

Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit
im Studiengang Physik

vorgelegt von
Thomas Lehmann
aus Worms

2004

Vorbereitungen für die
Qualitätstests der
ALICE-TRD-Kammern

Die Diplomarbeit wurde von
Thomas Lehmann ausgeführt am

**Physikalischen Institut
der Universität Heidelberg**

unter der Betreuung von

Frau Prof. Johanna Stachel

Vorbereitungen für die Qualitätstests der ALICE-TRD-Kammern

Eines der Experimente des Teilchenbeschleunigers LHC am CERN ist das auf die Untersuchung von Schwerionenkollisionen optimierte Experiment ALICE. Für die Kammern des Übergangsstrahlungsdetektors (TRD), der einen Subdetektor von ALICE darstellt, wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit diverse Meßreihen durchgeführt. Der Radiator ist in den Kammern für die Erzeugung der Übergangsstrahlung verantwortlich, die für die Teilchenidentifikation benötigt wird. Die Zusammensetzung des Radiators wurde aufgrund der hier durchgeführten Messungen entschieden. Für jede Kammer des TRD werden zur Signalerfassung Padplanes benötigt. Für deren Messungen wurde eine Testsoftware in Labview entwickelt, die Messungen selbst erfolgten über Kapazitätsmessungen. Auch wenn die Erfolgsquote der Messungen nicht zu beanstanden ist, so sind doch in Zukunft noch Verbesserungen im Meßaufbau angezeigt. Für die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit fertiggestellten TRD-Kammern wurden 4 verschiedene Messungen durchgeführt und die dafür notwendige Testsoftware in Form eines Labviewprogramms erstellt. Der Meßaufbau hat sich für die Durchführung der Messungen als geeignet erwiesen. Die gemessenen Kammern lagen bei allen 4 Tests innerhalb der Sollwerte. Schließlich wurde an der Testphase und Anpassung der Detektordatenbank (DCDB) an die Anforderungen des TRD mitgearbeitet. Zwar müssen für die DCDB noch Detailänderungen und -Verbesserungen durchgeführt werden, sie ist aber für den Einsatz als Datenbank des ALICE-Detektors geeignet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Der ALICE-Detektor	3
3	Der Transition Radiation Detector	4
3.1	Physikalische Grundlagen	5
3.1.1	Übergangsstrahlung	5
3.1.2	Teilchenidentifikation	5
3.2	Die Kammern des TRD	8
3.2.1	Der Radiator	9
3.2.2	Die Driftkammer	9
3.2.3	Die Padplane	11
4	Die Meßsoftware LabVIEW	13
5	Transmissionsmessungen der Radiatoren	16
5.1	Einführung	16
5.2	Experimenteller Aufbau	17
5.2.1	Versuchsaufbau	17
5.2.2	Der Röntgen-Detektor	18
5.2.3	Auslese	18
5.3	Die Quellen	19
5.3.1	Eisen-Quelle	20
5.3.2	Andere Quellen	20
5.4	Messungen	21
5.4.1	Energiespektren der Quellen	22
5.4.2	Diskussion der Spektren	23
5.4.3	Berechnung der Transmissionen	32
5.4.4	Meßreihe I	34
5.4.5	Meßreihe II	38
5.4.6	Transmissionen der Drahtkammer	41

