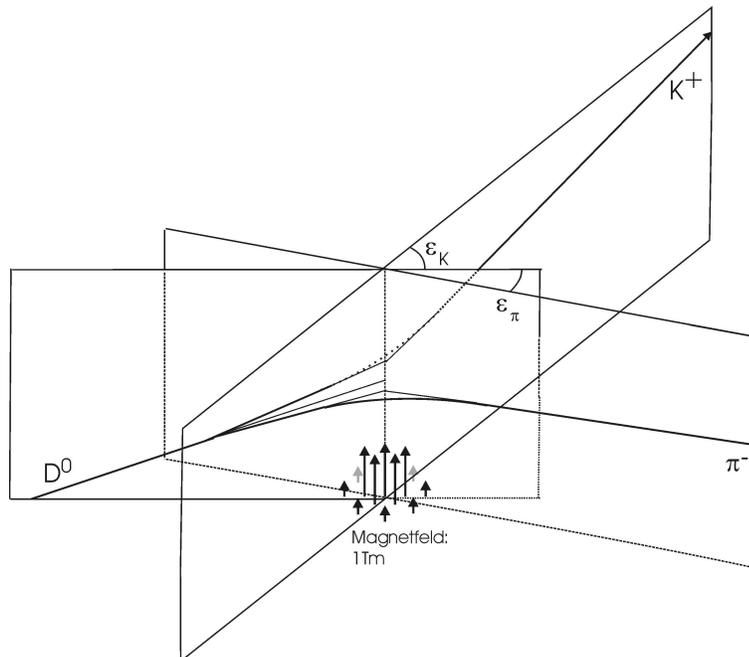


Abbildung 5.2: Räumliche Darstellung des Zerfalls des D^0 -Mesons: Zwei Spuren aus seinem Zerfall in einer vertikalen Ebene, die im Magnetfeld des ersten Spektrometermagneten abgelenkt werden. Das Integral $\int_{\text{Spur}} |\vec{B}(s)| ds$ über das von den Teilchenspuren (Wegelemente $|\vec{s}| = s$) durchsetzte Magnetfeld des Betrages $|\vec{B}(s)|$ beträgt 1 Tm.

5.1.1 Kinematisches Modell des D^0 -Mesonen-Zerfalls

Geht man von Ereignissen aus, für deren Nachweis das COMPASS-Spektrometer konzipiert ist¹, so ergeben sich für den Zerfall von D^0 typische Ejektilteilchenimpulskomponenten p_Z^{Lab} in der Größenordnung von 20 GeV/c in Strahlrichtung, wobei die dazu senkrechte Impulskomponente zunächst vernachlässigt werde. Nimmt man für einen typischen Zerfallswinkel an, dass die Trajektorien der Ejektile mit den Impulsen p^{CM} und Ruhemassen m im Schwerpunktsystem senkrecht zur Strahlrichtung gerichtet sind (Gleichung 34.16, S. 211 in [53]), dass also $p_{\perp}^{CM} = p^{CM}$, so ergibt sich:

$$p_{\perp}^{CM}(K, \pi) = \frac{m_{D^0}}{2} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{(m_{\pi} + m_K)^2}{m_{D^0}^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{(m_{\pi} - m_K)^2}{m_{D^0}^2}\right)} \quad (5.6)$$

Der Index Z steht für die Impulskomponente in Strahlrichtung, das Zeichen „ \perp “ für diejenige senkrecht dazu. Nicht in dieser Weise indizierte Variablen p^{CM} bzw. p^{Lab} bezeichnen den Gesamtimpuls im jeweiligen Bezugssystem.

Unter den oben angegebenen kinematischen Bedingungen ergeben sich mit einer D^0 -Ruhemasse von etwa 1,9 GeV/c² (nach [53]: $(1864,5 \pm 0,5)$ MeV) Schwerpunktsystem-Impulse von etwa 0,8 GeV/c für Pion und Kaon.

Für die Energie im Ruhesystem gilt:

$$E^{CM} = \sqrt{m_0^2 + p^2}. \quad (5.7)$$

Nach Ausführung der Lorentz-Transformation:

$$p_Z^{Lab} = \gamma \cdot p_Z^{CM} + \eta \cdot E^{CM} \quad (5.8)$$

bzw.

$$p_{\perp}^{Lab} = p_{\perp}^{CM} \quad (5.9)$$

$$\left(\text{mit } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E^{Lab}}{m_D}, \beta = \frac{v}{c} \text{ und } \eta = \beta \cdot \gamma = \frac{p^{Lab}}{m_D}\right).$$

Mit $\eta = \frac{20 \text{ GeV}/c}{1,9 \text{ GeV}/c^2} \approx \gamma \approx 10$ erhält man die Impulse im Laborsystem zu

$$p_{\pi}^{Lab} = 8,75 \text{ GeV}/c \quad \text{und} \quad p_K^{Lab} = 9,96 \text{ GeV}/c.$$

Für die weiteren Betrachtungen ist entscheidend, dass der Zerfall des D^0 -Mesons in einer vertikalen Ebene erfolgt, denn nur dann sind Winkel- und Impulsmessung linear unabhängig. Das liegt daran, dass der Zerfallswinkel ausschließlich durch die vertikale Komponente der Teilchenspuren bestimmt ist, der

¹Der ringabbildende Tscherenkow-Zähler etwa ist darauf ausgelegt, die Geschwindigkeiten von Pionen und Kaonen im Impulsbereich von zusammen genommen 10-100 GeV/c zu bestimmen.

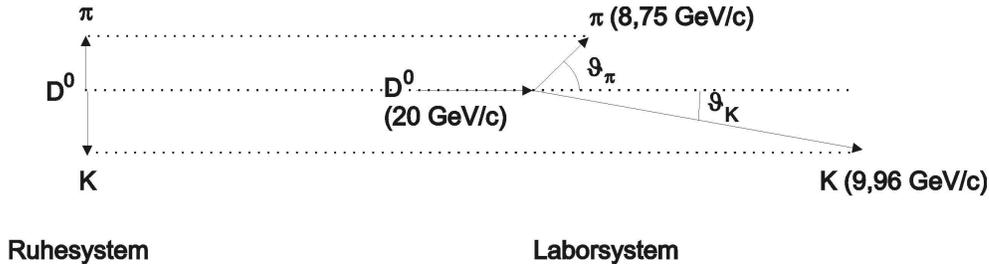


Abbildung 5.3: Kinematik des Zerfalls des D^0 -Mesons, links im Ruhe-, rechts im Laborsystem. Ein typischer Zerfallswinkel ergibt sich unter der Annahme, dass die Trajektorien der Zerfallsteilchen im Ruhesystem senkrecht vom Strahl wegführen.

Impuls hingegen durch die Ablenkung der Trajektorien der geladenen Ejektile in einem ebenfalls vertikal ausgerichteten Magnetfeld erfolgt, weswegen hier nur die Änderung der horizontalen Spurkoordinaten in die Messung eingeht. Jede andere Orientierung der Zerfallsebene würde dazu führen, dass auch horizontale Komponenten in die Zerfallswinkelmessung eingingen.

5.1.2 Genauigkeit der Impulsmessung

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit bei der Impulsmessung kann die Trajektorie eines Zerfallsteilchens ohne Beschränkung der Allgemeinheit gedanklich so verschoben werden, dass sie mit der des anderen Zerfallsteilchens in demjenigen Raumpunkt zusammen fällt, der von der Driftkammer (in diesem Modell fehlerfrei) gemessen wird (siehe Abbildung 5.4 oben), da die Strecke \overline{ab} klein ist gegen alle anderen auftretenden Größen. Weiterhin ist es aufgrund der kleinen vorkommenden Winkel zulässig, die Länge einer der beiden Trajektorien mit dem Abstand h zu identifizieren. Die Näherung kann auch auf ungleichnamig geladene Teilchen übertragen werden, da $\cos \frac{a-b}{h}$ für größer werdende Winkel ϵ kleiner wird.

Werden also die beiden von der Driftkammer fehlerfrei gemessenen Raumpunkte wie oben angegeben zu einem - natürlich ebenfalls fehlerfreien - zusammengefasst, und der Ablenkwinkel ϵ anhand der fehlerbehafteten Ortsmessungen mit den Stroh-Driftkammern gemessen, so erhält man zunächst:

$$\sin \epsilon = \frac{a - b}{h}, \quad (5.10)$$

sodann mit den oben diskutierten Näherungen und y als der von der Stroh-Driftkammerstation gemessenen Koordinate und Δy als ihrem Fehler:

$$\Delta \sin \epsilon = \sqrt{2} \frac{\Delta y}{h} \cos \frac{a - b}{h} \approx \sqrt{2} \frac{\Delta y}{h} \quad (5.11)$$

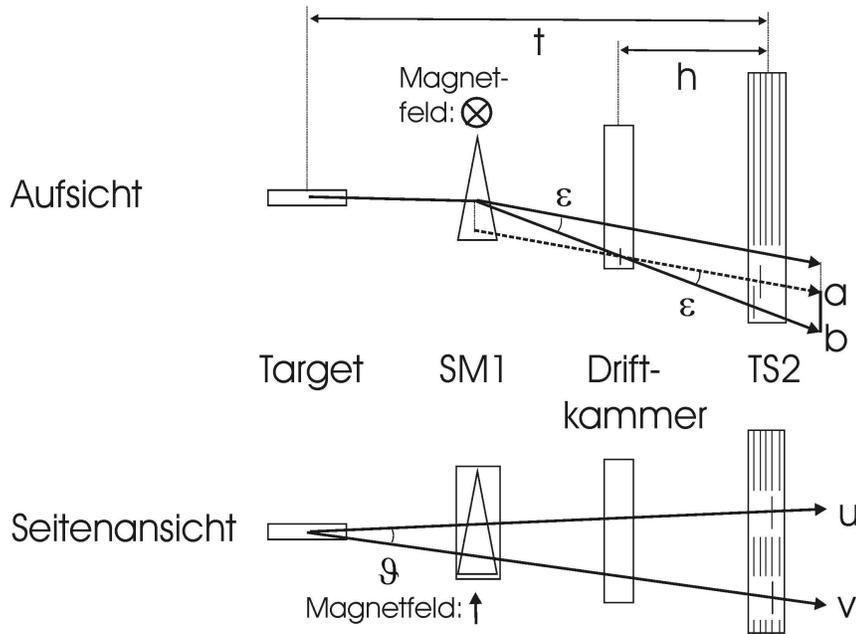


Abbildung 5.4: Zur Genauigkeit der Winkel- und Impulsmessung (hier für gleichnamig geladene Teilchen, siehe aber Text):

SM1: erster Spektrometermagnet, TS2: Stroh-Driftkammerstation. Die Ortsmessung in der Driftkammer sei fehlerfrei, ohne Beschränkung der Allgemeinheit kann die Spur verschoben werden (gestrichelt gezeichnet, siehe Text). „a“, „b“, „u“ und „v“ stehen für die von der Stroh-Driftkammerstation gemessenen Koordinaten.

Auswertung von Gleichung 5.11 ergibt mit dem Abstand von 1000 mm zwischen Driftkammer und Spurverfolgungsstation 2 hierzu einen Fehler $\Delta\epsilon$ von

$$\Delta\epsilon = \arcsin\left(\sqrt{2}\frac{\Delta y}{1000 \text{ mm}}\right). \quad (5.12)$$

Für eine angenommene Ortsauflösung von 200 μm (vgl. Abschnitt 10.2.1) führt dies zu einem Fehler der Winkelbestimmung von $\pm 0,02^\circ$. Diese Ortsauflösung wird für die im COMPASS-Spektrometer einzusetzenden Driftröhren zunächst gefordert [21]. Die tatsächlich zum Einsatz kommenden Zähler werden im Abschnitt 10.2.1 untersucht.

Mit der Zahlenwertgleichung 5.13 (Gleichung 25.20 in [53], S. 160) erhält man den Impuls des im Magnetfeld abgelenkten Teilchens:

$$p^{Lab} = \frac{0,3z\{B\}\{R\}}{\cos\lambda} \cdot \text{GeV}/c \quad (5.13)$$

mit p : Teilchenimpuls, λ : Einfallswinkel (hier kann näherungsweise $\cos\lambda$ wegen der in Vorwärtsrichtung gestreuten Teilchen gleich 1 gesetzt werden), z : Ladung des Teilchens in Einheiten der Elementarladung, B : Betrag des Magnetfeldes in T und R : Krümmungsradius der Trajektorie in m. Zur Verwendung der Klammern siehe Bemerkung auf Seite 177.

Im ersten Spektrometermagneten beträgt das Integral über das senkrecht im Raum stehende Magnetfeld entlang der Teilchenspuren 1 Tm, innerhalb des Magneten ist es in guter Näherung homogen.

An Hand der Zahlenwertgleichung 5.13 kann der Teilchenimpuls senkrecht zum Magnetfeld p_Z^{Lab} zu

$$p_Z^{Lab} = 0,3 \frac{\{B\} \cdot \{s\}}{\sin\epsilon} \cdot \text{GeV}/c \quad (5.14)$$

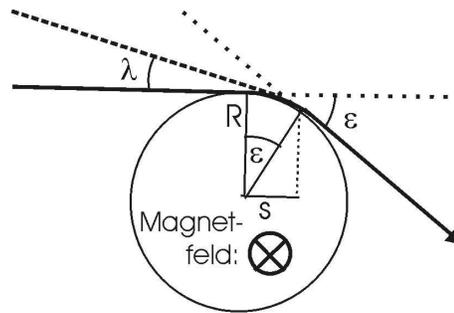


Abbildung 5.5: Ablenkung eines negativ geladenen Teilchens im homogenen Magnetfeld, das entlang der Strecke s von null verschieden ist.

berechnet werden. Zur Definition von s siehe Abbildung 5.5, die Einheiten der Größen entsprechen denen in Zahlenwertgleichung 5.13. Vgl. auch hierzu die Bemerkung auf Seite 177.

Der (Größt-)Fehler der Impulsbestimmung bei dem oben angenommenen typischen Zerfallswinkel ist dann:

$$\begin{aligned} \Delta p_Z &= 0,3 |\vec{B}| s \cdot \left(\frac{1}{\sin(\epsilon + \Delta\epsilon)} - \frac{1}{\sin \epsilon} \right) = \\ 0,3 \cdot 1 \text{ Tm} \cdot \left(\frac{1}{\sin 13,80^\circ} - \frac{1}{\sin 13,82^\circ} \right) &= 2 \text{ MeV}/c. \end{aligned} \quad (5.15)$$

5.1.3 Genauigkeit der Winkelmessung

Die Bestimmung der Genauigkeit der Zerfallswinkelmessung beruht auf ähnlichen Überlegungen: Hier sei der Ort des D^0 -Mesonenzerfalls fehlerfrei als in der Mitte des Targets liegend bekannt, auf die Koordinateninformation aus der planaren Driftkammer werde nicht zurück gegriffen.

Von einer expliziten Auflösung der Gleichung 5.5 nach dem Zerfallswinkel wurde wegen ihrer Komplexität zu Gunsten einer Abschätzung des Fehlers bei typischen Impulsen abgesehen.

Für die in Abbildung 5.3 dargestellte Kinematik erhält man im Laborsystem einen Zerfallswinkel von

$$\vartheta = \vartheta_\pi + \vartheta_K = \arcsin \frac{0,8 \text{ GeV}/c}{4 \text{ GeV}/c} + \arcsin \frac{0,8 \text{ GeV}/c}{20 \text{ GeV}/c} = 14^\circ. \quad (5.16)$$

Analog zu Gleichung 5.11 erhält man:

$$\Delta \sin \vartheta = \sqrt{2} \frac{\Delta x}{t} \cdot \cos \frac{u-v}{t} \approx \sqrt{2} \frac{\Delta x}{t} = \sqrt{2} \frac{200 \text{ mm}}{5 \text{ m}} \approx 6 \cdot 10^{-5}. \quad (5.17)$$

5.1.4 Genauigkeit der Massenbestimmung des D^0 -Mesons

Wertet man Gleichung 5.5 unter Benutzung des Wertes von 1864,6 MeV für die Masse des D^0 -Mesons [53] aus, so ergibt sich die Messgenauigkeit des Spektrometers zu $(13 \pm 1) \text{ MeV}$.

5.2 Nachweiseffizienz

Aus geometrischen Gründen kann nicht die gesamte Detektorfläche sensitiv sein. Die Strukturmaterialien (v. A. Röhrenwände) zwischen einander berührenden Röhren machen, zusammen mit den insensitiven Bereichen in der Nähe der

Röhrchenwände, etwa 2 % der Zählerfläche aus. Des Weiteren kann eine Teilchenspur, die das Detektorvolumen durchsetzt, ohne zusätzliche Information nicht der einen oder anderen Hälfte der Driftröhrchen-Projektionsfläche zugeordnet werden (Näheres hierzu im Abschnitt 4.2).

Diesen Problemen wird begegnet, indem die Driftröhrchen in Doppellebenen angeordnet werden, wobei die beiden Einzelebenen um einen Röhrchenradius versetzt hintereinander zu liegen kommen (Siehe Abbildung 5.6). Im Hinblick auf die Insensitivität deckt die eine Einzelebene die unempfindlichen Bereiche der anderen ab. Was die „Rechts-Links-Ambiguität“ angeht, so liefern Signale aus zwei in der geschilderten Weise versetzt angeordneten Röhrchenlagen in jedem Fall eine eindeutige Ortsinformation.

Simulationsrechnungen [21] zu Folge werden zwischen dem ersten Spektromettermagneten und dem ringabbildenden Tscherenkow-Zähler etwa 7000 Driftröhrchen benötigt, wobei eine Nachweiseffizienz zu Grunde gelegt wurde, wie sie üblicherweise mit den zunächst ins Auge gefassten „Honeycomb“-Driftkammern erreicht werden kann. Die Tests an den beiden Prototypen aus Moskau und Dubna erbrachten mittlere Effizienzen von über 99 % bei vernachlässigbaren Raten und 85-90 % bei Raten über $1,4 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, was nach [61] die Effizienzwerte übertrifft, auf denen die Simulationen basieren, allerdings ohne, dass sie dort explizit benannt würden.

Von den Autoren [21] wurde eine Anordnung in drei Richtungen in einer Ebene (senkrecht, waagrecht und unter einem Winkel von 10° zur Vertikalen geneigt) betrachtet, um vor allem die Impulsmessung mit ausreichender Redundanz durchführen und Geisterspuren eliminieren zu können. Geisterspuren („Ghost tracks“) nennt man nicht existente Teilchenspuren, die vom Zähler gemessen wurden, weil die Koordinatenwerte mehrerer Spuren nicht korrekt zugeordnet werden. In einem kartesischen Koordinatensystem, wie es durch die Geometrie der Stroh-Driftkammerstation nahe gelegt wird, können praktisch gleichzeitig gemessene Raumpunkte (x_1, y_1) und (x_2, y_2) , die realen Spuren entsprechen, nicht ohne Weiteres von der Kombination (x_1, y_2) und (x_2, y_1) unterschieden werden. Viele Geisterspuren können allerdings mit der Information aus den um 10° geneigten Driftröhrchen ausgeschlossen werden.

Um einerseits die Zweckbestimmung der gegenüber den vertikalen Röhrchen geneigten Strohalm-Ebenen nicht zu gefährden, andererseits aber den mechanischen Aufwand, der mit größerem Neigungswinkel wächst, in Grenzen zu halten und nur einen möglichst geringen Verlust an mit dem RICH-Eintrittsfenster komplementärer sensitiver Fläche hinnehmen zu müssen, wurden von Aleksakhin [2] Simulationsrechnungen zu dieser Frage ausgeführt, auf die auch bereits im Abschnitt 2 zurückgegriffen wurde. Da aufgrund der Simulationsergebnisse ein Neigungswinkel von $\pm 10^\circ$ als ausreichend erachtet werden kann, wurde dieser Winkel gewählt.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Teilchenflüsse im Zentrum der Detektorfläche bis zu 15 MHz/cm^2 betragen [21]. Daher muss ein ausreichender Bereich

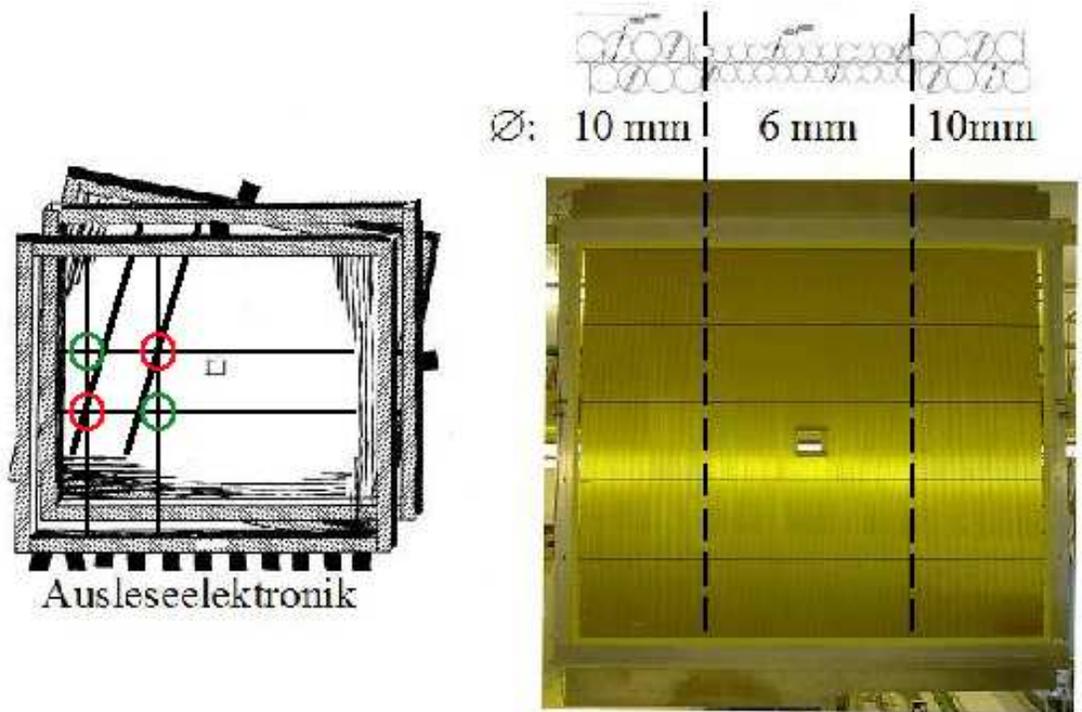


Abbildung 5.6: Anordnung der Driftröhrchen in Doppelebenen. Nur mit Hilfe der um 10° zur Vertikalen geneigten Doppalebene kann ermittelt werden, welches der in der Schemazeichnung links grün und rot gekennzeichneten Koordinatenpaare zu einer realen und welches zu einer Geisterspur gehört.

(vgl. oben zitierte Raten, unter denen die Prototypen getestet wurden) eine Effizienz von null aufweisen, also insensitiv sein, um die Ratenbelastung des Zählers in vertretbaren Grenzen zu halten. Ideal ist eine Aussparung in der Mitte der Fläche, die völlig frei von jeglichem Strukturmaterial ist.

5.3 Betriebsicherheit

Zeitgenössische Experimente zur Elementarteilchenphysik erfordern Apparaturen von erheblicher Größe; das COMPASS-Spektrometer wird im Endausbau etwa 40 m lang sein. Von keiner Komponente darf Brand- oder Unfallgefahr ausgehen, weswegen in diesem Kapitel in aller Kürze auf einige diesbezügliche Aspekte eingegangen werden soll.

Neben der Gefahr, die naheliegenderweise von eventuell herabstürzenden Zählern ausgeht, und der selbstverständlich durch fachgerechte Ausführung der Haltestrukturen begegnet wird, werden in zwei Bereichen sicherheitsrelevante Fragen berührt:

Die Verwendung von Gas ist in diesem Fall unkritisch, da es weder entzündlich noch brandfördernd wirkt. Ebenso wenig geht Erstickungsgefahr von den im Zähler befindlichen Gasmenngen aus. Tetrafluormethan ist chemisch inert, seine ätzende und somit auf Driftkammern alterungshemmende Wirkung entfaltet es erst im ionisierten Zustand. Mit dem Gasdruck zusammenhängende Fragen werden im Abschnitt 12 erörtert.

Mit Hochspannung arbeitende Detektoren unterliegen am C.E.R.N. besonderen Bestimmungen. Beispielhaft sei auf die Absicherung der Hochspannungszufuhr mit einer Sicherheitsschleife verwiesen (s. Abb. 5.7, die den Hochspannungsanschluss einer jeden Doppelebene (Steckerseite) zeigt): Die Sicherheitsschleife wird über die mit SL bezeichneten Verbindungen geführt, bei ihrer Unterbrechung wird die Hochspannungsversorgung automatisch abgeschaltet. Durch die Anordnung der SL-Kontakte an den Steckern wird erreicht, dass auch ein verkantetes Abziehen desselben zum sicheren Abschalten führt, noch bevor Hochspannung führende Teile berührt werden können.

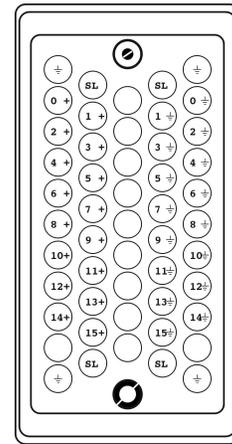


Abbildung 5.7: Der Hochspannungsanschluss (s. Text) [33]

Kapitel 6

Bauform

6.1 Prototypen und Tests

Um das Konzept eines auf Strohalm-Driftkammern basierenden Spurverfolgungssystems auf seine Eignung für das COMPASS-Spektrometer zu prüfen und die geeignete Produktionstechnologie zu ermitteln, wurden zwei Prototypen an einem Teststrahl am C.E.R.N. untersucht; der erste Prototyp wurde an der Moskauer Lomonossow-Universität hergestellt, der zweite stammte aus dem Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna.

Beide Prototypen wiesen bereits die Doppellagen-Struktur auf, um der in Abschnitt 4.2 bereits diskutierten Problematik der Volumen-Driftzeit-Relation gerecht zu werden. Auch waren wegen der unterschiedlichen zu erwartenden Ratenbelastungen bereits zwei verschiedene Röhrendurchmesser, 6 mm und 10 mm, vorgesehen.

Die Zähler waren mit Röhren bestückt, deren $2.25 \mu\text{m}$ dicke KAPTON-Wand mit Aluminium und innen zusätzlich mit Kohlenstoff bedampft war, um sie elektrisch leitend zu machen.

Der (kleinere) Zähler aus Moskau hatte eine aktive Fläche von $60 \times 80 \text{ cm}^2$, derjenige aus Dubna eine solche von $240 \times 120 \text{ cm}^2$. Beide Zähler waren also kleiner als für das COMPASS-Spektrometer erforderlich.

Der wesentliche Unterschied in der Technologie der beiden Prototypen lag darin, dass das Konzept aus Moskau vorsah, die mechanische Signaldrahtspannung an den Endkappen, die die Driftröhren abschließt, aufzunehmen und an den Rahmen aus Kohlefaser verstärktem Kunststoff weiterzugeben. Das Gas strömt durch eine Perforation in der Polyimidfolie in das Röhren.

Der Prototyp aus Dubna führt das Gas durch einen Kanal in der Endkappe zu, weswegen die mechanische Drahtspannung zunächst über die Endkappe auf das Röhren übertragen wird. Die Röhren sind ihrerseits gasdicht mit dem ebenfalls aus GFK gefertigten Rahmen verklebt.

Für die Testmessungen stand ein Siliziumzähler-Hodoskop zur Verfügung, mit

dem die Teilchenspuren mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ rekonstruiert werden konnten. Im Hinblick auf die von den Stroh-Driftkammern erwartete Ortsauflösung von $\pm 100 \mu\text{m}$ kann der Fehler der Referenz-Ortsmessung also vernachlässigt werden.

Der Moskauer Prototyp wurde im Mai 1998 mit einer Gasmischung aus Argon, Tetrafluormethan und Methan im Mischungsverhältnis $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CH}_4=74:20:6$ untersucht. Für den im August 1998 getesteten Zähler aus Dubna wurde das Gas modifiziert ($\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2=74:20:6$), da man sich davon eine über das Volumen konstante Driftzeit versprach. Ein solches Gas wird umgangssprachlich insofern als „linear“ bezeichnet. Auch unter dem Gesichtspunkt der Detektoralterung ist ein nicht-kohlenwasserstoffhaltiges Zählgas vorzuziehen.

Ausführlicher sei hier lediglich auf die Messung der Ortsauflösung und der Nachweiseffizienz eingegangen, da von dem hier angewandten Verfahren auch bei der Prüfung der ersten Kammer aus der Serienproduktion Gebrauch gemacht wurde:

Zunächst wurden alle Ereignisse, denen eine Driftzeit größer als 100 ns (was der gerundeten maximalen Driftzeit in 10-mm-Röhrchen entspricht) zugeordnet war, verworfen. Weiterhin wurden 7 Koordinateninformationen aus den 12 Siliziumzählerebenen verlangt. Der Fehler der Ortsbestimmung durch die Siliziumzähler ($\pm 10 \mu\text{m}$) kann bei der Bestimmung der Ortsauflösung der zu untersuchenden Driftröhrchen vernachlässigt werden.

Ortsauflösung

Zur quantitativen Bestimmung der Ortsauflösung wurde die Verteilung derjenigen von den Siliziumzählern gemessenen Ortskoordinaten bestimmt, denen Driftzeiten zugeordnet sind, die in einem Intervall von 0,3 ns um mehrere gegebene, feste Driftzeiten aus der Menge aller möglichen plausiblen Driftzeiten liegen. Hierbei wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass die Projektion der Volumen-Driftzeit-Relation auf eine Koordinatenachse zwei zu einer gegebenen Driftzeit gehörige Orte ergibt, die aber für die gewählten Driftzeiten gut unterschieden werden konnten.

Für den Prototypen aus Dubna lagen die gewählten Driftzeitintervalle für die 10-mm-Röhrchen bei 35,0-35,3 ns und 70,0-70,3 ns und für die 6-mm-Röhrchen bei 35,0-35,3 ns und 45,0-45,3 ns. Das Zeitfenster wurde so gewählt, dass einerseits genügend Ereignisse für eine aussagekräftige Analyse zur Verfügung standen, andererseits aber der durch die endliche Breite des Fensters Δt bedingte intrinsische Fehler $\Delta s = \int_{\Delta t} v(t)dt$ lediglich etwa $20 \mu\text{m}$ betrug. $v(t)$ steht hier für die Driftgeschwindigkeit als Funktion des Ortes der Primärionisation, der auch als Driftzeit bis zum Signaldraht ausgedrückt werden kann.

Tabelle 6.1: Ortsauflösung des Prototypen aus Dubna bei verschiedenen Driftzeiten, Daten aus [49].

Driftzeitfenster	35,0-35,3 ns	45,0-45,3 ns	70,0-70,3 ns
∅ 6 mm	210 μm	149 μm	–
∅ 10 mm	195 μm	–	120 μm

Nachweiseffizienz

Die Nachweiseffizienz ist gegeben als Quotient aus der Zahl gültiger, einem Driftrohrchen zugeordneter TDC-Einträge und der Zahl der Teilchenspuren durch dieses Röhrrchen, wie sie vom Siliziumzähler-Hodoskop bestimmt wurden.

Nachfolgend die Ergebnisse dieser Messungen, wie sie in [49] veröffentlicht wurden (siehe Abbildungen 6.1 und 6.2):

Weitere Eigenschaften der Prototypen, die mithilfe eines Modells der elektrischen Eigenschaften der Strohalm-Driftröhrrchen [49] bestimmt wurden, sind:

1. Die Kathodenflächen sind in dem Frequenzbereich, auf den der ladungsempfindliche Vorverstärker, Pulsformer und Diskriminator ASD8B ausgelegt ist, also $1\text{-}10^2$ MHz, galvanisch transparent. Dies führt dazu, dass die Signalleitung offenbar nicht zwischen Anodendraht und Kathodenfläche, sondern zwischen Anodendraht und externer Erde stattfindet.
2. Die elektrische Terminierung der Röhrrchen ist von entscheidender Bedeutung, um Signalreflexionen am offenen Ende zu vermeiden und einen gleichmäßigen, geringen Abfall der Signalamplitude entlang des Röhrrchens zu erreichen.

Eine detailliertere Darstellung der beiden Prototypen und der erzielten Testergebnisse findet sich in [61].

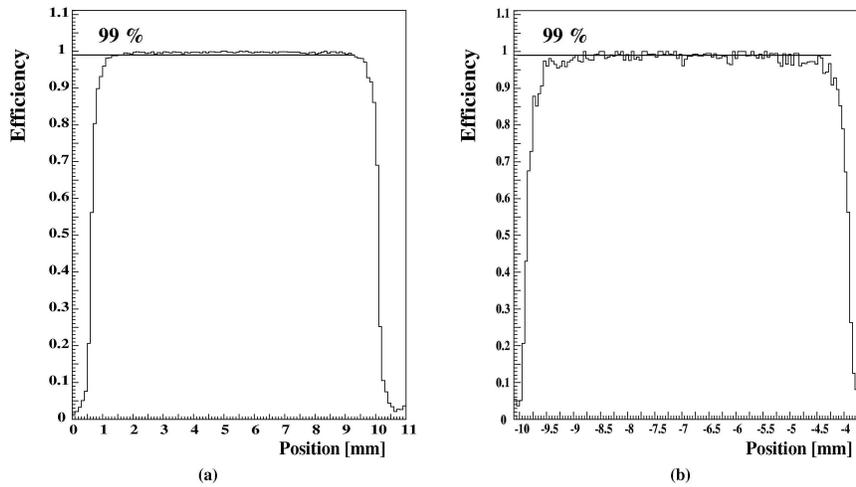


Abbildung 6.1: „Dubna-Prototyp“: Nachweiseffizienz der 10-mm- (a) und 6-mm-Driftröhrchen (b) bei vernachlässigbarem Teilchenfluss. Die waagerechte Gerade markiert 99% Effizienz [61].

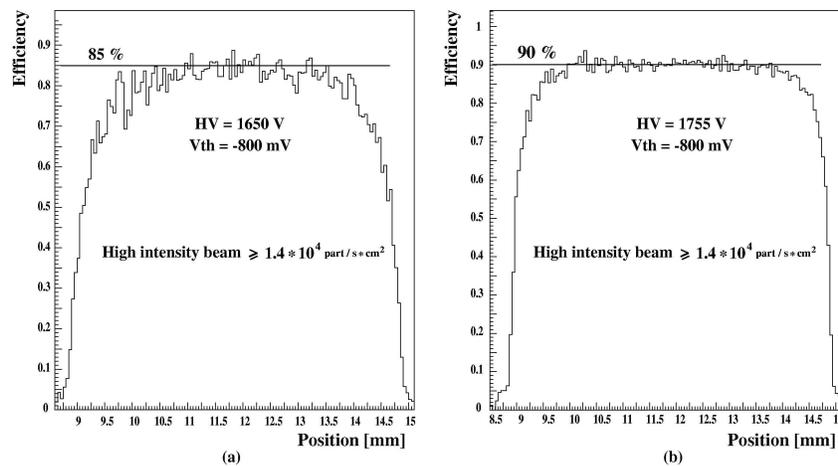


Abbildung 6.2: „Dubna-Prototyp“: Nachweiseffizienz der 10-mm- (a) und 6-mm-Driftröhrchen (b) bei hohem Teilchenfluss. Die waagerechte Gerade markiert 85 bzw. 90 % Effizienz [61].

Im Hinblick auf die Gestaltung des Gassystems, die im Abschnitt 12 näher beschrieben wird, wurde für den Prototypen aus Dubna mit einer kapazitiven Sonde schließlich auch die Konzentration von Sauerstoff im Zählgas gemessen, Abbildung 6.3 zeigt die Ergebnisse bei verschiedenen Gasflüssen. Hierzu ist kritisch anzumerken, dass die Daten zwar einen Aussagewert im Hinblick auf die Flussabhängigkeit der Sauerstoffkonzentration haben. Allerdings waren die untersuchten Strohhalm aus kohlenstoffbeschichtetem KAPTON HL gefertigt, die zudem noch mit einer Außenschicht aus Epoxidharz abgedichtet waren. Ohne dem folgenden Kapitel vorzugreifen sei hier bereits erwähnt, dass die endgültige Auslegung kohlenstoffbeladenes KAPTON XC als Wandmaterial vorsieht, auch die Epoxidharzdichtung ist fortgefallen. Auch ohne detaillierte quantitative Betrachtung ist aber bereits ersichtlich, dass der geforderte Sauerstoffgehalt von maximal 100 ppm [54] mit einem vergleichbaren Aufbau nicht zu erreichen ist.

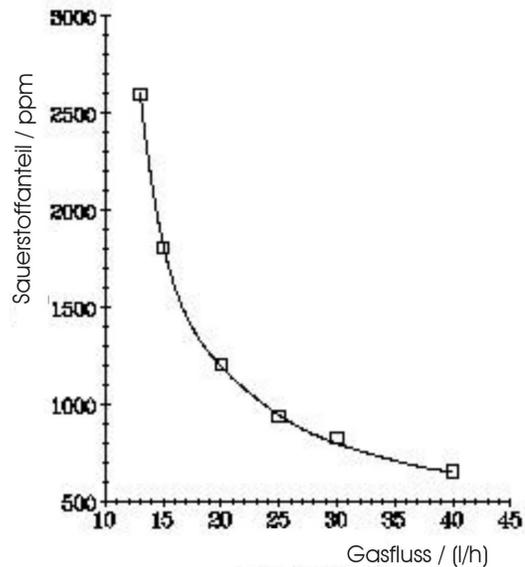


Abbildung 6.3: Sauerstoffkonzentration am Kammerausgang in Abhängigkeit vom Gasfluss. Messgenauigkeit der verwendeten kapazitiven Sauerstoffsonde: ± 100 ppm. Der Gasfluss konnte auf ± 1 l/h genau gemessen werden.

6.2 Festlegung des Konzeptes

Aufbauend auf den Ergebnissen des Vergleiches der beiden Prototypen entschied man sich, die Spurverfolgungsstation 2 in enger Anlehnung an die Technologie des aus Dubna gelieferten Prototypen zu bauen. Allerdings sollte der Rahmen aus Kostengründen nicht aus Kohlefasermaterial, sondern aus Aluminium bestehen. Für die Driftröhrchen selbst wurde kohlenstoffbeladenes Polyimid („KAPTON XC“¹) gewählt, um einerseits den Kathodenwiderstand gering zu halten und andererseits beim Einziehen der Drahtpositionierer keine Kohlenstoffverunreinigung im Gasraum zu riskieren. Des Weiteren sollen die Röhrchen an der auslesefernen Seite - auch an der physischen Öffnung - elektrisch terminiert sein.

Auf die Einzelheiten des Produktionsprozesses wird an anderer Stelle (Abschnitt 11.1) noch eigens eingegangen.

Im Endausbau sollen die Strohalm-Doppellagen der Spurverfolgungsstation 2 folgende geometrische Spezifikationen aufweisen:

Bezeichnung	X	Y	X' bzw. -X'
Orientierung der Röhrchen	vertikal (0°)	horizontal (90°)	± 10°
Röhrchenlänge / mm	3208	3658	3208
Anzahl Röhrchen (∅ 9,65 mm)	384	256	384
Anzahl Röhrchen (∅ 6,14 mm)	448	384	448
Gesamtzahl der Kanäle	832	640	832
Rahmen-Innenmaße / mm ²	3250×2720	3250×2442	3250×2720
sensitive Fläche / mm ²	3234×2720	3250×2420	3234×2720
Anzahl der Kammern dieses Typs	5	5	3+2

Tabelle 6.2: Geometrische Spezifikationen der Strohalm-Doppellagen der Spurverfolgungsstation 2 (geplanter Endausbau).

Um dem im Abschnitt 6.1 bereits angedeuteten Problem der Schadgaskonzentration im Zählgas (vgl. Abbildung 6.1) zu begegnen, wurde eine Umhüllung der Detektoren, ein mit einem Schutzgas gefülltes Volumen, vorgesehen. Selbstverständlich muss bei seiner Gestaltung der zusätzliche Materieeintrag minimiert werden. Einzelheiten hierzu werden im Abschnitt 12.2.3 diskutiert.

¹Für DuPont de Nemours S. A. eingetragenes Warenzeichen.

Kapitel 7

Das Alterungsproblem bei Gasdetektoren („Aging“)

Detektoren, die in Spektrometern wie COMPASS zum Einsatz kommen, sind in aller Regel über viele Jahre ionisierender Strahlung ausgesetzt, die ihre Funktion - bis hin zum völligen Ausfall - beeinträchtigen kann, zumal, wenn sie an zeitgenössischen Teilchenbeschleunigern hoher Luminosität eingesetzt werden.

Man ist daher gezwungen, die Strukturmaterialien moderner Detektoren auf „Strahlungshärte“ zu testen. Untersuchungen hierzu dürfen sich selbstverständlich nicht auf die aus der Wirkung der nachzuweisenden Teilchen resultierenden Dosis beschränken, sondern müssen auch und vor allem Strahlung berücksichtigen, die den Zähler trifft, ohne im Hinblick auf die experimentelle Fragestellung von Interesse zu sein.

Bei COMPASS sind das insbesondere Myonen aus dem Strahlhalo, die die Stroh-Driftkammern im strahlnächsten Bereich ihrer aktiven Fläche [21] mit einem Fluss von bis zu etwa $1 \cdot 10^3$ Hz/cm² durchsetzen¹. Wie im Abschnitt 6 bereits beschrieben, ist für den Strahl selbst in der Kammermitte eine physische Öffnung vorgesehen, sodass der Zähler hier weder sensitiv ist – was eine erhebliche Ratenbelastung bedeuten würde – noch überhaupt massives Material aufweist, mit dem Strahlteilchen wechselwirken könnten.

Um das Alterungsphänomen quantifizieren zu können, definiert man eine so genannte Aging-Rate R , die üblicherweise in $\% \cdot \text{cm} \cdot \text{C}^{-1}$ angegeben wird [41]:

$$R = -\frac{1}{G_0} \cdot \frac{dG}{dQ} = -\frac{1}{A_0} \cdot \frac{dA}{dQ} \quad (7.1)$$

mit G (G_0) als dem (Anfangs-)Gasverstärkungsfaktor, A als der Amplitude der von einer Testquelle im Zähler erzeugten Signale (A_0 : Anfangsamplitude) und Q als der je Einheitslänge des Signaldrahts vom Zähler bisher gesammelten elektrischen Ladung ($[Q] = \text{C/cm}$).

¹Für einen 190-GeV/c-Myonen-Strahl. Bei 100 GeV/c ist die Rate etwa um einen Faktor 3 höher.

Die Aging-Rate gibt also den Verlust an Pulshöhe nach Einwirkung Alterung verursachender Einflüsse auf den Detektor an.

Bevor die Funktion des Zählers in seinen Randbereichen durch Effizienzverlust signifikant beeinträchtigt wird, wirkt sich der Pulshöhenverlust bereits negativ auf die Ortsauflösung aus: Die Anstiegsflanke des Signals wird flacher, entsprechend später überschreitet das Signal die Triggerschwelle. Ein gealterter Zähler verursacht mithin einen systematischen Fehler hin zu größeren Driftzeiten. Das System „gealtertes Driftrohr mit ladungsempfindlichem Vorverstärker und Trigger“ bestimmt den Abstand des Ortes der Primärionisation vom Signaldraht systematisch somit als zu groß, weswegen die rt -Relation regelmäßig zu kontrollieren ist.

Der generellen Verschlechterung der Ortsauflösung und Abnahme der Effizienz kann mit diesem Mittel allerdings nicht begegnet werden.

7.1 Klassifikation bekannter Alterungsphänomene

Blum beschreibt zusammenfassend verschiedene Erscheinungsformen von Alterung [8]:

“Die Drähte [hier sind sowohl Anoden- als auch Kathodendrähte gemeint, naheliegenderweise sind mit letzteren zusammenhängende Fragen für Driftrohre aber ohne Belang] gealterter Kammern tragen Ablagerungen verschiedener Art, entweder punktuell oder in Form einer deckenden Schicht auf Anoden- oder Kathodendrähten, glatt oder haarartig, weiß, schwarz oder ölig, im Bereich der höchsten [Strahlen-]Exposition“. Ebenso kann ein unvergoldeter Draht chemisch angegriffen werden [41].

In seiner Übersichtsdarstellung kategorisiert Kadyk [41] die Auswirkungen dieser Phänomene auf die Funktion von Driftkammern: “Allgemein gesprochen, gehören die unerwünschten Effekte, denen sich Benutzer von Drahtkammern gegenübersehen, einer von zwei Kategorien an: (1) Verlust von Gasverstärkung oder [vor allem räumlicher] Gasverstärkungs-Uniformität (letztere resultiert in einer Verkleinerung der Plateauregion und in einer Verminderung der Empfindlichkeit bei Ionisationsmessungen), oder (2) elektrische Überschläge, die sich normalerweise in einer selbsterhaltenden Dunkelstrom-Entladung, also hohem Strom, der nicht von einer Strahlungsquelle verursacht wird, zeigen“. Ferner sei auch das Auftreten von Nach- und Mehrfachpulsen beschrieben worden.

Sauli [54] weist darüber hinaus darauf hin, dass der gleichmäßige hohe Dunkelstrom, der oft in gealterten Driftkammern zu beobachten ist, in der Regel nicht mit höherem Rauschen verbunden ist, dessentwegen die Triggerschwelle des ladungsempfindlichen Vorverstärkers erhöht werden müsste. Dies sei ein Hinweis darauf, dass der Strom von vielen „Ein-Elektron-Lawinen“ herrührt, die jede für

sich ein Signal erzeugten, das deutlich unter der Schwelle liegt. Solche Signale überschritten die Triggerschwelle erst, wenn sich die Lawinen in der Zeit überlappten.

7.1.1 Ursachen der Detektoralterung

Untersuchungen gealterter Zähler zeigten, dass die Oberflächen von Drähten und Kathodenflächen häufig mit Polymeren bedeckt waren, sei es in Form eines flächigen oder schuppenförmigen Belages, sei es als schlanke Whisker, die sich sowohl auf dem Anodendraht als auch auf der Kathodenfläche bilden und unter dem Einfluss des elektrischen Feldes der jeweils anderen Elektrode entgegenwachsen, wobei Kathodendrähte besonderer Gefahr ausgesetzt sind. Derart gestaltete Zähler zeigten Alterungseffekte bereits nach Strahlendosen, die um eine bis zwei Größenordnungen geringer sind als die, die Detektoren mit flächenhaften Kathoden beeinträchtigten - ein weiteres Argument für den Einsatz von Strohdriftröhrchen anstelle von konventionellen Driftkammern.

7.1.2 Chemische Prozesse

Das Auftreten von festen oder flüssigen Polymeren als Belag auf den Elektroden von Driftkammern legt den Schluss nahe, dass Bestandteile des Zählgas, insbesondere Kohlenwasserstoffe, unter dem Einfluss ionisierender Strahlung polymerisieren. Die so entstehenden Polymere können im inhomogenen elektrischen Feld zur Anode oder Kathode driften und sich dort ablagern.

Ergebnisse von Sauli [54] weisen darauf hin, dass die von der Strahlung im Gas gebildeten Ionen in der Tat Radikale erzeugen, die die Polymerisation von Gasbestandteilen ermöglichen.

Haben sich polare Moleküle gebildet, etwa Alkohole, die polare Hydroxylgruppen (OH) enthalten, so erfahren auch sie im inhomogenen elektrischen Feld eine Kraft, die sie zum Anodendraht driften lässt.

7.2 Überlegungen zur Vermeidung von Alterung bei den COMPASS-Strohdriftkammern

7.2.1 Auswahl der Strukturmaterialien

In nahezu jeder Arbeit über Driftkammer-Aalterung wird vor der Verwendung silikonhaltiger Materialien gewarnt, wenn sie mit dem Kammergas in Berührung kommen. Einzig beim gasdichten Verkleben der Röhrchenenden mit den Aluminium-Rahmenelementen kommt Silikon-Dichtungsmasse zum Einsatz, die ein

Herunterlaufen des noch nicht polymerisierten Epoxidharzes am Röhrchen-Paket verhindern soll. Allerdings wird dieser Bereich nach Dichtung des Gasverteilers nicht vom Zählgas erreicht.

Vom Gasanschluß der Strohkammern, dem das Zählgas über Kupferleitungen zugeführt wird, gelangt es unmittelbar in oben genannten Gasverteiler, der auf allen Seiten metallische Begrenzungen (aus Aluminium) aufweist. Der ebenfalls aus Aluminium gefertigte Deckel wird von einer Moosgummi-Rundschnur aus Neopren gedichtet, die Kontaktstellen an der Dichtfuge wurden plan geschliffen, wobei eine Rest-Oberflächenrauigkeit von $10\ \mu\text{m}$ verlangt wurde. Lediglich diejenige Seite des Gasverteilers, an der die Zählrohre beginnen, wird von oben genannter Epoxidharz-Masse begrenzt, in die die Röhrchen eingebettet sind. In jeder horizontalen Doppelebene (Y) ist das Zählgas einer Epoxidharz-Fläche von $275\ \text{cm}^2$ ausgesetzt ($395\ \text{cm}^2$ im Falle der vertikalen bzw. um 10° zur Vertikalen geneigten (X, X')). Dabei ist jeweils bereits die Epoxidharz-Fläche des Gassammlers auf der gegenüberliegenden Seite der Doppelebene berücksichtigt.

7.2.2 Restriktionen hinsichtlich der Wahl von Zählgas und Strukturmaterialien

Neben den in Abschnitt 4.1.1 erwähnten Parametern ist geringe Alterungsneigung wegen der hohen Strahlenbelastung eine wichtige Forderung an das Zählgas. Kohlenwasserstoffe, etwa CH_4 (Methan) neigen zu Polymerisationsreaktionen, wie im Abschnitt 7.3 auch experimentell gezeigt werden kann. Gegen die schon von Beginn an in Aussicht genommene Mischung $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2=74:20:6$ sprechen auch keine bisher veröffentlichten Resultate im Zusammenhang mit Detektoralterung.

In der Literatur wird vor allem die Verwendung silikonhaltiger Schmiermittel, etwa in den Ventilen des Gassystems, sowie der Einsatz etlicher Kunststoffe als schädlich bezeichnet [41]. Auf eine Zusammenfassung dieser umfangreichen Ergebnisse wird an dieser Stelle verzichtet, da noch keine abschließende Kategorisierung vorgenommen werden kann. Auf eine Verwendung der bis jetzt als Alterung verursachende Stoffe bekannten Substanzen und Materialien bei Herstellung und Betrieb der Stroh-Driftkammern wurde aber selbstverständlich verzichtet.

7.3 Experimente zum Alterungsverhalten

7.3.1 Der Aufbau am Garchinger Tandem-Beschleuniger

Der am Garchinger Tandem-van-de-Graaff-Beschleuniger eingerichtete medizinische Bestrahlungsplatz mit senkrechtem Strahlrohr, breiten, homogenen Strahlprofilen und genauer Dosimetrie eignet sich auch hervorragend zur Durchführung von Alterungsexperimenten. Der Strahlungsfluss kann mit seitlich in den Strahlengang eingebauten Szintillationszählern und einer Ionisationskammer bestimmt

werden. Die am Signaldraht deponierte Ladung wurde mit einem Stromintegrator gemessen.

Die zur Bestrahlung genutzten Protonen einer Energie von 26 MeV deponieren im Mittel in jedem Driftrohr 16 keV, was einer primären Ionisation von 700 Elektronen entspricht. Dies ist etwa um einen Faktor 7 mehr als die von 100-GeV-Myonen erzeugte Ionisation. Einerseits verlieren die Ergebnisse dadurch an Aussagekraft, da in kurzer Zeit gewonnene Ergebnisse nicht notwendigerweise auf einen mehrere Jahre andauernden Alterungsprozess zu übertragen sind, andererseits ist ein realistischeres Experiment unter den in vieler Hinsicht limitierten Bedingungen an einem Großgerät wie dem Garching Tandem-Beschleuniger kaum anders zu realisieren.

7.3.2 Bestimmung der Alterungsrate

Um die Alterungsneigung der drei untersuchten Driftkammer-Prototypen quantifizieren zu können, wurden die Pulshöhen der von einer ^{55}Fe -Röntgenquelle erzeugten Signale aufgenommen. ^{55}Fe emittiert Photonen mit Energien von 5,89 keV (und 6,49 keV, wobei das Verzweigungsverhältnis 25 %: 3,4 % zu Gunsten der 5,89-keV-Photonen beträgt)². Die bei Bestrahlung mit diesen 5,9 keV-Röntgenquanten vom Zähler gelieferten Signale haben mit ausreichender Genauigkeit gleiche Amplituden (vgl. allerdings den folgenden Absatz), weil das jeweils nachgewiesene Röntgenquant seine Energie über den Photoeffekt vollständig im Zähler deponiert.

In reinem Argon werden so im Mittel 224 Primärelektronen freigesetzt [32]. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass im Pulshöhenspektrum noch der so genannte „Escape-Peak“³ auftritt: Ein 5,89-keV-Photon wird vom Argon absorbiert, welches ein 2,7-keV-Auger-Elektron emittiert, das im Zähler durch Ionisation ein Signal von entsprechend geringerer Pulshöhe erzeugt. Die fehlende Energie von 3,2 keV führt ein sekundäres Röntgenphoton ab, das vom Zähler nicht nachgewiesen wird, mithin seiner Detektion gewissermaßen „entkommt“. Die so erzeugte Linie wird „Escape-Peak“ genannt (vgl. Abbildung 7.1).

Mithilfe eines solchen Röntgenstrahlers können periodisch während der Strah-

²Eisen-55 hat eine Halbwertszeit von 2,4 a und zerfällt zu 100 % über Elektroneneinfang mit einer Energie von 0,231 MeV [76].

³Der Auger-Effekt wird von der zeitgenössischen Theorie strahlungslos gedeutet (im Gegensatz zur Deexzitation durch Emission eines Röntgenquants): In einem auf einer inneren Schale ionisierten Atom wird die beim Elektronenübergang von einer weiter außen liegenden Schale nach innen frei werdende Ionisationsenergie strahlungslos auf ein Elektron einer dritten Schale übertragen. Dieses Elektron verlässt das Atom mit einer charakteristischen Energie, das Atom selbst bleibt zweifach ionisiert zurück. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein angeregter Zustand strahlend zerfällt, steigt mit der vierten Potenz der Kernladungszahl Z , die Auger-Ausbeute steigt weniger stark an. Nach [75, S. 1133] liegt die Grenze zwischen überwiegend strahlungslos und überwiegend strahlend in den tiefsten Zustand zurückkehrenden Atomen etwa bei $Z=30$.

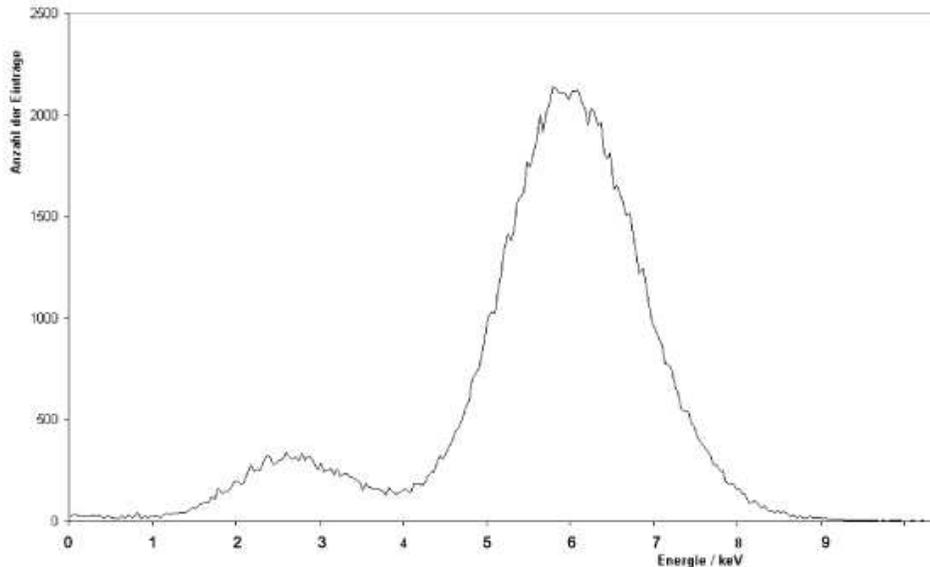


Abbildung 7.1: Mit einem Stroh-Driftrohr gemessenes ^{55}Fe -Pulshöhenspektrum. Zu erkennen sind die Linie bei 5,9 keV und der bei 2,7 keV liegende „Escape-Peak“ der Auger-Elektronen.

lenexposition Pulshöhenspektren aufgenommen werden, aus denen die in Gleichung 7.1 definierte Aging-Rate bestimmt werden kann. Nachdem diese Aging-Rate auf die Anfangspulshöhe normiert angegeben wird, braucht die anfängliche Gasverstärkung des zu untersuchenden Zählers ebenso wenig bekannt zu sein, wie ein geeichter Verstärker benötigt wird.

Aus den Ergebnissen zum wichtigen Parameter „Alterungsrate“ kann bereits geschlossen werden, dass für die COMPASS-Stroh-Driftkammern bei regulärem Zählerbetrieb keine Gefahr besteht. Dennoch wurden verschiedene weitere Untersuchungen vorgenommen, um ein tieferes Verständnis der Alterungsvorgänge in diesem speziellen Fall zu erlangen:

7.3.3 Mikroskopische Untersuchungen

Ablagerungen auf Draht und Kathodenfläche sind in der Regel (aber nicht immer, siehe [41]) unter dem Lichtmikroskop sichtbar.

Nach der Bestrahlung waren Ablagerungen bereits mit bloßem Auge zu sehen.

Im folgenden sind Signaldrähte und Kathodenflächen von Driftrohren abgebildet, wie sie sich unter dem Lichtmikroskop darstellen.

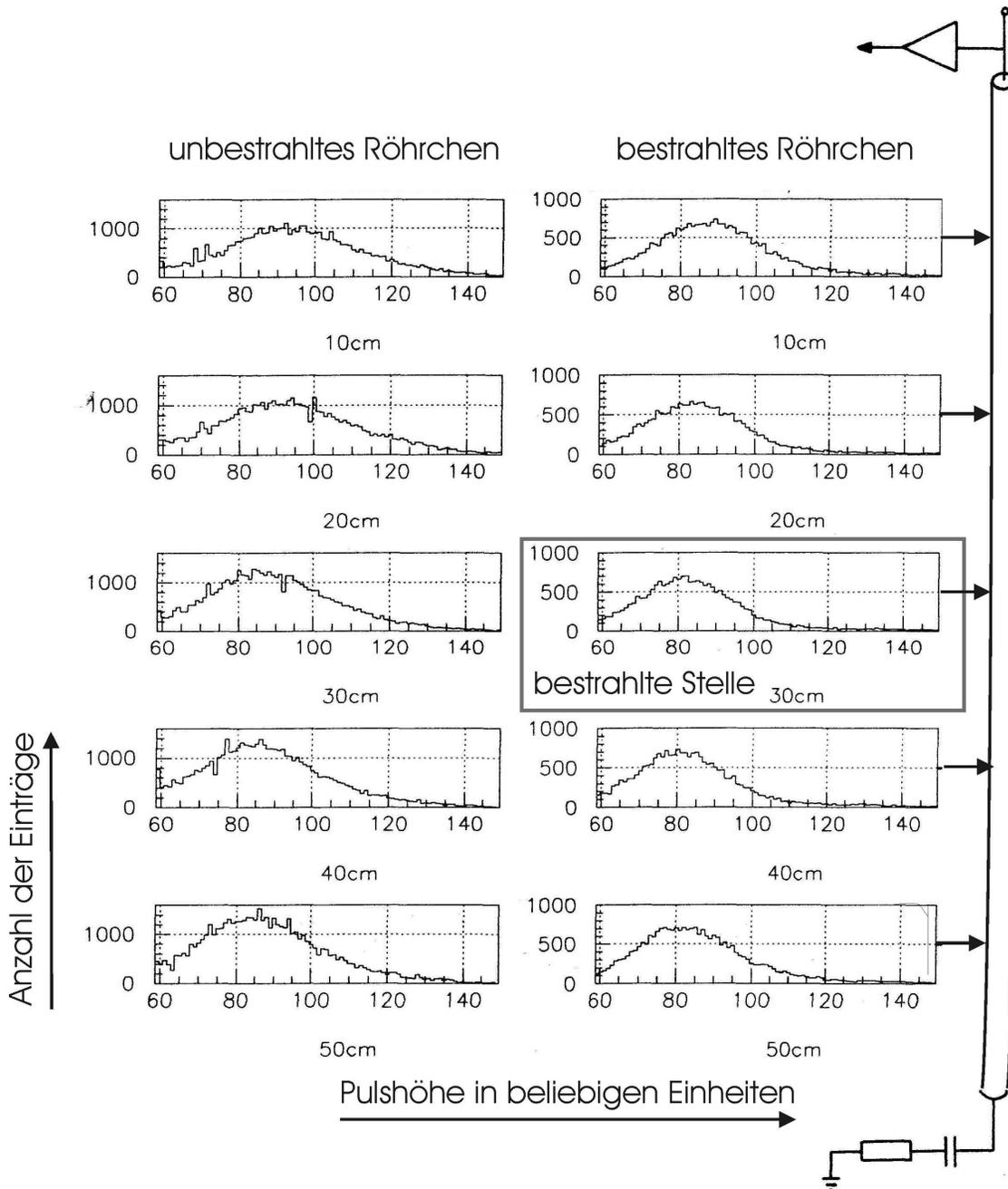


Abbildung 7.2: Vergleich zwischen den entlang eines unbestrahlten (links) und eines im Abstand von 20 cm vom Vorverstärker bestrahlten Driftröhrchens (rechts) mit einer ^{55}Fe -Quelle aufgenommenen Pulshöhenspektren. Wegen der elektrischen Terminierung erwartet man einen linearen Abfall der Amplitude entlang des Röhrchens. Gas: $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2=74:20:6$.

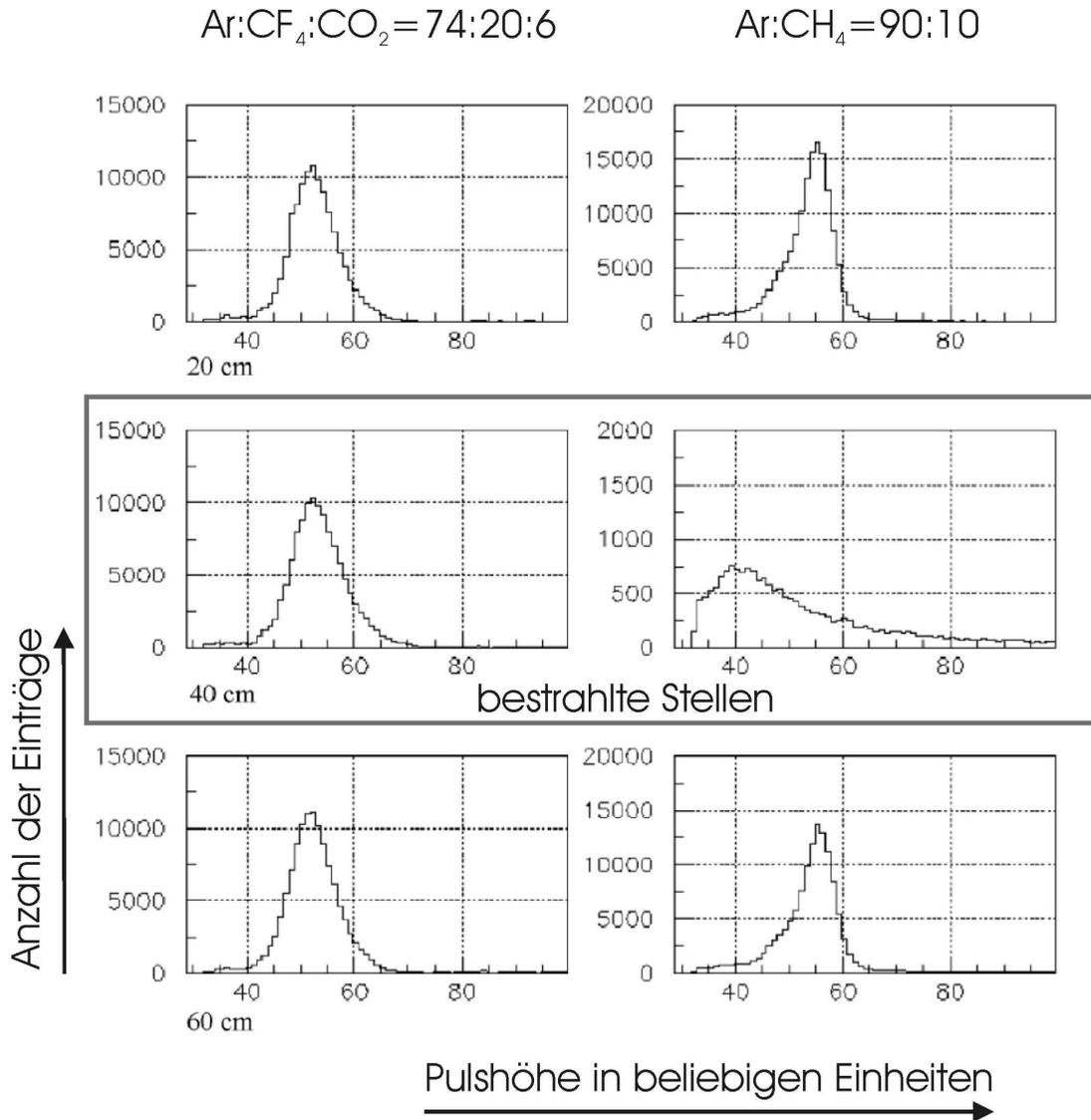


Abbildung 7.3: Vergleich zweier bestrahlter, mit dem COMPASS-Gas (Ar:CF:CO=74:20:6, links) und einem kohlenwasserstoffhaltigen Vergleichsgas (Ar:CH₄=80:20, rechts) betriebener Driftröhrchen: Mit einer ⁵⁵Fe-Quelle aufgenommene Pulshöhenspektren. Der starke Abfall der Pulshöhe an der bestrahlten Stelle (Mitte) des mit kohlenwasserstoffhaltigem Gas beschickten Röhrchens (rechts) ist deutlich zu erkennen.

Der Anodendraht desjenigen Rohres, das mit dem für das COMPASS-Spektrometer in Aussicht genommenen Gas betrieben wurde, wurde zusätzlich einer elektronenmikroskopischen und einer EMA-Untersuchung⁴ unterzogen.

Obwohl eine Elektronenstrahl-Mikroanalyse an den bestrahlten Kathodenflächen nicht vorgenommen wurde, kann es als wahrscheinlich angesehen werden, dass die in Abbildung 7.5 sichtbaren weißen Strukturen aus Polyethylen bestehen, das durch Polymerisation, hier insbesondere Polyaddition, entstanden sein kann.

„Unter Polymerisation versteht man die Aneinanderreihung von ungesättigten Monomeren zu Makromolekülen. [...] Bei der Polyaddition werden monomere Substanzen durch chemische Reaktionen, in denen meistens ein Atom von einer Einheit auf die andere übergeht, hergestellt. Die hierbei freiwerdenden Valenzen verbinden die jeweiligen Monomere miteinander“ [57].

Sollte neben der Ausgangssubstanz und diesem Reaktionsprodukt noch eine dritte Substanz entstehen, spricht man von Polykondensation. Vorstellbar wäre etwa die Bildung von Polyethylen und Wasser aus Methan und Sauerstoff:



Allerdings wurde im Kammergas nicht gezielt nach Wasser gesucht, welches aufgrund der Reaktion 7.2 nur in Spuren entstanden und auch nicht ohne weiteres von Wasser aus anderen Quellen, etwa dem in der Röhrenwand eingelagerten (vgl. Abschnitt 9.3.2), zu unterscheiden wäre. Insofern kann über die tatsächlich ablaufenden Reaktionen an dieser Stelle nur spekuliert werden. Dennoch wären eingehendere Untersuchungen dazu auf jeden Fall indiziert.

7.3.4 REM- und Elektronenstrahl-Mikroanalyse

Bereits unter dem Lichtmikroskop wurden Ablagerungen auf Draht und Kathodenfläche bemerkt. Die räumliche Struktur dieser Ablagerungen wurde unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht, ihre Elementzusammensetzung mittels des Elektronenstrahl-Mikroanalyseverfahrens (EMA) bestimmt. Hierbei wird das zu untersuchende Material mit einem Elektronenstrahl angeregt, anhand der daraufhin von der Probe emittierten charakteristischen Röntgenstrahlung können ihre Bestandteile identifiziert werden [31]. Das von H. Klingele, München, zur Verfügung gestellte Raster-Elektronenmikroskop mit Analysator für die charakteristische Strahlung regt die Probe mit Elektronenenergien zwischen 10 und 20 keV an. Der Signaldraht wurde jeweils auf einer Fläche von $10 \times 14 \mu\text{m}^2$ bestrahlt.

⁴EMA: Elektronenstrahl-Mikroanalyse. Mittels eines Elektronenstrahles (10 und 20 keV) werden im zu untersuchenden Objekt Elektronen in höhere Energieniveaus gehoben. Diese Zustände zerfallen sodann unter Emission charakteristischer Strahlung, aus der somit Rückschlüsse auf die in der Probe enthaltenen Elemente gezogen werden können.

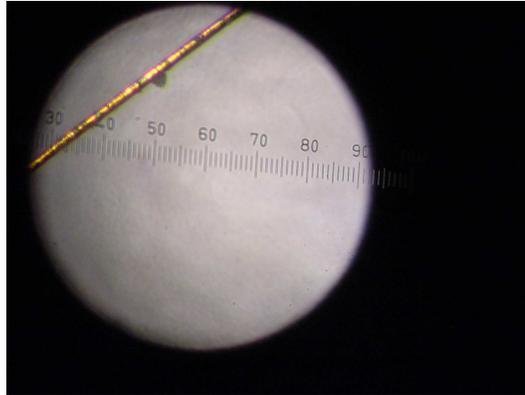


Abbildung 7.4: Der Strahlung ausgesetzter Signaldraht nach einer Ladungsakkumulation von $(1,2 \pm 0,2)$ C/cm unter dem Lichtmikroskop. Der Strichabstand der eingblendeten Okularskala entspricht $12 \mu\text{m}$ in der Ebene des Objektes. Deutlich zu erkennen sind ring- und nadelförmige Ablagerungen. Gas: Ar:CH₄=80:20.

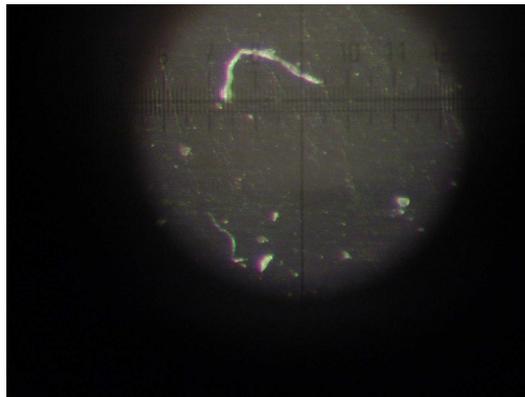


Abbildung 7.5: Der Strahlung ausgesetzte Kathodenfläche nach einer Ladungsakkumulation von $(1,2 \pm 0,2)$ C/cm unter dem Lichtmikroskop. Die Vergrößerung entspricht der von Abbildung 7.4. Die weißen Strukturen dürften aus Ablagerungen von Polyethylen bestehen, das durch Polymerisation (speziell: Polyaddition) aus Methan entstanden sein kann. Gas: Ar:CH₄=80:20.

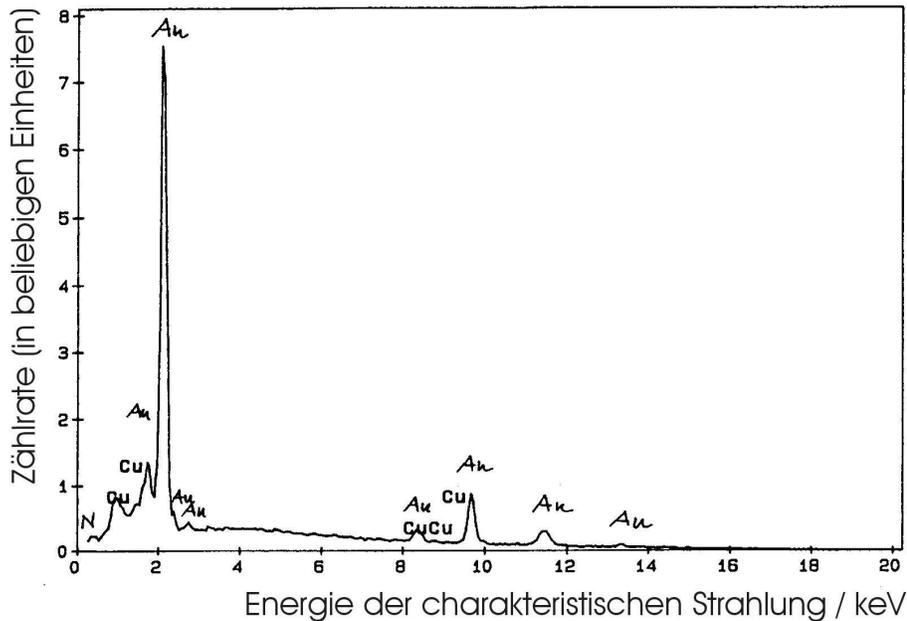


Abbildung 7.6: EMA-Spektrum eines Signaldrahtabschnittes nach der Akkumulation von 1,2 C/cm in Ar:CF₄:CO₂=74:20:6, Beschleunigungsspannung: 20 kV, Integrationszeit: 118 s. Kupfer und Gold sind Bestandteile des Drahtes [43].

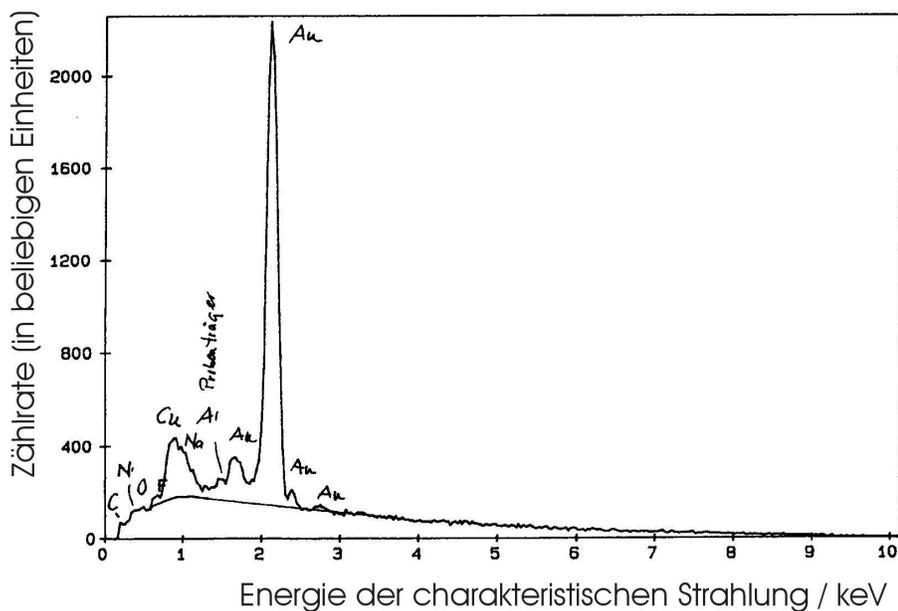


Abbildung 7.7: EMA-Spektrum wie in Abbildung 7.6, jedoch Beschleunigungsspannung: 10 kV. Unter diesen Bedingungen deutet sich zwischen Sauerstoff und Kupfer auch eine Fluor-Linie an, ihr Auftreten muss allerdings noch gesondert untersucht werden [43].

Bei der Interpretation der während der Analyse gemachten rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen ist zu bedenken, dass die chemische Struktur der mit EMA untersuchten Verbindungen durch den Elektronenstrahl modifiziert wird. Vor allem die fettigen Reste des bei der Drahtherstellung verwendeten Ziehmittels - chemisch handelt es sich um Glycerinester der höheren Carbonsäuren - können so aufgebrochen werden, sie zeigen sich in der REM-Aufnahme als dunkles Rechteck. Selbstverständlich korrespondiert die Luminanz der Strukturen nicht mit ihrem Erscheinungsbild unter sichtbarem Licht.

Das Spektrum in Abbildung 7.7 sollte noch genauer auf das Auftreten einer Fluor-Linie zwischen Sauerstoff und Kupfer untersucht werden. Sie könnte zumindest als Hinweis darauf verstanden werden, dass sich Bestandteile des Gases (Tetrafluormethan) polymerisiert und auf dem Draht abgelagert haben.

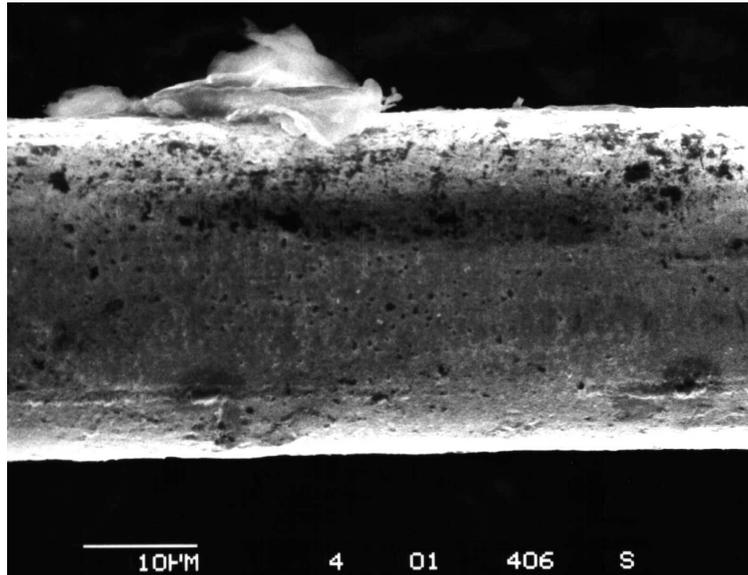


Abbildung 7.8: Rasterelektronenmikroskopische (REM-) Aufnahme des Signaldrahtes aus den Abbildungen 7.4, 7.6 und 7.7. Deutlich sichtbar ist der feinkrümelige Belag. Die dunkle Schattierung in der Mitte rührt von Resten des bei der Drahtherstellung verwendeten organischen Ziehmittels her. Oben links sind Staubpartikel zu erkennen, die sich nach der Zerlegung des Driftrohres auf dem Draht abgelagert haben.

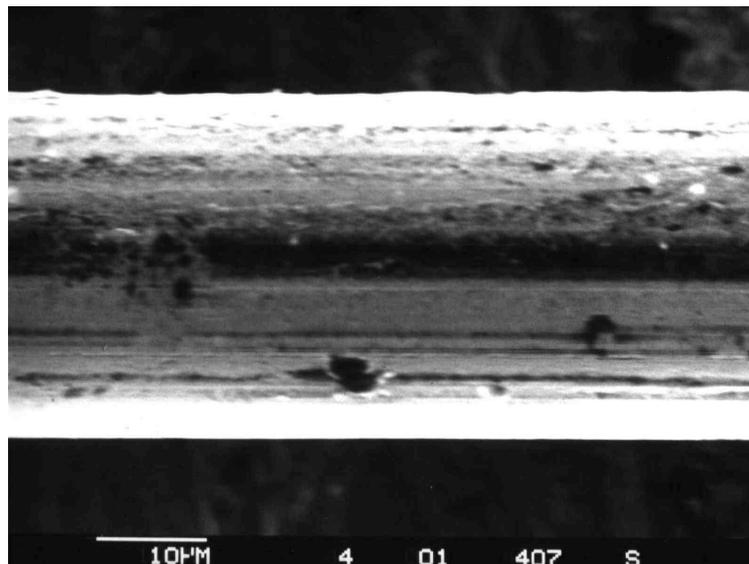


Abbildung 7.9: REM-Aufnahme eines neuwertigen Drahtes. Der durch Abbildung 7.8 für den benutzten Draht dokumentierte Belag ist hier nicht feststellbar, allerdings sind deutlichere Ziehmittelspuren sichtbar.

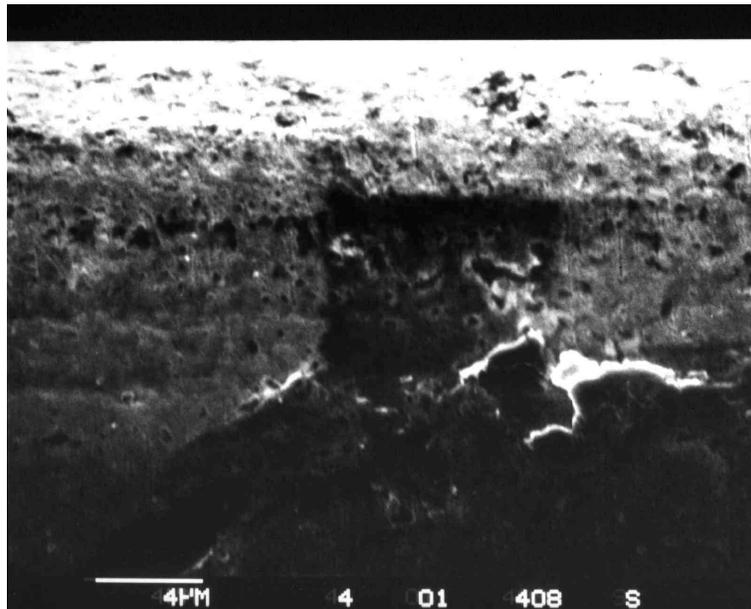


Abbildung 7.10: Um einen Faktor 2,5 stärker vergrößerte REM-Aufnahme des benutzten Signaldrahtes (vgl. Abb. 7.8). Die dunkle, rechteckige Fläche des vom Elektronenstrahl chemisch veränderten organischen Ziehmittels veranschaulicht auch die Größe des von der EMA-Analyse erfassten Bereiches. Rechts daneben ist der schuppige Belag zu erkennen, in dem mittels EMA Fluor nachgewiesen wurde.

Kapitel 8

Entwicklung neuartiger Drahtpositionierer

8.1 Nachteile der eingesetzten Draht- positionierer

Um den Signaldraht überall entlang der Röhren mit ausreichender Genauigkeit zu zentrieren, werden, wie bereits erwähnt, alle 80 cm Drahtpositionierer aus Polycarbonat eingesetzt.

Diese Drahtpositionierer (auch als „wire locators“ oder „spacers“ bezeichnet), die beim Prototypen und - weiterentwickelt - auch in den endgültigen Zählern Verwendung fanden, sind zwar optimiert hinsichtlich ihrer Masse und ihrer Eigenschaften, am Draht in die Driftröhren eingezogen zu werden und ihn dort mit ausreichender Genauigkeit zu zentrieren; ihre Verwendung birgt jedoch auch Nachteile:

1. Die Vorbereitung der Drähte mit dem damit verbundenen Ankleben der Drahtpositionierer ist aufwändig, der Klebstoff muss dabei in eine Vertiefung eingebracht werden, die nach einer senkrechten Seite offen ist.
2. Es muss etwa doppelt so viel Draht eingesetzt werden, wie es der Zählerlänge entspricht, da der Abschnitt, an dem der Signaldraht in die Röhren eingezogen wird, verloren geht.
3. Obwohl die Stabilisierungselemente der Drahtpositionierer abgeschrägt gestaltet sind, besteht die Gefahr, dass sie beim Einziehen in die Röhren die Wandung verletzen. Bei Driftröhren mit Kohlenstoffschicht wie beim Prototypen können sie dabei unter Umständen Kohlenstoff ablösen, was einerseits zu verringerter Leitfähigkeit an dieser Stelle führt, andererseits unkontrolliert leitfähiges Material im Röhreninneren freisetzt. Dieser Tatsache wurde bei der Materialauswahl allerdings durch die Wahl von kohlen-

stoffbeladenem KAPTON Rechnung getragen, in dem der Kohlenstoff fest gebunden und über das Wandvolumen verteilt eingearbeitet ist.

4. Beim Einsatz von Klebstoff an den Drahtpositionierern ist eventuell ein Beitrag zur Alterungsneigung des Detektors (s. Abschnitt 7) zu befürchten, andererseits auch ein Entlangkriechen des Klebstoffes am Signaldraht, welches ihn auf einem gewissen Längenabschnitt isoliert und seinen Durchmesser vergrößert, was zu Ineffizienz des Detektors an dieser Stelle führen kann. Demgegenüber verspricht man sich zusätzliche Zentrierung durch die kapillaren Eigenschaften des Klebstoffes, der sich im zentralen Durchstich des Drahtpositionierers zwischen dessen Berandung und den Signaldraht legen soll [60].

8.2 Alternative Drahtpositionierer

Forderungen, die an ein alternatives Drahtpositionierer-Design gestellt werden können, lauten:

1. Einfache Massenfertigung möglichst nur eines Einzelteiles für jeden Röhrendurchmesser.
2. Möglichst einfaches Einsetzen in die Driftröhrchen, wenig aufwändige Zuführung der Positioniererelemente.
3. Ggfs. Fertigung aus Widerstandsmaterial, um die Feldgeometrie und damit die tote Zone der Zähler im Bereich der Drahtpositionierer günstig zu beeinflussen.
4. Keine Verschlechterung der Eigenschaften gegenüber den bisher eingesetzten Elementen.
5. Möglichst geringer Drahtverlust beim Einsetzen (Forderung von untergeordneter Wichtigkeit).

Im Ergebnis kann ein Design vorgeschlagen werden, das auf Drahtpositionierern beruht, die im Laserschnitt-Verfahren (das Wasserstrahlschneide-Verfahren hat sich wegen zu geringer Präzision nicht bewährt) aus Polyurethan-Platten geschnitten werden und in ihrer Form einem Sprengring ähneln (siehe auch Abbildung 8.1):

Je zwei dieser Elemente werden um 180° gegeneinander verdreht um den Signaldraht gelegt, der aus der zentralen Öffnung des Einsetzinstrumentes nachgespeist wird (die Spule befindet sich am anderen Ende), und mit den beiden händisch einzusetzenden Zapfen zusammengefügt, wobei sie zusammengedrückt und auf die beiden Führungsstifte des Einsetzinstrumentes aufgeschoben werden.

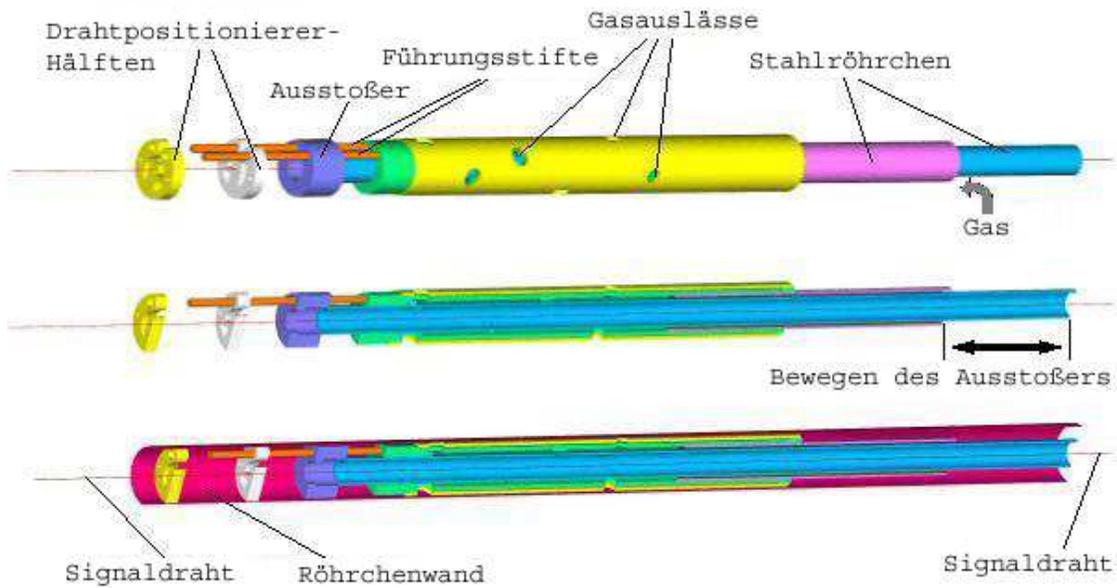


Abbildung 8.1: Absetzwerkzeug (symbolisch) mit aufgestecktem halben Drahtpositionierer. Ein anderer halber Drahtpositionierer ist abgesetzt dargestellt. Das Trägergas strömt zwischen den beiden Stahlröhrchen bis zum Werkzeugkörper, der Signaldraht wird durch das innere Stahlröhrchen zugeführt.



Abbildung 8.2: Fertiges Absetzwerkzeug mit halb ausgefahrenem Ausstoßer.

Sind alle Drahtpositionierer für ein Röhrchen geladen, so wird das Einsatzinstrument mit Stickstoff oder ölfreier Druckluft beschickt, sodass sich der vordere Teil auf einem Gaskissen in das Driftröhrchen einführen lässt. Am Ende wird der durch das innere Metallröhrchen laufende Signaldraht fixiert und das Einsatzinstrument sodann zurückgezogen, wobei sich der Signaldraht von der am anderen Ende befestigten Spule abwickelt. An der Position des ersten Drahtpositionierers wird das erste Kunststoffelement daraufhin durch geeignetes Gegeneinander-Verschieben der beiden Metallröhrchen durch den Ausstoßer von den Führungsstiften abgestreift, vergrößert wegen seiner Elastizität nach Abgleiten von den Führungsstiften seinen Durchmesser und bleibt an dieser Position fixiert. Gleichzeitig werden die beiden Teile des konzentrisch angebrachten Drahtführungsprismas gegeneinander nach außen bewegt und zentrieren den Signaldraht so von vier Seiten. Für das Abstoßen der Kunststoffelemente sollte noch eine geeignete Vorrichtung konstruiert werden, die die beiden Metallröhrchen etwa durch Betätigen eines Pistolengriffes um den richtigen Betrag gegeneinander verschiebt.

Alternatives Design

Aufbauend auf diesen Arbeiten wurde von A. Nawrot, Technische Universität Warschau, eine Modifikation vorgeschlagen, die einen elastischeren Drahtpositionierer, der eine Art Wabenstruktur aufweist, vorsieht. Statt der Führungshülsen am Ausstoßer kommt hier ein dünnwandiger Zylinder zum Einsatz. Vorteile dieses Designs sind in der geringeren Masse des Elementes sowie der nahezu vollkommenen Symmetrie zu sehen, allerdings konnte die Drahtpositionierung im Zentrum, die Produktion sowie das halbautomatische Absetzen bislang nicht zufrieden stellend gelöst werden. Dennoch verdient diese Modifikation, weiter entwickelt und untersucht zu werden.

8.2.1 Fertigung der Elemente

Um die Nachteile einer dem Grunde nach nahe liegenden Fertigung im Spritzguss-Verfahren zu vermeiden, die im hohen Preis einer Spritzgussform liegen, welche bei notwendigen Modifikationen unter Umständen neu angefertigt werden muss, wurden alternative Herstellungsmethoden untersucht:

Die Drahtpositionierer wurden mit verschiedenen Verfahren aus Polyurethan-Plattenmaterial ausgeschnitten. Dem Material war zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften zum Teil Kohlenstoff zugesetzt.

Das Wasserstrahlschnitt-Verfahren bewährte sich nicht, da die zu erzeugenden filigranen Strukturen vor allem im Bereich des Drahtpositionierungsprismas nicht zu erzielen waren. Das Verfahren beruht darauf, dass ein Wasserstrahl, dem ggfs. Reibekörper beigemischt werden, Material abtragen kann. Es wird vor allem in der Textil- und Kartonagenherstellung eingesetzt und eignet sich zudem zum Bearbeiten von Holz, aber auch Kunststoffen.

Einzig das Laserschnitt-Verfahren war in der Lage, mechanisch ausreichend präzise Ergebnisse zu liefern. Hierbei evaporiert ein gepulster Laserstrahl das zu entfernende Material. Es zeigte sich, dass Schnitte, die an einer definierten Position enden sollen, wie etwa im Zentrum des Drahtpositionierers im Falle der von A. Nawrot vorgeschlagenen Elemente, nicht an dieser Position begonnen werden können, sondern dort enden sollten. Das Einschalten des Laserstrahls verursacht stärkere Evaporation, sodass der Schnitt sich an eben dieser Stelle weitet. Beim Abschalten des Strahls tritt dieser Effekt nicht ein.

8.2.2 Untersuchungen an den Drahtpositionierern

Um ihre Tauglichkeit für den Einsatz in Driftröhrchen zu untersuchen, wurden einerseits mechanische Absetz- und Stabilitätsuntersuchungen vorgenommen, andererseits aber auch die Eigenschaften eines damit ausgestatteten Zählers untersucht.

Mechanische Untersuchungen

Versuchsweises Absetzen der Drahtpositionierer in einem Glasröhrchen machte deutlich, dass dieser Prozess mit dem Absetzinstrument problemlos und wenig zeitaufwändig zu beherrschen ist. Ein versehentlich verkantetes Absetzen ist aufgrund der Elementgeometrie nicht möglich, was im durchsichtigen Glasröhrchen gut verfolgt werden konnte.

Um ein Verrutschen der Drahtpositionierer während des Transports oder Einsatzes des Zählers auszuschließen, wurde ein 25 cm langes Driftröhrchen, das einen Drahtpositionierer enthielt, aus verschiedenen Höhen senkrecht auf eine ebene Fläche fallen gelassen. Es zeigte sich, dass bis zu einer Fallhöhe von 20 cm keine messbare Verschiebung des Positionierers im Röhrchen festzustellen war. Nachdem Beschleunigungen dieser Größenordnung weder beim Transport noch beim Einsatz der Zähler auftreten, dürfte ein Verlassen der Nominalposition nach Absetzen der Zähler an der nämlichen nicht zu befürchten sein.

Untersuchungen am Teststrahl

Zwei der Hauptkriterien, nach denen Drahtpositionierer ausgewählt werden, sind einerseits ihre Positioniereigenschaften und andererseits die Beeinträchtigung der Zählerfunktion durch sie, da sich bei jedweder Modifikation des elektrischen Feldes durch Einbringen von Material ein Effizienzverlust ergibt.

Hinsichtlich beider Kriterien wurden Messungen an verschiedenen Drahtpositioniererausführungen gemacht. An dieser Stelle sei nur auf die in der Produktion eingesetzte klassische Ausführung und die unter beiden Aspekten beste Alternative – ein Sprengring-Positionierer aus Polyurethan ohne Kohlenstoffbeladung – eingegangen:

Zur Bestimmung der Positioniereigenschaften konnte auf eine Röntgenanlage zurückgegriffen werden, mit der am C.E.R.N. Myon-Driftrohre für das ATLAS-Spektrometer vermessen werden [27]. Sie ist in Abbildung 8.3 gezeigt. Ein Röntgenstrahl mit einer Querschnittsfläche von $30 \mu\text{m} \times 8 \text{mm}$ wurde kontinuierlich über das zu untersuchende Objekt geführt. Hinter dem Objekt wurde die von einem Szintillator abgegebene Zählrate mit einer Integrationszeit von 40 ms bestimmt, die dann in Abbildung 8.4 als Funktion des Ortes aufgetragen wurde. Die Absorptionsbereiche der Röhrenwände und des Signaldrahtes sind deutlich zu erkennen. Der nicht ganz wie auf Grund der zylindrischen Geometrie zu erwarten ausgebildete Abfall an den Röhrenwandungen lässt sich mit dem möglicherweise ungleichmäßigen Auftrag von so genanntem Spindelspray erklären, der wegen seines Gehalts an Elementen mit hoher Kernladungszahl gute Röntgen-Absorptionseigenschaften aufweist und deswegen zur Sichtbarmachung des Materials eingesetzt wurde.

Die mechanische Genauigkeit des Aufbaues beträgt $10 \mu\text{m}$ [27].

Nachdem die Drahtposition nur relativ zur Rohrwandung bestimmt werden kann, was andererseits aber auch die Funktion eines Drahtpositionierers reflektiert, geht der oben angesprochene Fehler auch als systematischer Messfehler in die Bestimmung der Drahtposition ein. Obwohl nur in Strahlrichtung gemessen werden konnte, weswegen eine Aussage über die absolute Lage des Drahtes im Raum aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden kann, ist doch zu erkennen, dass sich der getestete neue Drahtpositionierer und das Vergleichsstück sehr ähnlich verhalten. In der gemessenen (zufälligen) Raumlage weichen die beiden Drahtpositionen um $(0,06 \pm 0,02) \text{mm}$ voneinander ab, was zumindest von der Größenordnung her gut konform geht mit dem theoretischen Wert der maximalen Abweichung von der Mittellage beim Vergleichsstück, welcher $\pm 0,035 \text{mm}$ beträgt (vgl. Fußnote S. 127).

Im Lichte der Ergebnisse erscheint eine weitere Verfolgung des vorgestellten Konzeptes sinnvoll, wobei vor Allem den elektrischen Eigenschaften Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Insbesondere ist zu prüfen, ob das Prisma, das sich nach dem Spreizen des Kunststoffelements zur Drahtzentrierung ergibt, Funkenerosion hervorruft, ob also Material aufgrund von elektrischen Überschlügen abgetragen wird. Es ist vorstellbar, dass der Draht bei längerem Einsatz der Elemente auf diese Weise den mechanischen Kontakt zum Drahtpositionierer verliert und daher von ihm nicht mehr zentriert werden kann [68].