5.5	Diskussion	44
5.5.1	Radiator-Aufbau	44
5.5.2	Systematischer Fehler	44
6	Qualitätstests der TRD-Padplanes	47
6.1	Einleitung	47
6.2	Meßaufbau	48
6.2.1	Meßprinzip	50
6.2.2	Meßgerät	52
6.2.3	Meßsoftware	54
6.2.4	Messungen der Padkapazitäten	54
6.3	Meßergebnisse	60
6.3.1	Vorderseite der Padplane	60
6.3.2	Rückseite der Padplane	63
6.4	Fazit und Ausblick	66
6.4.1	Meßaufbau	66
6.4.2	Meßgerät	67
6.4.3	Meßsoftware	67
7	Qualitätstests der TRD-Kammern	69
7.1	Meßaufbau für die Kammertests	70
7.1.1	Hochspannungsgeräte	70
7.1.2	Strommeßgerät	72
7.1.3	Gassystem	73
7.1.4	Das Kammermeßprogramm	74
7.2	Hochspannungstests	77
7.2.1	Kammereigenschaften	78
7.2.2	Die Messungen	79
7.3	Messungen der Gasleckraten der Kammern	81
7.3.1	Berechnung der Gasleckrate	81
7.3.2	Die Messungen	83
7.3.3	Fazit und Ausblick	86
7.4	Messung der Homogenität der Gasverstärkung	87
7.4.1	Vorbereitungen	87
7.4.2	Die Messungen	89
7.5	Messungen der Verstärkungs-Kennlinien	92
7.6	Zusammenfassung der Kammermessungen	95
8	Die Detektordatenbank	97
8.1	Einleitung	97
8.2	Aufbau der DCDB	98

8.2.1	Die generische Struktur der DCDB	99
8.2.2	Die Scriptsprache XML	102
8.2.3	Das Anlegen der Datenstrukturen	102
8.2.4	Die Benutzerschnittstelle der Datenbank	102
8.3	Verbindung von LabVIEW zur DCDB mit Labserver	103
8.3.1	Installation und Konfiguration von Labserver	104
8.3.2	Die DCDB-XML-VIs für LabVIEW	105
8.4	Fazit und Ausblick	106
8.4.1	Fehlerquellen	106
8.4.2	Fazit	106
8.4.3	Ausblick	108
9	Zusammenfassung und Ausblick	109

Kapitel 1

Einleitung

Am Europäischen Kernforschungszentrum CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) wird mit dem Large Hadron Collider (LHC) der zur Zeit leistungsfähigste Teilchenbeschleuniger der Welt gebaut. Einer der 4 Detektoren am CERN wird der Detektor ALICE (A Large Ion Collider Experiment) sein, der auf die Untersuchung von Schwerionenkollisionen optimiert ist. Das Ziel der hochenergetischen Schwerionenphysik ist die Erforschung von stark wechselwirkender Materie bei extremen Energiedichten, wie es sie z. B. im Inneren von Neutronensternen gibt. Auch wird nach aktuellem Stand der Forschung davon ausgegangen, daß ähnliche Bedingungen relativ kurze Zeit (10^{-5} s) nach dem Urknall geherrscht haben. Durch die Erzeugung und Untersuchung dieser Zustände in einem Experiment kann man daher Erkenntnisse über die Entstehung des Universums gewinnen [ATP95].

Nach heutigem Kenntnisstand stellen Quarks und Leptonen die einzigen Elementarteilchen dar. Alle anderen Materieformen, z. B. Nukleonen, Atome, Festkörper, lassen sich auf diese Materiebestandteile zurückführen. Quarks und Leptonen sind Fermionen, d. h. Teilchen mit halbzahligen Spin und antisymmetrischer Wellenfunktion. Quarks werden in 6 Gruppen aufgeteilt (up, down, charm, strange, top und bottom), sie tragen neben der elektrischen auch eine sog. Farbladung. Es gibt 6 Farben: Rot, Grün, Blau und ihre jeweiligen Antifarben.

Die Wechselwirkung zwischen den Farbladungen nennt man die starke Wechselwirkung. Sie bildet zusammen mit der elektrischen, der schwachen und der Gravitationswechselwirkung die 4 fundamentalen Kräfte der Natur. Beschrieben wird die Theorie der starken Wechselwirkung in der Quantenchromodynamik (QCD). Die Austauschteilchen im Falle der starken Wechselwirkung sind die Gluonen, sie koppeln an die Farbladung der Quarks. Im Gegensatz zu den Austauschteilchen anderen Wechselwirkungen tragen die Gluonen selbst

auch Farbladung, koppeln also auch untereinander. Durch die starke Wechselwirkung schließen sich die Quarks zu nach außen hin farbneutralen Teilchen zusammen, den Hadronen, die aber durchaus eine elektrische Ladung haben können. Hadronen aus zwei Quarks nennt man Mesonen (Beispiel: Pion), die aus drei Quarks Baryonen (Beispiel: Proton). Da alle Hadronen, die als freie Teilchen beobachtet wurden, im Gegensatz zu Quarks farbneutral sind, spricht man davon, daß Quarks in den Hadronen „eingeschlossen“ sind (confinement).