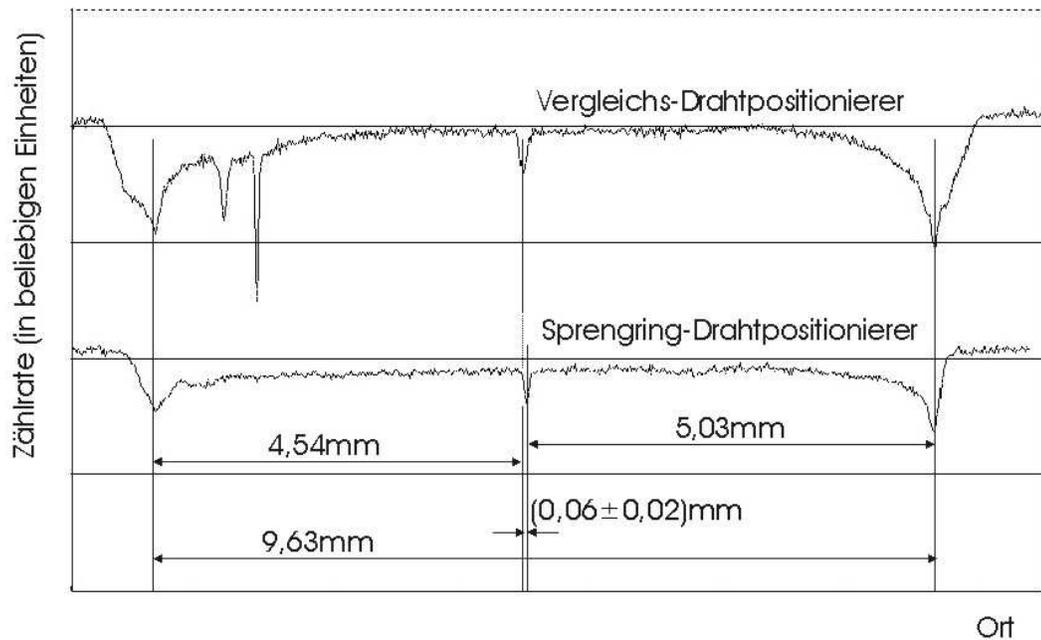
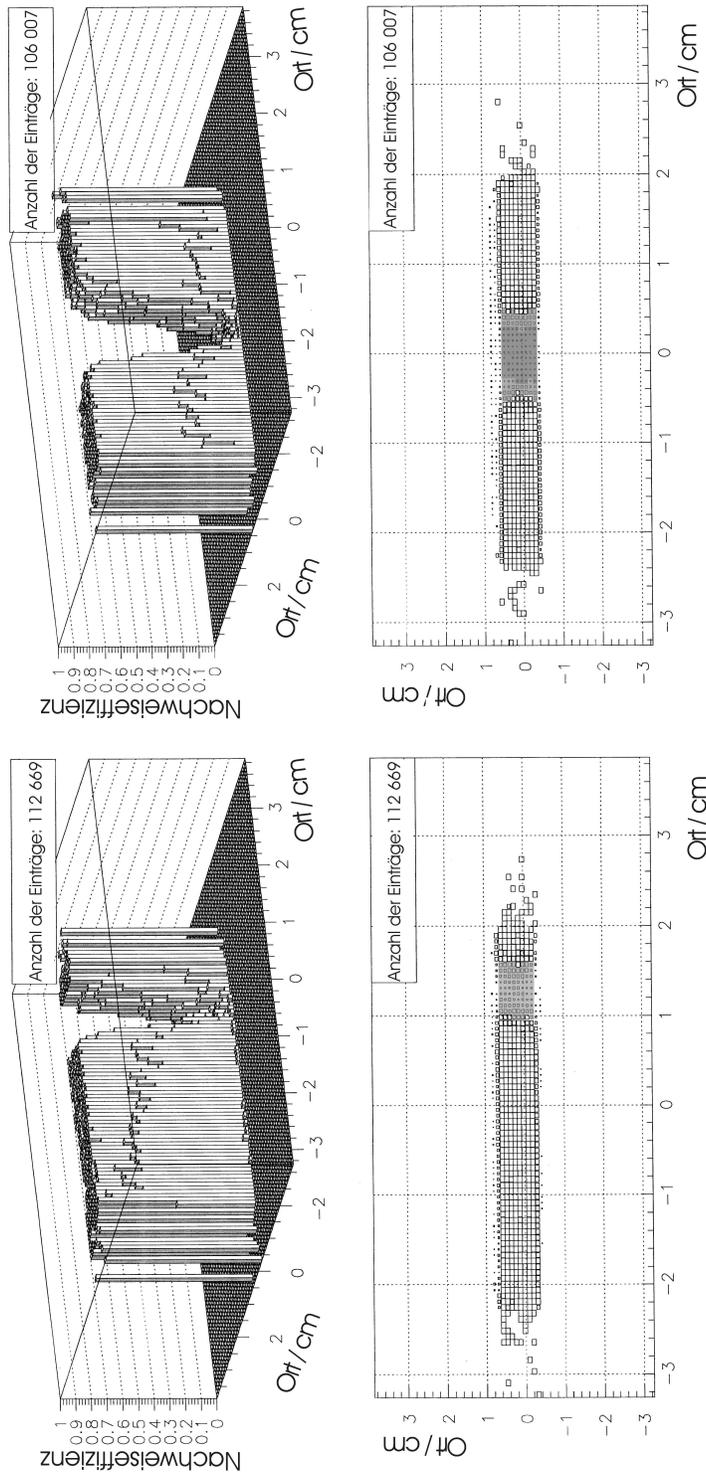


Abbildung 8.4: Röntgen-Querschnittsmessung durch die Teströhrchen zur Bestimmung der Drahtpositioniereigenschaften. Der angegebene Messfehler bezieht sich nur auf die Bestimmung des Abstandes der beiden gemessenen Drahtpositionen im Diagramm. Bei der Absolutposition kann von einem zusätzlichen Fehler von $\pm 0,05$ mm ausgegangen werden. Die beiden Absorptionsspitzen im linken Bereich des oberen Diagrammes stammen von Referenzdrähten der Apparatur und sind hier ohne Bedeutung.



Fester Vergleichs-Drahtpositionierer aus Polycarbonat,
wie in der Driftkammerstation 2 eingesetzt

Sprengring-Drahtpositionierer aus Polyurethan
(ohne Kohlenstoffbeladung)

Abbildung 8.5: Nachweiseffizienz von 10-mm-Test-Driftröhrchen, die mit einem neuartigen (links) und einem konventionellen Drahtpositionierer (rechts) ausgestattet waren. Der (kleinere) ineffiziente Bereich links unten (Sprengring-Drahtpositionierer) wurde zum Vergleich dunkelgrau in die Darstellung rechts unten übertragen.

Kapitel 9

In der Fertigung eingesetztes Material

Unter den bislang diskutierten Einzelteilen, aus denen die Driftkammern gefertigt werden, bestimmen wegen ihres Einflusses auf die Drahtzentrierung insbesondere die Drahtpositionierer und die Endkappen die mechanische Genauigkeit eines einzelnen Driftröhrchens und damit einer Strohalm-Doppelebene.

9.1 Drahtpositionierer

Die Drahtpositionierer werden im Spritzgussverfahren aus Polycarbonat gefertigt. Die Geometrie ist aus Abbildung 9.1 ersichtlich.

Die drei Flügel am äußeren Umfang sind so geformt, dass sich der am Signaldraht befestigte Positionierer leicht in die Röhrchen einführen lässt. Er klemmt spielfrei im Röhrchen, weswegen die Drahtpositioniereigenschaften ausschließlich von Lage und Durchmesser der zentralen Öffnung (Durchmesser: $100\ \mu\text{m}$) bedingt werden. Ohne den Einfluss des Klebstoffes (vgl. Abschnitt 4) und unter der Annahme absolut konzentrischer Lage der Öffnung kann der Draht also um maximal $35\ \mu\text{m}$ von der zentralen Lage abweichen ($(\text{Lochdurchmesser} - \text{Drahtdurchmesser})/2 = 35\ \mu\text{m}$).

Versuche ergaben weiterhin, dass die Signaldrahtoberfläche beim Aufschieben der Drahtpositionierer nicht beschädigt wird.

9.2 Endkappen

Herstellungsverfahren und Material der Endkappen sind dieselben wie bei den Drahtpositionierern, die Bauform ist aus Abbildung 9.2 ersichtlich. Lediglich die an der physischen Öffnung eingesetzten werden - wegen der geringen erforderlichen Stückzahl - in einem spanenden Verfahren aus Polycarbonat-Halbzeugen

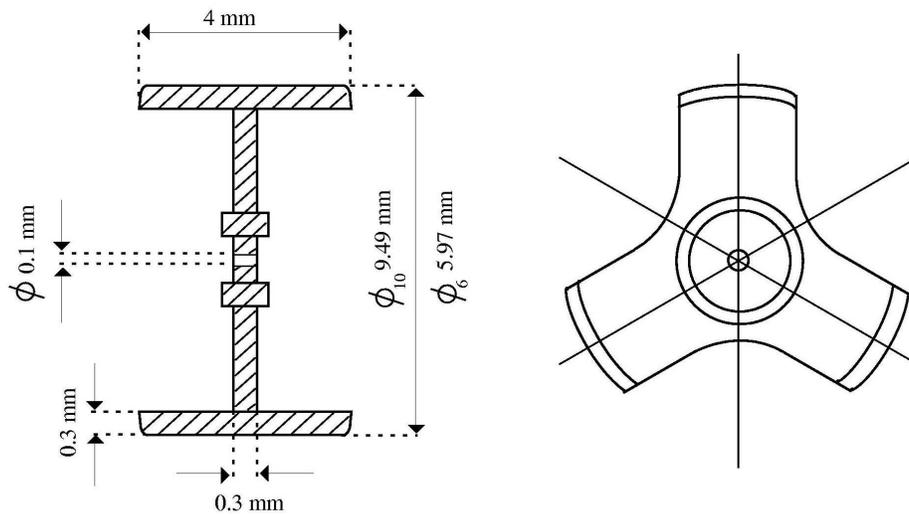


Abbildung 9.1: Drahtpositionierer-Bauform, wie sie in der Massenfertigung der Stroh-Driftkammern verwendet wird. Das Element wird im Spritzguss-Verfahren aus Polycarbonat hergestellt. Die beiden Durchmesserangaben beziehen sich auf die unterschiedlichen Ausführungen für die beiden Röhrchendurchmesser.

gefertigt. Gleiches gilt im Übrigen für den Gaskanal aus Fiberglas, der mit ihnen verbunden wird.

Messungen und theoretische Berechnungen zu den Strömungswiderständen der Gaskanäle in den Endkappen werden im Abschnitt 12.2 dargestellt. Dort wird auch die Auswirkung dieser Parameter auf die Konstanz der Zählgasmischung diskutiert.

9.3 Eigenschaften des Driftrohrmaterials

Herstellbarkeit, Funktion und Eignung der Stroh-Driftkammern für den beabsichtigten Einsatzzweck hängen entscheidend von den mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Röhrchenmaterials ab, weswegen die wesentlichen Anforderungen in diesem Abschnitt dargestellt werden sollen.

9.3.1 Anforderungen an das Driftrohrmaterial, Auswahlkriterien

Um die Funktion des Drift Röhrchens zu gewährleisten, muss die Innenfläche als Kathode und damit elektrisch leitend ausgeführt sein. Der Flächenwiderstand

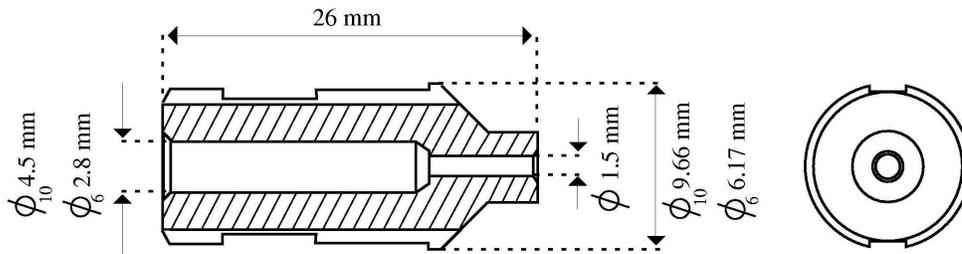


Abbildung 9.2: Endkappe, wie sie in der Massenfertigung der Stroh-Driftkammern verwendet wird. Das Element wird im Spritzguss-Verfahren aus Polycarbonat hergestellt. Die beiden Durchmesserangaben beziehen sich auf die unterschiedlichen Ausführungen für die beiden Röhrendurchmesser.

kohlenstoffbeladener Polyimidfolie (KAPTON XC) beträgt $500 \Omega/\square$ ([49], ohne Fehlerangabe).

Die elektrische Leitfähigkeit der Kathode ist aus zwei Gründen wichtig:

Sie erzeugt das elektrische Feld innerhalb der Röhren und ermöglicht den Gleichstrom-Komponenten des Signals, zur Erde abzufließen. Ihr Widerstand muss klein genug sein, damit der von diesem Strom erzeugte Spannungsabfall die Gasverstärkung nicht signifikant beeinflusst. Für typische Gasverstärkungswerte reicht ein Kathoden-Gleichstromwiderstand in der Größenordnung von $100 \text{ k}\Omega$ aus [49].

Weiterhin muss gute Signalleitung gewährleistet sein, ebenso wie das Übersprechen zwischen benachbarten Kanälen gering sein soll. Je geringer der Gesamtwiderstand der Kathode ist, desto bessere Eigenschaften hat der Zähler in dieser Hinsicht. Simulationsrechnungen von Zaremba und Marzec [49] zufolge reichen die elektischen Eigenschaften aus KAPTON XC hergestellter Strohhalme aus, um daraus hergestellte Stroh-Driftröhren den an anderer Stelle formulierten Anforderungen entsprechend betreiben zu können, was bedeutet, dass die durch die elektronische Auslese (Schwellensetzung des ladungsempfindlichen Vorverstärkers) bedingte Auflösungsver schlechterung dominiert.

Die Einhaltung der Durchmessertoleranz bei der Fertigung wurde nach Lieferung an das VIK Dubna für jedes Röhren einzeln mit einem Grenz-Lehrdorn geprüft.

9.3.2 Wasseraufnahme durch das Driftrohrmaterial

Obwohl vom Hersteller der Polyimidfolie bereits Datenmaterial vorlag [29], wurden Laborexperimente durchgeführt, um eine mögliche Modifikation der hygroskopischen Eigenschaften durch Aluminisierung, Kohlenstoff-Beladung oder die Verwendung von thermisch polymerisierendem Klebstoff bei der Röhrenherstel-

lung nachzuweisen. Das Verhalten der Röhrrchen unter Feuchteinfluss kann von entscheidender Bedeutung sein, da etwa geringe Längenänderungen bei beidseitiger Einspannung der Röhrrchen zu erheblicher Veränderung der Geometrie des elektrischen Feldes, unter Umständen sogar zu Kurzschluss, führen können, wenn sich die Halme durchbiegen.

Zu diesem Behufe wurden je etwa 12 g der Röhrrchen für 1h in Wasser gelegt, um einerseits völlige Sättigung zu erreichen, andererseits aber einer Zerstörung der Klebstoffschicht vorzubeugen, wie sie bei ähnlichen Versuchen aufgetreten ist, nachdem für den ATLAS-TRT-Detektor vorgesehene Röhrrchen für 24 h gewässert worden waren [47]. Anschließend wurden die flüssige Phase an der Oberfläche abgeschleudert und die Röhrrchen nach etwa 10-minütiger Trocknung, während derer eventuelle Reste flüssigen Wassers verdunsten konnten, einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre ausgesetzt.

Nach Wägung wurden die Röhrrchen in einem konstant auf 50°C gehaltenen Ofen getrocknet. Die Abnahme ihrer relativen Masse wurde beobachtet, sodass der ursprünglich eingelagerte Wasseranteil bestimmt werden konnte. Auf eine Darstellung des zeitlichen Verlaufes dieser relativen Masse und etwa die Bestimmung einer Zeitkonstanten wurde verzichtet, da anhand dieser Daten keine Aussage über das Trocknungsverhalten bei Raumtemperatur möglich wäre.

Es zeigt sich, dass die KAPTON-Röhrrchen unabhängig von ihrem Durchmesser etwa 1 % ihrer Masse an Wasser aufnehmen können.

Völlig trockene Röhrrchen sind stark hygroskopisch, in Luft von ca. 60 % relativer Feuchte etwa nehmen sie Wasser mit einer Zeitkonstanten¹ von (40 ± 10) min auf. Die zeitliche Dynamik dieses Vorgangs ist aus Abbildung 9.3 ersichtlich.

9.3.3 Längenänderung als Funktion von Temperatur und Feuchte

Die Fähigkeit des Materials, Wasser aufzunehmen, beeinflusst neben seinen dielektrischen auch die mechanischen Eigenschaften. Entscheidend für die Konstruktion der Zähler ist vor allem der Einfluss des Wassergehaltes auf die mechanische Länge der Röhrrchen:

Mit dem Wissen um die Zeitkonstanten, mit denen die Wasseraufnahme erfolgt (siehe Abschnitt 9.3.2), konnte ein zweiter Versuch konzipiert werden, in dem jeweils ein 840 mm langes Röhrrchen der jeweiligen Art in einem Klimaschrank, in dessen Innenraum Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit in weiten Grenzen frei gewählt werden konnten, den jeweiligen Bedingungen ausgesetzt wurde, wobei gleichzeitig für rasche Umwälzung der Luft gesorgt wurde. Die automatische Steuerung dieser Parameter wurde so programmiert, dass die Strohhalme bei gegebener Temperatur einer Atmosphäre von 80 % relativer Feuchtigkeit ausge-

¹Diese Zeitkonstante sei definiert als die Zeit, während derer das Material den Bruchteil 1/e seiner Kapazität an Wasser aufnimmt.

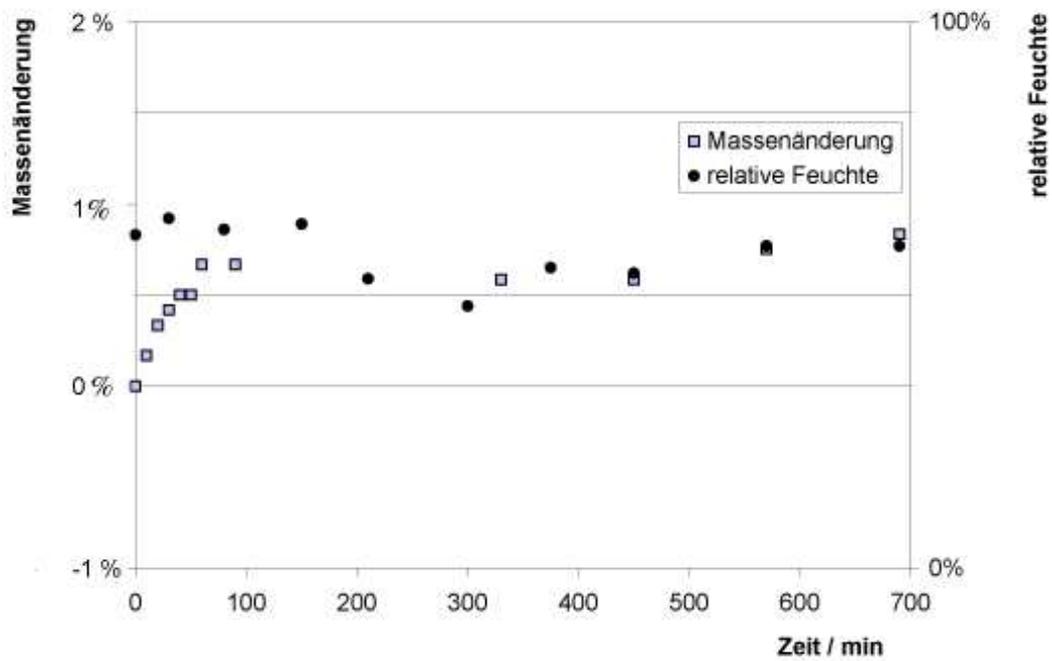


Abbildung 9.3: Wasseraufnahme völlig getrockneter KAPTON-Röhrchen, die einer Atmosphäre einer relativen Feuchte von etwa 60 % ausgesetzt wurden. Dargestellt ist die Abweichung des Quotienten aus der Masse des feuchten und des völlig getrockneten Proberöhrchens von 1.

setzt waren, deren Wasserdampfsättigung innerhalb von 4 h gleichmäßig auf 5 % zurückgeführt wurde, wobei die Temperatur nach jedem dieser Zyklen beginnend mit 40°C um 10 K bis auf 10°C reduziert wurde. Darüber hinaus wurde auch bei 15°C gemessen, um im Bereich der häufig in der Experimentierhalle herrschenden Bedingungen ein genaueres Bild zu erhalten. Die Richtung von feucht nach trocken wurde gewählt, da wegen der unbekannt, aber möglicherweise längeren Zeitkonstanten, mit denen die Feuchtigkeitsabgabe des Materials erfolgt (vgl. voriger Abschnitt), der Feuchtigkeitsgradient in der Zeit in abnehmender Richtung ohnehin gering gehalten werden musste, wohingegen die trockenen Röhrchen Wasser bekanntermaßen schnell aufnehmen. Aus technischen Gründen kann die Luft im Klimaschrank rasch befeuchtet, aber nur langsam getrocknet werden, weswegen sich diese Gestaltung der Messzyklen auch deshalb anbot. Der zeitliche Verlauf der beiden Parameter Temperatur und relative Feuchte ist zusammen mit der daraus resultierenden Längenänderung des 10-mm- \varnothing -KAPTON-Röhrchens in Abbildung 9.4 dargestellt.

Die Änderung der Länge des Proberöhrchens wurde mit einem Laser-Extensometer bestimmt, wozu das Röhrchen am einen Ende fixiert und am anderen mit einem Aluminiumreflektor versehen wurde, auf den das Extensometer blickte. Bei den Messungen unter Temperaturänderung kann davon ausgegangen werden, dass die Apparatur aus Invarstahl ihre Länge nicht ändert.

Abbildung 9.5 zeigt eine Darstellung des Messprinzips (Triangulation): Ein Laserstrahl wird auf das Objekt gerichtet, dessen Entfernung vom Extensometer bestimmt werden soll, in diesem Fall der Aluminiumreflektor am Strohhalmenende. Der Lichtpunkt auf dem Objekt wird unter Nutzung des diffus reflektierten Lichtes auf eine abseits von der Achse des Laserstrahls angebrachte Photodiodenzeile abgebildet. Der Ort des Bildes auf dieser Zeile hängt von der Länge des zu bestimmenden Abstandes zwischen Extensometer und Reflektor ab.

Die für ein 10-mm-Kapton-Röhrchen in Abbildung 9.6 dargestellten Messergebnisse legen den Schluss nahe, dass der Temperatureinfluss gegen den der Feuchtigkeit vernachlässigt werden kann, wobei die beim Einsatz der Strohhalmkammern im Spektrometer zu erwartenden Temperatur- und Feuchtigkeitswerte in dem vom Versuch abgedeckten Bereich liegen dürften. Die somit unter Feuchtigkeitseinfluss zu erwartende maximale Verlängerung ΔL beim Einbau völlig trockener Röhrchen und extremer Befeuchtung liegt für die längsten (horizontalen) Strohhalme der Länge 3658 mm bei

$$\Delta L = 3658 \text{ mm} \cdot \frac{2,2 \text{ mm}}{840 \text{ mm}} \approx (10 \pm 1) \text{ mm},$$

wobei ein Messfehler von 1 mm als realistisch angenommen werden kann. Die Frage, ob der Längenzuwachs eher durch Stauchung der Röhrchen oder Ausweichen der Ebene in Richtung ihre Normalen ausgeglichen wird, kann damit jedoch nicht beantwortet werden, sie bedarf weitergehender Untersuchung. Zumindest steht die Dimension der gemessenen möglichen Längenänderung aufgrund von

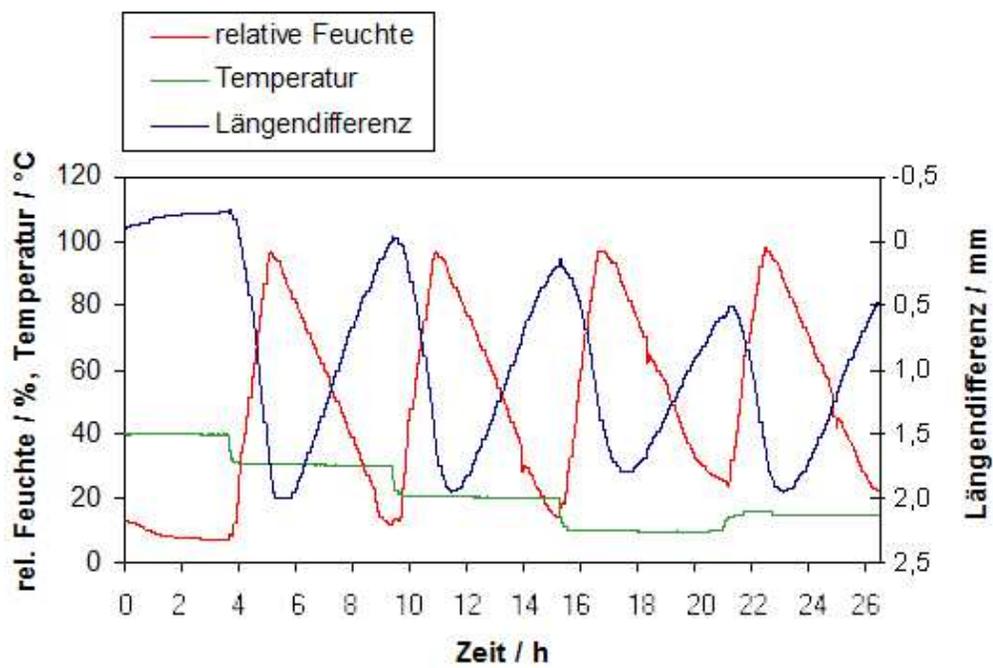


Abbildung 9.4: Variation von Temperatur und relativer Feuchte im Klimaschrank. Daraus resultierend: Änderung der Länge eines 840 mm langen KAPTON-Röhrchens von 10 mm Durchmesser. Man beachte die inverse Orientierung der Längendifferenzskala.

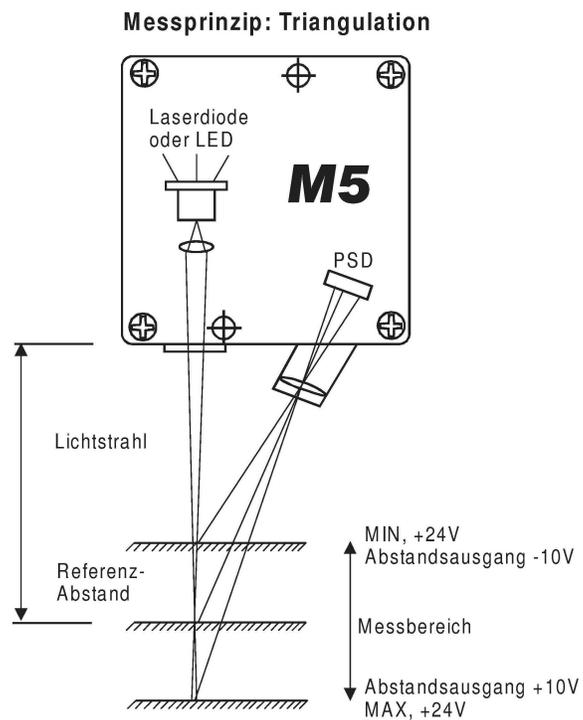


Abbildung 9.5: Zur Funktion des Laser-Extensometers [50]: Das vom Objekt reflektierte Laserlicht wird auf eine Photodiodezeile abgebildet. In Abhängigkeit von der Länge des zu bestimmenden Abstandes liegt das Bild des Lichtpunktes auf dem Objekt an einem jeweils anderen Ort entlang dieser Zeile.

Feuchteinfluss nicht a priori im Widerspruch zu dem beobachteten Biegephänomen (siehe Abschnitt 10.4.2), da sich diese zusätzliche Distanz bei der vorliegenden doppelagigen Ausführung der Röhrchen, im Falle der längsten 10-mm-Strohhalme, auf etwa 700 Windungen, also Folienstöße, je Röhrchen, verteilen würde. Es ist durchaus vorstellbar, dass jeder dieser Folienstöße einen signifikanten Bruchteil dieser Länge ((10 ± 1) mm), also maximal etwa $\frac{1}{70}$ mm, aufnehmen kann. Eine Aufnahme eines durch Feuchtigkeit verbogenen Kammerbereiches findet sich in Abbildung 10.11.

Dass die Eigenschaften von KAPTON durch Feuchtigkeit beeinflusst werden, bestätigt auch der Hersteller DuPont de Nemours S. A., der dazu in [29] ausführt, dass der Kunststoff durch eine Polykondensationsreaktion erzeugt werde (also eine Reaktion, wie sie beispielhaft in Gleichung 7.2 aufgeführt ist). 50 % relative Feuchte entspreche 1,8 % Wassergehalt, 100 % relative Feuchte 2,8 % - völliger Sättigung. Das ist etwa der doppelte bis dreifache Wert des hier gemessenen maximalen Wassergehaltes, was aber nachvollziehbar ist, da sich die Herstellerangaben auf Polyimidfolie ohne Kohlenstoffbeladung (KAPTON HN) beziehen.

Von DuPont wurde zwar nicht die Änderung der räumlichen Ausdehnung des Materials als Funktion der relativen Feuchte gemessen, wohl aber die Permittivitätszahl, die insofern für zukünftige weitere Untersuchungen ein geeigneter und leicht zu erfassender Indikator für den Wassergehalt der Folie sein dürfte.

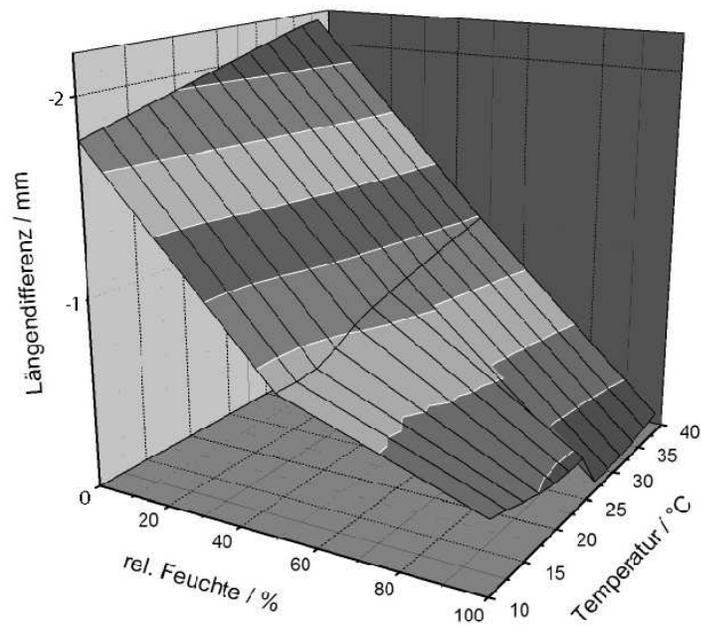


Abbildung 9.6: Längenänderung eines 840 mm langen 10-mm-KAPTON-Röhrchens als Funktion von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit. Die Inkonsistenz der Messwerte im Bereich hoher Feuchtwerte ist auf Beschlag der Optik des Laser-Extensometers zurück zu führen. Der statistische Fehler eines jeden Punktes auf der Fläche ist auch unter Berücksichtigung dieser Tatsache kleiner als $\pm 0,2$ mm.

Kapitel 10

Untersuchung der ersten fertiggestellten Kammer am Teststrahl

Nach Ankunft der ersten zum Einsatz im Spektrometer bestimmten Kammer am C.E.R.N. wurde an einem Teststrahl überprüft, ob ihre Parameter den Spezifikationen entsprechen, und ob sich die Eigenschaften der getesteten Prototypen mit einem Zähler endgültiger Größe reproduzieren lassen.

Das Teststrahlexperiment lieferte in erster Linie Aufschluss über die Ortsauflösung und die Nachweiseffizienz in Abhängigkeit von den Ortskoordinaten des Teilchendurchganges auf der Zählerfläche, sowohl in axialer als auch radialer Richtung des Driftröhrchens.

10.1 Teststrahlaufbau

Zur Untersuchung des Zählers stand am C.E.R.N. ein Protonenstrahl des Impulses $8 \text{ GeV}/c$ und der Flussrate $1 \cdot 10^5 \text{ Protonen}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ zur Verfügung, weswegen sich keine Hochratenexperimente durchführen ließen (vgl. die Untersuchung der Prototypen, dargestellt in Abschnitt 6.1). Als Spurverfolgungssystem konnten Szintillatorfaser-Detektoren eingesetzt werden. Die Strohhalmkammer selbst wurde in einem Aluminiumrahmen aufgehängt, der einerseits auf Rollen stand und so eine Verschiebung der Kammer in horizontaler Richtung gestattete, in dem die Kammer aber andererseits auch an zwei elektrisch betriebenen Flaschenzügen auf- und abbewegt werden konnte. Der Aufbau ist in Abbildung 10.1 schematisch dargestellt.

10.1.1 Spurverfolgungssystem

Sowohl für die Analyse der Ortsauflösung, als auch die Untersuchung der Nachweiswahrscheinlichkeit werden Referenzzähler benötigt, die den Ort bestimmen, an dem eine Teilcentrajektorie die Strohkammer durchsetzt.

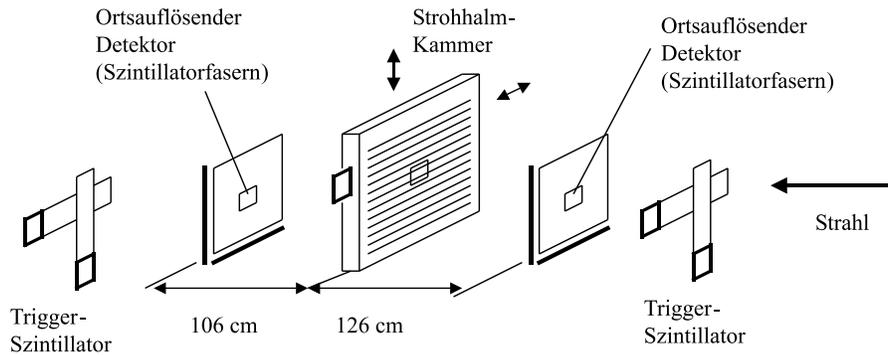


Abbildung 10.1: Der Testaufbau, im Wesentlichen bestehend aus einem Triggersystem, ortsauflösenden Szintillatorfaser-Detektoren vor und hinter dem zu untersuchenden Zähler und einem beweglichen Rahmen (hier nicht dargestellt), mit dem die Strohalmkammer relativ zu Strahl und Spurverfolgungssystem in zwei Raumrichtungen bewegt werden konnte.

Als Spurverfolgungssystem konnten die für den späteren Einbau in das COMPASS-Spektrometer vorgesehenen Szintillatorfaser-Detektoren aus Nagoya (Japan) benutzt werden. Ihr Aufbau ist schematisch in Abbildung 10.2 gezeigt. Die Fasern sind in Strahlrichtung in 7 Lagen angeordnet, um ausreichend Licht für die Auslese zu erzeugen. Sie sind bereits im aktiven Bereich wie ein Lichtleiter gestaltet, also mit - in diesem Fall zwei - nicht szintillierenden Außenschichten (in der Regel als „Cladding“ bezeichnet) versehen, die den für die Funktion eines Lichtleiters wichtigen Brechungsindexsprung auch bei Berührung von außen sicherstellen.

Eine Möglichkeit, genauere Informationen über die mit dem Spurverfolgungssystem gewonnenen Teilchentrajektorien zu erlangen, wäre die gezielte Auswertung von Spuren, die Einträge in zwei sich überlappenden Szintillatorfasern erzeugen. Weil der Anteil solcher Spuren an der Gesamtheit aller Trajektorien unter

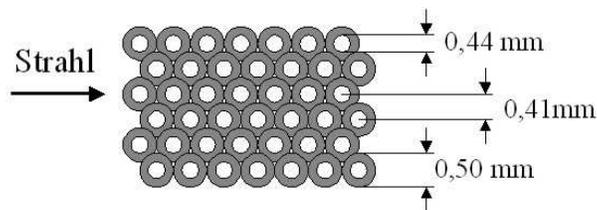


Abbildung 10.2: Schematische Darstellung der zur Spurverfolgung eingesetzten Szintillatorfaser-Detektoren.

10 % lag (Überlapp der Szintillatorfaserlagen: $0,03 \text{ mm}/0,41 \text{ mm} \approx 0,073$) und ein Verwerfen aller anderen Spuren die Statistik somit erheblich eingeschränkt hätte, wurde auf eine dahingehende Analyse verzichtet.

10.1.2 Der Trigger

Zur Messung der Driftzeit muss ein Signal erzeugt werden, mit dem das Chronometer¹ gestartet bzw. gestoppt wird (vgl. hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.1.1).

Als Trigger wurden die beiden strahlaufwärts zur Strahldefinition angebrachten Szintillationsdetektoren (gemeinsame Fläche: $5 \times 5 \text{ cm}^2$) verwandt, die strahl-abwärts stehenden wurden lediglich zur Kommissionierung des Systems benutzt. Während des Experimentes lieferten sie nur redundante Information. Das von den strahlaufwärts eingesetzten Zählern erzeugte Signal diente als Stopp-Information.

Bei der Auswertung der Daten ist ein Spezifikum der TDC-Funktion zu beachten: Ein kontinuierlich arbeitender (Mehrfach-)TDC kann als sich drehende Trommel verstanden werden, auf die die Start- und Stoppsignale von einem festen Ort aus geschrieben werden. Ihnen wird auf diese Weise eine Kanalnummer zugeordnet, die nur von der Vorgeschichte des Systems, also der Winkelposition eines Punktes auf der Trommel zu einem beliebigen Zeitpunkt, abhängt. Die vom TDC ausgegebene Maschinenzahl T für den zeitlichen Abstand von Start- und Stoppsignal ergibt sich mit der Kanalbreite des verwendeten TDCs von 130 ps dann zu

$$T_n = |k_{n, \text{Stopp}} - k_{n, \text{Start}}| \cdot 130 \text{ ps} , \quad (10.1)$$

wobei $k_{n, \text{Start}}$ und $k_{n, \text{Stopp}}$ die beiden zum selben Ereignis n gehörigen Einträge für Start und Stopp bedeuten.

Die Regel ist nun, dass zwischen der Rotation der Trommel und dem Eintreffen der Start- und Stoppsignale keinerlei Korrelation besteht, weswegen es bei einem Bruchteil $< t_{\text{Drift}} > / t_{\text{TDC}, \text{max}}$ (mit $< t_{\text{Drift}} >$: mittlere Driftzeit und $t_{\text{TDC}, \text{max}}$: maximale Zeitspanne, die der TDC in eine Maschinenzahl umsetzen kann) der Ereignisse zu einer Art Pseudo-Überlauf kommt: Damit ist gemeint, dass die mit dem Stoppsignal belegte Kanalnummer kleiner ist, als die des Startsignals², weil der Abschnitt auf dem Trommelumfang, der der zu registrierenden Zeitspanne entspricht, über den Anfang der Kanalnummerierung hinweggeht. Korrekterweise gibt der TDC keinen Überlauf aus, allerdings entspricht die nach Gleichung 10.1 berechnete Zeit in Wahrheit der Zeit $t_{\text{TDC}, \text{max}} - t_{\text{Drift}, n}$ ($t_{\text{Drift}, n}$: Driftzeit des in

¹Hier selbstverständlich eine Schaltung, die die Zeitspanne zwischen Start- und Stoppsignal in eine Maschinenzahl umsetzt, ein sogenannter Time-to-Digital-Converter, kurz TDC.

²Start- und Stoppsignal sind hier auf die Steuerung des TDC bezogen zu verstehen, unabhängig davon, ob das „Common-Start-“ oder das „Common-Stop-Regime“ gewählt wurde, vgl. hierzu Abschnitt 4.1.1.

Rede stehenden Ereignisses). Abbildung 10.4 zeigt beispielhaft ein solches TDC-Spektrum. Der Bruchteil der Ereignisse, die aufgrund dieses Effektes am Ende des Spektrums eingetragen werden, beläuft sich bei einer mittleren Driftzeit von 30 ns auf $30 \text{ ns} / (64\,000 \text{ Kanäle} \cdot 130 \text{ ps/Kanal}) \approx 4 \cdot 10^{-3}$. Diese Zahl entspricht dem Verhältnis der Zahl der Einträge im rechten Kästchen in Abbildung 10.4 zur Summe der Einträge in beiden Kästchen.

10.2 Analyse der Ergebnisse

Der unter dem Gesichtspunkt des geringsten Messfehlers geeignetste Ort, den zu untersuchenden Zähler anzubringen, ist die Mitte zwischen den beiden Teilen des Spurverfolgungssystems, da dort die Quadrate der Messfehler der beiden Spurverfolgungsdetektoren im Mittel gleich groß und somit die Quadratwurzel aus ihrer quadratischen Summe am kleinsten ist.

Bei einer Triggerrate von $9,7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ wurden an dieser Stelle die Nachweiseffizienz und die Ortsauflösung bestimmt, wobei zu berücksichtigen war, dass die Messgenauigkeit des Spurverfolgungssystems dort $85 \text{ } \mu\text{m}$ beträgt, wozu noch ein Fehler von $35 \text{ } \mu\text{m}$ aufgrund der Vielfachstreuung der Strahlteilchen oben angegebenen Impulses in der Luft kommt.

Im Übrigen sei an dieser Stelle nochmals auf den Einfluss der Triggerschwelle verwiesen, die am ladungsempfindlichen Vorverstärker eingestellt wird, siehe hierzu Abschnitt 4.1.2. Mit einer Steuerspannung von 1500 mV , mit der am verwendeten ASD8-Vorverstärker die Schwelle gesetzt wird, konnte noch eine ausreichende Signalerkennung realisiert werden. Umgerechnet auf eine Ladungsmenge mussten mindestens $8,0 \text{ fC}$ auf dem Signaldraht deponiert werden, um den Trigger auszulösen.

10.2.1 Ortsauflösung

Die Untersuchungen orientieren sich an dem Verfahren, das auch bei der Analyse der mit Zähler-Prototypen gewonnenen Daten angewandt worden ist [61], siehe Abschnitt 6.1. Es sei an dieser Stelle daher nur kurz in Erinnerung gerufen: Es wurden die Verteilung derjenigen von den Szintillatorhodoskopen gemessenen Ortskoordinaten bestimmt, denen Driftzeiten zugeordnet sind, die in einem Intervall von $0,3 \text{ ns}$ um mehrere gegebene, feste Driftzeiten aus der Menge aller möglichen plausiblen Driftzeiten liegen.

Für drei Driftzeitintervalle, nämlich für die 10-mm-Röhrchen bei $35,0\text{-}35,3 \text{ ns}$, $50,0\text{-}50,3 \text{ ns}$ und $70,0\text{-}70,3 \text{ ns}$ und für die 6-mm-Röhrchen bei $35,0\text{-}35,3 \text{ ns}$, $50,0\text{-}50,3 \text{ ns}$ und $65,0\text{-}65,3 \text{ ns}$, wurden die Daten ausgewertet. Auch in diesem Fall reichte die Breite des Zeitfensters aus, um einerseits genügend Ereignisse für eine aussagekräftige Analyse zu liefern, andererseits aber den durch die endliche Breite des Fensters Δt bedingten intrinsischen Fehler $\Delta s = \int_{\Delta t} v(t) dt$ auf lediglich

etwa $20\ \mu\text{m}$ zu begrenzen. $v(t)$ steht hier für die Driftgeschwindigkeit als Funktion des Ortes der Primärionisation, der auch als Driftzeit bis zum Signaldraht ausgedrückt werden kann.

Die Abbildungen 10.3 und 10.5 stellen die Ergebnisse dar, wobei in der Gesamtdarstellung (Abbildung 10.5) bereits der durch die Ortsauflösung des Spurverfolgungssystems bedingte intrinsische Fehler von $85\ \mu\text{m}$ und der aufgrund der Vielfachstreuung in der Luft ($35\ \mu\text{m}$) quadratisch subtrahiert wurden.

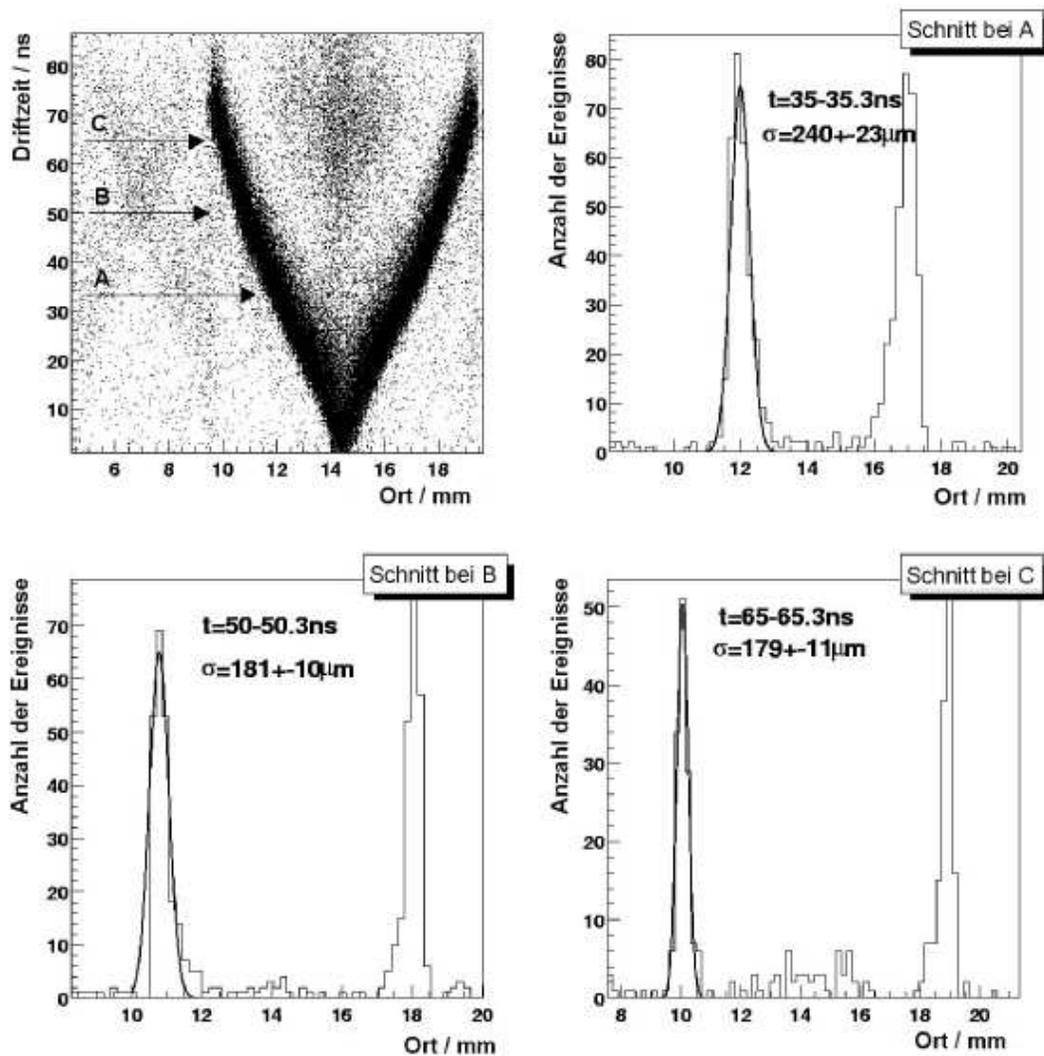


Abbildung 10.3: Zur Bestimmung der Ortsauflösung eines 6-mm-Röhrchens für verschiedene Abstände der Teilcentrajektorie vom Signaldraht. Die entsprechenden Ergebnisse der Messungen an den beiden Prototypen finden sich im Abschnitt 6.1.

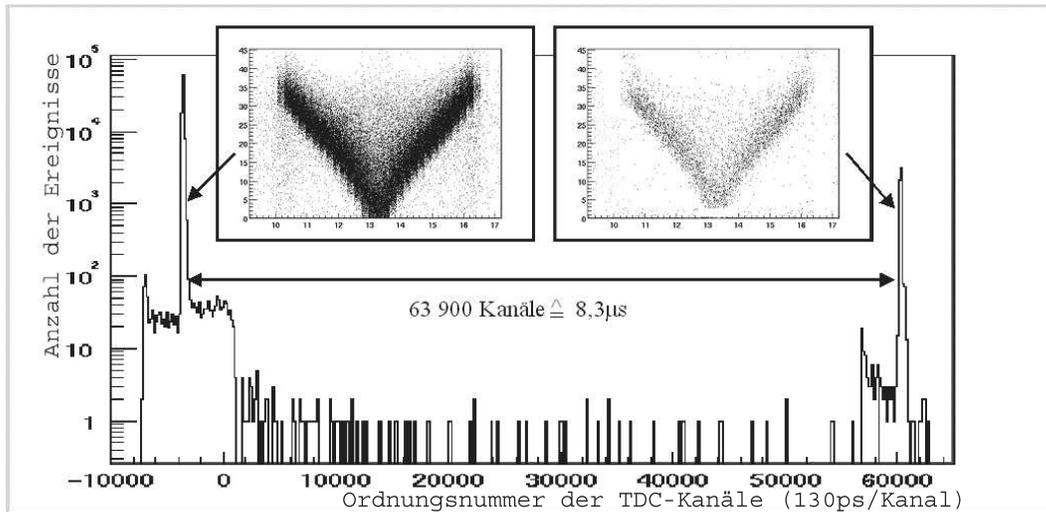


Abbildung 10.4: Zur kontinuierlichen Funktion des Time-to-Digital-Converters. In den Einblendungen im oberen Bereich sind Orts-Driftzeit-Relationen dargestellt (Abszissen: Ort/mm, Ordinaten: Driftzeit/ns), mit denen ein quantitativer Eindruck vom Ereignisinhalt der beiden Zeitbereiche vermittelt werden soll. Der zeitliche Abstand der beiden Bereiche ist ein TDC-bedingtes Artefakt und hat keine physikalische Bedeutung. Das Spektrum gehört zu einem 6-mm-Driftrohr.

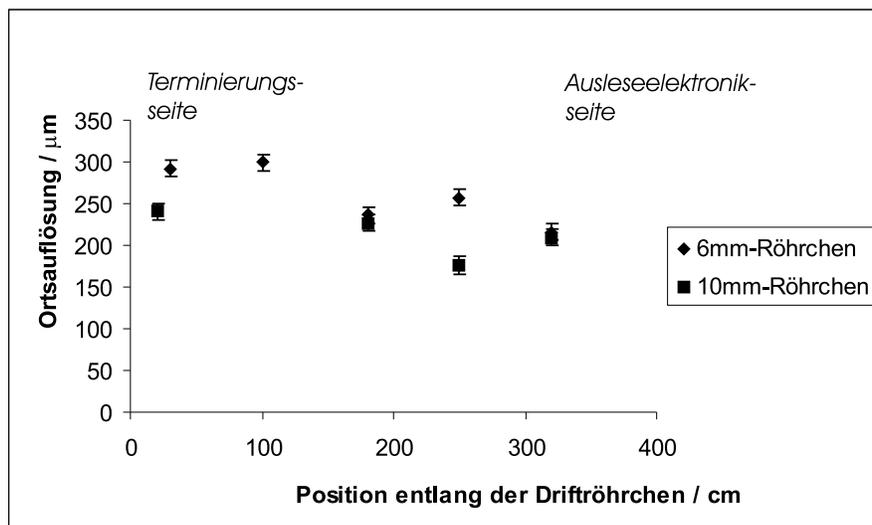


Abbildung 10.5: Ortsauflösung eines 6- und eines 10-mm-Röhrens an verschiedenen Stellen entlang seiner Ausdehnung. Der intrinsische Fehler durch die geringe Ortsauflösung des Spurverfolgungssystems von 85 μ m und der durch Vielfachstreuung in Luft bedingte (35 μ m) wurden bereits subtrahiert. Dargestellt ist die Auflösung im Driftzeitfenster 50,0-50,3 ns.

10.2.2 Nachweiseffizienz

Auch zur Bestimmung der Nachweiseffizienz wurde auf Definition und Verfahren aus Abschnitt 6.1 zurückgegriffen, allerdings konnten, wie bereits erwähnt, bedingt durch den zur Verfügung stehenden Protonenstrahl, keine Hochratenexperimente durchgeführt werden. Auch hier sei die Nachweiseffizienz also definiert als Quotient aus der Zahl gültiger, einem Driftröhrchen zugeordneter TDC-Einträge und der Zahl der Teilchenspuren durch dieses Röhrchen, wie sie - in diesem Fall vom Szintillatorfaser-Hodoskop - bestimmt wurden.

Die Abbildungen 10.6, 10.7 und 10.8 zeigen die Ergebnisse der Messungen an 10- und 6-mm-Röhrchen sowie an Strohhalmen, die an der physischen Öffnung enden.

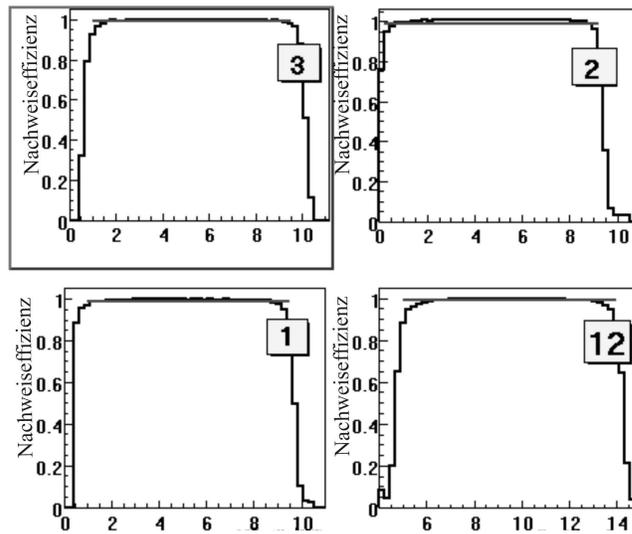


Abbildung 10.6: Nachweiseffizienz der 10-mm-Driftröhrchen. Die waagerechte Gerade markiert 99 % Effizienz.

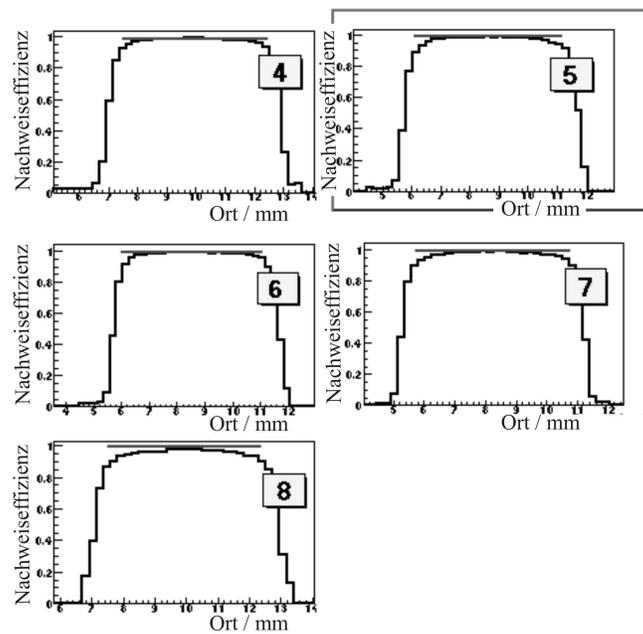


Abbildung 10.7: Nachweiseffizienz der 6-mm-Driftröhrchen. Das grau umrandete Diagramm gehört zu der im Abschnitt 10.2.1 hinsichtlich ihrer Ortsauflösung dargestellten Stelle (Abbildung 10.3), die waagerechte Gerade markiert 99 % Effizienz.

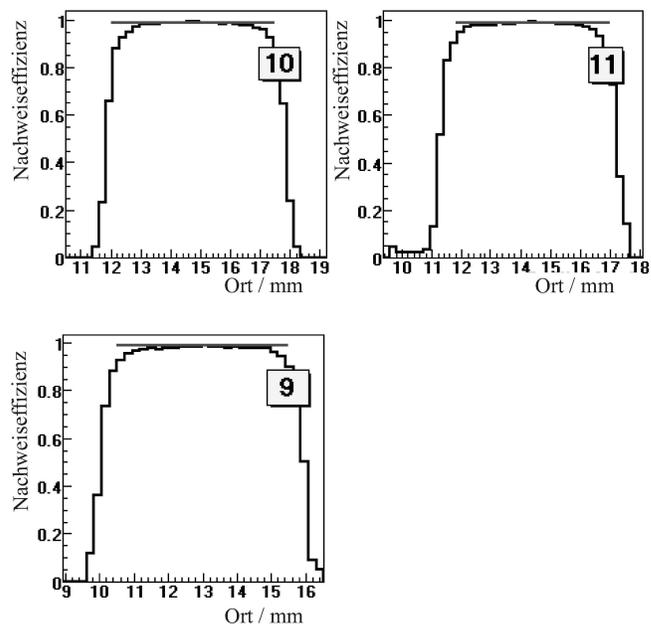


Abbildung 10.8: Nachweiseffizienz der Driftröhrchen, die an der physischen Öffnung enden. Die waagerechte Gerade markiert 99 % Effizienz.

10.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Vor allem die Resultate zur Ortsauflösung zeigen, dass der untersuchte Nullserien-Zähler den Anforderungen des COMPASS-Programmes, wie sie in Abschnitt 5 formuliert sind, nur bedingt genügt, da nicht an allen untersuchten Punkten der sensitiven Fläche eine Ortsauflösung unter $200\ \mu\text{m}$ gemessen wurde. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen nur unter ungünstigeren Bedingungen durchgeführt werden konnten, als bei den Messungen an den beiden Prototypen. Der von der Herstellungstechnologie vergleichbare Prototyp aus Dubna lieferte bessere Ergebnisse zur Ortsauflösung (vgl. Abschnitt 6.1). Vor allem das Fehlen eines geeigneten Spurverfolgungssystems, insbesondere aber die Verwendung nicht optimal angepasster Ausleseelektronik schmälern die Aussagekraft der Ergebnisse, obwohl eine eingehende Fehleranalyse durchgeführt wurde.

Zumindest die Ergebnisse zur Nachweiseffizienz und Betriebssicherheit erfüllen die Erwartungen.

In jedem Fall muss eine Erniedrigung der Triggerschwelle angestrebt werden, eine Größenordnung von etwa $4\ \text{fC}$ wird bei Driftkammern allgemein erreicht. Einerseits kann damit die Ortsauflösung gesteigert werden (vgl. Abschnitt 4.1.2), andererseits kann man - bei gleichbleibender Auflösung - die Gasverstärkung verringern, was sich günstig auf das trotz umfänglicher Tests immer noch vorhandene Alterungsrisiko auswirkt, denn vom Signaldraht wird bei gleicher Ratenbelastung weniger Ladung gesammelt.

Ein Hinweis darauf, dass hier noch Potenzial ausgeschöpft werden kann, ist die Tatsache, dass das Grundrauschen der Zähler beim Betrieb außerhalb des Spektrometers, etwa im Röntgenteststand (im folgenden Abschnitt beschrieben), geringer ist als im eingebauten Zustand.

10.3 Präzisionsbestimmung mittels Röntgen-durchleuchtung

Gegenwärtig wird mit einer Röntgenanlage die geometrische Präzision der Zähler mit einer absoluten Ortsauflösung³ von 30 μm [56] untersucht. Beispielhaft sei hier die Doppelebene 6 angeführt, für die die Abweichungen der Drahtpositionen von ihren Nominallagen - nach Einzelebenen getrennt - in den Abbildungen 10.9 und 10.10 dargestellt sind.

Die Doppelebene 6 ist eine gegenüber der Vertikalen um 10° geneigt eingebaute Zählereinheit, sie ist also mit kurzen Röhrrchen ausgestattet. Die Abweichung der Drahtpositionen von den Nominallagen, projiziert auf die Kammerebene, ist anhand der Länge der roten und blauen Balken dargestellt, wobei die Farben für die beiden Vorzeichen des Versatzes in der Zählerebene stehen, die Balkenlänge gibt den Betrag an, wobei zur Skalierung an der Ordinate jeweils die Länge eines ausgewählten Balkens in Mikrometern angegeben ist. Die an den Bildrändern liegenden Reihen jeweils nebeneinander liegender Balken gehören zu Schnitten unmitttelbar am Kammerrahmen, die dazwischen liegenden vier Reihen zu Schnitten an den Drahtpositionierern.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen der Signaldrahtpositionen von ihren Nominallagen von Röhrrchen zu Röhrrchen nur wenig abweichen, über die ganze Ebene aber über 1mm betragen. Ferner variiert das Vorzeichen der Abweichung vorwiegend entlang der Röhrrchen.

Besondere Beachtung verdient der einzelne blaue Balken an der zweiten Drahtpositionierer-Position von unten, im linken Bereich der Abbildung 10.9: Die Symptomatik - Abweichung gegenüber den umliegenden Röhrrchen um etwa 0,5 mm - legt nahe, dass der Signaldraht in diesem Röhrrchen nicht durch den zentralen Durchstoß des Drahtpositionierers geführt ist, oder letzterer wider Erwarten verkippt ist.

10.4 Weitere Doppelebenen

Nach der erfolgreichen testweisen Inbetriebnahme der ersten Doppelebene mussten die in der Folge an das C.E.R.N. gelieferten weiteren Doppelebenen je zu dritt zu so genannten Submodulen aus einer Doppelebene mit vertikalen (X), einer mit horizontalen (Y) und einer um 10° gegen die Vertikale geneigten Driftröhrrchen (X') zusammengesetzt werden. Für den Einsatz im Spektrometer werden weiterhin je zwei dieser Submodule zu sogenannten Modulen aus insgesamt 6 Doppelebenen zusammengefügt, sodass sich in Strahlrichtung die Abfolge (X, Y,

³Absolute Ortsauflösung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Koordinate eines Ortes auf der Kammerfläche in der zu den Röhrrchen senkrechten Richtung mit dieser Genauigkeit angegeben werden kann.

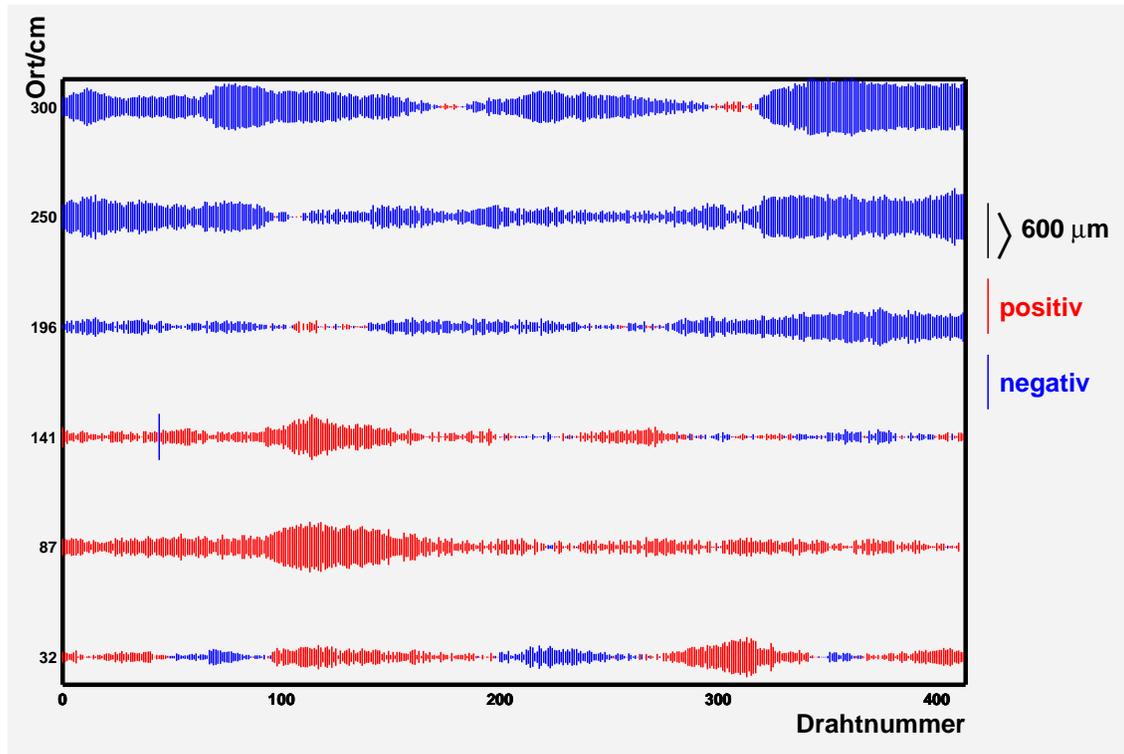


Abbildung 10.9: Doppelebene 6 (X'), erste Einzelebene (strahlaufwärts): Abweichungen der Drahtpositionen von ihren Nominallagen in der Detektorebene. Gemessen wurde am oberen und unteren Kammerrahmen sowie an den vier Drahtpositionierern. Jeder Balken steht für einen Draht, seine Länge gibt den Abstand von der Nominalposition und seine Farbe das Vorzeichen dieser Abweichung (für die hier angestellten Betrachtungen unerheblich) an.

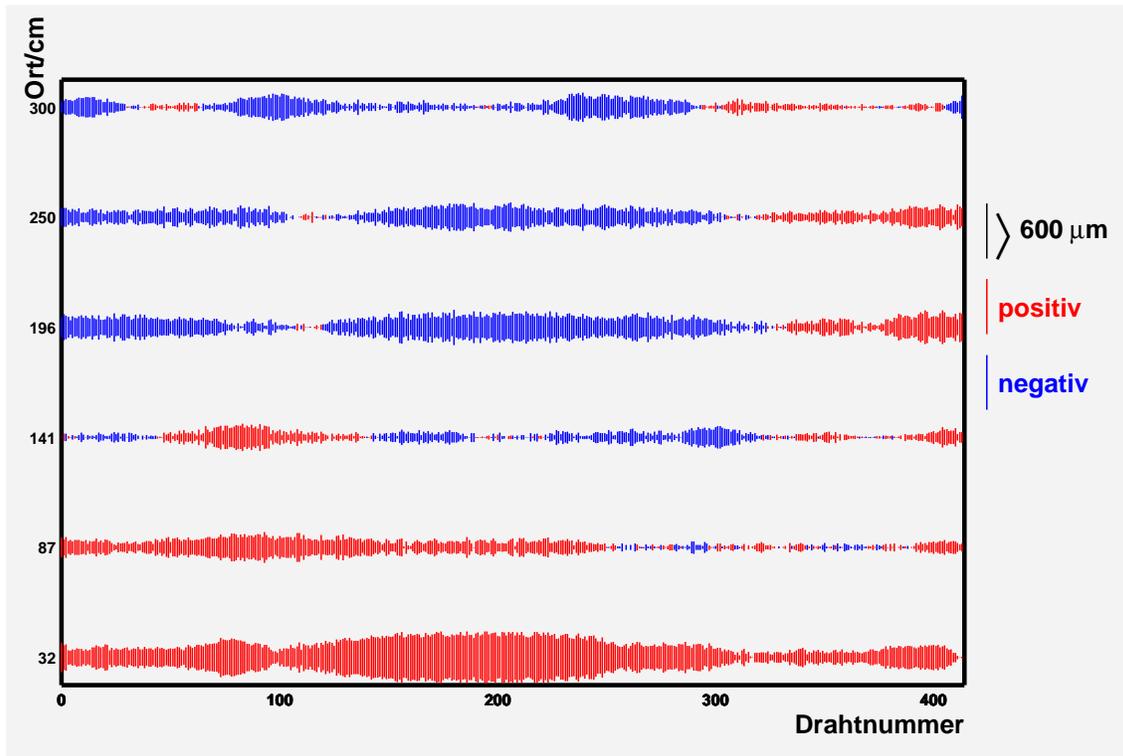


Abbildung 10.10: Doppelene 6 (X'), zweite Einzelebene (strahlabwärts): Abweichungen der Drahtpositionen von ihren Nominallagen. Näheres bei Abbildung 10.9.

X'), $(-X', Y, X)$ ergibt. Das Minuszeichen bei der vierten Doppelebene deutet an, dass der Neigungswinkel hier ein anderes Vorzeichen hat.

Die Doppelebenen mit den Ordnungsnummern (die der Produktionshistorie folgen, nicht der Anordnung im Spektrometer) 1-3 und ab 6 bestehen aus Strohhalmen aus einer Doppellage KAPTON-Folie (Polyimid), wohingegen die Kammern Nr. 4 und 5 Röhrrchen beinhalten, deren äußere Lage aus Mylar-Folie (Polyester) besteht. Vor allem wegen der ungünstigeren Klebeeigenschaften der Mylar-Folie wurde nach Herstellung der 5. Doppelebene wieder auf die KAPTON-KAPTON-Röhrrchen zurück gegriffen.

10.4.1 Assemblieren der Submodule und Module

Für das Zusammensetzen von je drei Doppelebenen zum Submodul hat sich die liegende Montage auf einem Stahlrahmen, auf dem die Ebenen mit dem Kran bewegt werden und in den die Kammerperipherie an der Ausleseseite eintauchen kann, bewährt. Die Zähler werden mit Präzisionsstiften, die durch alle drei Doppelebenen hindurchgehen und an allen vier Ecken eingesetzt werden, gegeneinander positioniert. Die jeweils mittlere Doppelebene (horizontale Röhrrchen) weist oben eine Haltestruktur für die hängende Montage im Spektrometer auf.

Das Zusammensetzen zweier solcher Submodule erfolgt in vertikaler Lage, wobei ein Submodul an Trägern hängt und das andere mit dem Kran herangeführt wird. Auch hier verbinden Präzisionsstifte die beiden Submodule.

10.4.2 Feuchtigkeitsabhängige Durchbiegung

Im Verlaufe der Produktion wurde deutlich, dass sich die hygroskopischen Eigenschaften beider Röhrrchenmaterialien (vgl. Abschnitt 9.3.2) dramatisch auf die mechanischen Zählereigenschaften auswirken: Die in Abschnitt 9.3.3 näher untersuchte Abhängigkeit zwischen relativer Umgebungsfeuchte und Röhrrchenlänge führt angesichts der beidseitigen spielfreien Einspannung der Röhrrchen im Aluminiumrahmen dazu, dass die aus den nebeneinander liegenden Röhrrchen gebildete Fläche in Strahlrichtung von ihrer Nominalposition abweicht, wobei sie durch die an vier Stellen darüber gespannten Kohlefaserstreifen in dieser Position gehalten wird.

Die Ursache ist darin zu sehen, dass die Zähler in Dubna in der Regel unter sehr geringer relativer Luftfeuchtigkeit (0-10 %) hergestellt werden, auch während der Lagerung sind die Röhrrchen bereits dieser trockenen Luft ausgesetzt. Speziell die Strohalm-Doppelebenen mit den Ordnungsnummern 2 bis 4, an denen das Phänomen erstmals auftrat, wurden in den Wintermonaten produziert, also bei Außentemperaturen von -30 bis -35°C , was die geringe Luftfeuchtigkeit in der Produktionshalle erklärt. Auf diese Problematik wurde mit künstlicher Befeuchtung der Strohhalme (unter dem Zelt in Abbildung B.4, Mitte rechts) und

mechanischer Vorspannung der Rahmenelemente während der Kammerherstellung reagiert.

Ein typisches Beispiel für die Abweichung zeigt Abbildung 10.11. Es ist zu erkennen, dass es aus nicht weiter untersuchten Gründen zu einer Krümmung hauptsächlich im Bereich der Flächenabschnitte zwischen dem Kammerrahmen und den Kohlefaserstreifen (Drahtpositionierern) kommt. Zwischen den Streifen zeigt sich zwar ein Versatz, allerdings verlaufen die Röhrrchen dort mit relativ geringer Sagitta, also gerade.

In Extremfällen wurden dagegen Abweichungen von bis zu 6 mm gemessen, was auf eine Verlängerung um $(140 \pm 5) \mu\text{m}$ auf 320 cm Röhrrchenlänge zurückzuführen ist.

Beim Vergleich dieser Werte mit den in Abschnitt 9.3.3 diskutierten ist zu bedenken, dass die in den Aluminiumrahmen eingespannten Röhrrchen eine Stauchung erfahren, die sich in Verwerfungen zwischen innerer und äußerer KAPTON-Lage der Kathodenfläche widerspiegeln und den longitudinalen Längenzuwachs vermindern. Diese Verwerfungen sind in der Aufnahme rechts in Abbildung 10.11 zu erkennen.

Eine weitere, sehr sensitive Methode, geringe Abweichungen der Driftröhrrchen von der Nominallage in Strahlrichtung zu bestimmen, ist die Messung der Gasverstärkung mit der ^{55}Fe -Röntgenquelle. An deformierten Stellen steigt die Gasverstärkung an, da der Signaldraht dort nicht in allen Richtungen denselben Abstand zur Kathodenfläche hat und sich mithin die elektrische Feldstärke dort erhöht, wo dieser Abstand kleiner als der Röhrrchenradius ist. Es wäre lohnend, diese Methode anhand mechanischer Vergleichsmessungen zu eichen.

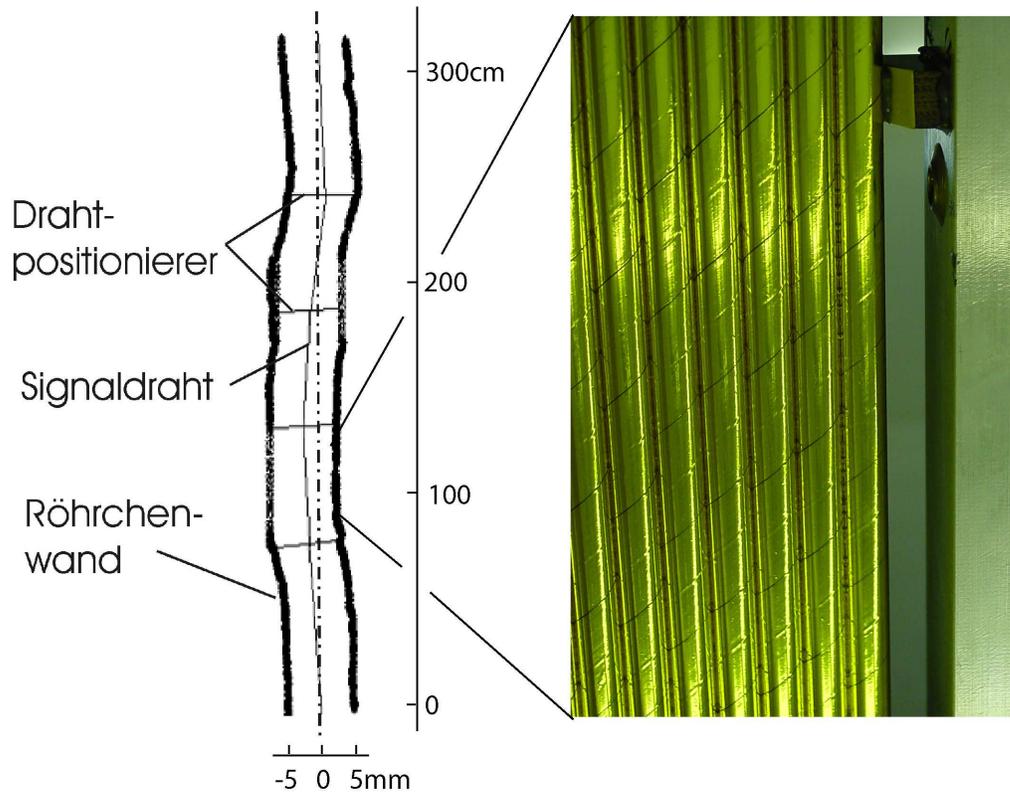


Abbildung 10.11: Durch Feuchtigkeit verbogene Doppelenebene:
 links: Querschnitt eines (geringfügig) gebogenen Röhrchens, Messung alle 10 cm entlang seiner Achse relativ zu einem über den Rahmen gespannten Draht mittels eines Stahlmaßstabes. Die Darstellung der beiden Dimensionen ist ebenso wie die der Wanddicke nicht maßstabsgerecht. Die grafische Summation der Wegelemente entlang der Schnittlinien ergibt eine Verlängerung gegenüber der Nominallänge um lediglich $(10 \pm 5) \mu\text{m}$.
 rechts: Aufnahme eines verbogenen Ebenenteils. Zu erkennen sind die Verwerfungen zwischen innerer und äußerer KAPTON-Lage der Kathodenfläche.

Teil III

Produktion und Inbetriebnahme

Kapitel 11

Produktionskette und Spezialwerkzeug

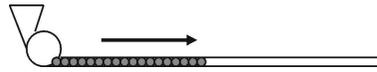
11.1 Die Produktionsschritte im Einzelnen

Es sollen nun detailliert die einzelnen Schritte der Kammerproduktion in Dubna erläutert werden, wobei besonderes Augenmerk denjenigen Schritten gilt, die die mechanische Präzision und damit die Ortsauflösung des Zählers bestimmen. Zunächst seien die Arbeitsgänge jedoch kurz zusammengefasst. Die Zahlen in Klammern verweisen auf die Abbildungen im Bildanhang ab Seite 179, auf das Einfügen der Bilder an dieser Stelle wurde mit Blick auf die Übersichtlichkeit verzichtet.

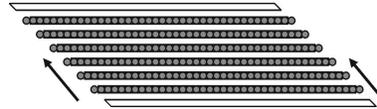
Die Technologie der Strohkammerproduktion wurde am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna/Russische Föderation entwickelt und in [17], [18], [67] und [67] veröffentlicht.

11.1.1 Zusammenfassung der Produktionsschritte

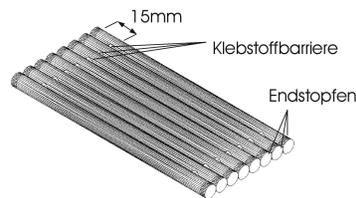
1. Prüfung der angelieferten Röhrchen auf Beschädigungen und Übereinstimmung mit den Durchmesser-Spezifikationen, Prüfung der von weiteren Herstellern angelieferten Komponenten wie Drahtpositionierer, Endkappen usw. (Abbildungen B.1, links unten und B.6, obere Zeile (beschädigte Röhrchen)).
2. Manuelles Zuschneiden der Röhrchen auf die erforderlichen Längen. (Abb. B.1, links oben).
3. Anbringen eines Kupferringes als Mundstück an einem Ende, um das Röhrchen halbautomatisch mit Stahlkugeln füllen zu können. (Abb. B.1, Mitte links und rechts oben).
4. Füllen der Röhrchen mit Stahlkugeln (Abb. B.1, rechts unten).



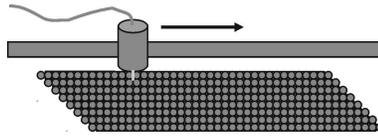
5. Auslegen der Röhrrchen auf Stahltischen zu so genannten Segmenten, Verschluss mit Positionierstopfen, Zusammendrücken mit geführtem Stahllineal auf dem Tisch (Abb. B.2, links oben und Mitte).



6. Anbringen einer Klebstoffbarriere (Abb.B.2, Mitte links).



7. Verkleben der Röhrrchen bei automatischer Klebstoffdosierung (Abb.B.2, rechts oben).
8. Entfernen der Kugeln, Umdrehen des einseitig verklebten Segmentes (Abb. B.1, linke Spalte).
9. Anbringen einer weiteren Klebstoffbarriere.
10. Verkleben der Röhrrchen von der Rückseite.
11. Anbringen von kurzen Kohlefaserstreifen auf den Segmenten (Abb. B.3, links oben).
12. Vorbereiten der Rahmenelemente, Aufkleben der elektrischen Verbinderkarten.
13. Verkleben von Rahmenelementen und Röhrrchensegmenten zu zwei Einzelebenen (Abb. B.3, rechte Spalte).
14. Aufkleben der Versteifungsrahmen für die zentrale Öffnung (Abb. B.6, links unten).
15. Anbringen von langen Kohlefaserstreifen auf den Einzelebenen (Abb. B.4, Mitte links).



16. Aufbringen einer Silikon-Dichtungsbarriere im Bereich der Rahmenelement-Position (Abb. B.4, unten).
17. Vormontage der Rahmenprofile.
18. Zusammenfügen der beiden Einzelebenen (Abb. B.5, Mitte rechts).
19. Abdichtung der Röhrrchen zum Gasverteiler hin (Abb. B.6, rechts unten).
20. Bestücken der Signaldrähte mit Drahtpositionierern, Endkappen und Drahtführungshülsen (Abb. B.7, untere Zeile).
21. Bedrahten der Röhrrchen (Abb. B.7, links und rechts oben).
22. Messung der mechanischen Drahtspannung nach der magnetischen Resonanzmethode (Abb. B.8, rechts oben).
23. Aufsetzen der Gassammler an der zentralen Öffnung.
24. Anbringen der elektrischen Terminierung an der zentralen Öffnung, Aufbringen des Isolierüberzuges (Abb. B.8, links oben).
25. Anbringen der Kohlefaser-Haltestreifen, Spannen und gasdichte Verklebung derselben am Rahmen (gegen das Schutzgasvolumen).
26. Herstellen der Lötverbindungen an Signalweg, Hochspannungszuführung und Erdung, Anbringen der Steckverbinder (Abb. B.8, rechts unten).
27. Dichtung des Gasvertailers, Anbringen der Gasanschlüsse (Abb. B.9, rechts oben).
28. Prüfung auf Gasdichtigkeit.
29. nötigenfalls: Nachdichten von Röhrrchen oder Gasverteiler (Abb. B.9, Mitte links).
30. Elektrische Prüfung, Messung der Gasverstärkung, unter Umständen: geometrische Messungen.
31. nötigenfalls: Drahtwechsel an fehlerhaften Kanälen.
32. Verpackung zum Transport, Bereitstellung der wetterfesten Transportverpackung (Abb. B.9, untere Zeile).

11.1.2 Ausführliche Darstellung wichtiger Arbeitsschritte

Generelles Verfahren zum Kleben der Kohlefaserstreifen an die Strohhalmebenen (Punkte 11. und 15.)

Je vier Kohlefaserstreifen der Breite 5 mm und Dicke 0,5 mm stabilisieren die Strohhalmebenen in Strahlrichtung, normal zu ihrer Ebene. Sie sind je nach Kammerorientierung 2500 mm bzw. 3260 mm lang, verlaufen senkrecht zur Strohhalmachse und werden folgendermaßen von beiden Seiten flach an die Einzelsegmente bzw. -ebenen¹ geklebt:

Mittels einer Metallstange werden zunächst Kunststoff- oder Aluminiumhülsen des jeweiligen Strohalm-Innendurchmessers an die für die Kohlefaserstreifen vorgesehenen Positionen gebracht. Es zeigt sich, dass es zweckmäßig ist, die Hülsen mit Luftlöchern zu versehen, damit alle vier in einem Arbeitsgang in den Strohalm eingeführt werden können. Verzichtet man, wie zunächst geschehen, auf diese Luftlöcher, so drückt die Luft im dann abgeschlossenen Röhrchenvolumen die jeweils vorher eingeführte Hülse von ihrer Position. Die Stahlkugeln sind bei der Ausführung dieses Arbeitsschrittes bereits nicht mehr in den Strohhalmen, sie wurden bereits vor dem Umdrehen der Segmente zur Verklebung der Rückseite entfernt.

Über die so stabilisierten Strohhalme kann nun der großflächig mit Epoxidklebstoff bestrichene Kohlefaserstreifen gelegt und mit Gewichten beschwert werden. Ist der Klebstoff nach 24 Stunden ausgehärtet, dauert die Ausstattung eines Segmentes bzw. einer Einzelebene mit Kohlefaserstreifen naheliegenderweise ebenso lange, wenn in jedem Röhrchen vier Hülsen gleichzeitig verwandt werden können, ansonsten ist der Arbeitsschritt erst nach vier Werktagen abgeschlossen.

An den Außenseiten werden in einem späteren Arbeitsschritt noch gleichartige, senkrecht stehende Kohlefaserstreifen angebracht, die die Durchbiegung der Doppelebene in Strahlrichtung begrenzen. Durch ihre Einbaulage sind sie in dieser Hinsicht wirksamer als die flach an den Ebenen anliegenden Streifen („T-Träger-Prinzip“), im Übrigen werden sie zudem noch mechanisch mit (500 ± 100) N gespannt.

Zusammenfügen der Strohalmsegmente zu Einzelebenen (Punkt 13.)

Die Herstellung der Einzelebenen, wie auch das anschließende Zusammenfügen zur Doppelebene, geschieht auf dem großen Präzisions-Stahl Tisch, der zunächst mit Polyethylenfolie der Dicke 0,1 mm belegt wird.

Sodann werden Stahlschienen in den Löchern des Stahl tisches fixiert. Die Stahlschienen verbinden ECKelemente, deren Innenseiten als Präzisionsflächen ausgeführt sind, denn nur diese ECKelemente berühren die Strohalmsegmente

¹Damit ist ein System aus einem 6- und zwei 10-mm-Segmenten gemeint, die Rede ist hier also vom Ankleben der langen Kohlefaserstreifen, die zwischen den Einzelsegmenten zu liegen kommen.

in dieser für die Präzisionsbestimmung relevanten Phase. Der Abstand zwischen diesen Flächen unter Berücksichtigung aller Toleranzen des Tisches und der Eckelementfixierung kann mit 100 μm angegeben werden kann.

Verständlicherweise sind Stahlschienen verschiedener Länge für die Kammer mit horizontal liegenden Röhren einerseits und vertikal bzw. unter Neigung verlaufenden Röhren andererseits vorgesehen, die Arbeitsschritte sind jedoch immer dieselben:

Die Segmente einer Einzelebene werden mittig zwischen den Stahlschienen ausgelegt, die Röhrenachsen parallel zu den Schienen. Bereits hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen der Wand der äußeren Röhren und den Präzisionsflächen der Stahlschienen dem Sollmaß von 1,55 mm möglichst nahe kommt.

Sodann wird ein Kohlefaser-Abstandstreifen zwischen *ein* 6-mm- und das 10-mm-Segment geklebt. Seine Dicke entspricht der Differenz der Radien der beiden Strohhalmdurchmesser, also 2 mm (vgl. Abbildung 5.6). Auch die Verbindung der beiden anderen Segmente erfolgt durch Kleben und anschließendes Beschweren mit Gewichten, wozu an den Positionen dieser Gewichte spezielle Kunststoffzylinder in die Strohhalme eingeführt werden, um sie vor Deformation zu schützen (Abbildung B.3, unten rechts).

Um zu vermeiden, dass die zwischen den beiden Einzelebenen über deren gesamte Länge laufenden Kohlefaserstreifen beim späteren Zusammenfügen der beiden Einzelebenen übereinander zu liegen kommen, werden ihre Positionen bereits an dieser Stelle außerhalb der Stahlschienen auf der Polyethylenfolie auf dem Tisch markiert; für die eine Ebene 6 mm links von der Nominalposition der außen liegenden - kurzen, da nur jeweils ein Segment abdeckenden - Kohlefaserstreifen, für die andere Ebene 6 mm rechts davon (siehe Abbildung 11.1). Die inneren, also zwischen den Einzelebenen zu liegen kommenden Kohlefaserstreifen dürfen nicht übereinander liegen, weil zwischen den Ebenen lediglich ein Zwischenraum von 0,5 mm vorgesehen ist.

Ferner wird noch die Kontur der physischen Öffnung auf der Folie markiert.

Die Handhabung der Drahtpositionierer (Punkt 20.)

Zur Vorbereitung des Bedrahtens, also des Einführens der Signaldrähte in die Röhren, werden die Drähte im vorgegebenen Abstand mit Drahtpositionierern versehen.

Dem Epoxidharz-Klebstoff Araldit 2013 wird eine drahtzentrierende Wirkung zugeschrieben, indem er im flüssigen Zustand durch Kapillarwirkung den Draht und die Berandung des Führungsloches im Drahtzentrierer auf allen Seiten benetzt. Dennoch soll seine Neigung, den Draht entlang zu kriechen und ihn so elektrisch zu isolieren, gering sein [60].

Außerdem ist der Klebstoff von grauer Farbe, sodass er beim Befüllen der dafür vorgesehenen Aussparungen gut sichtbar ist.

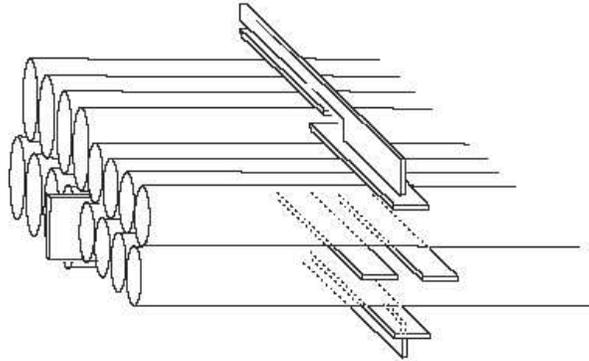


Abbildung 11.1: Anordnung der Kohlefaserstreifen, die die Strohhalmlagen stabilisieren. Links das Ende eines Abstandhalters, der in jeder Einzelebene *nur an einem* Übergang zwischen 6- und 10-mm-Röhrchen eingesetzt werden muss. Die beiden Streifen in der Mitte zwischen den Einzelebenen erstrecken sich über die ganze Kammerlänge, wohingegen die äußeren hier waagrecht liegenden Streifen nur jeweils ein Segment (Bereich gleichen Röhrchendurchmessers) abdecken. Die senkrechten Streifen oben und unten stehen unter mechanischer Spannung (etwa 500 N/Streifenlänge) und stabilisieren die Doppellebene in Strahlrichtung.

Der Klebevorgang wird mit halbautomatischer Klebstoffdosierung und unter der nominalen Drahtspannung von 0,9 N händisch vorgenommen.

11.1.3 Verfahren zum Erreichen der geometrischen Präzision

An dieser Stelle soll noch einmal auf diejenigen Arbeitsschritte eingegangen werden, die besondere Bedeutung im Hinblick auf die geometrisch präzise Fertigung haben.

Hierbei sind zwei Gruppen von Arbeitsgängen zu unterscheiden:

1. Arbeitsgänge, die dem Erreichen spezifizierter geometrischer Parameter dienen

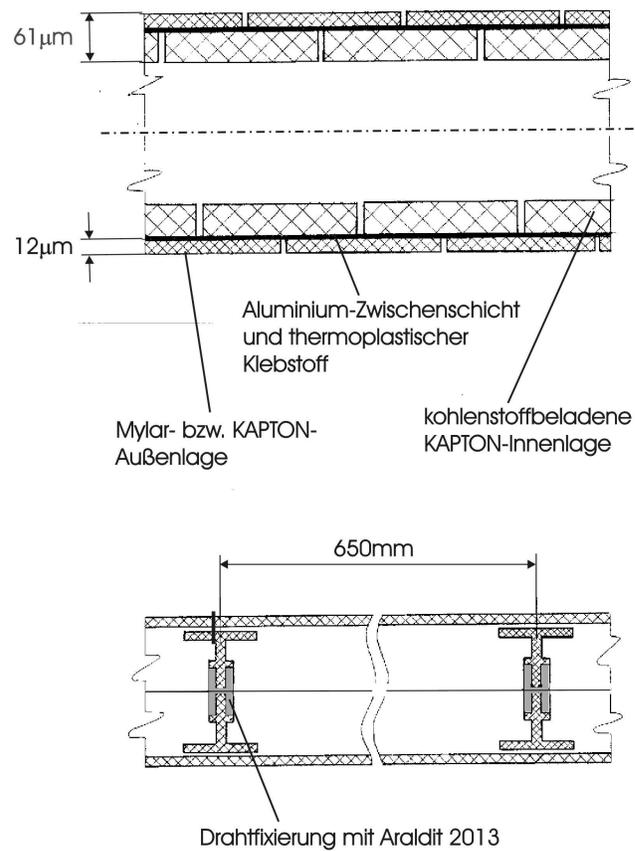


Abbildung 11.2: Schnitt durch ein Driftrohr (schematisch) und Fixierung der Drahtpositionierer.

2. Arbeitsgänge, die den Zähler lediglich mechanisch stabilisieren, ohne die räumliche Lage einzelner Bauteile in im Vorhinein bestimmter Weise festzulegen

Zur ersten Gruppe gehören die Justage der Positionen der Stahlkugeln beim Kleben der Segmente, die Verwendung der Distanzfolien und die Positionierung der Stahllineale hierbei, sowie alle Schritte, die das Verkleben der Segmente untereinander und ihre Positionierung im Rahmen betreffen.

In der zweiten Gruppe sind das Aufkleben der flachen Kohlefaserstreifen, die Justage der senkrechten Kohlefaserstreifen und das Anbringen der Distanzstücke am Rahmen zu nennen.

Positionierung der Stahlkugeln (Punkt 5.)

Es mag den Anschein haben, dass der Positionierung der Stahlkugeln, die mit einer Toleranz von $\pm 3 \mu\text{m}$ gefertigt werden, im Hinblick auf die geometrische Präzision der Strohalmsegmente und damit der gesamten Zähler hohe Bedeutung zukommt.

Bei näherer Betrachtung (vgl. Abbildung 11.3) wird allerdings rasch klar, dass das ein Trugschluss ist: Ein Versatz v einer Kugelreihe in der Richtung ihrer längsten Ausdehnung gegenüber der nächsten verändert den Abstand d dieser beiden Reihen um einen Abstand Δd , solange jede Kugel nur vier Nachbarn berührt, was bei kleinen Versätzen v , wie sie nur betrachtet zu werden brauchen, natürlich der Fall ist. Es gilt:

$$(2r)^2 = v^2 + d^2 \quad \text{und} \quad \Delta d = 2r - d \quad (11.1)$$

Für den Versatz v ergibt sich also:

$$\Delta d = 2r - \sqrt{(2r)^2 - v^2} = 2r \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{2r}\right)^2} \right) \approx 2r \left(\frac{v^2}{8r^2} \right) = \frac{v^2}{4r} \quad (11.2)$$

Akzeptiert man für jedes Röhrchen einen Fehler seiner Absolutposition Δd von maximal $20 \mu\text{m}$ gegenüber seinem nächsten Nachbarn, so muss der Versatz v für die 6mm-Röhrchen ($r = 3000 \mu\text{m}$) unter $500 \mu\text{m}$ gehalten werden. Zwar muss einerseits bedacht werden, dass ein Versatz in beiden Richtungen zu einer Verringerung des Röhrchenabstandes führt, der Fehler sich also systematisch in dieser Richtung auswirkt und im statistischen Mittel nicht zu null wird. Andererseits geht der Versatz v aber quadratisch in den Abstandsfehler Δd ein, wirkt sich also umso weniger deutlich aus, je geringer er ist. An der Stelle $v = 0$ ist auch $\frac{d\Delta d}{dv} = 0$, was allerdings durch die in Gleichung 11.2 gemachte Näherung nicht deutlich wird.

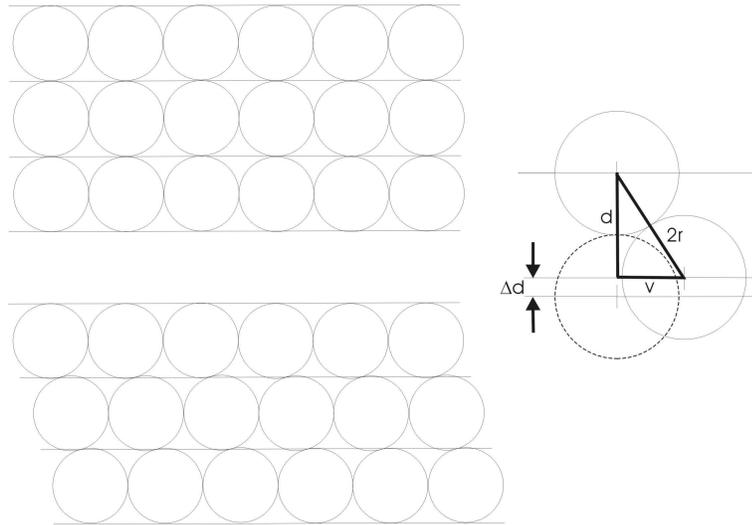


Abbildung 11.3: Zur Auswirkung mangelhafter Kugelpositionierung.

Die Ausdehnung der Strohhalmssegmente in der Raumrichtung orthogonal zur Röhrenachse wird dadurch bestimmt, dass das Stahllineal zum Zusammenschieben der kugelgefüllten Röhren auf dem Stahltisch in Schritten von 10 Röhrendurchmessern mit zwei Stiften in Löchern, die mit einer Relativgenauigkeit von $20\ \mu\text{m}$ zu ihren nächsten Nachbarn positioniert sind, fixiert wird. Unter diesen Umständen kann man für eine Einzelebene aus im Mittel 700 Röhren von einer Genauigkeit (Größtfehler) von $700/10 \cdot 20\ \mu\text{m} = 1400\ \mu\text{m} = 1,4\ \text{mm}$ in der betrachteten Dimension senkrecht zur Strohhalmausdehnung ausgehen, weil den Röhren so alle 10 Strohhalmdurchmesser eine Position dieser Genauigkeit aufgezwungen wird. Beim Zusammendrücken bemüht sich der damit befasste Mitarbeiter, zwischen diesen Positionen für möglichst gleiche Röhrenabstände zu sorgen, was sich aber wegen der dichten Packung der Kugeln ohnehin so ergeben dürfte.

In der Praxis zeigt sich weiterhin, dass die Gesamtausdehnung der Einzelebenen beim Aufkleben auf die Aluminium-Rahmenelemente durch Einsetzen verschiedener Sätze speziell dazu angefertigter Kunststoff-Endstopfen mit jeweils geringfügig (um etwa $0,1\ \text{mm}$) verschiedenen Durchmessern noch in der erforderlichen Größenordnung verändert werden kann, wovon durchaus Gebrauch gemacht wird. Legt man eine durch diesen Schritt mögliche Variation der Gesamtausdehnung einer Ebene (in der Richtung senkrecht zur Strohhalmausdehnung) mit etwa 700 Röhren von $1\ \text{mm}$ mit einem mittleren Durchmesser von $8\ \text{mm}$ zugrunde [66], so ergibt sich je Röhren ein mittlerer Versatz v von etwa $200\ \mu\text{m}$, was als realistisch angesehen werden kann.

Reaktion auf das Überschreiten des spezifizierten Rohrdurchmessers

Während des Produktionsprozesses sah man sich dem Problem gegenüber, dass sich die angelieferten Röhren von Lieferung zu Lieferung in ihrem Innendurchmesser unterschieden. Dabei darf ein solcher von 9,49 mm bzw. 5,89 mm keinesfalls unterschritten werden, da sich die Stahlkugeln wegen zu großer Reibung sonst nicht mehr halbautomatisch einführen lassen.