Erzeugt man z. B. durch Kollisionen in einem Teilchenbeschleuniger Kernmaterie sehr hoher Dichte oder Temperatur, dann können sich Quarks im Kern quasifrei bewegen, da ihre strikte Zuordnung zu ihrem Hadron aufgehoben ist. Das Gemisch aus Quarks und Gluonen, das man dabei erhält, nennt man *Quark-Gluon-Plasma* (QGP). Der Phasenübergang zwischen Kernmaterie und Quark-Gluon-Plasma, bei dem vermutlich auch die chirale Symmetrie wiederhergestellt wird (das ist die Ausrichtung des inneren Drehmoments des Quarks (Spin) parallel zu seinem Impuls), findet voraussichtlich bei einer kritischen Temperatur von $T_C \approx 160$ MeV statt [Sta99].

Durch die Kollisionen von schweren Ionen (z. B. vollständig ionisierte Blei-Kerne) in einem Beschleuniger wie dem LHC verdichtet und erhitzt man Kernmaterie so stark, daß man dabei QGP erzeugen kann. Zwar wurden auch schon vor dem LHC am CERN oder am Brookhaven National Laboratory (BNL) ultrarelativistische Schwerionenkollisionen durchgeführt, kein Experiment konnte aber bisher die Energie von 5,5 TeV pro Nukleonpaar erreichen, die der LHC zur Verfügung stellen wird. Bei dieser Energie durchdringen sich die Kerne vollständig und es entsteht ein QGP, das anschließend wieder rehadronisiert.

Während dieses Prozesses entsteht eine Vielzahl von Teilchen, die detektiert und analysiert werden müssen. Unverzichtbar dafür ist eine zufriedenstellende Teilchenidentifizierung, weshalb zum Detektor ALICE im Jahre 1999 nachträglich der Übergangsstrahlungsdetektor (**T**ransition **R**adiation **D**etector, TRD) hinzugefügt wurde [TRD01].

Kapitel 2

Der ALICE-Detektor

Der Start des Detektors ALICE soll voraussichtlich 2006 mit ersten Kollisionsversuchen erfolgen. ALICE wird auf die Untersuchung von Schwerionenkollisionen (Bleikerne) bei Schwerpunktsenergien von 5,5 TeV optimiert sein. Bei diesen hohen Energien soll Quark-Gluon-Plasma (QGP) mit einer Temperatur von ca. 1 GeV entstehen. Das Ziel von ALICE wird es sein, die Eigenschaften des QGPs, seine Dynamik, den Phasenübergang bei seiner Rehadronisierung und die Entwicklung des hadronischen Endzustandes bis hin zum Ausfrieren der Hadronen zu untersuchen.

ALICE ist zur Zeit das einzige Schwerionenexperiment am LHC und wird so konzipiert sein, daß man eine große Anzahl von physikalischen Observablen über einen größtmöglichen Phasenraum messen kann. Dabei wird der Detektor auf die Physik minimaler Baryonendichte und maximaler Energiedichte ausgelegt sein. Außer der Beobachtung einzelner Signale sollen auch quantitative und qualitative Unterschiede zwischen Proton-Proton- und Kern-Kern-Kollisionen bei einer Vielzahl von Endzuständen untersucht werden. Als Observable werden hadronische und leptonische Teilchen, ebenso wie Photonen, erfaßt [TRD01].

Der ALICE-Detektor befindet sich im Inneren des L3-Magneten (nominale Feldstärke 0,4 T). Er besteht in radialer Richtung betrachtet von innen nach außen aus dem System zur Spurrekonstruktion (**I**nnere **T**racking **S**ystem, ITS), der Spurendriftkammer (**T**ime **P**rojection **C**hamber, TPC), dem Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) und dem System zur Flugzeitbestimmung (**T**ime **O**f **F**light, TOF). Zusätzlich gibt es zwei kleinere Detektoren, ein elektromagnetisches Kalorimeter (**P**H**O**ton **S**pectrometer, PHOS) und einen Detektor zur Identifizierung von Teilchen mit großen Impulsen (**H**igh **M**omentum **P**article **I**dentification **D**etector, HMPID). Schließlich gibt es noch ein vorwärts gerichtetes Myonenspektrometer, das sich außerhalb des L3-Magneten befindet.

Kapitel 3

Der Transition Radiation Detector

Wichtig für die mit ALICE durchgeführten Experimente wird die Teilchenidentifikation sein. Um genau das zu gewährleisten, wurde der Übergangsstrahlungsdetektor TRD 1999 dem ALICE-Experiment hinzugefügt. Seine Hauptaufgabe: Identifizierung von Elektronen, die bei Schwerionenreaktionen entstehen [TRD01].

Da neben der Produktion von Elektronen auch Pionen entstehen, kommt der Unterscheidung beider Teilchenarten eine wichtige Bedeutung zu. Im Besonderen interessiert man sich bei den Elektronen für diejenigen mit Impulsen größer als 1 GeV/c, da ab diesem Energiewert die Unterscheidung der Elektronen von den Pionen durch Energieverlustmessungen in der TPC nicht mehr ausreicht. Daher wurden die physikalischen Möglichkeiten des ALICE-Experiments durch das Hinzufügen des TRD deutlich erweitert.

Desweiteren wird der TRD als Trigger für Prozesse mit hohen Transversalimpulsen $p_t > 3 \text{ GeV}/c$ dienen.

Bei Schwerionenreaktionen wird der TRD, in Zusammenarbeit mit der TPC und dem Inner Tracking System (ITS), eine gute Elektronenidentifizierung im Rahmen folgender Messungen bieten [TRD01]:

- Im Dielektronenzerfallskanal, bei der Unterscheidung zwischen primären und sekundären J/Ψ -Mesonen, ebenso wie bei der direkten Bestimmung des Wirkungsquerschnitts der B-Mesonen-Produktion.
- Im Zerfallskanal einzelner Elektronen, bei der Analyse semileptonischer Zerfälle von Hadronen mit offenem Charm und offenem Beauty. Diese können wichtige Hinweise auf die Beurteilung des QGPs, insbesondere in Bezug auf die Ausbeute an Quarkonia, liefern.

- Bei gleichzeitiger Messung (Koinzidenzen) von Elektronen im zentralen Bereich und Myonen im Myonenarm des Detektors, wodurch man Informationen über Zusammenhänge der Hadronenproduktion mit offenem Charm und offenem Beauty gewinnen kann.
- Bezüglich der Einsatzmöglichkeiten des TRD als Trigger kann man Informationen über das thermische Kontinuum in der Nähe des Drell-Yan-Bereichs erhalten.
- Schließlich wird der TRD auch zur Analyse von Proton-Proton-Kollisionen im Rahmen des ALICE-Experiments eingesetzt werden. Dabei sollen Vergleichsdaten zum Schwerionenprogramm sowie zur Untersuchung elementarer Hadronen-Wechselwirkungen gewonnen werden.

3.1 Physikalische Grundlagen

3.1.1 Übergangsstrahlung

Übergangsstrahlung (**T**ransition **R**adiation, TR) entsteht, wenn ein geladenes Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit (also hohem Lorentz-Faktor γ) die Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten durchfliegt. Das Teilchen bildet beim Annähern an die Grenzfläche einen Dipol veränderlicher Feldstärke, der Übergangsstrahlung emittiert. Die Photonen werden in einem Kegel mit Öffnungswinkel $\theta \propto 1/\gamma$ um die Teilchenrichtung emittiert, bei Röntgenphotonen (Energie > 1 keV) also stark in Vorwärtsrichtung. Übergangsstrahlung entsteht sowohl beim Übergang von dünnerem in dichteres Medium, als auch umgekehrt. Das Emissionsmaximum für die Übergangsstrahlung liegt beim ALICE-TRD bei ca. 10 keV. Bei einem Lorentzfaktor von $\gamma > 1000$, d. h. bei Elektronen mit Impulsen $p_e > 0,5$ GeV/c bzw. bei Pionen mit Impulsen $p_\pi > 140$ GeV/c, wird Übergangsstrahlung im Energiebereich zwischen 2 keV und 30 keV erzeugt.