Ein zu großer Röhrendurchmesser führt zur Defomierung der Röhren beim Zusammendrücken auf dem Tisch, sie würden dann auch unter dieser Abweichung vom kreisrunden Querschnitt zu Segmenten verklebt werden, was die Genauigkeit in ihrer Absolutposition und die Geometrie des elektrischen Feldes stören würde. Um dem zu begegnen, werden beim Auslegen der Strohhalme auf den Tischen Distanzhalterfolien einer Dicke, die der Durchmesserüberschreitung entspricht (etwa 10 μm), nach Abbildung 11.4 zwischen den Röhren eingefügt. Auf diese Weise werden die Strohhalme beim Auslegen und Zusammendrücken mit dem Stahllineal zwar ebenso deformiert, werden die Distanzhalterfolien dann allerdings entfernt, so kehren sie wieder zu ihrem ursprünglichen kreisförmigen Querschnitt zurück. Die Erfahrung zeigt, dass das Gewicht der Stahlkugeln ausreicht, die Röhren nach dem Zusammendrücken auch ohne gegenseitigen Kontakt auf ihrer Nominalposition zu halten.

Zusammenfassende Wertung der mechanischen Genauigkeit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die mechanische Genauigkeit der Strohalm-Einzelebenen auf der Herstellung der einzelnen Segmente auf den kleinen Stahltischen (maximale Abweichung der Absolutposition des letzten Röhrens einer Ebene: $\pm 1,4 \text{ mm}$) und dem Zusammenfügen der Segmente zu Einzelebenen auf dem großen Stahltisch (Festlegung bzw. Justage der Röhren-Schrittweite („pitch“) mit einer Genauigkeit von $\pm 200 \mu\text{m}$) beruht. Letztlich dürfte diese Justage die endgültige Genauigkeit bedingen, was auch durch Messungen mit dem Röntgenstand bestätigt wird. Den damit erzielten Ergebnissen zufolge liegt die Abweichung der Signaldraht-Absolutposition vom Nominalwert für alle untersuchten Kammern bei 100-200 μm , von einzelnen Drahtgruppen (Abweichung hier bis zu 400 μm) abgesehen [56]. Auf die genaue Positionierung der Stahlkugeln beim Verkleben der Segmente kommt es nicht an.

Lediglich die Parallelität zwischen den Rahmenelementen und den Röhren (Winkelpositionierung) sowie der Versatz zwischen den beiden Einzelebenen innerhalb einer Kammer kann nicht mit guter Genauigkeit determiniert werden, da die Position der Röhrenebene im Aluminiumrahmen nur visuell kontrolliert wird.

Die Verwendung eines einzigen Präzisions-Stahltisches führt allerdings bei allen Prozessen, für die eine Fixierung auf ihm vorgesehen ist, vor allem bei der Herstellung der Röhren-Einzelebenen und der Rahmenmontage, auch zu

größtmöglicher Reproduzierbarkeit der Dimensionen der Zähler.

Fixieren der Signaldrähte in den Führungshülsen („Crimpen“, Punkt 21.)

Um die mit 0,9 N gespannten und mit Drahtpositionierern versehenen Signaldrähte in den Endkappen zu fixieren, werden sie durch Messinghülsen gezogen und darin durch Quetschen derselben, sogenanntes „Crimpen“², fixiert. Der Innendurchmesser der Hülsen im ungequetschten Zustand beträgt 100 μm , weswegen dem Crimpprozess nicht nur eine Fixierungs- sondern auch eine (zentrierende) Positionierungsfunktion zukommt. Im Gegensatz etwa zur Jet-Driftkammer des Crystal-Barrel-Spektrometers (C.E.R.N.-Experiment PS197, [13]), von dem die Technologie der Fixierung der Signaldrähte in Messing-Führungshülsen übernommen wurde, wurde die Crimpung hier jedoch nur in einer Dimension vorgenommen. Deswegen ist in der dazu senkrechten Richtung mit einem Versatz des Signaldrahtes um bis zu 35 μm von der Nominalposition auf der Röhrenachse zu rechnen³.

Während des Produktionsprozesses trat unvermittelt die Schwierigkeit auf, dass zwischen 40 und 50 % der Signaldrähte beim ersten Crimpvorgang brachen. Wegen des Material-, aber vor allem wegen des Zeitverlustes sind derartige Einbußen keinesfalls tolerabel, denn die Drähte sind bei diesem Schritt bereits mit Drahtpositionierern, einer Endkappe und einer Messinghülse versehen, die Vorbereitung eines Drahtes hat bereits 24 Stunden in Anspruch genommen, davon 20 Minuten unter Einsatz eines Mitarbeiters.

Zwar stand zu vermuten, dass die Drähte einer neuen Lieferung von anderer Qualität waren als die bisher verwandten, doch konnte dieser Verdacht mangels geeigneter Aufzeichnungen während der Produktion nicht zweifelsfrei bewiesen werden.

Die daraufhin vorgenommenen Messungen von Fließgrenze und Bruchlast erbrachten keine auffälligen Abweichungen von den bisher eingesetzten Signaldrähten.

Prüfung auf Gasdichtigkeit (Punkt 28.)

Um die Gasdichtigkeit der Zähler zu prüfen und die Leckrate zu ermitteln, wird die plane Rahmenfläche beidseitig gasdicht mit Polyethylenfolie bespannt. Über einen mechanischen Flussmesser wird Stickstoff in das Schutzgasvolumen eingeleitet, dessen Ausgang über ein Waschfläschchen geführt wird, das anzeigt, ob Gas austritt, der Schutzgaseingang ist ebenfalls versperrt. Der einströmende Gasfluss

²„Das Crimpen ist eine mechanische Verbindungstechnik, bei der die Verbindung durch das Zusammenquetschen von metallischen Vorrichtungen erfolgt“. [24]

³35 μm entsprechen der Hälfte der lichten Weite der Messinghülse abzüglich des Drahtdurchmessers.

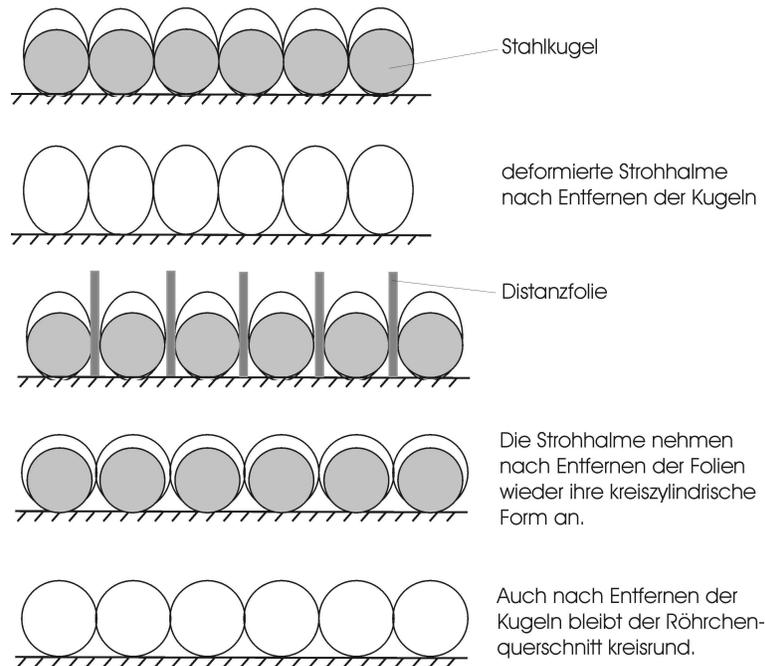


Abbildung 11.4: Zur Verwendung von Distanzfolien im Falle des Überschreitens des spezifizierten Rohrdurchmessers.

wird unter Berücksichtigung der Größe des Schutzgasvolumens so lange reduziert, bis kein Gas mehr durch das Waschfläschchen strömt. Somit gelangt der gesamte Fluss über Lecks in das Zählgasvolumen, deren Größe auf diese Weise mit einer Genauigkeit von $\pm 20 \text{ cm}^3/\text{h}$ bestimmt werden kann. Das Ziel besteht darin, die Gasverluste geringer als $50 \text{ cm}^3/\text{min}$ zu halten.

Nach dem Test mit einem thermischen Lecksucher⁴ gefundene Lecks in den Strohhalmen werden entweder mit Epoxidharz gedichtet, mit Polyimidfolie überklebt oder, falls der Gassammler undicht ist, mit Epoxidharz ausgegossen.

11.1.4 Untersuchung der Drahriss-Problematik

Um die Ursache des Drahriss-Phänomens zu ermitteln, wurden umfangreiche Tests durchgeführt, wobei 350 Crimpungen unter verschiedenen Bedingungen vorgenommen wurden.

Crimpwerkzeug und Drahtführungshülsen

Eine wesentliche Eigenschaft des Crimp-Werkzeuges ist, dass sich die Backen, mit denen die Messinghülse gequetscht wird, beim Zusammendrücken der Schenkel

⁴Der thermische Lecksucher saugt durch die Prüfspitze kontinuierlich Gas an. Ändert sich die Gasart und damit die Wärmekapazität, so gibt er ein Signal.

zunächst bis auf ein von null verschiedenes Spaltmaß schließen, dann aber wieder öffnen. Dieses Spaltmaß ist dadurch definiert, dass die Drahtführungshülse aus Messing durch das Crimpen eine Stärke von $(0,42 \pm 0,01)$ mm erhält.

Die Messinghülse selbst ist in einen konischen Kunststoffmantel eingegossen, der ihren gasdichten Einsatz in eine zylindrische Bohrung bzw. in die Endkappe ermöglicht. Vor dem Crimpprozess beträgt der Innendurchmesser des Röhrchens 0,1 mm, wobei ein Ende an der inneren Berandung eine Fase aufweist, die das Einführen des Drahtes erleichtert.

Experimentelle Untersuchungen zum Crimpen

Obwohl der Crimpprozess offenbar im Grenzbereich der Materialeigenschaften geführt wird, können Maßnahmen ergriffen werden, welche die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Drahttrissen mindestens um einen Faktor 10 senken.

Für die Drahtcharge, die beim Auftreten der Drahtrisse verwandt wurde, wurde die Fließgrenze zu (130 ± 20) g bestimmt, was innerhalb der spezifizierten Werte liegt. Durch Messung des Elastizitätsmoduls wurde für das Verhalten unter mechanischer Spannung kein Unterschied zwischen den problematischen und früheren Drahtlieferungen festgestellt.

Zum Zwecke einer genaueren Messung wurde eine Apparatur mit 10 Endkappen aufgebaut, die eine Fixierung des Drahtes 15 cm über der Drahtführungshülse vorsah. Das Massestück zum Erzeugen der Spannung hing 20-30 cm unterhalb dieser Hülse. Nachdem die Endkappen auch beim Crimpen im Detektor nicht völlig fixiert sind, wurde ein vergleichbares Spiel erlaubt. Der Crimpprozess selbst wurde - wie auch bei der Detektorproduktion - von Hand vorgenommen.

Es zeigte sich jedoch, dass der Versuchsaufbau durch die nur teilweise befestigten Endkappen mechanisch instabil wurde und die Vergleichbarkeit der Hülsenfixierung mit derjenigen im Detektor kaum gewährleistet war.

In einem zweiten Schritt wurden daher die Drahtführungshülsen statt von einer realen Endkappe von einem Loch in einer starr mit dem massiven Stahl-tisch, der den Aufbau trug, verbundenen Acrylglasplatte gehalten. Auch das Crimpwerkzeug wurde auf einem höhenverstellbaren Schlitten fixiert, sodass es während des Crimpvorganges seine Lage relativ zur ebenfalls starr montierten Drahtführungshülse nicht änderte.

Es ist davon auszugehen, dass der Draht durch eine statische Fixierung der Hülsen gegenüber einer in bestimmten Grenzen beweglichen - wie im realen Produktionseinsatz - beim Crimpen stärker beansprucht wird, weswegen die auf den Testergebnissen aufbauenden Empfehlungen als strenger denn erforderlich gewertet werden sollten.

Falls der Draht beim Crimpen unter Nominalspannung (entsprechend einer Belastung mit einem 90-g-Massestück) nicht oder lediglich oberhalb der Führungshülse brach, wurde er mit einem zusätzlichen 25-g-Massestück belastet, um die Fixierung des Drahtes in der Hülse und seine Integrität zu überprüfen. Es

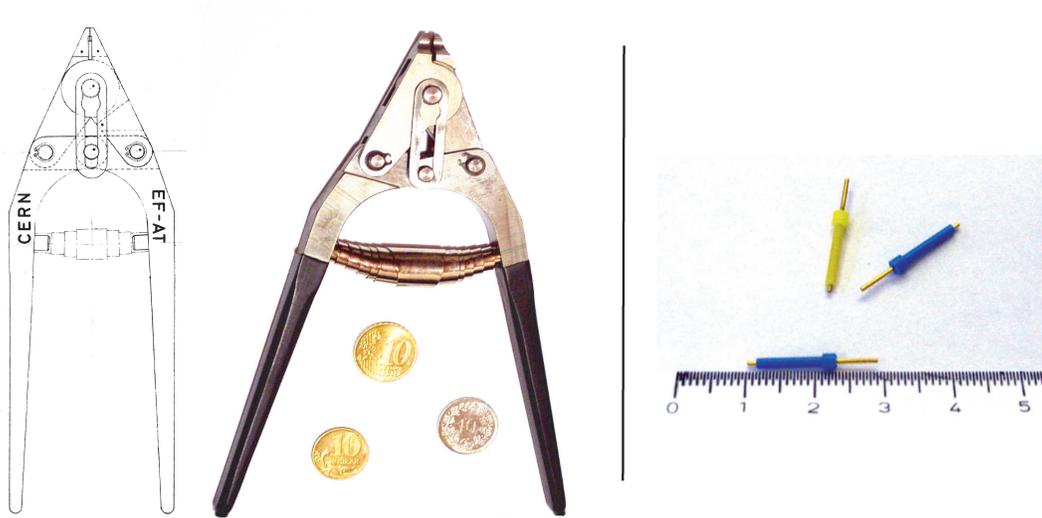


Abbildung 11.5: Crimpwerkzeug und Drahtführungshülsen (in anderem Maßstab). Die Backen des Werkzeugs schließen sich nicht ganz, sie bearbeiten die Messinghülsen so, dass sie durch das Crimpen eine Stärke von $(0,42 \pm 0,01)$ mm erhält.

zeigte sich, dass der Signaldraht bei dieser zusätzlichen Belastung niemals riss oder aus der Führungshülse glitt, was einerseits bedeutet, dass die Qualität der Crimpverbindung unter den am Crimpwerkzeug im Verlauf des Experimentes vorgenommenen Modifikationen nicht gelitten hat, andererseits aber auch als Beleg dafür gewertet werden darf, dass lediglich der Crimpvorgang selbst für den Signaldraht gefährlich ist; einmal fixiert, kann von ausreichender Integrität desselben ausgegangen werden, sodass durch das Crimpen induzierte Drahtrisse etwa beim Transport der Zähler kaum zu besorgen sein dürften.

Die Beobachtungen können wie folgt zusammengefaßt werden:

1. Der Draht bricht mit höherer Wahrscheinlichkeit im oberen Bereich der Hülse.
2. Selbst kaum sichtbare Bewegungen der Hülse, auch wenn sie lediglich von der nicht fixierten Backe des Crimpwerkzeuges hervorgerufen werden, führen unweigerlich zum Drahtbruch.
3. Andererseits waren bei praktisch allen Drahtbrüchen Bewegungen der Hülse visuell festzustellen, vor allem, wenn das Crimpwerkzeug zu greifen beginnt.
4. Eine Verkippung des Werkzeuges beim Crimpvorgang bedingt eine zusätzliche Gefährdung des Drahtes, dieselbe Folge hat der Versuch, die Hülse

manuell zu stabilisieren, indem eine Backe des Crimpwerkzeuges auch nur leicht dagegen gedrückt wird.

5. Allein die in Frage stehende zweite Drahtcharge war von Brüchen im unteren Bereich der Führungshülse betroffen, oft auch an beiden Enden des gecrimpten Bereiches.
6. Gute Fixierung des Crimpwerkzeuges bringt den Draht in Gefahr, da die Drahtführungshülse gezwungen wird, den Werkzeugbacken zu folgen, während die Kräfte darauf beim Crimpen aus der Hand offenbar geringer sind. Der Draht bricht unmittelbar bei Sichtbarwerden der Hülsenbewegung.
7. Der Draht bricht beim Crimpen, wenn er nicht axial nach oben weggeführt wird.
8. Eine elastische Fixierung des Crimpwerkzeuges, die seine rasche Justage relativ zur Hülse vor dem eigentlichen Crimpvorgang erlaubt, scheint sich anzubieten.
9. Es kann als wahrscheinlich angesehen werden, dass die vier vorhandenen Crimpwerkzeuge nicht in allen Parametern übereinstimmen, und zwar in einer Weise, die sich auf die Qualität der Crimpung auswirkt. Obwohl von den Mitarbeitern als verlässlich bezeichnete Werkzeuge hier nicht überprüft wurden, so gibt doch der Unterschied der mit Werkzeug 1 und 4 am selben Draht erzielten Ergebnisse einen gewissen Hinweis darauf, der allerdings noch einer genaueren Bestätigung bedarf, zumal sich ein ähnliches Bild auch durch Verwendung des Drahtes 7 anstelle von Drahtprobe 4 ohne Tausch des Werkzeuges erzielen ließ (siehe Abbildung 11.7).

Die Messung der Restdicke an der gecrimpten Fläche erbrachte eine Differenz von $(10 \pm 5) \mu\text{m}$ für mit Werkzeug 4 ausgeführte Crimpungen zwischen dem oberen und unteren Ende dieser Fläche. Dies kann als Hinweis darauf verstanden werden, dass die Häufung von Drahrissen im oberen Bereich der Führungshülsen nicht zufällig auftritt, sondern dass die größere Beanspruchung des Drahtes in diesem Bereich zum Versagen desselben führt. Da nur das Werkzeug 4 diese Auffälligkeit zeigt, muss sie sich durch Schleifen der Werkzeugbacken auf Parallelität korrigieren lassen.

10. Eine Vergrößerung des Abstandes zwischen der Hülse und der Aufhängung des Drahtes führt zu einer erheblichen Verminderung des Drahrisikos.
11. Dasselbe gilt für eine Verlegung des zu quetschenden Bereiches an das Ende der Führungshülse. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Hülse ihre Eigenschaft, den Draht wenigstens in einer Dimension zu zentrieren, verlieren könnte.

12. Eine elastische Drahtaufhängung zu realisieren ist problematisch, nachdem der Einfluss der Masse des elastischen Elementes mit Befestigungsmöglichkeit für den Draht nicht zweifelsfrei geklärt werden konnte. Die Ergebnisse der diesbezüglichen Testreihe können allenfalls als Hinweis darauf verstanden werden, dass beim Brechen des Drahtes mechanische Schwingungen hoher Frequenz eine Rolle spielen, für die sich die „elastische“ Drahtfixierung steif ausnimmt.
13. Die Abrundung der Ecken der Werkzeugflächen blieb ohne jegliche Auswirkung.

Aus den oben dargestellten Ergebnissen kann nur geschlossen werden, dass sich kein der Messung zugänglicher Parameter der Drahteigenschaften geändert hat. Vielmehr stellt der Crimpprozess selbst offenbar eine Gefahr für die Integrität des Signaldrahtes dar, vor allem, wenn die Backenflächen der Crimpzange beim Schließen nicht parallel geführt werden.

Trotz der Unsicherheiten können einige generelle Empfehlungen zur Prozessführung gegeben werden:

1. Das Personal sollte besser in der Bedienung des Crimpwerkzeuges und der Bedeutung der Arbeitsschritte unterwiesen werden. Besonderes Augenmerk muss auf die Vermeidung von Hülsenbewegungen beim Crimppvorgang gerichtet werden. Im Vorhinein kann die korrekte Lage des Werkzeuges zuverlässig überprüft werden, indem es angesetzt und die Backen vorsichtig geschlossen werden. Wird eine Bewegung der Hülse bemerkt, so kann das Werkzeug gefahrlos wieder geöffnet und in seiner Lage verändert werden, da der Draht ggf. erst gegen Ende der Verformung versagt.
2. Die Distanz zwischen der oberen Drahtaufhängung und der Drahtführungshülse sollte für den Crimpprozess am oberen Kammerrahmen so weit als möglich vergrößert werden.
3. Der Einsatz einer elastischen Drahtfixierung ist sinnlos, bevor nicht erhebliche Entwicklungsarbeit geleistet wurde, die weitgehende Masselosigkeit zum Ziel haben muss.
4. Sinnvoll ist die Anbringung einer Handauflage für die ausführenden Mitarbeiter.
5. Untersuchenswert ist die Möglichkeit, am Ende der Hülse zu crimpen. Hierbei ist die Frage zu beantworten, inwieweit eine Zentrierwirkung der ohnehin nur in einer von beiden Dimensionen erfolgenden Crimpung beim bisherigen Verfahren zum Tragen kommt und dann verloren geht.
6. Das Crimpwerkzeug sollte nicht verändert werden, es sei denn mit dem Ziel, die Parallelität der Backen zu verbessern.

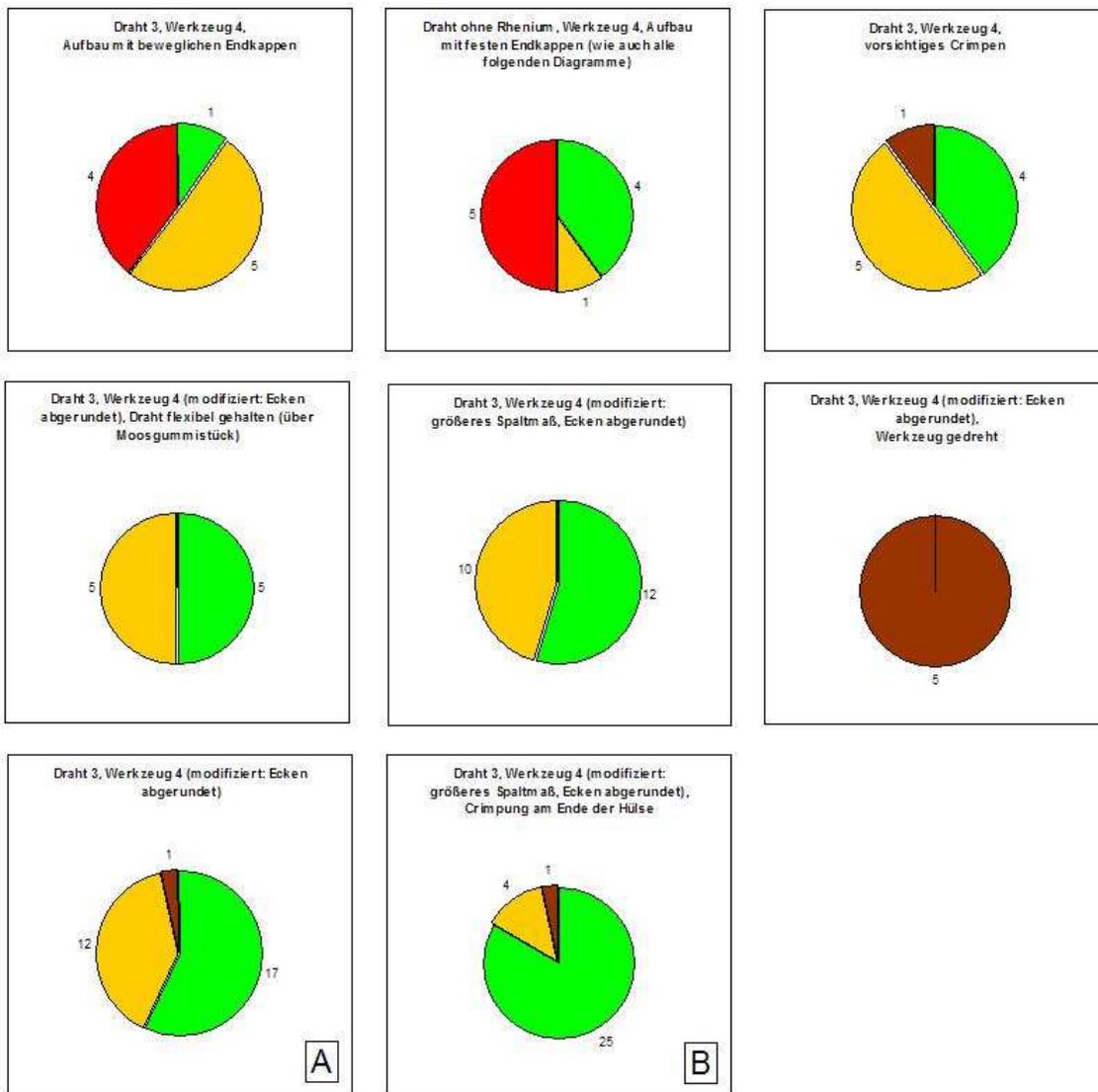


Abbildung 11.6: Auswertung der Crimptests (1).

Farbcode:

grün: kein Drahttriss

gelb: Drahttriss oberhalb der Hülse (mithin außerhalb des Driftröhrens)

braun: Drahttriss unterhalb der Hülse

rot: Drahttriss auf beiden Seiten

Auswertung und Bedeutung der Buchstaben: siehe Text.

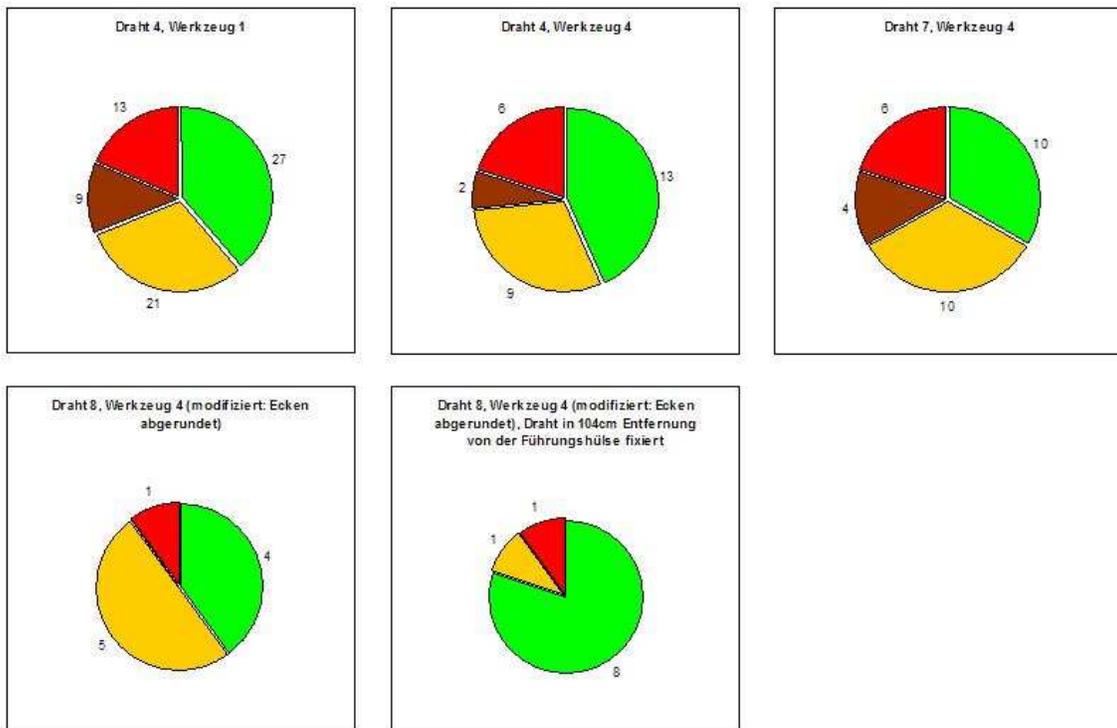


Abbildung 11.7: Auswertung der Crimptests (2).

Farbcode:
siehe Abbildung 11.6

Auswertung: siehe Text.

7. Crimpungen mit wesentlich geringerer Drahtspannung (eine Reduktion etwa auf 80 g wäre sinnlos) verringern die Gefahr von Drahttrissen. Die Möglichkeit, die volle Drahtspannung erst nach erfolgter oberer Crimpung herzustellen, verdient weitere Untersuchung.
8. Unabdingbar ist die Bereitstellung geeigneter Aufbewahrungsmöglichkeiten für die Werkzeuge, es empfiehlt sich auch eine Fixierung am Handgelenk, um Dejustage und sonstige Schäden zu vermeiden, sollte das Werkzeug einmal zu Boden fallen.

Abschließend seien noch einige theoretische Überlegungen zum Crimpvorgang angeführt:

Der Draht wird bei manueller Crimpung, die nicht auf beiden Seiten der Beanspruchung simultan erfolgt, in radialer Richtung ausgelenkt, sodass es zum Kontakt des Drahtes mit der Hülsenöffnung kommt. Dies hat zur Folge, dass der Draht einer Biegebeanspruchung unterliegt, die dazu führt, dass er kontaktseitig gestaucht, jedoch an der der Kontaktstelle abgewandten Seite gedehnt wird. Dies, so ist anzunehmen [64], könnte bei der ohnehin schon hohen Zugbelastung des Drahtes (12,5 MPa bei einer 90 g entsprechenden Spannung, das sind 70 % der Fließgrenze) zu Mikrorissbildung führen. Nach Rissausbreitung ist abruptes Versagen die Folge, da sich der Querschnitt des Drahtes verringert und den axialen Belastungen nicht standhält.

Es ist davon auszugehen, dass der Draht anisotrope Materialeigenschaften besitzt, weil ihm bei der Herstellung durch „Ziehen“ verfahrensbedingt eine kristallografische Vorzugsorientierung aufgeprägt wird. Hierbei ist eine axialsymmetrische Textur, die als „Fasertextur“ [14] bezeichnet wird, zu erwarten.

Aus Gerthsen Physik [75], S. 816:

„Ein zugbeanspruchter Draht verlängert sich vorwiegend durch [...] Gleitungen [längs bestimmter Netzebenen, besonders solcher mit kleinen Miller-Indizes, also geringer Verzahnung ineinander], die unter etwa 45° zur Zugrichtung stehen. Eine Netzebene könnte über die andere gleiten, indem sich alle ihre Atome gleichzeitig anheben. Das entspräche aber einer lokalen Dehnung von erheblichem Ausmaß (z.B. 0,225 bei der dichtesten Kugelpackung). Demnach dürfte die Festigkeitsgrenze nicht sehr viel kleiner sein als der Elastizitätsmodul (etwa $\frac{1}{10}$ davon), was noch immer viel zu hoch ist.“

In Wirklichkeit gleitet nicht die ganze Netzebene auf einmal, sondern nur ein Teil davon, im Grenzfall eine einzige Atomreihe. So entsteht eine Störung, die sich durch das Gitter schiebt, eine Versetzung oder Dislokation (Taylor, Orowan, Polanyi, 1934).“

Von Troost et al. [72] an Wolframdraht durchgeführte Untersuchungen erbrachten in der Tat den Nachweis einer zylindrischen Textur. Nachdem die Drahtfixierung durch Crimpen ein häufiger angewandtes Verfahren ist, könnte eine weitergehende Analyse der zugrundeliegenden kristallographischen Verhältnisse technologisch verwertbare Ergebnisse liefern.

Abschließend sei noch ausdrücklich auf die geringe statistische Signifikanz der Ergebnisse hingewiesen⁵. Obwohl im Ganzen etwa 350 Crimpungen unter kontrollierten Bedingungen ausgeführt wurden, liegt der jeweils untersuchten Parameterkombination nur eine Stichprobe von 10 bis 30 Versuchen zugrunde.

Ausblick

Mit den zur Verfügung stehenden Mitteln konnte die Ursache der Drahttrisse nur ansatzweise erfasst werden. Sollte es in Zukunft weiterhin zu mechanischem Versagen der Signaldrähte in großer Zahl kommen, so bieten sich sowohl auflicht- als auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen an der Bruchfläche an, um ein tieferes Verständnis für die beobachteten Phänomene zu erlangen [63]. Bereits unter dem Lichtmikroskop können Versetzungsstrukturen durch Schleifen, Polieren und chemisches Ätzen sichtbar gemacht werden. Inhomogenitäten des Materials, die im Hinblick auf ein Versagensverhalten von Bedeutung sein können, sind jedoch nur einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung der Bruchfläche zugänglich.

Es empfiehlt sich, Analysen dieser Art unabhängig vom Produktionsprozess vorzunehmen, um auf eine erneute Häufung von Drahttrissen ggf. rasch reagieren zu können.

11.2 Zeitliche Gestaltung der Produktion

An dieser Stelle soll in aller Kürze auf das zeitliche Ineinandergreifen der Produktionsschritte eingegangen werden. Das angewandte Verfahren lehnt sich an die sogenannte „Critical Path Method“ (etwa: Methode der kritischen Abfolge) an, was besagt, dass diejenige Abfolge von Produktionsschritten ermittelt wird, bei deren Verzögerung es zu einer Verzögerung des Gesamtablaufes kommt. Eine Folge hintereinanderliegender Produktionsschritte, zwischen denen jeweils auf die Beendigung anderer Abläufe gewartet werden muss, gehört also nicht zur kritischen Abfolge. Umgekehrt muss der Beseitigung einer Störung in der kritischen Abfolge höchste Priorität eingeräumt werden. Mit Hilfe eines Netzplanes wurde ermittelt, wie lange die verschiedenen Produktionsmittel zur Herstellung einer Detektoreinheit benötigt wurden.

⁵Nicht zuletzt wegen der Kosten - ca. 1 Schweizer Franken pro Drahtführungshülse und damit pro Versuch - wurde auf das Sammeln größerer Stichproben verzichtet.

Nach Überwinden der Anfangsschwierigkeiten zeigte sich anhand kontinuierlicher Überwachung des Zeitbedarfs der einzelnen Produktionsschritte, dass die Fertigung einer Doppelebene im Mittel 108 Arbeitstage dauert, wobei durch Optimierung der Belegungsauern der einzelnen Produktionsschritte nach der Herstellung von vier Doppelebenen erreicht wurde, dass der zeitliche Versatz zwischen dem Beginn der Produktion einer Ebene und dem der folgenden von 40 auf 34 Arbeitstage reduziert werden konnte.

Das Ablaufdiagramm im Anhang (Abbildungen D.1 bis D.4) macht deutlich, dass dieser zeitliche Versatz der entscheidende, die Gesamtdauer der Produktion bedingende Parameter ist. Auf den Zeitraum, den die Herstellung einer Einheit (Doppelebene) in Anspruch nimmt (in diesem Fall 108 Tage), kommt es umso weniger an, je mehr dieser Einheiten produziert werden.

Die wesentlichen Elemente des Ablaufdiagrammes sind die schwarzen Summenbalken, die den Zeitbedarf des ganzen Projektes (oberster Balken) bzw. den der Untereinheiten (Produktion einer Doppelebene) beschreiben, sowie die farbigen Vorgangsbalken, die für Einzelschritte stehen. Die Balken dürfen sich nur dann überlappen, wenn die Ausführung der jeweiligen Aufgaben keine gemeinsamen Ressourcen, seien es Produktionsmittel oder Personal, in Anspruch nimmt. Die Beachtung dieser Bedingung wird durch Vorgangsverknüpfungen, dargestellt durch senkrechte farbige Linien, sichergestellt, die zeitliche Koinzidenz konkurrierender Vorgänge verhindern.

Am Beispiel der Belegung der drei kleinen und des einen großen Stahltesches sei schließlich noch dargestellt, wie sich der Einsatz knapper Ressourcen (großer Stahltesch) von dem in ausreichendem Maße vorhandener Produktionsmittel (kleine Tische) unterscheidet.

11.3 Materialfluss und Transport der fertigestellten Zähler

Die Produktion kann sich nicht nur aufgrund von Engpässen bei der Infrastruktur, sondern auch beim Materialfluss verzögern. Die kumulierte Erfahrung bei der Herstellung von zehn Doppelebenen zeigt, dass Verbrauchsmaterialien, die in Westeuropa oder Nordamerika beschafft und vom Transportdienst des C.E.R.N. versandt werden, in der Regel erst nach etwa einem Monat am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna eintreffen. Der Erfahrung zu Folge werden die sich zudem rasch ändernden Einfuhrbestimmungen der Russischen Föderation von den damit befassten Organen der Finanzverwaltung in einer Weise vollzogen, die sich als erheblich stringenter bezeichnen lässt, als die dem Opportunitätsprinzip⁶ verpflichtete Praxis der Zollverwaltungen etwa der Europäischen Union. Um ein Einfuhrbegehren nicht zu verzögern, muss die schriftliche Deklaration

⁶Ein Grundsatz, nach dem der Staat nach Zweckmäßigkeitsgesichtspunkten handeln darf.

Usage of Dubna Production Resources

Large steel table

Week 21 /2000



date	time	workpiece	for DL	Status	picture	remarks
Monday 21.5.	10h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Straw layer glued to frame elements	To be compl.	Workpiece finished
Tuesday 22.5.	11h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Preparation for carbon strip gluing, gluing 1 st -2 nd strip	To be compl.	Start of new work
Wednesday 23.5.	10h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	3 rd carbon strip glued	To be compl.	
Thursday 24.5.	11h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	4 th carbon strip glued	156	
Friday 25.5.	11h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Carbon strips glued, removal of auxiliary plastics elements	162	
Saturday 26.5.	-	1 st layer (Mylar, vertical)	5		-	

Usage of Dubna Production Resources

Large steel table

Week 22 /2000



date	time	workpiece	for DL	Status	picture	remarks
Monday 28.5.	13h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Gluing distance keepers between 6 and 10mm segments	168	
Tuesday 29.5.	11h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Application of silicone barriers to the straw ends	174	
Wednesday 30.5.	11h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	1 frame bar glued, gluing of the 2 nd in progress	179	
Thursday 31.5.	14h	1 st layer (Mylar, vertical)	5	Glue hardening	186	Workpiece finished
Friday 01.6.	10h	4 th chamber (Mylar, horizontal)	4	Preparation for periphery board gluing	192	Process n
Saturday 02.6.		3 rd chamber (Mylar, horizontal)	4	Periphery boards glued, currently being soldered	198	

Usage of Dubna Production Resources

Large steel table

Week 23 /2000



date	time	workpiece	for DL	Status	picture	remarks
Monday 04.6.	11h	4 th double layer	4, then 5	Periphery gluing finished, started with 5 th chamber (c-strips)	204	Process finished, occupied by the 2
Tuesday 05.6.	10h	2 nd layer of the 5 th chamber	5	1 long carbon strip glued, 2 nd in preparation	210	
Wednesday 06.6.	10h	2 nd layer of the 5 th chamber	5	Adjusting auxiliary plastics elements for gluing 3 rd carb. strip	216	
Thursday 07.6.	13h	2 nd layer of the 5 th chamber	5	4 th carbon strip and frame-distance piece glued	219	Workpiece
Friday 08.6.	13h	4 th double layer	4	Gluing gas channels (Phys. hole, 1 st side)	227	1-day proc
Saturday 09.6.	16h	4 th double layer	4	Gas cover assembly	233	New process star

Abbildung 11.8: Zeitkritisches Produktionsmittel: Die Belegung des großen Stahltisches während dreier Wochen, dargestellt anhand sogenannter Ressourcen-Blätter, wie sie zur Überwachung des Projekt-Fortschrittes eingesetzt wurden. Zur besseren Übersicht wurde die Spalte „for DL“ („für Doppel Ebene“) farbig unterlegt. Es wird deutlich, dass das auf dem großen Stahltisch bearbeitete Werkstück innerhalb des betrachteten Zeitraumes drei Mal gewechselt werden musste und die Produktion der Doppel Ebenen 3 und 4 hier ineinander greift. In den Spalten rechts daneben steht grüner Hintergrund für einen abgeschlossenen, gelber für einen neu begonnenen Arbeitsschritt.

mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt werden, da der mit einer nachträglichen Korrektur verbundene Aufwand jedenfalls als unverhältnismäßig bezeichnet werden muss.

Transport

Um den zunächst unkalkulierbaren Risiken einer Beschädigung der fertiggestellten Zähler während des Transports an das C.E.R.N. zu begegnen, wurde ein Prototyp einer Doppellebene der Größe $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ einer simulierten Lkw-Fahrt von Dubna nach Brest (an der Grenze zwischen den Republiken Weißrussland und Polen) unterworfen, da davon auszugehen ist, dass die größte mechanische Belastung - wegen der zum gegenwärtigen Zeitpunkt schlechten Straßenverhältnisse - auf diesem Streckenabschnitt zu erwarten ist. Die Simulation wurde auf einem Vibrations-Teststand („Vibrostand“) durchgeführt, unter Beachtung bekannter Ähnlichkeitssätze konnte auf das Verhalten einer Kammer realer Größe geschlossen werden.

Es muss damit gerechnet werden, dass die Doppellebenen durch von Fahrbahnunebenheiten hervorgerufene Beschleunigungen in mechanische Resonanz geraten und die bekannte Resonanzkatastrophe zum Bruch der Klebeverbindungen führen könnte. Dies umso mehr, als die massive Struktur um die physische Öffnung in der Kammermitte herum gerade am Ort größter Amplitude der Grundschwingung zu liegen kommt.

Ferner ist vorstellbar, dass selbst eine einmalige Auslenkung der Kammermitte aus ihrer Ruhelage zum Entstehen von Haarrissen in der Epoxidharzstruktur des Gasverteilers führt und so dessen Dichtigkeit leidet.

Obwohl die Tests am Vibrostand nur eine Amplitude der Grundschwingung von 50 mm erwarten lassen [55], welche aufgrund von bei der Produktion gesammelten Erfahrungen mit geklebten Strohalmsegmenten als ungefährlich eingestuft werden kann, wurde für den Transport der Detektoren an das C.E.R.N. die vertikale Lage gefordert. Um die Amplitude der Schwingungen klein zu halten, wurden die einzelnen Doppellebenen in Polyethylenfolie verpackt, und der Raum zwischen diesen Folien und den Driftröhrchen wurde entlang der Kohlefaserstreifen mit 10 cm breiten und 1 cm dicken Schaumgummimatten ausgefüllt.

Abbildung B.12 (im Anhang) zeigt eine Aufnahme der hölzernen Transportverpackung.

Kapitel 12

Das Gassystem

Das Gassystem für die Strohdriftkammern wurde im Zeitraum März bis Mai 2000 in Zusammenarbeit zusammen mit der Gruppe um M. Bosteels am C.E.R.N. entwickelt und gebaut.

Unter Rückgriff auf Simulationen mit dem Programmpaket GARFIELD von R. Veenhof [74] wurde die dreikomponentige Mischung $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2 = 74:20:6$ als Zählgas ausgewählt. Vergleichbare Mischungen wurden bereits verschiedentlich für Driftkammern eingesetzt und vereinen Linearität in der Orts-Driftzeit-Relation über nahezu die gesamte Driftstrecke mit hoher Driftgeschwindigkeit, welche wegen der großen Ratenbelastung zusätzlich gefordert werden muss. Im COMPASS-Spektrometer wird von den Straw-Driftkammern keine Empfindlichkeit auf Photonen verlangt¹, weswegen auf relativ preiswertes Argon als Hauptbestandteil zurückgegriffen werden kann.

Zwar wurde das Auftreten des sogenannten Aging-Phänomens bisher für keine der enthaltenen Komponenten beschrieben, dennoch wurden am Garching Tandem-Beschleuniger Tests hierzu ausgeführt, da sich auch Strukturmaterialien des Detektors auf das Alterungsverhalten auswirken können (siehe Kapitel 7). Es konnte gezeigt werden, dass der Pulshöhenverlust bei einer akkumulierten Ladung von 1,2 C/cm Signaldrahtlänge unter 2 % bleibt. Innerhalb von wenigstens 6 Jahren kontinuierlichen Zählerbetriebes ist also mit keiner Verschlechterung von Effizienz oder Ortsauflösung aufgrund des Aging-Phänomens zu rechnen.

Aufbauend auf umfangreichen Berechnungen und Messungen zur Gasdiffusion durch das Wandmaterial der Straws und den Strömungswiderständen der einzelnen Bauteile wurden die Anforderungen an das Gassystem definiert. Wegen des CF_4 -Gehaltes im Zählgas wurde das System geschlossen gestaltet, mithin wird Gas, das die Kammern verlässt, gereinigt und dem Zähler wieder zugeführt, nachdem das durch Diffusion veränderte Mischungsverhältnis durch Zugabe der

¹Strohalm-Driftrohre werden beispielsweise auch als Photonen-Detektoren zum Nachweis von Übergangsstrahlung eingesetzt, etwa im inneren Spurverfolgungssystem des am neuen Hadronen-Speicherring LHC des C.E.R.N. geplanten ATLAS-Spektrometers. Die Photosensitivität wird hier dadurch erreicht, dass dem Zählgas Xenon statt Argon beigegeben wird.

unterrepräsentierten Komponenten wieder eingestellt worden ist.

Allein der Preis für Tetrafluormethan (CF_4) rechtfertigt Mehrausgaben für ein geschlossenes Gassystem. Ferner wird ein Abblasen dieses fluorhaltigen Gases in die Atmosphäre für nicht sachgerecht erachtet: Zwar findet CF_4 in der derzeit gültigen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft („TA Luft“) keine Erwähnung, doch muss eine nachteilige Auswirkung dieser Substanz auf das Klima² zumindest in Betracht gezogen werden, wenn sie in die Atmosphäre gelangt.

Im Einzelnen kann das Gassystem maximal 1 m^3 Zählgas pro Stunde durch die Kammern fördern, der Relativdruck kann auf $\pm 0,1 \text{ hPa}$ konstant gehalten werden, wobei aus mehreren Regelmechanismen der jeweils geeignete ausgewählt werden kann. Die präzise Regelung des Kammerdruckes ist eine wesentliche Anforderung an das Gassystem, da der Logarithmus der Gasverstärkung nach Gleichung 4.3 umgekehrt proportional zur Gasdichte und damit proportional zum Gasdruck ist. Bei einem Atmosphärendruck von etwa 1000 hPa ändert sich die Gasverstärkung bei einer Druckschwankung um $0,1 \text{ hPa}$ also nur um einen Faktor von $5 \cdot 10^{-5}$, was bei einem Gasverstärkungswert von beispielsweise 10^5 (großzügige Abschätzung) und einem Primärelektron lediglich etwa 1 aC an Ladungsdifferenz am Signaldraht ausmacht, drei Größenordnungen unter den typischen Schwellen der ladungsempfindlichen Vorverstärker von etwa 1 fC .

Da zum Zeitpunkt der Planung des Systems noch nicht alle Details des Zählers festgelegt waren, wurde es auf leichte Erweiterbarkeit hin ausgelegt. Sollten Tests mit dem ersten Kammermodul ergeben, dass die Kontrolle des Gasmischungsverhältnisses eine Erhöhung des Gasflusses durch die Kammern erfordert, so kann eine Erweiterung der Kapazität schnell und kostengünstig realisiert werden.

12.1 Auswahl des Zählgases

Die im Abschnitt 4.1.2 erwähnten Restriktionen fanden zusammen mit den durch die Alterungsneigung bedingten Einschränkungen (vgl. Abschnitt 7) Berücksichtigung bei der Auswahl des Zählgases:

Die Wahl einer Mischung von Argon, Tetrafluormethan und Kohlendioxid im Verhältnis 74:20:6 ist bedingt durch die hohe Driftgeschwindigkeit der Elektro-

²Der Parameter „Global warming potential“, der die Wirkung anthropogener Substanzen in der Erdatmosphäre im Hinblick auf den sogenannten „Treibhauseffekt“, also die zivilisationsbedingte Erhöhung der mittleren Temperatur auf der Erde, angibt, wurde vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen zu $50\,000$ bestimmt. Unter Zugrundelegung des von ihm/ihr benutzten Modells liefert Tetrafluormethan mithin, bezogen auf seine gesamte Verweildauer in der Atmosphäre, einen $50\,000$ -mal größeren Beitrag zur Erhöhung der mittleren Temperatur als in gleicher Menge in die Atmosphäre gelangtes Kohlendioxid [73]. Tetrafluormethan spaltet stratosphärisches Ozon nicht, da es mit einer C-F-Bindungsenergie von 489 kJ/mol bei 298 K [38] (das entspricht $5,07 \text{ eV}$ je einzelner Bindung) unter Einwirkung von UV-Strahlung ausreichend stabil ist.

nen, die wegen der hohen Ratenbelastung des Zählers erforderlich ist. Dies führt zu einer geringeren Okkupanz. Weiterhin ist die gute Linearität der Volumen-Driftzeit-Relation ein Auswahlkriterium. Darüber hinaus ändern sich die Eigenschaften dieser Gasmischung vergleichsweise wenig, wenn das Driftrohr einem Magnetfeld ausgesetzt wird. Die Spurverfolgungsstation 2 befindet sich im inhomogenen Magnetfeld des ersten Spektrometernagneten, sodass dieser Qualität der gewählten Gasmischung große Bedeutung zukommt. Insbesondere ist zu untersuchen, wie sich ihre Eigenschaften bei Verunreinigung des Gases etwa durch Stickstoff verändern.

In einem ersten Schritt wurde für die Gasmischung $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2=74:20:6$ (reines Zählgas) mit dem Programmpaket GARFIELD [74] eine Simulation der rt -Relation ausgeführt, die sodann mit der Mischung $\text{Ar}:\text{CF}_4:\text{CO}_2:\text{N}_2=71:20:6:3$ (mit Stickstoff verunreinigt) verglichen wurde. Bei einer Driftzeit von etwa 35 ns, die der eines für die Bestimmung der Ortsauflösung herangezogenen Driftzeitfensters entsprach (vgl. Abschnitt 10.2.1), ergab sich eine Abweichung von $(130 \pm 10) \mu\text{m}$, wobei das verunreinigte Gas höhere Driftzeiten aufwies. Ein damit betriebener Detektor bestimmt also den kleinsten Abstand zwischen Teilchentrajektorie und Signaldraht systematisch als zu groß. Bei 4 % Verunreinigung mit Stickstoff (ebenfalls auf Kosten des Argonanteils) beträgt die Abweichung bereits $(150 \pm 10) \mu\text{m}$.

Eine quantitative Diskussion der sich in den Driftrohren mit weiteren Gasgemischungen (ohne Berücksichtigung des Verunreinigungsaspektes) ergebenden rt -Relation und Gasverstärkung, die sowohl auf Simulationsrechnungen mit GARFIELD, als auch auf Experimenten am Garching Tandem-van-de-Graaff-Beschleuniger beruht, findet sich bei Noll [52].

12.2 Sicherstellung hinreichend konstanter Gasparameter

Die Zusammensetzung des Zählgases innerhalb der Kammern ist eine Funktion des Ortes. Um für jeden Punkt im sensitiven Volumen sicherstellen zu können, dass die Gaszusammensetzung innerhalb der geforderten Grenzen liegt, muss der Gasstrom durch die Zähler bekannt sein. Beispielsweise ist zu erwarten, dass der Volumen- bzw. Massenstrom durch diejenigen Strohhälme, die von der physischen Öffnung unterbrochen werden, wegen des zusätzlichen Strömungswiderstandes geringer ausfällt. Dies führt dann zu größerer Modifikation der Gaszusammensetzung durch Diffusion.

Um die zum verlässlichen Betrieb der Detektoren erforderlichen Eigenschaften des Zählgases sicherzustellen, müssen neben den Eigenschaften der Strohkammern auch die des Gassystems genau bekannt sein. Ein Ansatz zur mathematischen Beschreibung des Systems basiert auf der Kontinuitätsgleichung:

$$\operatorname{div} \vec{j}_V = -\dot{\rho} \quad (12.1)$$

Hierbei gilt für den Volumenstrom \vec{j}_V : $\rho \cdot \operatorname{div} \vec{v} = \operatorname{div} \vec{j}_V$, mit \vec{v} : Geschwindigkeitsvektor eines Volumenelements und ρ : Dichte des Mediums. Der Vektor \vec{j}_V steht also für die Quelledichte, unabhängig davon, ob sich die Dichte des Mediums durch Zu- bzw. Abfuhr von Material oder durch Kompression bzw. Entspannung ändert.

Im Falle des COMPASS-Strohdrieffkammer-Gassystems wären für diese Darstellung sechs Quellen zu berücksichtigen: die (erwünschte) Zufuhr von Frischgas, das „künstliche Leck“ zur Abgabe von Schadgasen, die Kupfer-Reinigungskolonnen, die demselben Zweck dienen, die Strohkammern selbst, deren große Oberfläche zu signifikanten Diffusionsströmen nach innen und außen führt, sowie Kompressor und Drosselorgan, die jeweils eine Dichteänderung des Gases bewirken.

Man nimmt nun naheliegenderweise an, dass Kompressor und Drosselorgan (hier die Flussregler) zu keiner Modifikation der Gaszusammensetzung führen, weswegen zweckmäßigerweise von der Volumen- auf die Massenstromdarstellung übergegangen werden sollte: Wegen der Beziehung $p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const.}$ (Gesetz von Boyle und Mariotte für Druck p und Volumen V bei konstanter Temperatur - die Konstante const. ist proportional zur Gasmasse) ändert sich am Kompressor der Volumen-, nicht aber der Massenstrom:

$$\operatorname{div} \vec{j}_m = -\dot{\rho}. \quad (12.2)$$

12.2.1 Modellrechnung zum Gasstrom durch die Driftröhrchen

In diesem Abschnitt werden Modelle diskutiert, die den Gasfluss durch die Detektoren beschreiben, um die Modifikation des Zählgases durch eindiffundierende Verunreinigungen abschätzen zu können.

Strömungswiderstände der einzelnen Bauteile

Der Druckbereich, in dem Driftkammern üblicherweise betrieben werden und in dem auch die COMPASS-Strohalmkammern arbeiten, ist durch den so genannten *viskosen* oder *molekularen* Fluss gekennzeichnet. Er wird nach unten durch den Druckbereich abgegrenzt, in dem die mittlere freie Weglänge der Molekeln größer als die Gefäßdimensionen ist, und nach oben durch einen Bereich so hohen Druckes, dass intermolekulare Kräfte dominieren.

Unter der Annahme stationärer, isothermer Strömung gilt für den Strömungsleitwert³ C durch eine Leitung von kreisförmigem Querschnitt folgende von Ben-

³Der Strömungsleitwert ist der Kehrwert des Strömungswiderstandes. Im Gegensatz zu

singer und Wellenstein [7] angegebene Zahlenwertgleichung, die aus dem Gesetz von Hagen und Poiseuille für laminare Strömung folgt:

$$C = 3,27 \cdot 10^{-2} \left(\frac{d^4}{\eta l} \right) \bar{p} \quad (12.3)$$

Hierbei steht $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$ für den mittleren Druck in der Leitung (p_1 und p_2 : Druck am Ein- und Ausgang) in Torr, d und l für Durchmesser und Länge der Leitung in cm sowie η für die Viskosität des Gases in Poise (1 Poise = 0,1 Pa s) bei dem mittleren herrschenden Druck. C ist in dieser Zahlenwertgleichung mit der Einheit 1/s zu versehen.

Für eine Leitung von rechteckigem Querschnitt, etwa den Gaskanal an der physischen Öffnung oder in einer Endkappe, geben Bensinger und Wellenstein folgende Zahlenwertgleichung an:

$$C = 4,17 \cdot 10^{-2} Y \left(\frac{A^2}{\eta l} \right) \bar{p} \quad (12.4)$$

Die Definitionen sind dieselben wie in Gleichung 12.3, A steht für die Querschnittsfläche in cm^2 , Y ist eine tabellierte Konstante, die 0,95 für ein Seitenverhältnis von 0,7 beträgt, für ein Seitenverhältnis von 0,5 ergibt sich der Wert 0,82. [7].

Mit diesen Gleichungen wurden die Strömungsleitwerte der einzelnen Kammerbauteile berechnet, umgerechnet in Strömungswiderstände sind sie den experimentell ermittelten Werten in Tabelle 12.1 gegenübergestellt.

Messung der Strömungswiderstände

Die im Abschnitt 12.2.1 berechneten Strömungswiderstände der den Gasstrom durch den Zähler beeinflussenden Bauteile wurden mithilfe der in Abbildung 12.2 dargestellten Anordnung auch experimentell bestimmt:

Der Gasstrom aus einer Stickstoffflasche wird zunächst über einen mechanischen Flussmesser (Messbereich: 0-100 l/h) geführt, direkt am zu untersuchenden Objekt (Strohalm oder Endkappe) misst ein Manometer mit Vakuumöl⁴ der Dichte 0,9 g/cm³ die Differenz zum Außendruck, gegen den das Gas aus dem zu untersuchenden Objekt abgeblasen wird.

Durch den Anschluss direkt am Messobjekt lässt sich der Einfluss der Strömungswiderstände der Leitungen und des Flussmessers (sowie die evtl. Abhängigkeit des Flussmesser-Strömungswiderstandes von seiner Stellung im Falle der

(gewöhnlichen) elektrischen Widerständen ist der Strömungswiderstand eine Funktion des Druckes, weswegen er nur bei gegebenem Druck als konstant betrachtet werden kann.

⁴Eine geringe Dichte der Manometerflüssigkeit wirkt sich günstig auf den Messfehler aus, da die abzulesende Wegdifferenz in den beiden Manometerschenkeln umgekehrt proportional zur Flüssigkeitsdichte ist.

Messung bei konstantem Fluss) ausschalten, weswegen das Manometer unmittelbar die relevante Druckdifferenz anzeigt, zumal der Auslass des Röhrchens bzw. der Endkappe immer auf atmosphärischem Druck liegt. Der Volumenstrom wird nun bei jedem Objekt auf den gleichen Wert im laminaren Strömungsregime eingestellt, der Strömungswiderstand ist dann proportional zum Quotienten aus Druckdifferenz und Volumenstrom.

Um sicherzustellen, dass die Strömung in jedem Falle laminar ist, wurde mit den 3 Endkappen (6 mm, 10 mm und physische Öffnung) ein Diagramm „Volumenstrom als Funktion der Druckdifferenz“ aufgenommen und dann bei einem Volumenstrom gemessen, der einem Punkt auf der Geraden im laminaren Bereich entspricht.

Für laminare Strömungen gilt bei einer Druckdifferenz von Δp für den Volumenstrom $\frac{dV}{dt}$ (Gesetz von Hagen und Poiseuille):

$$\frac{dV}{dt} = \text{const} \cdot \Delta p \quad (12.5)$$

Turbulente Strömungen werden durch folgende empirische Beziehung beschrieben:

$$\frac{dV}{dt} = \text{const}' \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (12.6)$$

Beide Beziehungen gelten nur für Rohre mit kreisförmigem Querschnitt. Nach Logarithmieren (die Konstanten werden der Einfachheit halber als dimensionslos betrachtet) erhält man:

$$\log \frac{\frac{dV}{dt}}{[\frac{dV}{dt}]} = \log \text{const} + \log \frac{\Delta p}{[\Delta p]} \quad (12.7)$$

bzw.

$$\log \frac{\frac{dV}{dt}}{[\frac{dV}{dt}]} = \log \text{const}' + \frac{1}{2} \cdot \log \frac{\Delta p}{[\Delta p]} \quad (12.8)$$

Da der Logarithmus einer Konstanten wieder eine Konstante ist, unterscheiden sich die Steigungen der die laminare und die turbulente Strömung darstellenden Geraden im Diagramm $\log \frac{dV}{dt}(\Delta p)$ (erneut vereinfacht: Größen dimensionslos) nur um einen Faktor $\frac{1}{2}$.

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung ist in den Diagrammen der 6- und 10-mm-Endkappe gut zu erkennen, im Falle der Endkappe für die physische Öffnung ist jedoch nicht sicher zu beurteilen, ob ein Umschlag des Strömungsregimes überhaupt erfolgt ist, und ob mithin die gestrichelte oder die durchgezogen durch die geringer Druckdifferenz entsprechenden Punkte gezeichnete Gerade die realistischere Mittelung wiedergibt.

Die Abhängigkeiten sind für alle drei Endkappentypen in Abbildung 12.1 zusammengefasst. Die geschätzten Messfehler betragen ± 2 Pa für die Druck- und

± 2 l/h für die Volumenstrommessung, wenn man annimmt, die Steighöhe des Vakuumöls im Manometer auf $\pm 0,25$ mm ablesen zu können. Volumen- und damit Dichteänderungen innerhalb der Apparatur dürften sich bei den anzunehmenden Druckverhältnissen nur in vernachlässigbarer Weise auswirken.

Im Falle der Endkappen an den Kammerrändern mit rechteckigen Gaskanälen lässt sich das Gesetz von Hagen und Poiseuille allerdings nicht anwenden, anhand empirisch ermittelter Gleichungen [7] lassen sich aber die Dimensionen eines vergleichbaren Kreisrohres errechnen.

Im Übrigen ist plausibel, dass sich im Falle eines rechteckigen Querschnittes das laminare und das turbulente Regime stärker unterscheiden (man erkennt die größere Änderung der Geradensteigung), denn der Kreis ist diejenige geometrische Form mit dem kleinsten Umfangs-zu-Querschnitts-Verhältnis. Der rechteckige Gaskanal weist bei gleicher Querschnittsfläche eine größere Begrenzungsfläche auf, an der die Randbedingung „Strömungsgeschwindigkeit = 0“ erfüllt sein muss. Nach dem Umschlagen zur turbulenten Strömung gilt (genaugenommen nur außerhalb der Prandtl'schen Grenzschicht) diese Randbedingung nicht mehr, das Geschwindigkeitsprofil wird flacher, und der Unterschied zum Kreisrohr geringer, was im Diagramm ebenfalls erkennbar ist.

Bei den 6- und 10-mm-Endkappen wurde nur von einem Gaskanal ausgegangen (die Dimensionen sind bei beiden gleich, siehe Abb. 9.2), da der andere durch die Massefeder zum überwiegenden Teil verschlossen ist und eine Verringerung der lichten Weite sich mindestens in vierter Potenz auswirkt. Aus den Ergebnissen kann allerdings geschlossen werden, dass er doch einen merklichen Beitrag liefert. Bei der Endkappe für die physische Öffnung ist der Knick (das Röhrchen steht senkrecht auf der Strohhalmachse) nicht berücksichtigt. Die Auswirkung des Knicks wurde theoretisch nicht untersucht, aber die Abweichung des Strömungswiderstandes von dem für ein gerades Rohr berechneten Wert geht in die richtige Richtung, zu kleineren Strömungsleitwerten.

Tabelle 12.1: Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Strömungsleitwerten C einiger Kammerbauteile, jeweils in Normlitern je Sekunde und 133 Pa (≈ 1 Torr) Druckdifferenz.

	$\frac{C_{\text{berechnet}}}{\text{l}_n/(s \cdot 133 \text{ Pa})}$	$\frac{C_{\text{gemessen}}}{\text{l}_n/(s \cdot 133 \text{ Pa})}$
10-mm-Endkappe	0,019	$0,020 \pm 0,003$
6-mm-Endkappe	0,019	$0,029 \pm 0,004$
Endkappe physische Öffnung	0,060	$0,043 \pm 0,006$

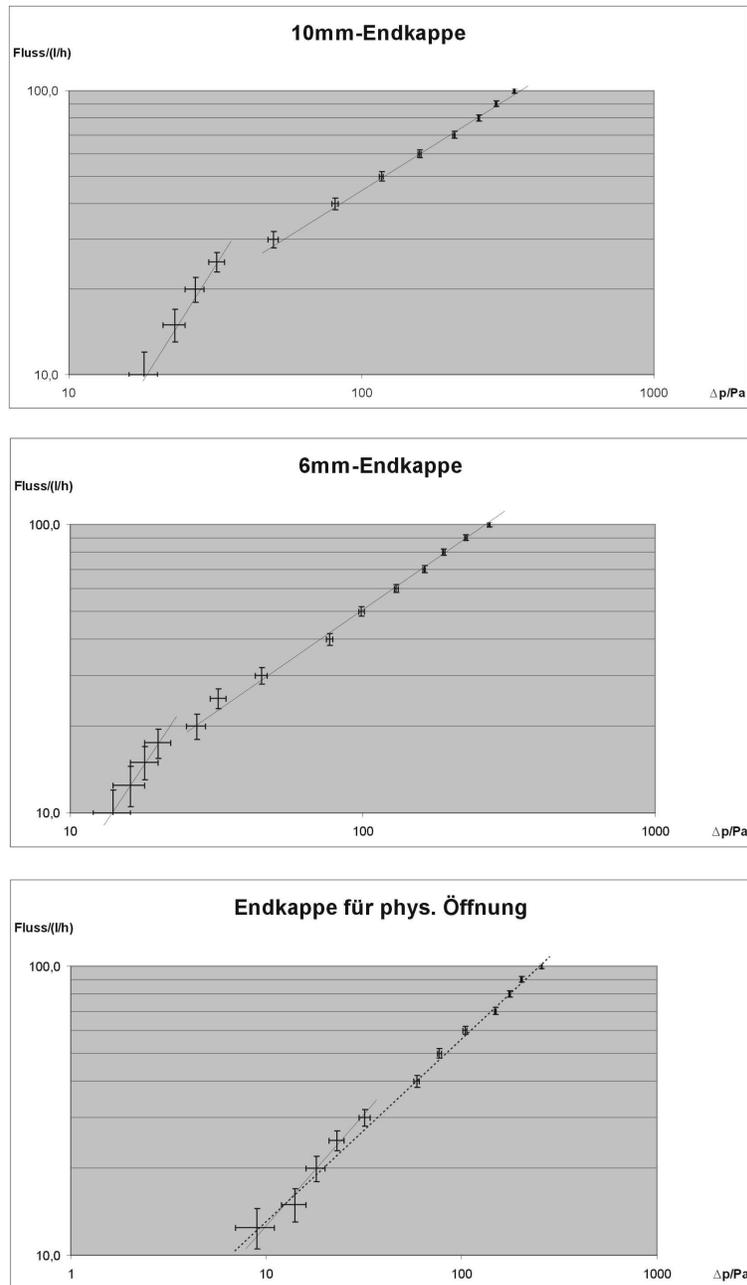


Abbildung 12.1: Die Abhängigkeit des Volumenstromes („Fluss“) von der Druckdifferenz für die drei Endkappentypen. Im Falle der Endkappe für die physische Öffnung ist ein Strömungsumschlag nicht klar erkennbar (siehe Text).

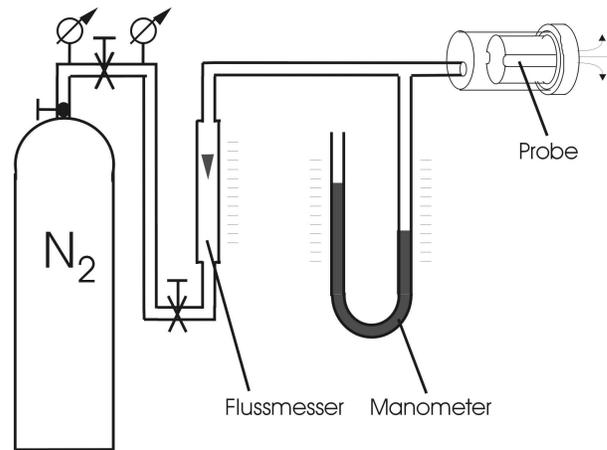


Abbildung 12.2: Aufbau zur Messung der Strömungsleitwerte verschiedener Kammerbauteile, dargestellt ist eine Endkappe (nicht maßstabsgerecht).

Gasflussverteilung innerhalb der Kammern

Analog zu der Arbeit von Bensinger und Wellenstein [7] wurde ein Widerstandsnetzwerk entworfen, das die theoretisch berechneten Strömungswiderstände R , sie sind definiert als die Kehrwerte der Strömungsleitwerte C , innerhalb einer Kammer mit vertikal verlaufenden Röhrrchen vereinfacht wiedergibt. Es ist in Abbildung 12.3 dargestellt, die Strömungswiderstände wurden entsprechend den im Abschnitt 12.2.1 berechneten Werten gesetzt und zusammengefasst, da für den Gesamtwiderstand R von n parallel liegende Röhrrchen mit den Einzelwiderständen R_n gilt:

$$\frac{1}{R} = \sum_n \frac{1}{R_n} \quad (12.9)$$

Die Ergebnisse der mit dem Programm „Mathematica“ vorgenommenen Auswertung des das Widerstandsnetzwerk beschreibenden Gleichungssystems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Gasfluss teilt sich bis auf eine Abweichung von maximal 4 % gleich auf das 6- und die beiden 10-mm-Segmente (zusammengenommen) auf, was - wegen des höheren Strömungswiderstandes - zu einem um einen Faktor 1,9 langsameren Gasaustausch in den 6-mm-Röhrrchen führt. Auf die Nennung von Zeitwerten für den Gasaustausch wurde bewusst verzichtet, da sie durch die Gestaltung des Gassystems in weiten Grenzen frei gewählt werden können.
- Die Anströmung der Kammern (Gasein- und -auslass auf einer Seite oben und unten (A → D in Abbildung 12.3) oder an den Enden einer Diagonale über die Kammer (D → C)) wirkt sich im Rahmen der oben bereits

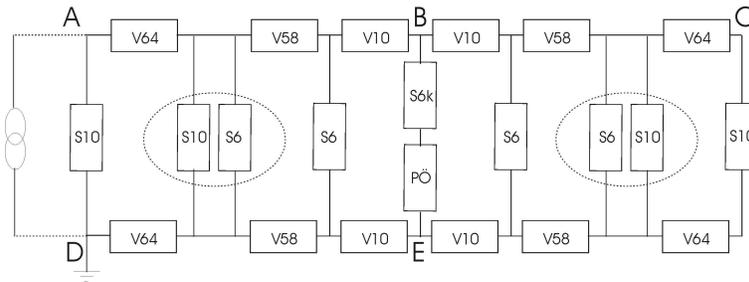


Abbildung 12.3: Vereinfachtes Schaltbild der Strömungswiderstände einer Doppellebene vertikaler Röhrrchen zur Berechnung der Gasverteilung innerhalb der Kammer

V: Gasverteiler, S: Strohhalm-Sätze (es wurde jeweils der Gesamtwiderstand aller Röhrrchen eines Typs berechnet). PÖ: Physische Öffnung. Die Ziffern stehen für den Röhrrchendurchmesser in mm bzw. die Länge des Gasverteilerabschnitts in cm. S6k bezeichnet die kürzeren Röhrrchen an der physischen Öffnung. Auf die Buchstaben wird im Text Bezug genommen.

genannten Fehlergrenzen nur auf die Gasaustauschzeit der Röhrrchen der physischen Öffnung aus (siehe Tabelle 12.2).

12.2.2 Modifikation des Gases durch Diffusion

Besondere Beachtung verdient der Dichtring an den Deckeln der Gasverteiler. Es wurde Moosgummi-Rundschnur aus einem Material (CR - Chloroprenkautschuk, Handelsname: „Neopren“) gewählt, das bei einer absorbierten Strahlendosis von 10 Gy keine Verschlechterung der Eigenschaften zeigt. Ferner bleiben die Kräfte, mit denen die Gasverteilerdeckel angedrückt werden müssen, bei einer solcherart weichen Dichtschnur im Vergleich zu Vollmaterial beherrschbar. Für das Material wird vom Hersteller für Stickstoff eine Permeabilitätskonstante von

Tabelle 12.2: Verhältnisse der zum Gasaustausch in den 10-mm-Röhrrchen ($t_{10\text{mm}}$) und den Röhrrchen an der physischen Öffnung ($t_{PÖ}$) benötigten Zeiten bei verschiedener Anströmung der Kammer. Die Buchstaben entsprechen denen in Abbildung 12.3.

Anströmart	$t_{10\text{mm}}/t_{PÖ}$
einseitig oben und unten (A→D)	6,5
diagonal oben und unten (A→D)	4,5
zentral oben und unten B→E)	2,1

$1,2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}_n^3 \cdot \text{mm} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cmHg})$ angegeben [36] (cm_n^3 : cm^3 unter Normalbedingungen, also eine Gasmenge).

Wenn man davon ausgeht, dass der Deckel die Nut für den Dichtring bis auf einen Spalt von $30 \mu\text{m}$ abschließt (die Materialoberfläche ist mit $20 \mu\text{m}$ Rauigkeit spezifiziert) und das Gas den Ring nicht unterkriecht⁵, so ergibt sich für eine Gesamtlänge der Dichtfuge⁶ aller 5 Submodule von etwa 190 m eine Fläche von 58 cm^2 , über die eine Permeation von Stickstoff in das Zählgas stattfindet, wobei es eine Dichtfugenweite von 45 mm (Materialausdehnung in Permeationsrichtung) zu überwinden hat. Das bedeutet, dass nach Gleichung 12.10 während eines Tages lediglich (86400 s , N_2 -Partialdruck: 60 cmHg) $0,8 \text{ cm}_n^3$ Stickstoff in das geschlossene Gassystem eindringen, was gegenüber den sonstigen Schadgasflüssen vernachlässigbar ist:

$$\Phi = \frac{V}{t} = \frac{P \cdot A \cdot \Delta p}{d} \quad (12.10)$$

mit Φ : Gasfluss aufgrund von Permeation, V : durch das Material gelangtes Gasvolumen, P : Permeabilitätskonstante des Materials, A : Fläche, über die die Permeation erfolgt, t : Zeit, Δp : Partialdruckdifferenz, d : Materialausdehnung in Permeationsrichtung.

Wendet man Gleichung 12.10 auf diejenige Zeit an, die das Gas zum Durchströmen der Strohhalme benötigt, so ergibt sich die Schadgaskonzentration an den Röhrchenenden, sofern Rückdiffusion und Mischung unberücksichtigt bleiben. Diese Effekte sind jedoch trotz der Laminarität der Strömung, die zu ei-

⁵Forderung für die Oberflächenrauigkeit innerhalb der Nut: $\leq 1,6 \mu\text{m}$, diese Rauigkeit wird von der CR-Schnur so gedichtet, dass allenfalls ein gegenüber der Permeation vernachlässigbares Unterkriechen stattfindet [65].

⁶Ein langer Gaskanaldeckel (Kammern mit senkrechten oder geneigten Strohhalmen) hat einen Umfang von ca. $6,9 \text{ m}$, ein kurzer (Kammern mit horizontalen Strohhalmen) einen solchen von ca. $5,9 \text{ m}$.

Tabelle 12.3: Permeabilitätskonstanten für einige Gase; Herstellerangaben, Messungen an der TU Warschau und eigene Messungen: DuPont: KAPTON-Hersteller, Tricon: Aluminisierbetrieb.

Angabe in $\text{cm}_n^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (0,1 \text{ MPa})^{-1}$ für eine Foliendicke von $d=52 \mu\text{m}$.

Quelle	O ₂	N ₂	Ar	CF ₄	CO ₂
DuPont (für KAPTON HL)	183	44	–	–	329
Tricon (für aluminisiertes KAPTON)	0,6	–	–	–	–
TU Warschau (für KAPTON XC)	30	22	63	–	78
eigene Messungen (für kohlenstoffbeschichtetes KAPTON)	–	–	24 ± 3	22 ± 3	240 ± 30

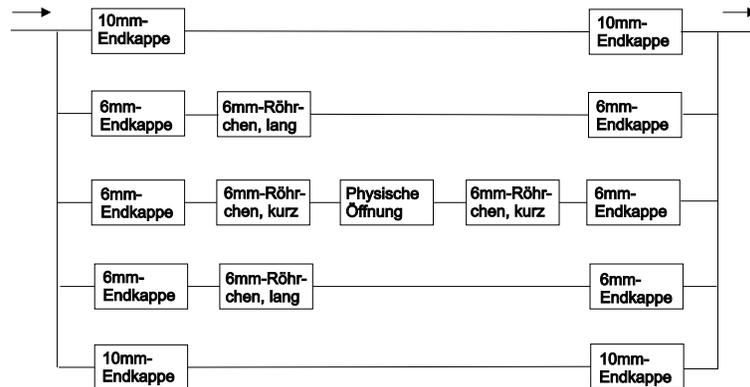


Abbildung 12.4: Vereinfachtes Strömungswiderstandsschaltbild einer Doppelsebene (dargestellt ist jeweils nur ein Röhrchen der jeweiligen Art).

ner stärkeren Vermischung des Gases in axialer Richtung als bei turbulenter Strömung führt, vernachlässigbar [71]. Basierend auf den Permeabilitätskonstanten aus Tabelle 12.3 sind die sich ergebenden Konzentrationen in Tabelle 12.4 zusammengestellt, wobei die aluminisierte Folie („Tricon“) die realen Verhältnisse in den Driftröhrchen am besten wiedergeben dürfte, da die Aluminiumschicht offenbar die effizienteste Gasbarriere darstellt. Die Permeabilitätskonstanten der anderen Materialien können insofern vernachlässigt werden. Die zur Herstellung der Strohhalme verwendete Folie ist deshalb - und außerdem wegen der besseren elektrischen Eigenschaften - aluminisiert. Auch bei der Gestaltung des Schutzgasvolumens (vgl. den folgenden Abschnitt) ist die Frage der Folialuminisierung zur Verringerung der Permeation von Bedeutung.

Tabelle 12.4: Konzentrationen unerwünschter Gase in den Zählern in ppm, basierend auf verschiedenen Permeabilitätsmessungen, wobei die aluminisierte Folie („Tricon“) die realen Verhältnisse in den Driftröhrchen am besten wiedergeben dürfte. Gerechnet mit einer angenommenen Gasaustauschzeit von 5 h. Bezeichnungen wie in Tabelle 12.3.

Quelle	∅ 10mm		∅ 6mm		Phys. Öffnung	
	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂
DuPont	38000	34000	12000	11000	15000	14000
Tricon	60	–	19	–	23	–
Warschau	6230	17000	1970	5400	2420	67000

12.2.3 Das Schutzgasvolumen

Im Zusammenhang mit der Untersuchung der beiden Zähler-Prototypen wurde deutlich, dass die Konzentration schädlicher Gase wie etwa Sauerstoff im Zählgasvolumen nicht ausreichend gering gehalten werden kann, wenn das sensitive Volumen nur durch die 60 μm starke KAPTON-Folie von der Außenluft abgegrenzt ist. Es zeigte sich, dass das Gas nur durch Einschluss der Driftröhrchen in ein weiteres, mit einem Schutzgas wie etwa Stickstoff gefülltes Volumen erreicht werden kann. Auch dem in Abschnitt 10.4.2 bereits diskutierten feuchtigkeitsabhängigen Durchbiegephänomen lässt sich auf diese Weise begegnen, wenn das Schutzgasvolumen ausreichend trocken gehalten werden kann.

Die Bedingungen, die bei der Gestaltung beachtet werden müssen, lauten im Einzelnen [34]:

- Die Folie, die zur Begrenzung des Volumens in Strahlrichtung dient, darf sich aufgrund von Druckunterschieden nicht mehr als 10 mm in Richtung der Ebenennormalen ausdehnen, um andere Detektoren (GEMs, Siliziumzähler) nicht zu beschädigen.
- Die relative Luftfeuchtigkeit im Schutzgasvolumen muss unter 5 % gehalten werden können.
- Der Sauerstoffgehalt in diesem Volumen muss unterhalb eines Wertes liegen, der es - mit Blick auf die Leistungsfähigkeit des Gassystems - erlaubt, den Sauerstoffgehalt des Zählgases unter 100 ppm zu halten.
- Der Druckunterschied muss so gering sein, dass es im Falle von Fehlfunktion nicht zu Schäden kommt.

Die Forderungen nach Begrenzung des Sauerstoffgehaltes motivieren sich aus den in Abschnitt 12.2.2 vergleichbaren Berechnungen [25], die relative Feuchtigkeit soll wegen der Durchbiegeproblematik so gering wie möglich gehalten werden. Unter dem Gesichtspunkt der mechanischen Eigenschaften (geringe Flächenmassendichte, hohe Reißfestigkeit bietet sich Mylar-Folie an, die allerdings mit Aluminium beschichtet werden muss, um die Diffusion von Wasserdampf gering zu halten. Die zum Transport der Zähler aufgebrauchte Polyethylenfolie wäre unter beiden Aspekten ungeeignet.

Es konnte gezeigt werden [25], dass sich die Mylar Folie bei einer Abgas-schlauchlänge von 10 cm und einem Schutzgas-Volumenstrom von 30 l/h in der Kammermitte nur um 9,8 mm aus der Rahmenebene wölbt, was rechnerisch einer Druckdifferenz von 0,38 Pa entspricht. Bei der Konzeption wurde auch die möglicherweise rasche Schwankung des Atmosphärendrucks bei Wetteränderungen berücksichtigt, während derer die Druckdifferenz vorübergehend höher sein kann.

Die Ausdehnung der Folie unter statischem Gasdruck und die Abnahme der Feuchtigkeit, jeweils unter (erstmaliger) Spülung mit 30 l Stickstoff pro Stunde, ist in Abbildung 12.5 angegeben. Neben Stickstoff kommt auch Kohlendioxid als Schutzgas in Frage, es hätte den Vorteil, dass es Bestandteil des Zählgases ist und seine Diffusion in die Driftröhrchen somit beim Betrieb des Gassystems berücksichtigt werden könnte. Allerdings weist es schlechtere Isolationseigenschaften auf, weswegen die Entstehung von Kriechströmen an der elektrischen Terminierung der Röhrchen an der physischen Öffnung zu besorgen wäre. Insofern wurde Stickstoff als Schutzgas gewählt.

Die zum Aufbringen der Folie eingesetzte Technologie [34] sieht vor, sie zunächst mit etwa 40 N/m Spannung über einen Aluminiumrahmen zu ziehen und dort zu fixieren, der so groß ist, dass er über eine einzelne Strohkammer gelegt werden kann. Die Strohkammer selbst ist mit doppelseitigem Klebeband und Epoxidharzklebstoff vorbereitet, so dass der Rahmen mit der Folie darübergerlegt und die Folie faltenfrei aufgebracht werden kann. Der Rahmen ist in Abbildung B.10, Mitte rechts zu erkennen. Die relative Feuchte im Schutzgasvolumen wird über einen kapazitiven Sensor im Abgasschlauch gemessen und zusammen mit den Daten der langsamen Steuereinrichtungen aufgezeichnet.

12.3 Die technische Gestaltung des Gassystems

Das System zur Versorgung der Driftkammerstation mit Zähl- und Schutzgas ist in Abbildung 12.6 schematisch dargestellt. Es ist so ausgelegt, dass es den Gehalt des Zählgases an Wasserdampf und Sauerstoff jeweils unter 5 ppm halten kann (vgl. Abschnitt 12.2.2). Um den Gasdruck zur Verbesserung von Nachweiseffizienz und Ortsauflösung erhöhen zu können (siehe Abschnitt 4.1.1), sollte dies einmal gewünscht werden, so kann der Absolutdruck in den Zählern frei zwischen 1 und 3 bar gewählt werden.

Die Gasversorgung der Strohkammern ist als geschlossenes System ausgeführt, wobei die Gasmischung mit drei Massenflussreglern aus den Einzelkomponenten hergestellt wird. Der Argon-Massenflussregler fungiert dabei als Hauptregler, der die Massenflussregler für Tetrafluormethan und Kohlendioxid steuert, die die anderen Zählgasbestandteile dann automatisch im programmierten Verhältnis zugeben.

Im druckseitigen Gassammler wird ständig ein zwischen 0,5 und 3 bar wählbarer Überdruck aufrecht erhalten. Der Gasfluss durch jede Strohalm-Doppelebene kann mit einem eigenen mechanischen Flussmesser und -regler eingestellt werden, der Fluss durch alle Kammern ist am Steuerrechner wählbar.

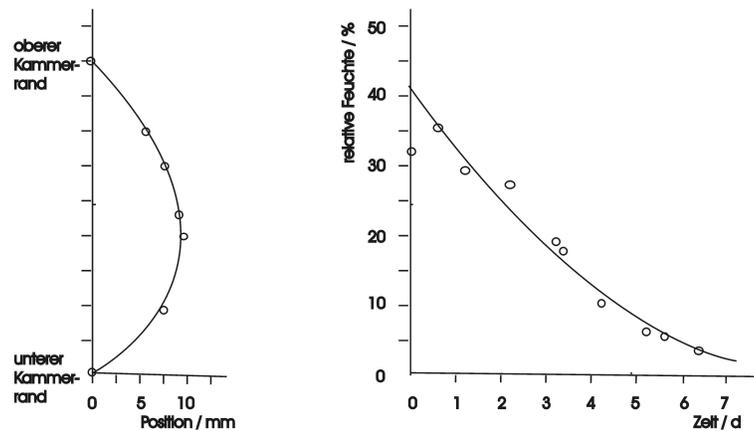


Abbildung 12.5: Wölbung der Schutzgasvolumen-Begrenzungsfolie unter 30 l/h Stickstofffluss im zentralen Kammerquerschnitt (links, Ordinate in beliebigen Einheiten). Abnahme der relativen Feuchte im Schutzgas mit fortschreitender Trocknung der Driftröhrchen nach erstmaligem Anschluss an das Schutzgas (rechts).

Gasrückführung und -erneuerung

Das von den Strohkammern abgegebene Zählgas wird in einen Gassammler geführt, der mit einem regelbaren Überdruckventil ausgestattet ist. Auch wird der Relativdruck an dieser Stelle elektronisch erfasst.

Ein Kompressor (Membranpumpe) fördert das Gas in den druckseitigen Gassammler. Er kann nötigenfalls durch ein Elektroventil vom kammerseitigen Gassammler abgetrennt werden. Die Regelung der Förderleistung kann auf zwei Arten erfolgen: Zunächst kann sie über eine Steuer-Wechselspannung direkt über den Kompressor beeinflusst werden. Es ist aber auch möglich und unter dem Gesichtspunkt des geringeren Verschleißes auch von Vorteil, den Kompressor immer mit seiner Nennleistung zu betreiben, was seiner Maximalleistung entspricht. Das in diesem Fall zu viel geförderte Gas wird über die Rückleitungsstrecke - durch ein pneumatisch betätigtes Proportionalventil geregelt - in den kammerseitigen Gassammler zurückgeführt. Die Regelgröße ist in diesem Fall der Druck in ebendiesem Gassammler.

Nachdem keine Entzugsmöglichkeit für Schadgase, vor allem Stickstoff, vorgesehen ist, besteht die einzige Möglichkeit, sie zu eliminieren, im kontrollierten, kontinuierlichen Abblasen eines Teils des Kammerabgases über das künstliche Leck im druckseitigen Gassammler, das ebenfalls mit einem Flussregler ausgestattet ist. Dieser Gassammler ist ebenfalls mit einem mechanischen Überdruckventil ausgestattet. Darüber hinaus spielt das künstliche Leck auch bei der Druckregelung eine Rolle.

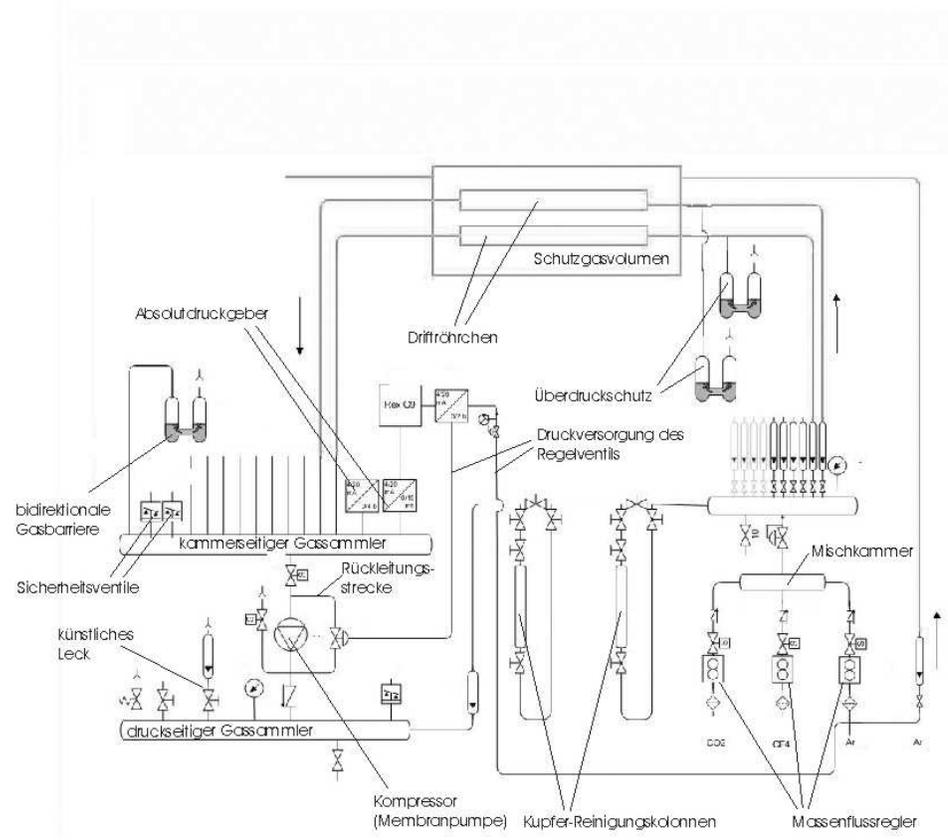


Abbildung 12.6: Schaltbild des Gassystems. Das Gas aus der Argonleitung dient als Zählgasbestandteil, aber auch als Schutzgas und Antriebsgas für das Proportionalventil in der Rückleitungsstrecke am Kompressor. Modifiziert, nach [9].

Gasreinigung

Da sich vor allem Sauerstoff nachteilig auf die Funktion von Driftkammern auswirkt (siehe hierzu Abschnitt 12.2), musste eine aktive Entfernungsmöglichkeit zumindest für O_2 geschaffen werden: Das aus dem druckseitigen Gassammler zur erneuten Verwendung zurückströmende Zählgas wird abwechselnd über 4 Reinigungskolonnen geführt, die jeweils 0,3 l Sauerstoff aufnehmen können. Sie enthalten reduziertes Kupfer, das zur Vergrößerung der Oberfläche auf ein Zeolith-Gerüst aufgebracht ist. Man kann sie in Abbildung B.11 unten rechts gut erkennen. Die Reinigungskolonnen müssen zu ihrer Regeneration entnommen werden, weswegen die dafür erforderlichen Absperrventile vorgesehen wurden. Während der Regeneration eines Teils der Kolonnen verbleiben die anderen jeweils abwechselnd im System und werden in den Gasstrom eingeschleift. Sollte sich eine zu kurze Standzeit der Kolonnen ergeben, so kann nachträglich eine automatische Ausheizmöglichkeit vor Ort realisiert werden.

Die ersten Betriebserfahrungen sprechen dafür, dass sich eine Sauerstoffkonzentration in der Größenordnung von 1000 ppm nicht merklich auf die Signalhöhe auswirkt [25].

Sicherheitsaspekte

Vor allem ein geschlossenes Gassystem wie das hier eingesetzte muss gegen Fehlfunktionen geschützt sein, die den Druck in den angeschlossenen Zählern zu stark ansteigen oder zu stark abfallen lassen. Ab 10 hPa Unterdruck können die Strohhalmte kollabieren [25]. Es ist unklar, welchem Druck die Halme standhalten, allerdings werden die Gasverluste durch Lecks ab etwa 1 hPa Überdruck intolerabel hoch.

Das COMPASS-Strohkammer-Gassystem weist neben der elektronischen Überwachung (siehe Abschnitt 12.4.6) noch mehrere Komponenten auf, die es inhärent sicher machen:

Bidirektionale Waschfläschchen befinden sich im Gassystembereich der Experimentierhalle, zwischen dem Gasausgang der Zähler und dem Kompressor. Das Fläschchen ist so dimensioniert, dass es den maximal vom Kompressor zu fördernden Volumenstrom ein- oder ablassen kann. Weitere bidirektionale Waschfläschchen mit einem 4 hPa entsprechenden Ölstand befinden sich unmittelbar an den Zählereingängen. Sollte die Gaszufuhr unterbrochen sein, so wird auf diese Weise ausgeschlossen, dass der eventuell weiterhin Gas absaugende Kompressor die Zähler evakuiert. Um in diesem Fall kein Öl in die Kammern gelangen zu lassen, sind kammerseitig Reservoirs angebracht.

Da die Gasmischung augenblicklich nicht ständig überwacht wird, muss verhindert werden, dass die Gasverstärkung unkontrolliert ansteigt, wenn elektronegative Gaskomponenten, etwa CF_4 , unterrepräsentiert sind. Die einzige Möglichkeit besteht in einer niedrigen Einstellung der Strom-Auslöseschwelle des Hoch-

spannungsversorgungsgerätes (über das COMPASS-DCS, vgl. Abschnitt 3.8), da in einem solchen Fall der Strom durch die Zähler ansteigt.

12.4 Inbetriebnahme

Dieses Kapitel beschreibt den Test des fertiggestellten Gassystems im Labor. Es enthält auch kurze Handreichungen zum An- und Herunterfahren des Systems durch den Bediener, sowie ein Verzeichnis häufig auftretender Funktionsfehler und die erforderlichen Maßnahmen dagegen.

12.4.1 An- und Herunterfahren des Systems

Auf dem „PLC“-Rechner (Schneider) im Steuerschrank läuft das gemeinsame Steuerprogramm, das neben dem Gassystem für die Stroh-Driftkammern auch die Systeme der GEM- und der MWPC-Detektoren steuert. Nach Druck auf die „straw chamber“-Taste erscheint das Leitungsschema des Strohkammer-Gassystems.

Anfahren des Systems - Anleitung für den Bediener

1. Zunächst ist sicherzustellen, dass die Gasleitungen ordnungsgemäß mit dem System verbunden und die Flussregler an den Ausgängen (zu den Zählern) geschlossen sind.
2. Die Gasleitungen zu den Detektoren sind zu öffnen.
3. Das Ventil in der Rückleitungsstrecke muss an der REX-G9-Steuereinheit auf etwa 30 % Schließung gestellt werden.
4. Einschalten der Massenflussregler durch Druck auf die Taste „FLOWMETER ON“.
5. Einschalten des Kompressors mit der entsprechenden Taste
6. Nachdem sich der Systemdruck stabilisiert hat - in der Regel innerhalb einiger Sekunden - kann der Gasfluss durch die Kammern mit den Flussreglern (beschriftet mit 1-19) auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Die nach Veränderung von Einstellungen automatisch erfolgende Stabilisierung des Systemdrucks kann anhand von Soll- (rote Ziffern an der Steuereinheit) und Istwertanzeige (grüne Ziffern) verfolgt werden.
7. Waschfläschchen am System beobachten, ebenso die Stabilisierung des Systemdruckes und der Gasflüsse (Massenflussregler und mechanische Flussregler zu den Kammern).

Herunterfahren des Systems - Anleitung für den Bediener

Nachdem wegen hoher Leckraten einiger Zähler vom Betrieb bei festem Absolutdruck auf Relativdruck-Betriebsweise, also das Konstanthalten einer festen, aber geringen Differenz zwischen Außen- und Kammerdruck, übergegangen wurde, weicht der Systemdruck niemals wesentlich vom Außendruck ab, was beim Herunterfahren eines in Absolutdruck-Betriebsweise arbeitenden Systems beachtet werden müsste.

1. Zum Herunterfahren sind die Ventile der mechanischen Flussregler (zu den Zählern) zu schließen, das Ventil in der Vorbeileitungsstrecke muss aber geöffnet bleiben.
2. Danach sind der Kompressor und die Massenflussregler am Kontrollbildschirm auszuschalten.
3. Soll das Gassystem längere Zeit ausgeschaltet bleiben, so muss bedacht werden, dass sich die Gaszusammensetzung in den Zählern ändert und daher die Hochspannung von den Zählern zu nehmen ist.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass das Einschalten der Massenflussregler allein nicht zweckmäßig ist, etwa, um eine Notversorgung der Detektoren mit Zählgas aufrecht zu erhalten. In einem solchen Fall würde jeder Massenflussregler den maximalen Gasfluss, für den er konzipiert ist, in das System einleiten. Dies hätte zur Folge, dass sich die Gaszusammensetzung änderte, da die maximalen Flüsse, die die Massenflussregler abgeben können, nicht dem Verhältnis der Komponenten im Zählgas entsprechen.

12.4.2 Prüfung des Kompressors

Um den Arbeitspunkt des Kompressors zu bestimmen, also denjenigen Steuerfrequenzbereich, in dem sich der Volumenstrom am effizientesten regeln lässt, wurde der geförderte Volumenstrom als Funktion der Kompressor-Steuerfrequenz gemessen. Hierzu wurde hinter den Kompressor ein Gasometer⁷ geschaltet, mit dem - ausreichende Integrationszeiten vorausgesetzt - genauer gemessen werden konnte als mit einem mechanischen Flussregler. Das Druck-Regelventil war während des gesamten Tests geschlossen, ebenso das Ventil in der Vorbeileitungsstrecke. Mithin strömte das Gas über das Gasometer in einen Rezipienten von 50 l und sodann zurück zum Kompressor.

Zum Test wurde Argon verwendet, da dieses Gas der Hauptbestandteil des späteren Zählgases ist.

Abbildung 12.8 zeigt den erzielten Volumenstrom als Funktion der Kompressor-Steuerfrequenz.

⁷Gemeint ist ein Messgerät, das den Volumenstrom kontinuierlich über die Zeit aufintegriert.

12.4.3 Prüfung der Druckregelung

Das Strohkammer-Gassystem bietet zwei Möglichkeiten, den Systemdruck zu kontrollieren:

Entweder arbeitet der Kompressor mit maximaler Leistung, wobei der überschüssige Volumenstrom über ein regelbares Ventil an die Saugseite zurückgeführt wird; oder diese Rückleitung bleibt geschlossen, und der gewünschte Volumenstrom wird über die Regelung der Kompressorleistung selbst gesteuert.

Die Funktion beider Regelungsvarianten wurde folgendermaßen überprüft:

Druckregelung über die Kompressorleistung

Während dieses Tests war das Druck-Regelventil völlig geschlossen, sodass die Druckregelung allein über den Kompressor erfolgte. Seine Förderleistung (Regelung über die Frequenz der Dreiphasen-Wechselstromversorgung) wurde verändert, wie in Abbildung 12.8 dargestellt.

In diesem Fall muss ständig ein Fluss von mindestens $1 \text{ m}^3/\text{h}$ aufrecht erhalten werden (mithin muss eine hinreichend große Rückleitungsstrecke dauernd geöffnet bleiben), weil der Kompressor nicht unterhalb einer minimalen Förderleistung betrieben werden darf. Das bedeutet, dass lediglich ein maximaler Fluss von 500 l/h durch die Zähler geführt werden kann.