3.1.2 Teilchenidentifikation

In den Kammern des TRD entstehen Elektronen-Ionen-Paare außer durch Übergangsstrahlung auch direkt beim Durchflug der Elektronen bzw. Pionen durch das Gasvolumen. Zur Unterscheidung der Elektronen von den Pionen dient bei den Elektronen der Anstieg des Meßstroms am Ende des Meßsignals, da vor allem bei den Elektronen durch die Übergangsstrahlung weitere Elektronen-Ionen-Paare im Gasvolumen gebildet werden. Dies geschieht über-

wiegend am Anfang des Gasvolumens, weil die Absorptionslänge¹ von Röntgenphotonen der Energie 10 keV in Xenongas nur ca. 10 mm beträgt.

Zur Illustration des unterschiedlichen Verhaltens von Elektronen und Pionen beim Durchflug durch eine TRD-Kammer siehe Abb. 3.1. Der Aufbau der Kammern wird in Kap. 3.2 beschrieben.

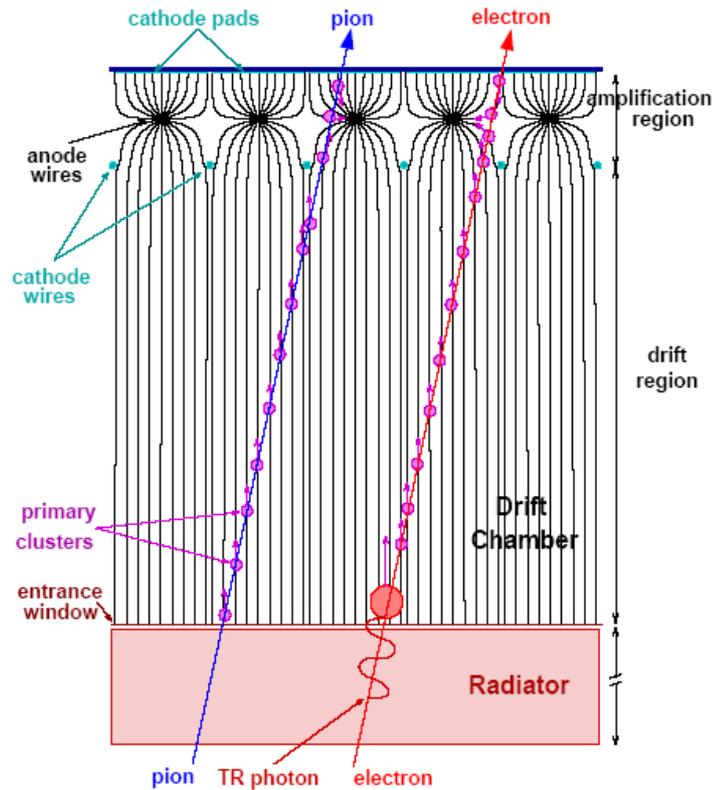


Abbildung 3.1: Prinzip einer TRD-Kammer: Die Elektronen bilden Übergangsradiation am Beginn der Driftzone, die Pionen nicht. [TRD01]

Der Grund dafür, daß vor allem Elektronen und nicht Pionen Übergangsradiation erzeugen, liegt in ihrer höheren Geschwindigkeit, d.h. an ihrem größeren γ -Wert. Teilchen gleicher Impulse, aber unterschiedlicher Massen, haben unter Berücksichtigung von $\gamma = E/m_0c^2$ unterschiedliche Lorentz-Faktoren γ . Damit ein Teilchen Übergangsradiation erzeugt, muß es einen Lorentzfaktor

¹Die Absorptionslänge ist die Strecke, nach der die Intensität eines Teilchenstrahls auf den Bruchteil $(1/e)$ abgefallen ist

$\gamma > 1000$ haben. Da Pionen ca. die 270-fache Masse von Elektronen haben, haben sie einen entsprechend geringeren γ -Wert. Sie erzeugen bei einem Impuls von weniger als 140 GeV/c keine Übergangsstrahlung.