Als Testergebnis kann festgehalten werden, dass sich mit der Kompressorleistung als Regelgröße eine Druckkonstanz von $\pm 2 \text{ hPa}$ erreichen lässt.

Druckregelung über das Ventil in der Rückleitungsstrecke

Für diesen Test wurde die Kompressorleistung, die über die Frequenz der Versorgungsspannung beeinflusst werden kann, maximal gewählt, was einer Steuerfrequenz von 60 Hz entspricht.

Diese Art der Regelung erlaubt die freie Wahl des Gasflusses zwischen 25 l/h und $1,2 \text{ m}^3/\text{h}$, letzterer bei einem Druck von 800 hPa im Hochdruckteil des Systems, also am Ausgang des Kompressors. Das Gassystem sollte immer so betrieben werden, dass das Regelventil in der Rückleitungsstrecke im Proportionalbereich arbeitet, also zwischen 30 und 60% der völligen Schließung.

Weiterhin wurde das Verhalten dieses Ventils in Öffnungs- und Schließungsrichtung überprüft. Obwohl sich der lineare Bereich nur zwischen 30 und 60% der völligen Schließung erstreckt, konnte bis 10% der Maximalwerte kein Hystereseeffekt⁸ beobachtet werden. Abbildung 12.7 zeigt den Gasfluss als Funktion der Ventilschließung.

Nachdem auch in diesem Regelungsregime keine Schwingneigung zu beobachten war (siehe auch Abschnitt 12.4.4), sollte das System in dieser Betriebsart

⁸Gemeint ist ein Einfluss der Bewegungsrichtung, also Öffnen oder Schließen des Ventils.

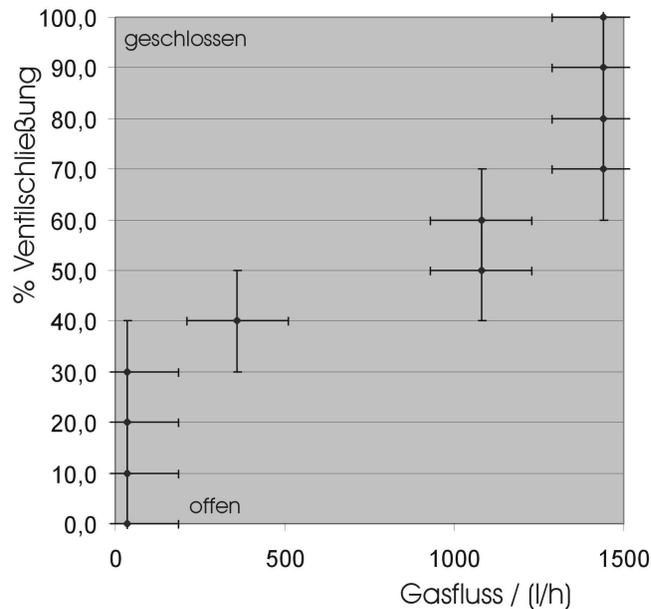


Abbildung 12.7: Volumenstrom als Funktion der Schließung des Druckregelventils.

eingesetzt werden. Hinsichtlich der Druckkonstanz sind beide Regelungsmodi (also Druckregelung über Kompressor oder Ventil in der Rückleitungsstrecke) als äquivalent zu betrachten, allerdings entfällt hier die Notwendigkeit, die Rückleitungsstrecke ständig offenzuhalten, was den maximalen Fluss durch die Zähler im Falle der Kompressorregelung auf 500 l/h begrenzt.

12.4.4 Messung von Druckschwankungen in den Zählern

Um die Fähigkeit des Gassystems zu untersuchen, plötzlich auftretende Druckänderungen in den Kammern zu beherrschen, wurde der Sollwert des Druckes mehrmals instantan um 5 hPa verändert. Der neue Sollwert wurde jeweils innerhalb von 10 s erreicht, auch im Falle der ventilgesteuerten Regelung ohne Überschwinger. Die Antwort des Regelsystems auf solche Störungen ist in Abbildung 12.9 und 12.10 dargestellt.

12.4.5 Steuerung der Massenflussregler

Die Zugabe einer jeden Zählgaskomponente wird separat von einem Massenflussregler gesteuert, der über den Kontrollschirm des Steuerrechners bedient werden kann. Der Fluss durch den Argon-Massenflussregler wird vorgegeben, die Massenflussregler für CF_4 und CO_2 führen automatisch die anderen Gasbestandteile im jeweils programmierten Verhältnis zu.

Diese Mischungsverhältnisse können geändert werden. Mit der Taste, der am Bildschirm die Bezeichnung „ CF_4 “ (bzw. „ CO_2 “) zugewiesen ist, wird zunächst der eingestellte Wert markiert. Sodann kann der neue Wert über die Zehnertastatur eingegeben werden. Mit der Eingabetaste wird der Wert übernommen, vorher kann mit „ESC“ zum ursprünglichen Wert zurückgekehrt werden.

Es ist zu beachten, dass die Massenflussregler in der Nähe des maximalen Flusses (d. h. ab etwa 99 % dieses Wertes) nurmehr zu unvollständiger Regelung in der Lage sind. Aus demselben Grunde sollten die in Tabelle 12.5 zusammengestellten minimalen Flüsse nicht unterschritten werden.

12.4.6 Automatische Überwachung des Systems

Ein außerplanmäßiger Zustand des Systems wird im „Straw“-Statusbereich am unteren Rand des Steuerrechner-Bildschirms angezeigt. Die Zustandsanzeige wechselt von „ON“ (ein) auf „FAULT“ (Fehlfunktion), sofern es sich um eine Fehlfunktion handelt, die vom System selbst beherrscht werden kann.

Des Weiteren blinkt das Symbol für die ausgefallene Komponente auf dem Bildschirm. Diese Meldung erlischt, wenn der zugehörige Parameter sich wieder innerhalb des festgelegten Normalbereiches befindet.

Sollte es zu einer Fehlfunktion kommen, die das System nicht selbst korrigieren kann, so erscheint die Meldung „ALARM“ im Statusbereich, das System wird angehalten und alle roten Leuchtdioden in der Steuerrechner-Einheit blinken, um auf die Fehlfunktion aufmerksam zu machen. In diesem Fall wird der Gasfluss durch die Kammern unterbrochen, indem der Kompressor angehalten und die Massenflussregler geschlossen werden, um einen eventuellen unkontrollierten Druckanstieg und Änderung der Gasmischung zu vermeiden. Aus diesem Grund muss allerdings dafür gesorgt werden, dass der Zähler in einem solchen

Tabelle 12.5: Spezifikationen der Massenflussregler: maximale und minimale Gasflüsse

Gas	max. Fluss	min. Fluss
Ar	250 l/h	2,5 l/h
CF_4	60 l/h	0,6 l/h
CO_2	30 l/h	0,3 l/h

Fall in einen sicheren Zustand gebracht wird, vor allem durch kontrolliertes Herunterfahren der Hochspannung an den Signaldrähten.

Massenflussregler

Falls der Massenfluss einer oder mehrerer Gaskomponenten den Bereich von 2 % um den eingestellten Sollwert verlässt, so blinkt das dem jeweiligen Massenflussregler zugeordnete Symbol, und eine einfache Fehlfunktion wird im „Straw“-Statusbereich angezeigt.

Sollte der Massenfluss für mehr als 10 Minuten außerhalb eines Bandes von $\pm 5\%$ um den eingestellten Sollwert bleiben, so wird das Gassystem angehalten und die „ALARM“-Meldung ausgegeben.

Der Kompressor

Kompressor und Kompressor-Steuereinheit werden folgendermaßen überwacht: Ein Motorschutzschalter schaltet die Stromversorgung aus, wenn der Motor blockiert ist. Über- und Unterspannung, Überhitzung oder Fehlfunktion der Dreiphasen-Wechselstrom-Steuereinheit, Drehmomentüberschreitung an der Kompressorwelle sowie Kurzschluss und Schaltungsfehler führen ebenfalls zur Abschaltung.

Alle diese Überwachungsmechanismen halten den Kompressor ggf. sofort an, und eine Fehlfunktion wird angezeigt. Über die Massenflussregler wird jedoch weiterhin Frischgas der eingestellten Zusammensetzung in das System eingespeist. Erst nach 10 Minuten wird das Gassystem völlig angehalten und die „ALARM“-Meldung ausgegeben.

Überdrucküberwachung und Druckregelung

Die Überdrucküberwachung erfolgt über einen Druckgeber an der Ausgangsseite des Kompressors, der bei einem Systeminnendruck von 1,2 bar an dieser Stelle anspricht. Ein Differenzdruckgeber (Messbereich 100-500 hPa) misst den Überdruck in den Zählern.

Sollte der Druck über den eingestellten Wert steigen, wird die „ALARM“-Meldung ausgegeben und das Gassystem angehalten.

Auch der kammerseitige Systemdruck wird durch den Steuerrechner überwacht.

Zusätzliche Überdrucksicherheit wird durch den Einbau eines mechanischen Überdruckventils erreicht, das bei einem Überdruck von 1,5 bar öffnet.

12.4.7 Verzeichnis häufig auftretender Funktionsfehler - Anleitung für den Bediener

Auf dem Kontrollbildschirm erscheint „ALARM HP“ oder am Waschfläschchen ist Gasaustritt festzustellen:

Folgendes ist zu tun:

1. Sicherstellen, dass der eingestellte Gasfluss durch die Zähler nicht größer ist als der höchstens vom Kompressor gelieferte Fluss (1200 l/h);
2. Sicherstellen, dass das künstliche Leck nicht geschlossen ist;
3. Sicherstellen, dass der Kompressor läuft;
4. Überprüfen der Funktion des Druckreglers.

Der Druckgeber (am Kompressor-Ausgang) gibt Überdruck-Alarm und der Kompressor wurde automatisch abgeschaltet:

Folgendes ist zu tun:

1. Sicherstellen, dass alle Ventile richtig eingestellt sind;
2. Sicherstellen, dass die augenblicklich eingeschleifte Reinigungskolonnie nicht blockiert ist;
3. Überprüfen der Funktion der mechanischen Flussregler.

Es erscheint „FAULT“ (Fehlfunktion) oder „ALARM“ für die Massenflussregler:

Folgendes ist zu tun:

1. Sicherstellen, dass das künstliche Leck den Anforderungen entsprechend eingestellt ist;
2. Überprüfen des Systeminnendrucks, der bei (500 ± 100) hPa liegen muss;
3. Überprüfen der Frischgasversorgung.

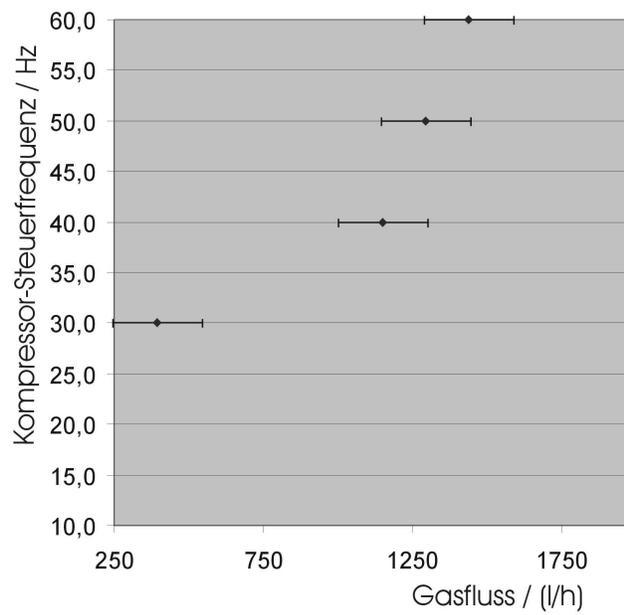


Abbildung 12.8: Abhängigkeit des Volumenstroms von der Kompressor-Steuerfrequenz.

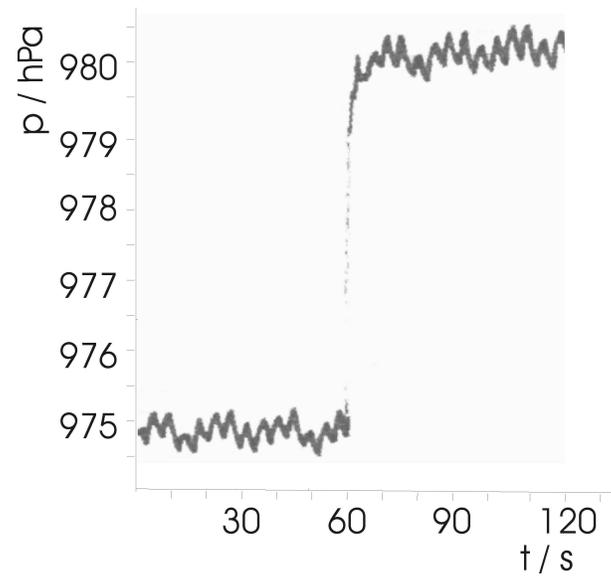


Abbildung 12.9: Ventilbasierte Druckregelung: Antwort des Systems auf instantanen Druckwechsel.

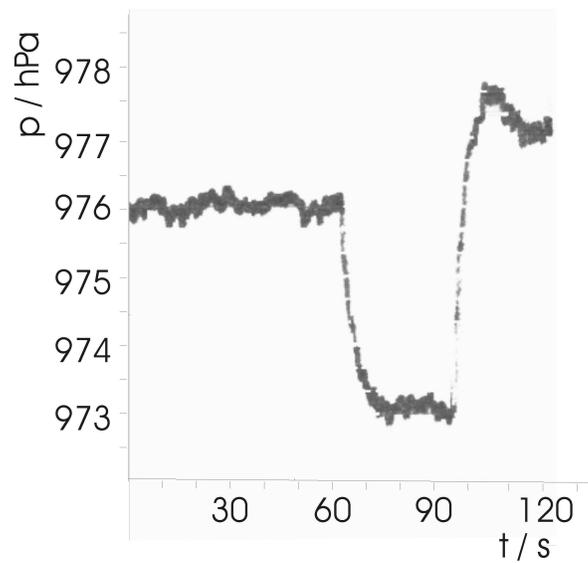


Abbildung 12.10: Kompressorbasierte Druckregelung: Antwort des Systems auf instantanen Druckwechsel.

Kapitel 13

Ausblick

Zum Abschluss der vorwiegend technischen Betrachtungen des COMPASS-Großwinkel-Spurverfolgungssystems soll noch kurz und daher auf keinen Fall mit dem Anspruch auf Vollständigkeit erwähnt werden, dass die im Jahr 2002 mit dem Spektrometer gewonnenen Daten bereits zu ersten teilchenphysikalischen Ergebnissen geführt haben. So konnte etwa die Entstehung des Lambda-Baryons bei den untersuchten Reaktionen nachgewiesen werden.

Auch die Leistungsfähigkeit der Stroh-Driftröhren kann nicht nur am Teststrahl, sondern auch anhand der aufgezeichneten Ereignisse beurteilt werden. Ebenfalls anhand von Daten der Strahlzeit des Jahres 2002 konnte die Ortsauflösung einer Stroh-Driftröhrenebene bestimmt werden. Ohne diese Messung näher bewerten zu wollen, sei in Abbildung 13.1 die Residuenverteilung angegeben. Damit ist die Verteilung der Differenzen aus mit einer Stroh-Driftröhrenebene gemessenen Koordinaten und der Position der rekonstruierten Spuren in dieser Ebene, welche mit den anderen ortsauflösenden Detektoren gemessen wurde, gemeint. Diese Darstellung wurde auf dem Workshop Future Physics @ [at] COMPASS im September 2002 am C.E.R.N. gezeigt [70].

Das COMPASS-Spektrometer wird in Zukunft weiter ausgebaut werden, wobei Bedarf an ortsauflösenden Detektoren vor allem im Bereich der ringabbildenden Tscherenkowzähler besteht, da die Rekonstruktion der Ringe, die sich ergeben, wenn man den Tscherenkowkegel mit einer Ebene schneidet, durch genaue Kenntnis der Trajektorie des nachgewiesenen geladenen Teilchens wirksam unterstützen kann.

Neben diesem und der in dieser Arbeit bereits diskutierten Verbesserung der Massenauflösung beim Nachweis von D^0 -Mesonen nennen G. Alexeev, O. Denisov und A. Maggiora in [3] noch etliche weitere Gründe für den Einsatz weiterer ortsauflösender Zähler.

Die Untersuchung, ob zumindest Teile dieser Aufgaben mit den hier vorgestellten Stroh-Driftröhren aus Dubna vorteilhaft erledigt werden können, lohnt sich in jedem Fall.

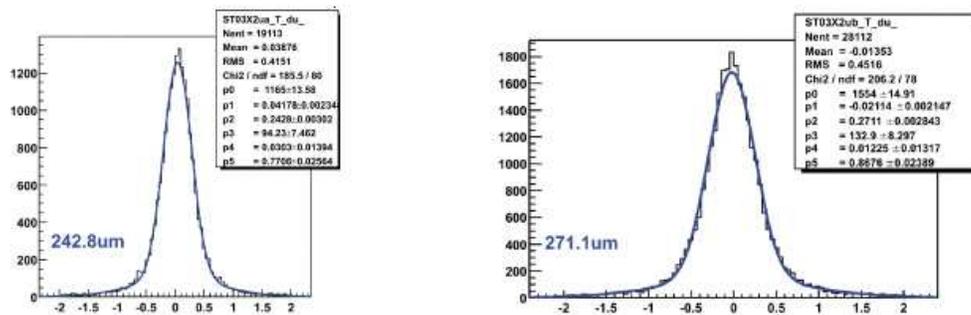


Abbildung 13.1: Residuenverteilung zur Bestimmung der Ortsauflösung aus experimentellen Daten. Dargestellt ist die Verteilung der Differenzen aus mit einer Stroh-Driftröhrenebene gemessenen Koordinaten und der Position der rekonstruierten Spuren in dieser Ebene, welche mit den anderen ortsauflösenden Detektoren gemessen wurde - links für 6-mm- (19113 Spuren), rechts für 10-mm-Röhren (28112 Spuren). Es ist auch die Breite der Verteilung angegeben [70].

Am Ende

Mir ist sehr daran gelegen, dass das Deutsche als Wissenschaftssprache dort seinen Stellenwert behält, wo es ästhetisch und auch praktisch sinnvoll ist, obwohl die englische Sprache sich selbstverständlich auch über die Naturwissenschaften hinaus zu einem De-facto-Standard entwickelt hat, und das völlig berechtigtermaßen. Wer aber ängstlich darauf bedacht ist, in solchen Arbeiten jedweden - auch nur vermeintlichen - Anglizismus zu vermeiden, erweist unserer Muttersprache ebenso wenig einen guten Dienst wie derjenige, der einer in Teilen völlig überzogenen und für den mit mancher Feinheit unserer Sprache ehemals vertrauten Sprecher unverständlichen Rechtschreibreform das Wort redet.

Kein Autor aus dem anglo-amerikanischen Sprachraum nimmt Anstoß an Fachausdrücken wie etwa „Eigenzeit“, nur weil wesentliche frühe Arbeiten zu diesem Thema in deutscher Sprache verfasst waren. Die Feststellung, dass er dadurch seiner sprachlichen Souveränität auch nicht im Ansatz verlustig geht, erübrigt sich.

Aufrichtigen Dank schulde ich Martin Faessler, der mich wohlwollend anleitete und mir ermöglichte, mehrere Jahre in Russland tätig zu sein.

Ich habe gerne mit Brigitte Bieber, Viktor N. Bytchkow, Meike Dlaboha, Ulrich Fuchs, Walter Kallies, Georgij D. Kekelidse, Oliver Link, Viktor M. Lyssan, Gerhard Mallot, Frank Meyer-Wildhagen, Sergej V. Mischin, Jürgen Neumayr, Klaus Platzer, Marta Sans-Merce, Michail G. Saposhnikow, Igor A. Sawin, Christian Scheffzük, Igor A. Schukow, Nadeshda S. Tsarenkova, Swetlana W. Tschubakowa, Susanna Wallis-Plachner, Konstantin Virjasow und Ulrich Wiedner zusammengearbeitet. Für substantielle Beiträge danke ich insbesondere Wolfgang Dünneweber, Reiner Geyer und Vladimir D. Peschechonow.

Die Verwirklichung des dieser Arbeit zugrunde liegenden Projektes wäre ohne die Überwindung der Teilung Europas unmöglich gewesen. Ich habe großen Respekt vor jedem, der dazu beigetragen hat und wünsche mir, den Sieg von Vernunft und Menschlichkeit über Hass und Gewalt und somit die friedliche Beilegung der Konflikte in der Welt erleben zu dürfen.

В заключении

Мартин Фесслер руководил эту работу и мне дал возможность работать в России - я очень благодарен за это. Мне хочется выразить благодарность и признание за помощь, дружескую поддержку и конструктивное обсуждение моей работы следующими коллегами: Бригитте Бибер, Виктор Н. Бычков, Майке Длабоха, Ульрих Фухс, Вальтер Каллис, Георгий Д. Кекелидзе, Оливер Линк, Виктор М. Лысан, Герхард Маллот, Франк Майерь-Вильдхаген, Сергей В. Мишин, Юрген Ноймайр, Клаус Платцер, Марта Санс-Мерсе, Михаил Г. Сапожников, Игорь А. Савин, Кристиан Шеффцюк, Игорь А. Жуков, Надежда С. Царенкова, Светлана В. Чубакова, Сузанна Валлис-Плахнер, Константин Вирысов и Ульрих Виднер. Я хотчу бы также выразить отдельную благодарность Вольфгангу Дюннвеберу, Райнеру Гайеру и Владимиру Д. Пешехонову за особое участие в моей работе.

Реализация проекта, на которой основана эта работа, была бы невозможно без объединения Европы. Я почувствую большое уважение к тем, которые способствовали и желаю, чтобы я мог присутствовать победу справедливости и гуманности над ненавистью и жесткостью и таким образом примирение конфликтов в мире.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Radiative Streuung eines Pions	18
2.2	Photon-Gluon-Fusion	22
2.3	Simulierte Ereignisse mit einem D^0 -Meson	22
3.1	Spektrometer-Endausbau (Myonenstrahl)	24
3.2	Das polarisierte Target	27
3.3	Energieniveaus im polarisierten Target	27
3.4	Der erste Spektrometerabschnitt mit Spurverfolgungsstation 2 . .	29
3.5	Schema der Datennahme und zentralen Speicherung.	33
4.1	Triggerschwelleneinfluss auf den Messfehler	42
4.2	Ortsmessung mit Driftrohr (1)	44
4.3	Ortsmessung mit Driftrohr (2)	44
5.1	Zu den Anforderungen an die Ortsauflösung	49
5.2	Räumliche Darstellung des D^0 -Mesonen-Zerfalls	49
5.3	Kinematik des D^0 -Mesonen-Zerfalls	51
5.4	Zur Genauigkeit der Winkel- und Impulsmessung	52
5.5	Ablenkung im Magnetfeld	53
5.6	Doppelebenen, Geisterspuren	56
5.7	Der Hochspannungsanschluss	57
6.1	Nachweiseffizienz des „Dubna-Prototypen“, vernachlässigbare Rate	62
6.2	Nachweiseffizienz des „Dubna-Prototypen“, hohe Rate	62
6.3	Sauerstoffkonzentration am Kammerausgang	63
7.1	^{55}Fe -Spektrum	70
7.2	Alterungstests: Pulshöhenspektren bestrahlt/unbestrahlt	71
7.3	Alterungstests: Pulshöhenspektren für zwei verschiedene Gase . .	72
7.4	Lichtmikroskop-Aufnahme eines bestrahlten Signaldrahtes	74
7.5	Lichtmikroskop-Aufnahme einer bestrahlten Kathodenfläche . . .	74
7.6	Bestrahlter Signaldraht: EMA-Spektrum (20 kV)	75
7.7	Bestrahlter Signaldraht: EMA-Spektrum (10 kV)	75
7.8	Bestrahlter Signaldraht: REM-Aufnahme	77

7.9	Neuwertiger Signaldraht: REM-Aufnahme	77
7.10	Bestrahlter Signaldraht: stärker vergrößerte REM-Aufnahme	78
8.1	Drahtpositionierer-Absetzwerkzeug (symbolisch)	81
8.2	Fertiges Absetzwerkzeug mit halb ausgefahrenem Ausstoßer.	81
8.3	Röntgenanlage (Drahtpositionierer-Untersuchung)	85
8.4	Röntgen-Querschnittsmessung (Drahtpositionierer)	86
8.5	Nachweiseffizienz an neuartigen Drahtpositionierern	87
9.1	Drahtpositionierer, verwendete Bauform	90
9.2	Endkappe	91
9.3	Wasseraufnahme von KAPTON-Röhrchen	93
9.4	Messung im Klimaschrank	95
9.5	Zur Funktion des Laser-Extensometers	96
9.6	Feuchtigkeitsbedingte Längenänderung von KAPTON-Röhrchen	98
10.1	Aufbau zum Test der ersten Kammer	100
10.2	Spurverfolgungssystem aus Szintillatorfaserdetektoren	100
10.3	Bestimmung der Ortsauflösung (6-mm-Röhrchen)	103
10.4	Zur kontinuierlichen Funktion des TDC	104
10.5	Ortsauflösung (6- und 10-mm-Röhrchen)	104
10.6	Nachweiseffizienz (10-mm-Röhrchen)	105
10.7	Nachweiseffizienz (6-mm-Röhrchen)	106
10.8	Nachweiseffizienz (Röhrchen an der physischen Öffnung)	107
10.9	Geometrieabweichung von Doppelebene 6/1	110
10.10	Geometrieabweichung von Doppelebene 6/2	111
10.11	Durch Feuchtigkeit verbogene Doppelebene	114
11.1	Anordnung der Kohlefaserstreifen	122
11.2	Schnitt durch ein Driftröhr	123
11.3	Zur Auswirkung mangelhafter Kugelpositionierung.	125
11.4	Zur Verwendung von Distanzfolien	128
11.5	Crimpwerkzeug, Drahtführungshülsen	130
11.6	Auswertung der Crimptests (1)	133
11.7	Auswertung der Crimptests (2)	134
11.8	Belegung des großen Stahltisches	138
12.1	Gasströmung durch die Endkappen	148
12.2	Aufbau zur Messung von Strömungsleitwerten	149
12.3	Strömungswiderstandsschaltbild	150
12.4	Vereinfachtes Strömungswiderstandsschaltbild	152
12.5	Eigenschaften des Schutzgasvolumens	155
12.6	Schaltbild des Gassystems	156
12.7	Funktion des Druckregelventils	161

12.8 Kompressorsteuerung	165
12.9 Ventilbasierte Druckregelung	166
12.10Kompressorbasierte Druckregelung	166
13.1 Orts-Residuenverteilung, gewonnen aus experimentellen Daten . .	168
B.1 Aufnahmen: Vorbereitung der Röhrrchen	180
B.2 Aufnahmen: Segmentherstellung	181
B.3 Aufnahmen: Verbinden der Segmente	182
B.4 Aufnahmen: Vorbereiten der Einzelebenen zum Verkleben	183
B.5 Aufnahmen: Verkleben mit dem Rahmen	184
B.6 Aufnahmen: beschädigte Röhrrchen, physische Öffnung, Gasverteiler	185
B.7 Aufnahmen: Drahtvorbereitung, Crimpen	186
B.8 Aufnahmen: physische Öffnung, Drahtspannungsmessung, Gasdeckel	187
B.9 Aufnahmen: Ausleseseite, Verpacken, Abfahrt	188
B.10 Aufnahmen: Vorbereitende Arbeiten am C.E.R.N.	189
B.11 Aufnahmen: Gassystem	190
B.12 Transportbehältnis, Ladevorgang	191
B.13 Aufbau im Klimaschrank	191
C.1 Vorrichtung zum Einsetzen der Kugeln	194
C.2 Verkleben von Einzelebene und Rahmenelement	194
C.3 Der Gaskanal an der physischen Öffnung	195
C.4 Gasverteiler an den äußeren Driftrohrenden	195
C.5 Massenbelegung der physischen Öffnung (1).	196
C.6 Massenbelegung der physischen Öffnung (2).	196
C.7 Massenbelegung der physischen Öffnung (3).	197
D.1 Ablaufdiagramm (oben links)	200
D.2 Ablaufdiagramm (unten links)	201
D.3 Ablaufdiagramm (oben rechts)	202
D.4 Ablaufdiagramm (unten rechts)	203

Tabellenverzeichnis

4.1	Ionisierungseigenschaften einiger Gase	36
4.2	Diethorn-Parameter einiger Gase	40
6.1	Ortsauflösung des „Dubna-Prototypen“	61
6.2	Geometrische Spezifikationen	64
12.1	Strömungsleitwerte einiger Kammerbauteile	147
12.2	Gasaustauschzeiten	150
12.3	Permeabilitätskonstanten	151
12.4	Schadgaskonzentrationen	152
12.5	Spezifikationen der Massenflussregler	162

Anhang A

Abkürzungsverzeichnis

Soweit auf die Stroh-Driftkammern bezogen, werden die Bezeichnungen „Zähler“, „Detektor“ usf. synonym verwandt.

Die Zahlenwerte von Impulsen und Energien werden in dieser Arbeit stets mit ihren vollständigen Einheiten eV/c bzw. eV/c^2 mit den entsprechenden dezimalen Vorsätzen geschrieben, wohingegen in Gleichungen aus Formelzeichen die Konvention $c_0=1$ für die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 als vereinbart gelte.

Auswahl und Satz von Formelzeichen orientieren sich weitestgehend an den Empfehlungen der Kommission für Symbole, Einheiten und Nomenklatur (SUN-Kommission) der Internationalen Union für reine und angewandte Physik (IUPAP) [40].

Insbesondere sei auf die Bedeutung der Klammern in den Zahlenwertgleichungen 5.13 und 5.14 hingewiesen: „Für eine physikalische Größe mit dem Formelzeichen a [bedeuten] $\{a\}$ den Zahlenwert und $[a]$ das Einheitenzeichen“ [40].

X: Doppalebene mit vertikalen Driftröhrchen

X': Doppalebene mit um 10° gegen die Vertikale geneigten Driftröhrchen, gleich welchen Drehsinns

Y: Doppalebene mit horizontalen Driftröhrchen

VIK: Vereinigtes Institut für Kernforschung, Dubna, Russische Föderation, eine internationale, überstaatliche Organisation, der 18 Staaten als Vollmitglieder angehören. Die Bundesrepublik Deutschland ist assoziiertes Mitglied.

\square : Symbol für eine quadratische Fläche, die entlang zweier gegenüberliegender Seiten kontaktiert ist, um den Flächenwiderstand der Kathode zu messen. Man sieht leicht ein, dass diese Eigenschaft einer leitenden Fläche in der Einheit Ω/\square angegeben werden kann und unabhängig von der Seitenlänge der quadratischen Probestfläche ist.

Anhang B

Bildanhang

Bei der Auswahl der Aufnahmen wurde auf die Darstellung von möglichst vielen Details des Produktionsprozesses geachtet, sodass das vorliegende Kompendium einerseits leidlich umfänglich geriet, andererseits aber - so bleibt wenigstens zu hoffen - einen reichen Fundus an Informationen bietet, der im Zählerbetrieb auftretende Fragen zu beantworten hilft.

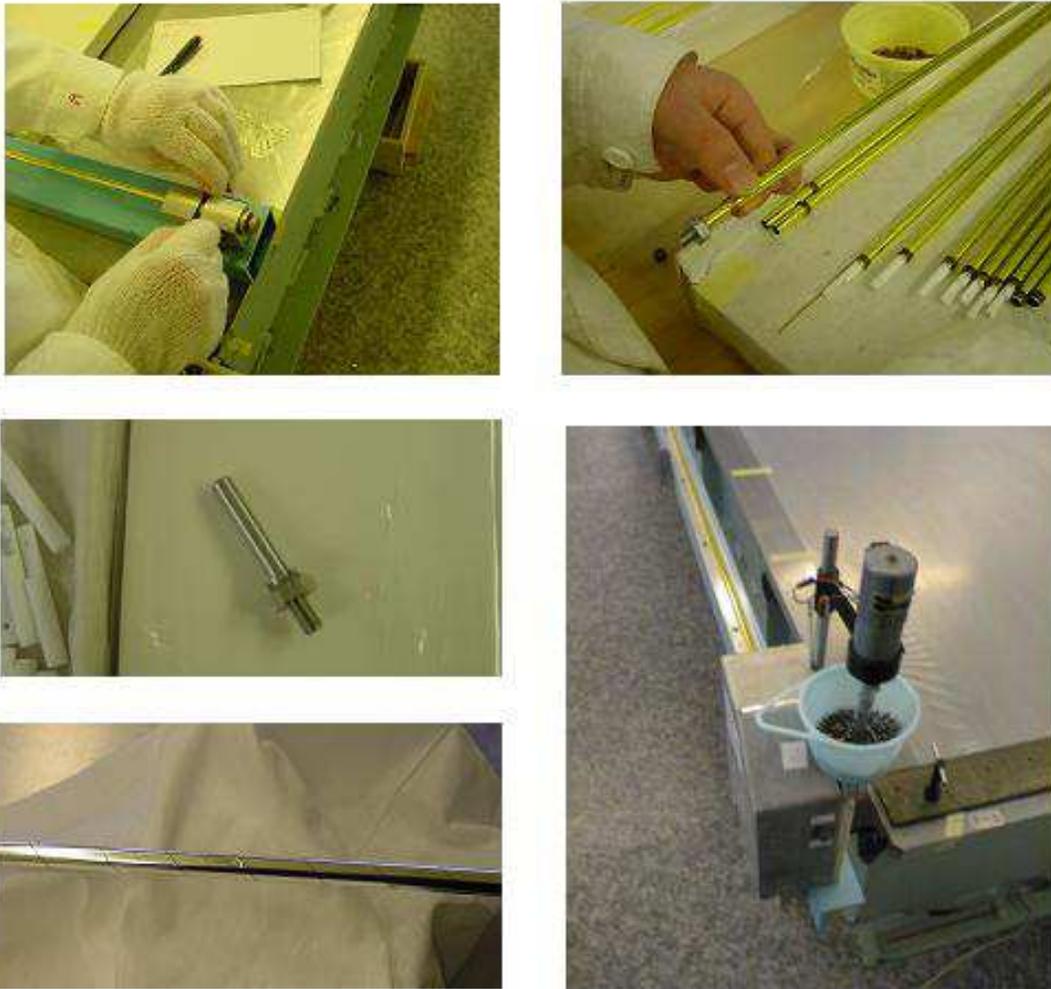


Abbildung B.1:

linke Spalte:

- oben: Schneiden der Strohhalme auf Länge
- Mitte: Werkzeug zum Ankleben der Kupferringe
- unten: mangelhaftes Röhrchen (Mylar-Außenlage)

rechte Spalte:

- oben: Anbringen der Kupferringe (Mundstücke)
- unten: halbautomatisches Füllen der Röhrchen mit Stahlkugeln.

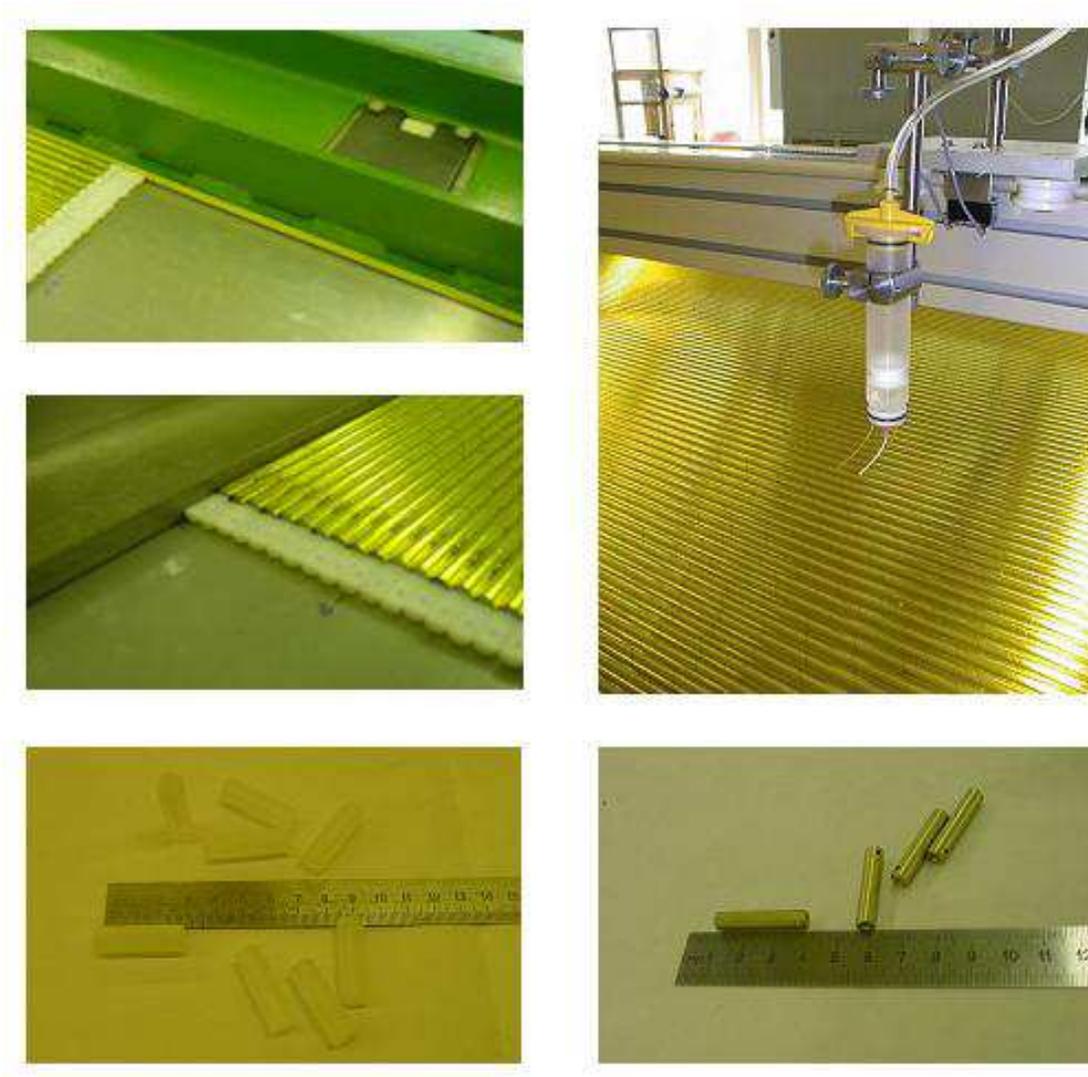


Abbildung B.2:

linke Spalte:

- oben: Zusammenschieben der kugelgefüllten Halme (Stahllineal)
- Mitte: dito, Berandung des Tisches, Klebstoffbarriere
- unten: Kunststoffhülsen zur Kohlefaserstreifen-Montage (alt)

rechte Spalte:

- oben: Verkleben der Strohalmsegmente
- unten: Aluminiumhülsen zur Kohlefaserstreifen-Montage (neu).



Abbildung B.3:

linke Spalte:

oben: kleine Stahltische, auf denen die wesentlichen Arbeitsschritte der Strohalmsegment-Produktion ausgeführt werden

unten: Justage und Verkleben dreier Strohalmsegmente (10/6/10 mm Durchmesser) auf dem großen Stahltisch (präzisionsbestimmender Arbeitsschritt, die Ausrichtung erfolgt - wie dargestellt - an den Ecken)

rechte Spalte:

oben: Verkleben des Aluminiumrahmens mit den Segmenten

unten: Fixierung der Klebung am Übergang zwischen 6-mm- und 10-mm-Röhrchen.

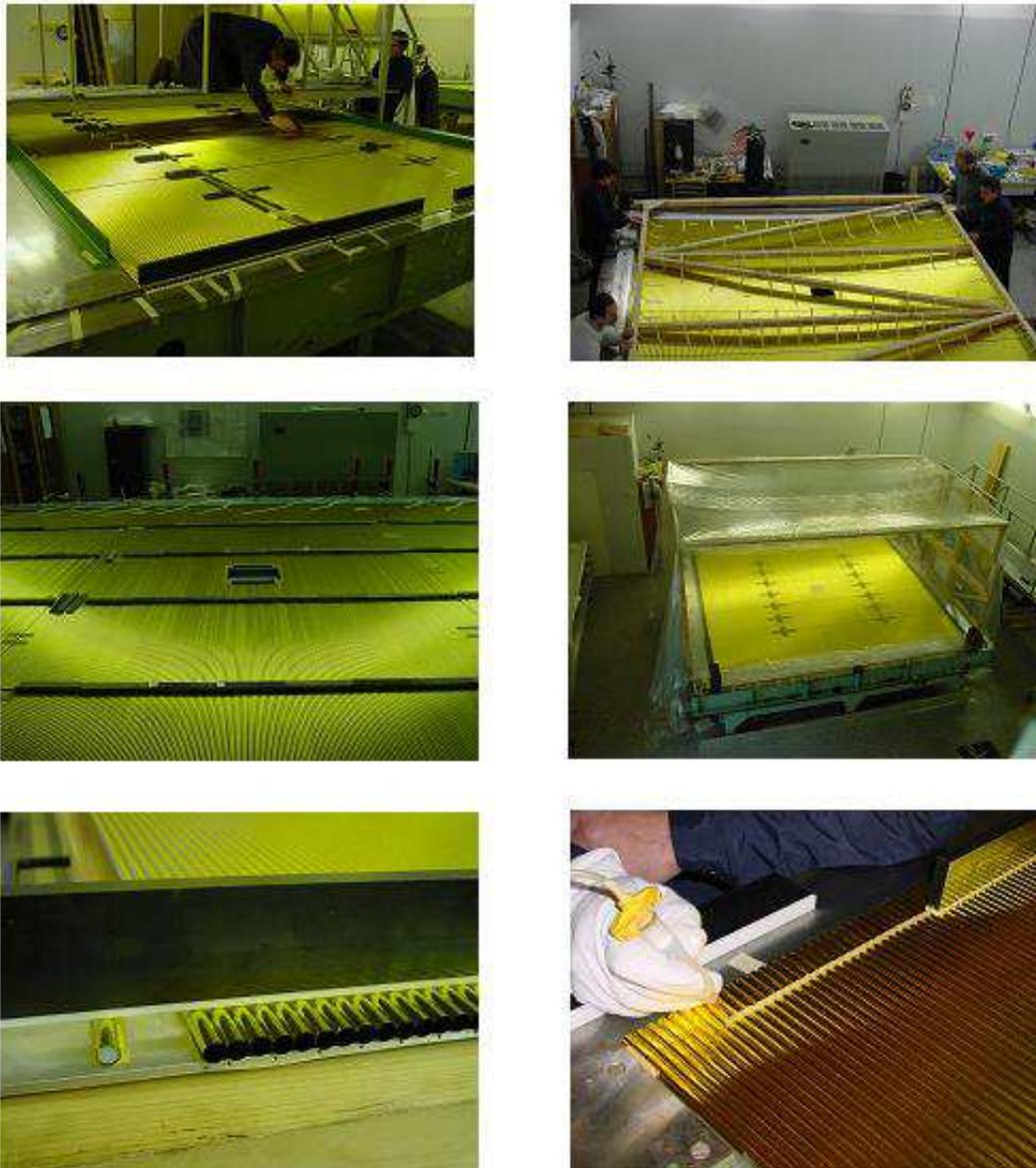


Abbildung B.4:

linke Spalte:

oben, Mitte: Fixieren der Klebungen an den Segmentübergängen (siehe auch Abbildung B) und Kohlefaserstreifen
 unten: Aufbringen der Silikonbarriere an den Röhrenden

rechte Spalte:

oben: händisches Vertragen einer Strohalm-Einzelebene
 Mitte: Verkleben der Einzelebene mit dem Aluminiumrahmen in feuchter Atmosphäre unter mechanischer Vorspannung des Rahmens
 unten: Aufbringen der Silikonbarriere.

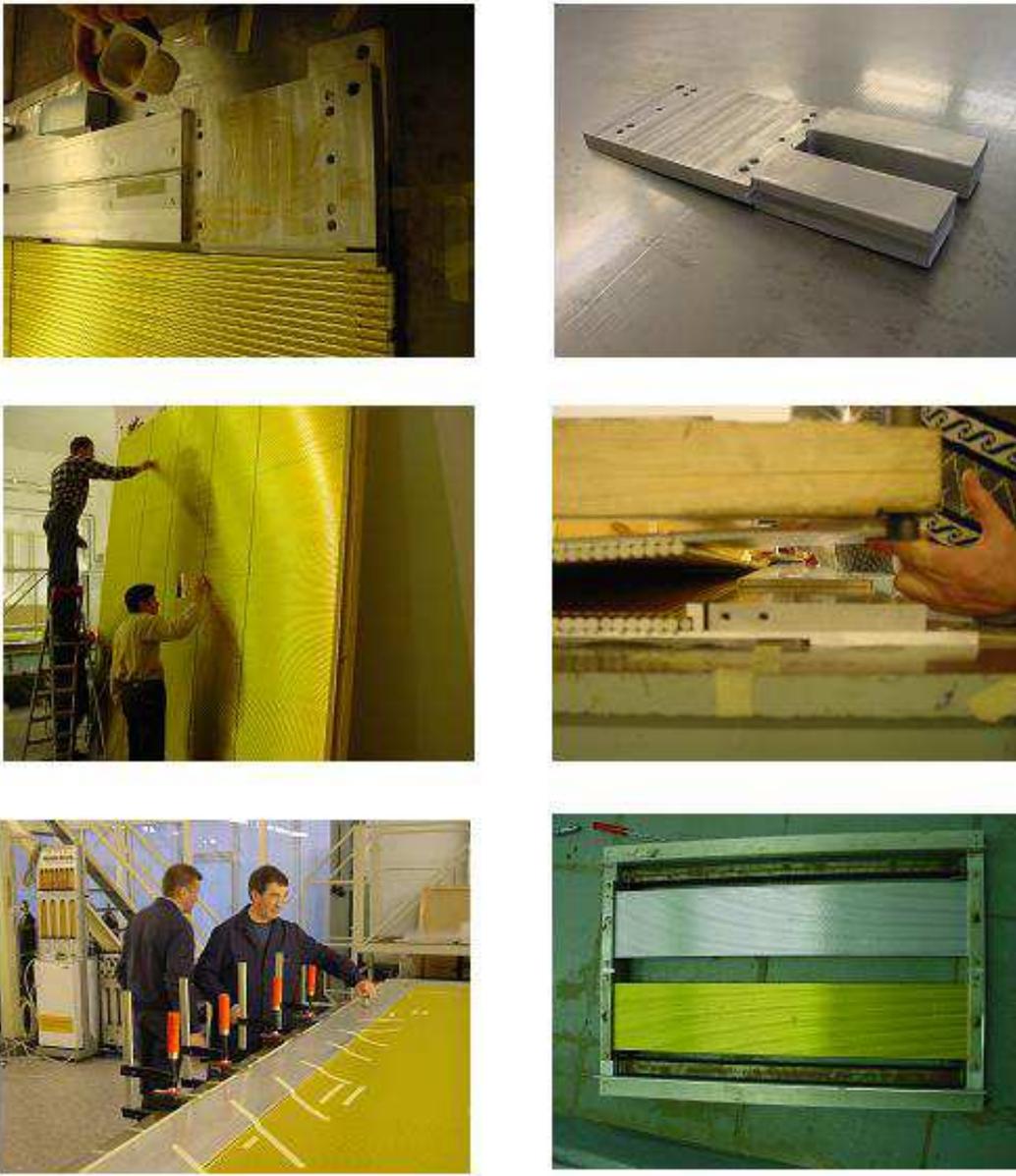


Abbildung B.5:

obere Reihe: Anbringen des Rahmen-Eckelementes

Mitte:

links: Aufbringen von Klebstoff auf die Kohlefaserstreifen zum Verkleben mit der zweiten Einzelebene
rechts: Verbinden beider Einzelebenen

unten:

links: Fixieren der Al-Rahmenelemente nach Verkleben der Ebenen
rechts: Versuchssegmente (Stabilitätstest auf dem Vibrationsstand).



Abbildung B.6:

obere Reihe: beschädigt gelieferte Mylar-Röhrchen

Mitte:

links: Anfertigung d. senkr. Kohlefaserstreifen (6-/10-mm-Übergänge)
rechts: Gas-Transferstruktur für die physische Öffnung

unten:

links: phys. Öffnung (bedrahtet), vor der Montage der Gaskanäle
rechts: Abdichten des Gasverteilers im Rahmen auf der Röhrchenseite.



Abbildung B.7:

linke Spalte:

oben: Bedrahten der physischen Öffnung
 Mitte: Crimpversuch mit fixiertem Werkzeug
 unten: Anbringen der Drahtpositionierer am Signaldraht auf der
 Drahtvorbereitungsbank

rechte Spalte:

oben: obere Drahtfixierung beim Crimpen (lichte Weite: 28 cm)
 unten: Drahtvorbereitungsbänke.

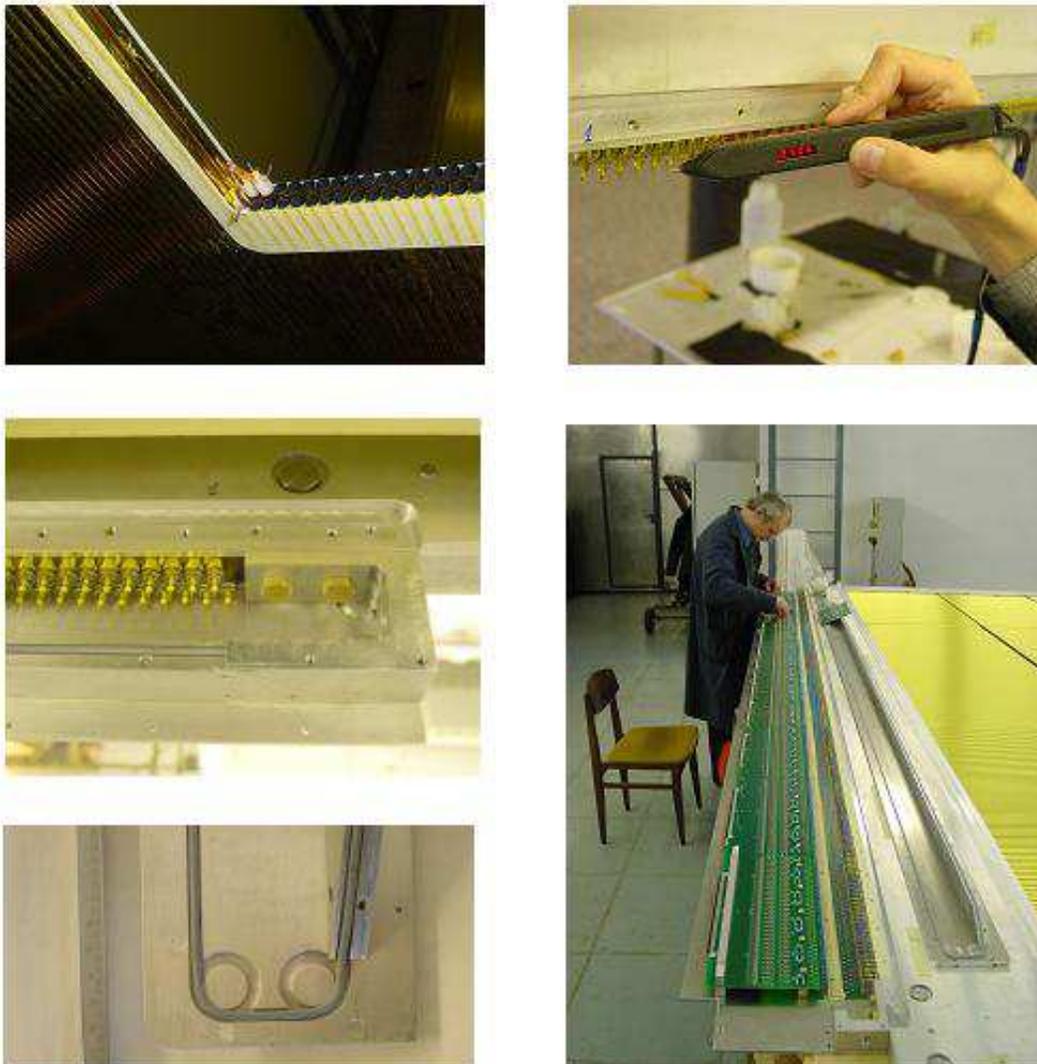


Abbildung B.8:

linke Spalte:

oben: physische Öffnung während des Bedrahtens und der Montage der Endkappen

Mitte: Gasverteiler

unten: Gasverteilerdeckel mit Moosgummi-Dichtschnur aus Chloroprenkautschuk (vgl. Abschnitt 12.2.2)

rechte Spalte:

oben: Drahtspannungsmessung nach der magnetischen Resonanzmethode

unten: Lötarbeiten an den Platinen.



Abbildung B.9:

linke Spalte:

oben: elektrische Terminierung am Übergang von 6- zu 10-mm-Röhrchen, aufwändige Abschirmung zwischen den Röhrchen [49]

Mitte: zwei nachträglich gedichtete Gaslecks in den Röhrchenwänden

unten: ein Kammertransport verläßt das Institutsgelände in Dubna.

rechte Spalte:

oben: Hochspannungsanschluss (Redel-Steckverbinder, s. Abb. 5.7)

Mitte: (Winter-)Wetterschutz der Kammern beim Verbringen an eine andere Produktionsstätte (zweite Produktionslinie)

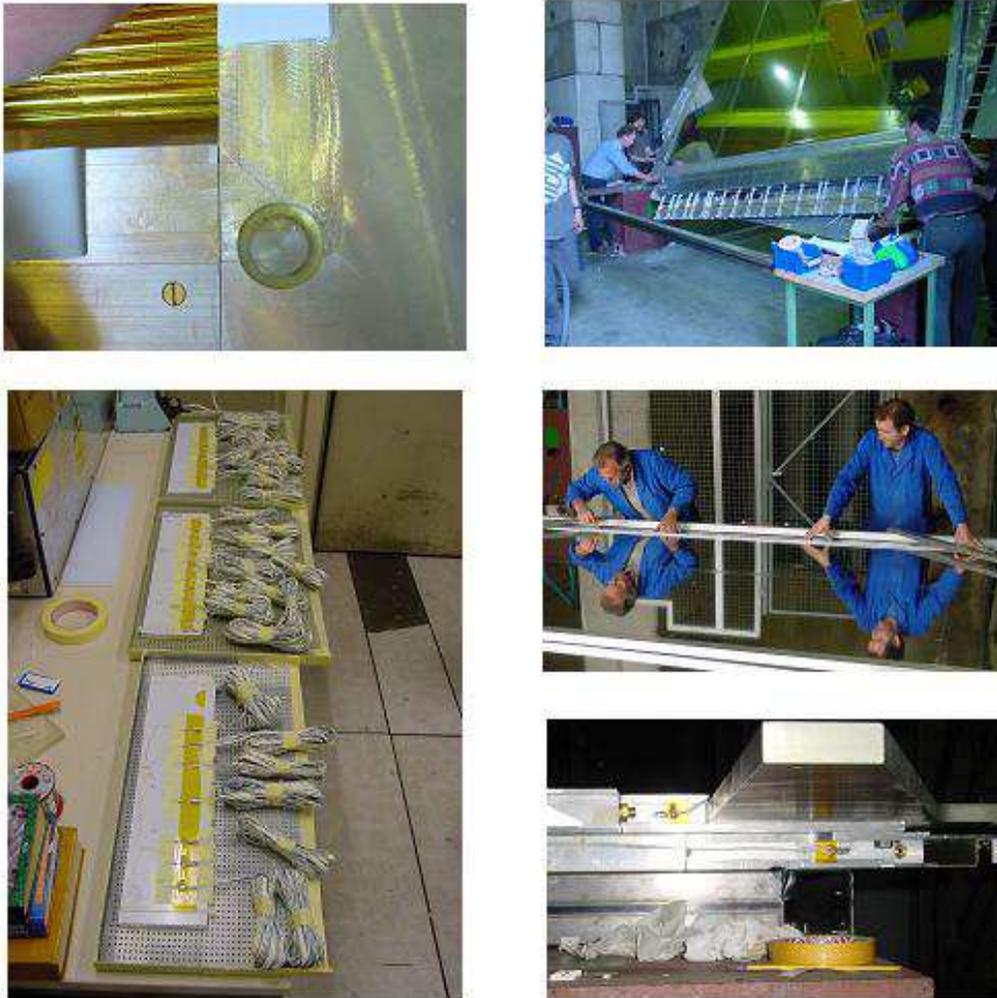


Abbildung B.10:

linke Spalte:

oben: Klebebandstoß an einer Ecke (zum Anbringen der Schutzgasfolie)

unten: montagezeitsparendes Vorbereiten der Temperatursensoren für den Kammerrahmen (Aufkleben auf KAPTON-Klebeband)

rechte Spalte:

oben: Anheben eines Submoduls (3 Doppelebenen) mit dem Kran (C.E.R.N., Gebäude 888 auf dem Nordgelände)

Mitte: Anbringen der Schutzgasfolie (zusätzlich zu dem oben links abgebildeten Klebeband sorgt eine 32 mm breite Epoxidharzspur für Gasdichtigkeit)

unten: Anbringung zweier Temperatursensoren am Kammerrahmen: wärmeisolierende Abdeckung mit aluminisiertem Klebeband.

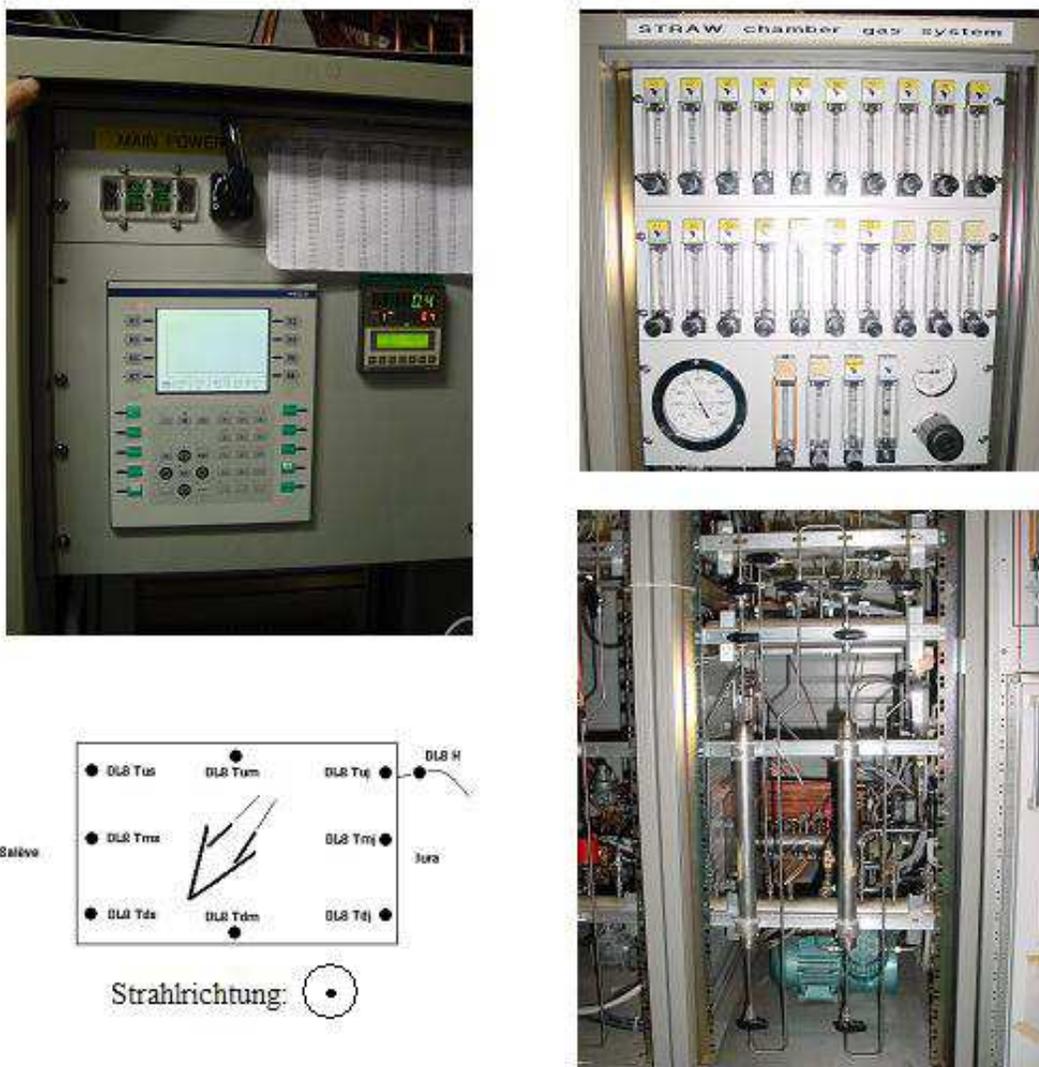


Abbildung B.11:

linke Spalte:

oben: Bedienfeld des Gassystems, links der PLC, rechts der REX-G9 (siehe Abschnitt 12.4.1)

unten: Sensor-Terminologie am Beispiel der Doppellebene 8: Temperatursensoren, rechts im Schutzgas-Ableitungsschlauch der Feuchtigkeitssensor

rechte Spalte:

oben: Flussregler und Systemdruck-Manometer des Gassystems

unten: das Leitungssystem mit Kompressor (unten), bidirektionaler Gasbarriere (links daneben) sowie den beiden Kupfer-Reinigungskolonnen (im Vordergrund).



Abbildung B.12: Das hölzerne Transportbehältnis (links), Beladen des Tiefladers mit dem Kran (rechts).



Abbildung B.13: Der Aufbau im Klimaschrank zur Bestimmung der Längenänderung der Strohhalme als Funktion von Temperatur und Feuchtigkeit: Im Vordergrund ist der optische Wegaufnehmer zu sehen; der Strohalm liegt in dem Aluminiumprofil, an dessen rückwärtigem Ende er befestigt ist.

Anhang C

Zeichnungen zur Zählerproduktion

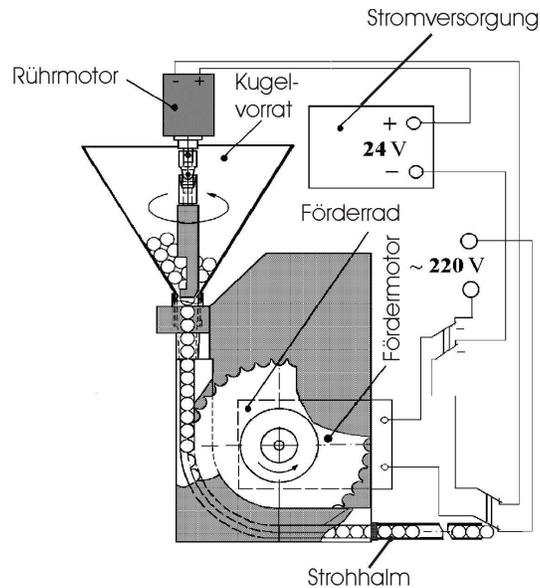


Abbildung C.1: Vorrichtung zum halbautomatischen Befüllen der Strohhalme mit Präzisions-Stahlkugeln. Der Kugelvorrat wird ständig durchgerührt, damit die Kugeln kontinuierlich nachgleiten. [16], modifiziert.

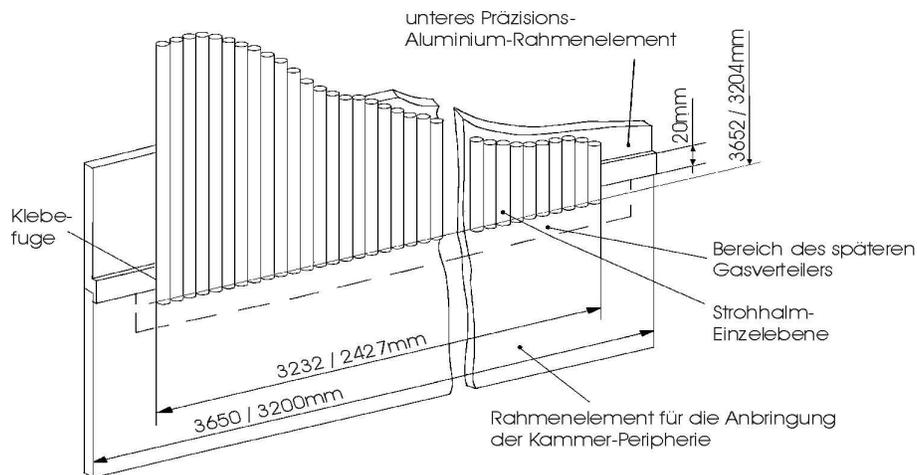


Abbildung C.2: Kleben einer Strohalm-Einzelebene an das Aluminium-Rahmenelement (Oberflächenrauigkeit des Präzisions-Al-Elements: besser als 0,1 mm. [16], modifiziert.

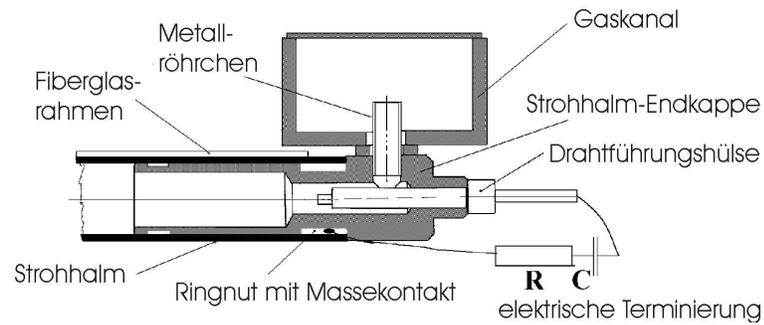


Abbildung C.3: Gaskanal an der physischen Öffnung. Der Fiberglasrahmen ist 1mm stark und umgibt die gesamte Öffnung (Außenmaß: 230 mm × 220 mm Innenmaß: 200 mm × 200 mm). Im Gegensatz zu den Endkappen außen an der Kammer müssen diese an der Ringnut gasdicht in die Strohhalme geklebt werden. [16], modifiziert.

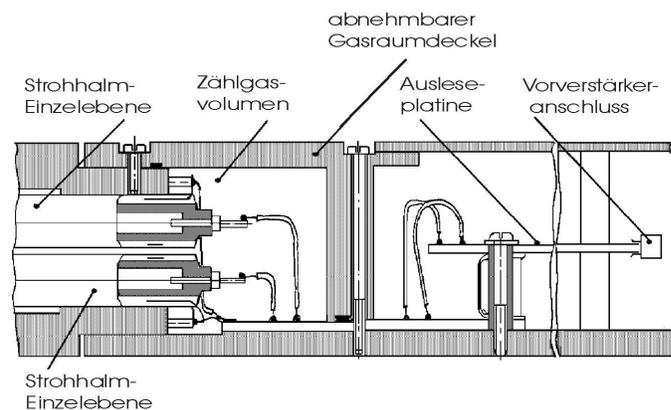


Abbildung C.4: Der Gasverteiler an den äußeren Driftrohren. [16], modifiziert.

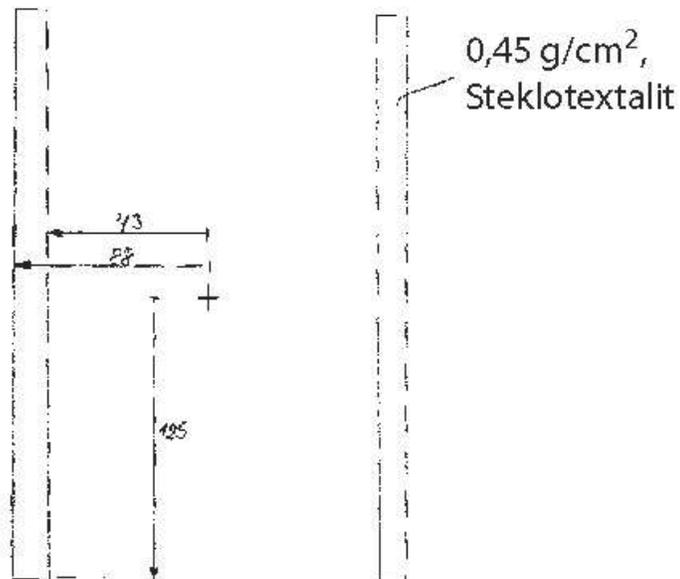


Abbildung C.5: Massenbelegung der physischen Öffnung (1).

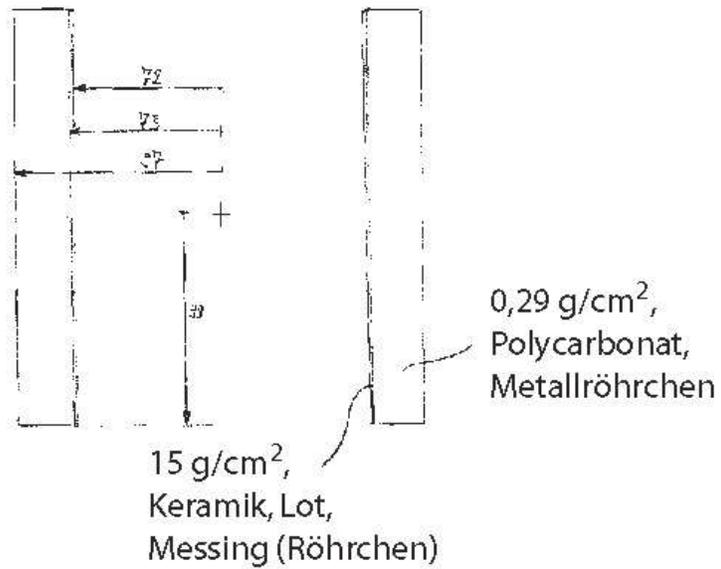


Abbildung C.6: Massenbelegung der physischen Öffnung (2).

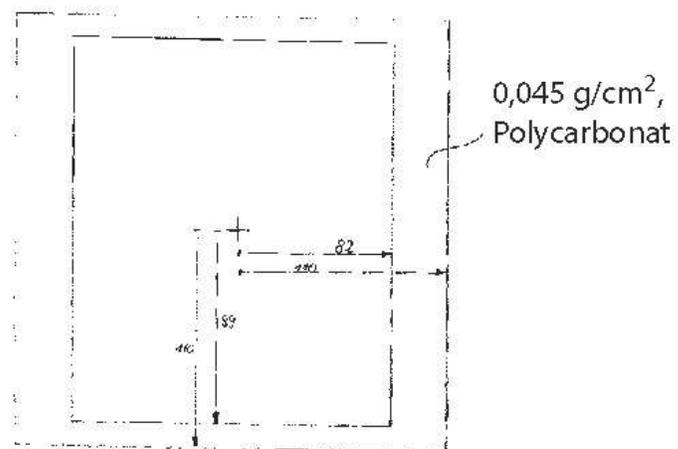


Abbildung C.7: Massenbelegung der physischen Öffnung (3).

Anhang D

Ablaufdiagramme zur Zählerproduktion

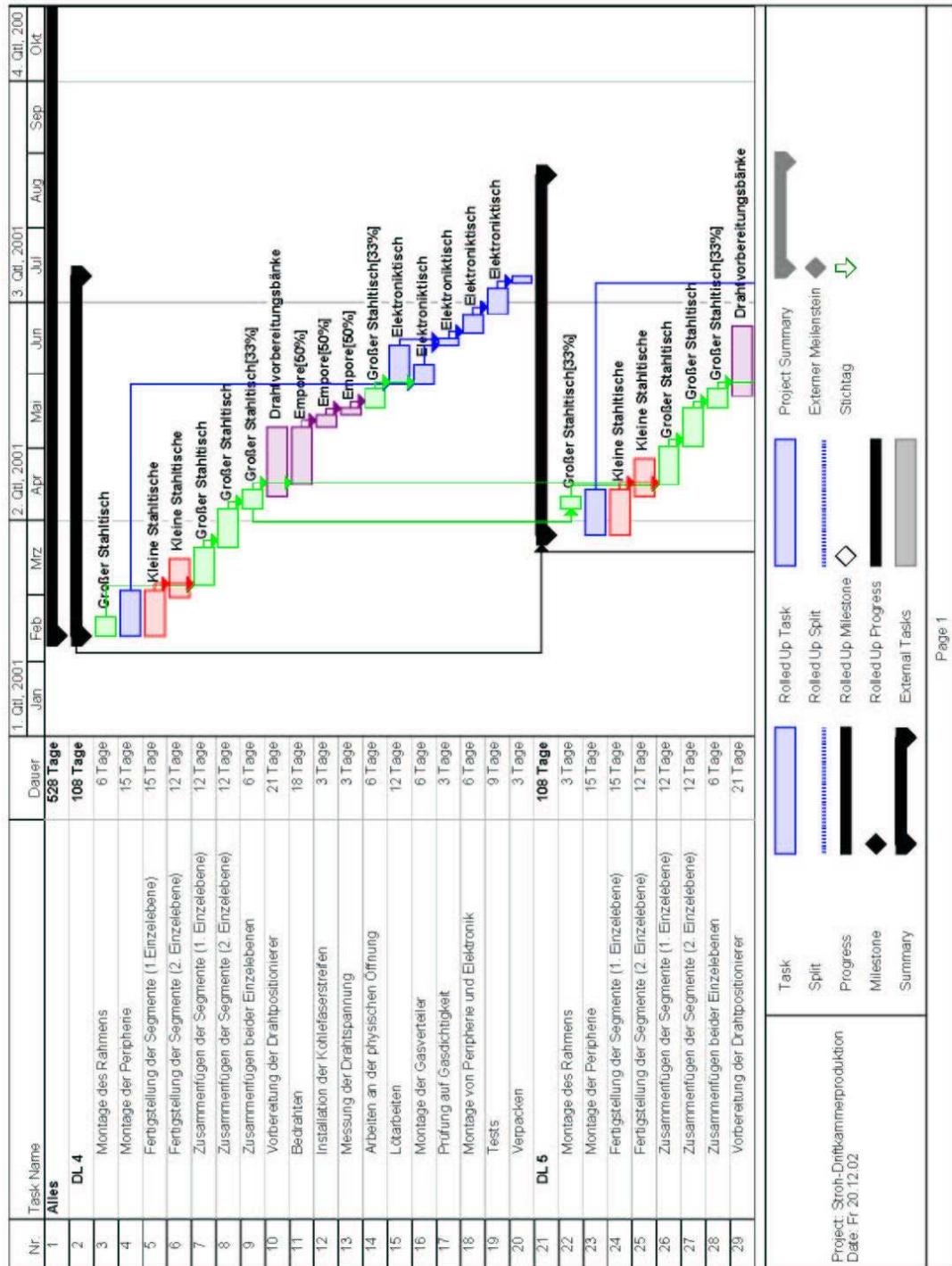


Abbildung D.1: Ablaufdiagramm zur Zählerproduktion, obere linke Ecke. Erläuterungen: siehe Abschnitt 11.2.

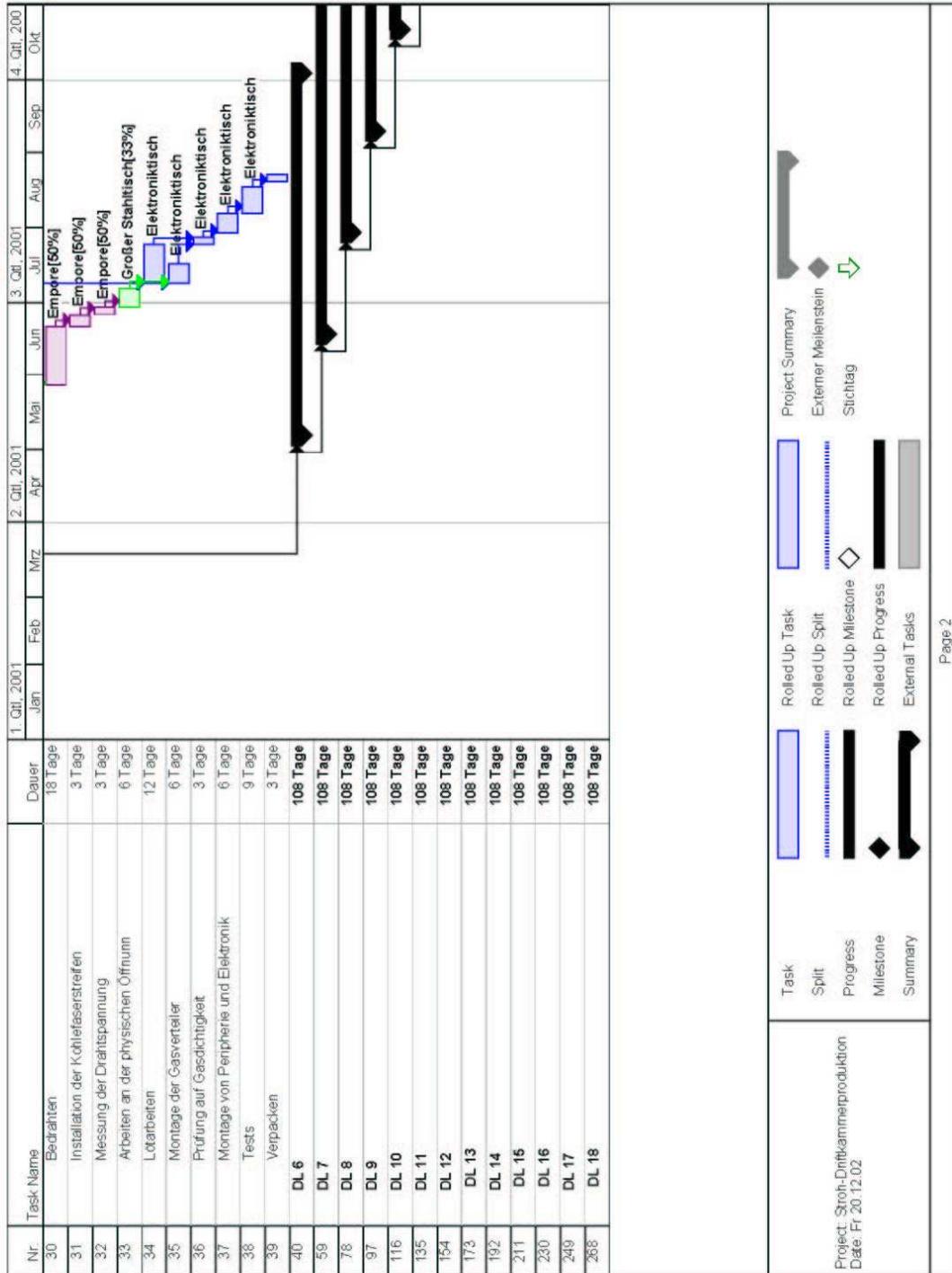


Abbildung D.2: Ablaufdiagramm zur Zählerproduktion, untere linke Ecke. Erläuterungen: siehe Abschnitt 11.2.

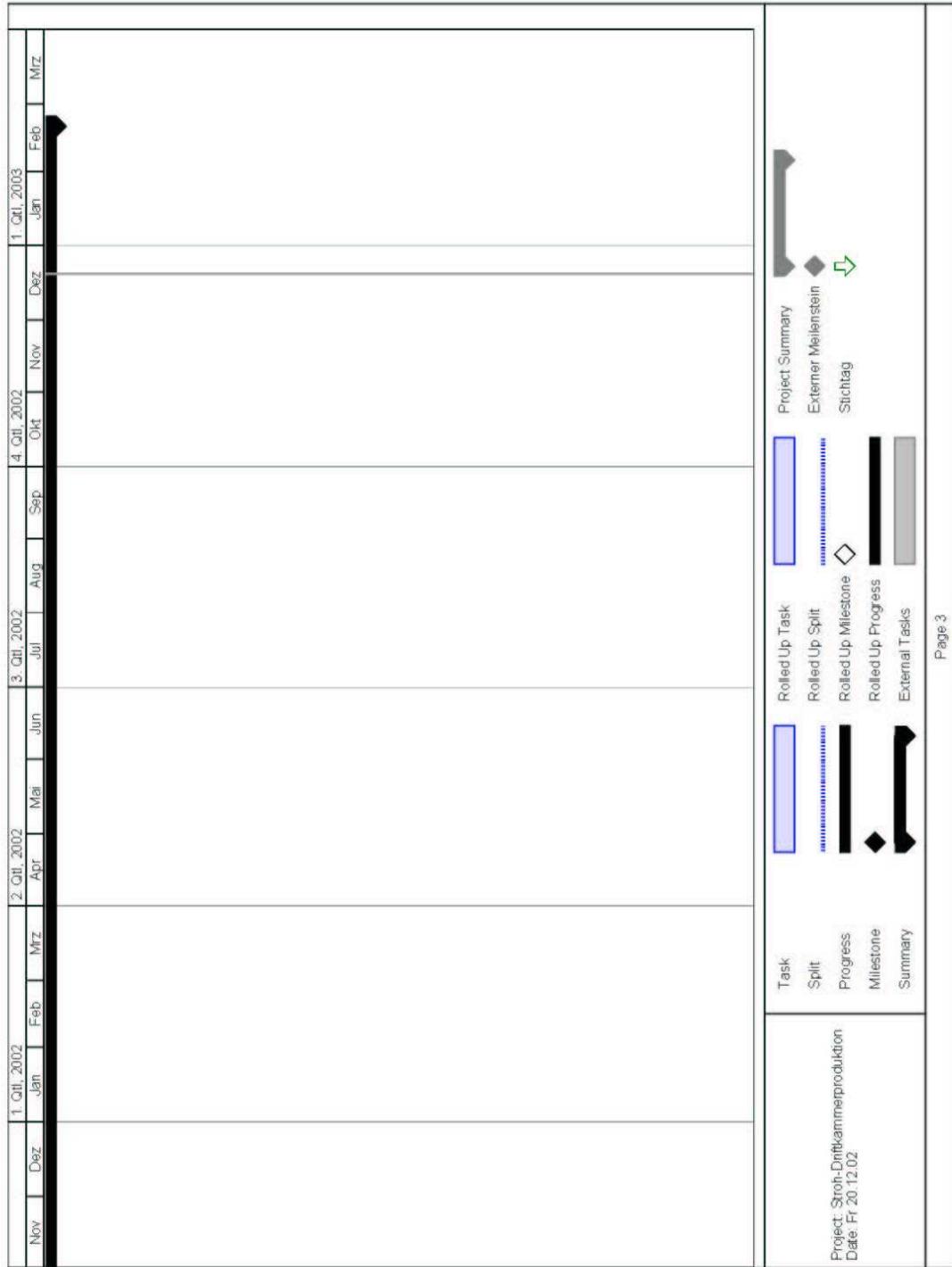


Abbildung D.3: Ablaufdiagramm zur Zählerproduktion, obere rechte Ecke. Erläuterungen: siehe Abschnitt 11.2.

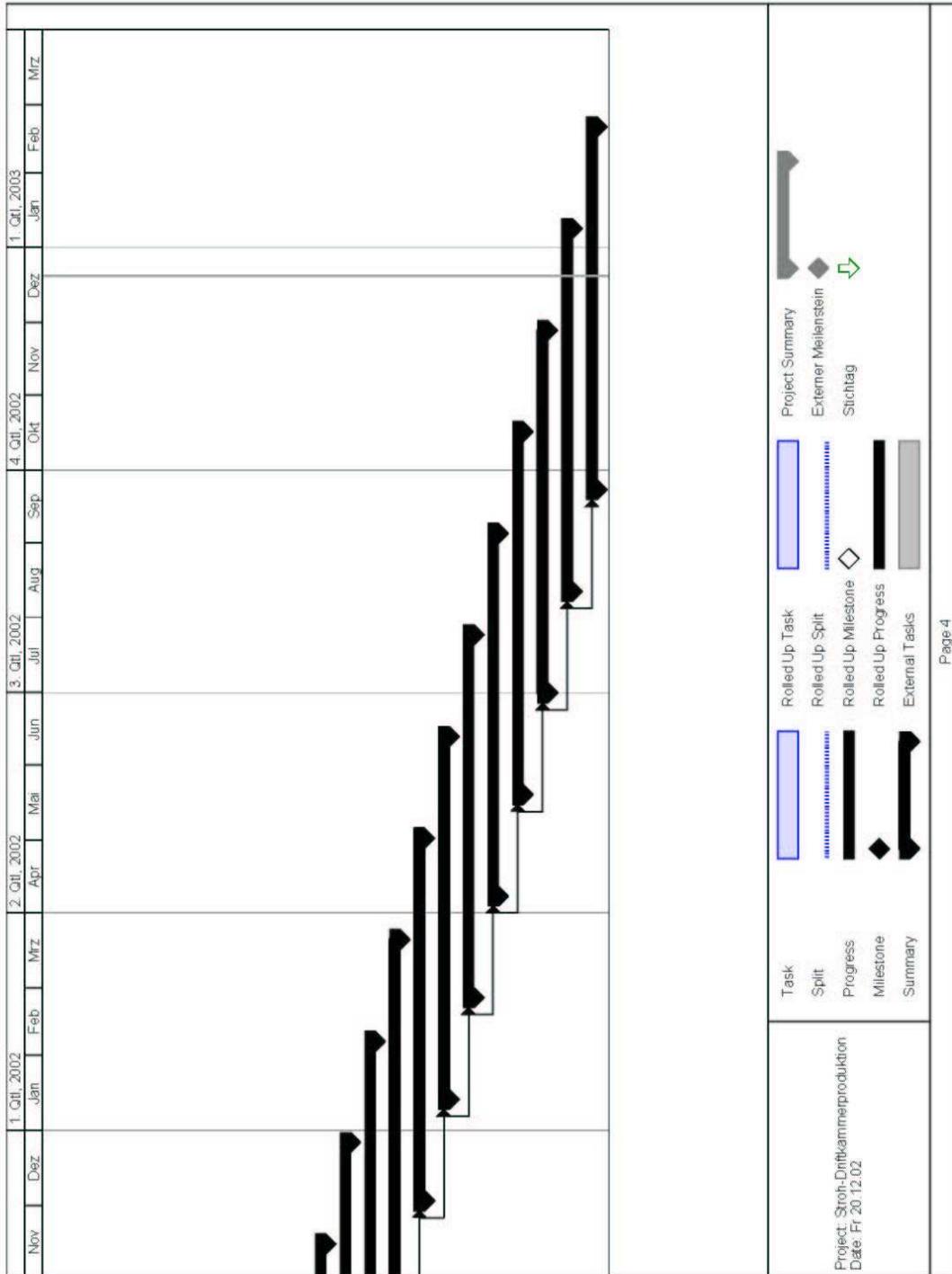


Abbildung D.4: Ablaufdiagramm zur Zählerproduktion, untere rechte Ecke. Erläuterungen: siehe Abschnitt 11.2.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Abragam, M. Goldman: Principles of Dynamic Nuclear Polarisation, Rep. Prog. Phys. **41** (1978) 395.
- [2] V. Aleksakhin: Investigation of the Straw Chambers Inclination Angle, COMPASS-Note 1999-10, C.E.R.N. 1999.
- [3] G. Alexeev, O. Denisov, A. Maggiora, RICH WALL detector of the COMPASS spectrometer, COMPASS-Note 2002-10, C.E.R.N. 2002.
- [4] G. Altarelli, G. G. Ross, Phys. Lett. B **212** (1988) 391.
- [5] The Crystal Barrel Collaboration, C. Amsler et al.: High statistics study of $f_0(1500)$ decay into $\pi^0 \pi^0$, Phys. Lett. B **342** (1989) 433-439.
- [6] The European Muon Collaboration, J. Ashman et al.: An investigation of the spin structure of the proton in deep inelastic scattering of polarized muons on polarized protons, Nucl. Phys. B **328** 1 (1989).
- [7] J. Bensinger, H. Wellenstein: Gas Flow Model for the MDT Chambers, ATLAS muon note 96-106, C.E.R.N. 1996.
- [8] W. Blum, L. Rolandi: Particle Detection with Drift Chambers, Berlin (Springer) 1994.
- [9] M. Bosteels, persönliche Mitteilung.
- [10] C. Bovet et al.: The CEDAR Project: Cerenkov Differential counters with Achromatic Ring focus, C.E.R.N. 1974.
- [11] I. R. Boyko et al., Vibration of Signal Wires under Irradiation, ATLAS internal note MUON-NO-79, C.E.R.N. 1995.
- [12] F. Bradamante: The gluon contribution to the nucleon spin and the COMPASS experiment at CERN, Prog. Part. Nucl. Phys. **44** (1999) 339-359.
- [13] K. Braune et al., Meson spectroscopy and the Crystal Barrel detector at LEAR, Vortrag auf der Konferenz „3rd International Symposium on Medium-energy Physics“, Beijing, 23.-28.06.1987, unveröffentlicht.

- [14] H. J. Bunge: Mathematische Methoden der Texturanalyse, Berlin 1969.
- [15] R. Burgwinkel: Aufbau und Test und Eichung des hochauflösenden Tagging-Systems TOPAS II am Bonner SAPHIR-Detektor, BONN-IR-96-02, Bonn 1996.
- [16] V.N. Bychkov et al.: Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System, Particles and Nuclei, Letters **2**-[111] (1989) 64-73.
- [17] V.N. Bychkov et al., JINR, E13-98-209, Dubna, Russland, 1998.
- [18] V.N. Bychkov et al., JINR, E13-98-269, Dubna, Russland, 1998.
- [19] R. D. Carlitz, J. C. Collins and A. H. Mueller, Phys. Lett. B **214** (1988) 229.
- [20] R. Cizeron et al., Nucl. Instr. Meth. A **307** (1991) 286-291.
- [21] The COMPASS Collaboration: Proposal - Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy, CERN/SPSLC 96-14 SPSC/P 297, C.E.R.N. 1996.
- [22] P. Cooper, Double Charmed Baryons, Vortrag auf dem Workshop „Future Physics at COMPASS“, C.E.R.N., 07.09.2002, unveröffentlicht.
- [23] O. Cramer, M. Faessler: Protonium-Vernichtung in $K_s^0 K_s^0 \pi^0$, C.E.R.N. 1997.
- [24] Datenbank „Verkabelung“, Bergheim (Datacom Buchverlag) 2002.
- [25] N. Dedek: persönliche Mitteilung.
- [26] W. Diethorn: A Methane Proportional Counter System for Natural Radio-carbon Measurements, USAEC Report NY06628 (1956).
- [27] D. Drakoulakos et al.: The high Precision X-Ray Tomograph for Quality Control of the ATLAS MDT Muon Spectrometer, C.E.R.N. 1997.
- [28] Ch. M. Dulya: The Polarization of Deuterons in Butanol and of Nitrogen Nuclei in Ammonia, Los Angeles (University of California), 1996.
- [29] KAPTON: Principales caractéristiques, Les Ulis/Frankreich (Du Pont de Nemours S. A. (France)) o. J.
- [30] A. V. Efremov, O. V. Teryaev: Preprint E2-88-287, Dubna/UdSSR 1988.
- [31] L. Engel, H. Klingele: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung von Metallschäden, München, Wien (Hanser) 1982.

- [32] J. Estermann, Untersuchung von Driftrohr-Detektoren mit Protonen am Münchener Tandem-Beschleuniger, Diplomarbeit, München 1999, unveröffentlicht.
- [33] H. Fischer: persönliche Mitteilung.
- [34] R. Geyer: persönliche Mitteilung.
- [35] J.-M. Le Goff: An Analytical Estimation of D^0 Mass Resolution, COMPASS note 2000-13, C.E.R.N. 2000.
- [36] K. Gürtler: persönliche Mitteilung.
- [37] K. Handrich: Aufbau einer Apparatur und Messung der Gasverstärkung in den Driftröhren des Atlas-Myondetektors, Staatsexamensarbeit, Freiburg 1998, unveröffentlicht.
- [38] A. F. Holleman: Lehrbuch der Anorganischen Chemie/Holleman-Wiberg, 91.-100. Aufl., Berlin (de Gruyter) 1985.
- [39] S. Horikawa et al.: Halo measurements for COMPASS, C.E.R.N. 1998.
- [40] Internationale Union für reine und angewandte Physik (IUPAP) (Hrsg.): Symbole, Einheiten und Nomenklatur in der Physik, deutsche Ausgabe von Symbols, Units and Nomenclature in Physics, Dokument U. I. P. 20 (1978), 2., korrigierte Auflage, Weinheim (Physik-Verlag) 1981.
- [41] J. A. Kadyk (Hrsg.): Workshop on radiation damage to wire chambers, LBL-21170, Berkeley 1986.
- [42] Jurij Kiselew: persönliche Mitteilung.
- [43] H. Klingele, persönliche Mitteilung.
- [44] K. Kurek: Determination of the Particle Momenta in an Inhomogeneous Field in COMPASS (first) Spectrometer - Tchebycheff Polynomials Method, COMPASS-Note 1998-7.
- [45] M. Leberig: Design und Aufbau eines Triggers für quasi-reelle Photonen, Doktorarbeit, Mainz 2002, unveröffentlicht.
- [46] W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Berlin (Springer) 1987.
- [47] V. M. Lyssan: Persönliche Mitteilung.
- [48] G. Mallot: Accessing the gluon polarisation in deep inelastic muon scattering, Proceedings of the International School on Nuclear Physics: 17th course on Quarks in Hadrons and Nuclei, Erice/Italien, 1995.

- [49] J. Marzec, K. Zaremba et. al.: Straw tubes electrical properties, COMPASS-Note 1998-10, C.E.R.N. 1998.
- [50] MEL Mikroelektronik GmbH (Hrsg.): Datenblatt zum Laserextensometer Typ M5, Eching 2002.
- [51] M. Moinester, Pion and Kaon Polarizabilities at CERN COMPASS, Vortrag auf der Konferenz „Advanced Study Institute on Symmetries and Spin“, Prag, 14.-27.07.2002, unveröffentlicht.
- [52] M. Noll: Bau und Inbetriebnahme von Driftrohren für das COMPASS-Experiment am CERN, Diplomarbeit, unveröffentlicht, München 1999.
- [53] Particle Data Group, Review of Particle Physics, Berlin (Springer) 2000.
- [54] A. Peisert, F. Sauli: Drift and diffusion of electrons in gases: a compilation (with an introduction to the use of computing programs), CERN-73-04, C.E.R.N. 1973.
- [55] V.D. Peschechonow: persönliche Mitteilung.
- [56] K. Platzer: persönliche Mitteilung.
- [57] G. Quack, Technische Elastomere, in: Physik der Polymere, 22. IFF-Ferienkurs, Jülich 1991.
- [58] C. Ramsauer: Über den Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle gegenüber langsamen Elektronen, Ann. Phys. **66** (1921) 546.
- [59] W. Riegler, Limits to Drift Chamber Resolution, Wien 1997.
- [60] E. Rosso: persönliche Mitteilung.
- [61] M. Sans, U. Wiedner: Test beam results of 2 prototypes of straw tube chambers for COMPASS, COMPASS-Note 1999-2, C.E.R.N. 1999.
- [62] F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, Technical Report 77-09, C.E.R.N. 1977.
- [63] Ch. Scheffzük: Neutronographische Texturanalysen und Mikrostrukturuntersuchungen natürlicher und triaxial verformter Halite, STR99/15, Aachen 1999.
- [64] Ch. Scheffzük: persönliche Mitteilung.
- [65] S. Shokin, persönliche Mitteilung.
- [66] I.A. Schukow: persönliche Mitteilung.

- [67] T. S. Shin et al., Nucl. Instr. Meth. A **332** (1993) 469-475.
- [68] A. Staude: persönliche Mitteilung.
- [69] D. Thers et al.: Micromegas as a large microstrip detector for the COMPASS experiment, Nucl. Instr. Meth. A **469/2** (2001) 133-146.
- [70] S. Dalla Torre: The COMPASS Spectrometer: Status and Performance, Beitrag zum Workshop „Future Physics @ [at] COMPASS”, C.E.R.N. 2002.
- [71] Th. Trefzger: Test Beam Results of a BMS MDT Chamber for the ATLAS Muon Spectrometer, ATL-MUON-97-163 (ATL-M-PN-163), C.E.R.N. 1997.
- [72] K. Z. Troost et al.: Microtexture Determination of As-Drawn Tungsten Wires by Backscatter Kikuchi Diffraction in the Scanning Electron Microscope, Materials Science Forum **157-162**, 1299 (1994).
- [73] UNEP, Glossary of Ozone Protection Terms; United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics, Ozone Action Programme under the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol (Hrsg.), o. J.
- [74] R. Veenhof, GARFIELD, A Drift Chamber Simulation Program, C.E.R.N. Program Library W 5050 (1998).
- [75] H. Vogel: Gerthsen Physik, 18. Aufl., Berlin (Springer) 1995.
- [76] R. C. Weast (Hrsg.): Handbook of Chemistry and Physics, Cleveland/Ohio (The Chemical Rubber Co.), 47. Aufl. 1966.
- [77] U. Wiedner: The COMPASS experiment at CERN, 7; th International Symposium on Meson-nucleon Physics and the structure of the Nucleon - MENU'97, Vancouver/Kanada, 1997.

Schulischer und beruflicher Werdegang

Christoph Joachim Ilgner

Geburtsdatum: 15. März 1969

Geburtsort: Bremen

Staatsbürgerschaft: deutsch

Familienstand: ledig

Ausbildung

von	bis	Schule/Hochschule	Abschluss
09/1979	06/1988	Karls gymnasium München	Allgem. Hochschulreife
07/1988	09/1989	Wehrdienst in der Bundeswehr	
11/1989	09/1993	Ludwig-Maximilians-Univ. München	Dipl.-Vorprüfung (1991)
10/1993	05/1996	Technische Universität München	Diplom-Physiker(univ.)
11/1998	gegenw.	Ludwig-Maximilians-Univ. München	

Beruflicher Werdegang

von	bis	Arbeitgeber, Ort
10/1996	06/1998	Universität der Bundeswehr, München
11/1997	01/2003	Ludwig-Maximilians-Universität München
02/2003	gegenw.	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
11/1997	gegenw.	Europäisches Laboratorium für Teilchenphysik, Genf
09/1999	gegenw.	Vereinigtes Institut für Kernforschung, Dubna
05/2000	12/2000	Deutsche Bahn AG, Berlin (als selbständiger Berater)
02/1995	05/1996	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Garching
09/1993	10/1993	Meteorologisches Institut der Universität München