Trägt man den durch eine Teilchensorte in einer TRD-Kammer erzeugten Spannungsimpuls über der Driftzeit auf, erhält man ein sogenanntes Impulshöhenspektrum (siehe Abb. 3.2).

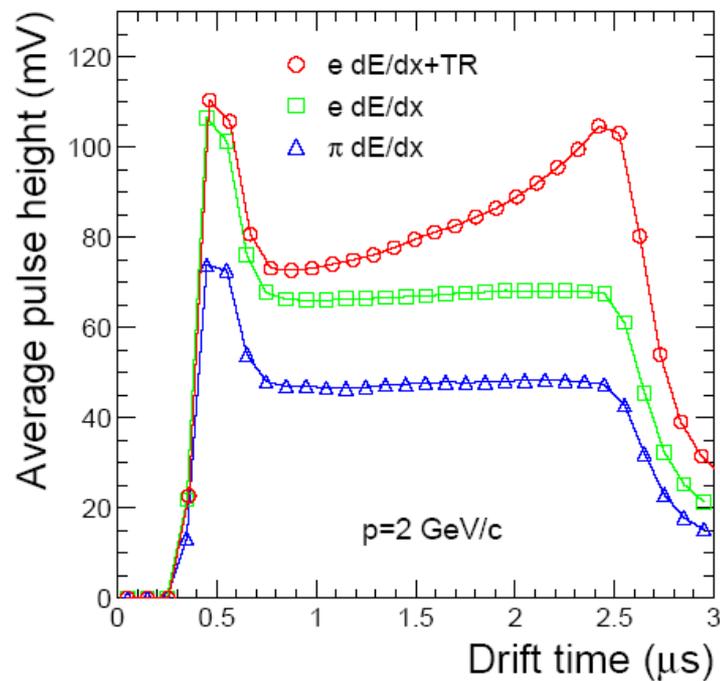


Abbildung 3.2: Aufgetragen in diesem Impulshöhenspektrum ist die an der Anode erzeugte Impulshöhe (mV) über der Driftzeit (μs) von Elektronen mit ($e dE/dx + TR$) und ohne ($e dE/dx$) Erzeugung von Übergangsstrahlung und von Pionen ($\pi dE/dx$). [And04]

Das Signal eines durch eine TRD-Kammer durchfliegenden Elektrons setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Zum einen ionisiert das Elektron auf seinem Weg durch die Driftkammer Gasatome und erzeugt dadurch Elektronen-Ionen-Paare. Das durch diese Elektronen erzeugte Impulshöhenspektrum ist in der Abbildung als Plot aus gelben Quadraten („ $e dE/dx$ “) aufgezeichnet. Der Anstieg des Signals am Anfang der Driftzeit kommt daher, daß beim Durchflug

des Teilchens durch das Gas zu beiden Seiten der Anode Gasatome ionisiert werden.

Hat das Elektron vorher einen Radiator durchflogen und dadurch Übergangsstrahlung gebildet, so erzeugt diese Übergangsstrahlung am Anfang der Driftzone ebenfalls durch Ionisation Elektronen. Diese Elektronen müssen die längste Driftstrecke auf ihrem Weg zur Anode zurücklegen und sind somit für den Signalanstieg im Impulshöhenspektrum am Ende der Driftzeit verantwortlich (rote Kreise, „ $e dE/dx + TR$ “).

Im Falle von Pionen mit weniger als $140 \text{ GeV}/c$ wird dagegen keine Übergangsstrahlung erzeugt, daher ist deren Impulshöhenspektrum (blaue Dreiecke, „ $\pi dE/dx$ “) einzig durch die Ionisation des durchfliegenden Pions geprägt und hat daher den prinzipiell gleichen Verlauf der Impulshöhe über der Driftzeit wie die Elektronen, die keine Übergangsstrahlung erzeugen. Durch diesen prägnanten Unterschied im jeweiligen Impulshöhenspektrum lassen sich Elektronen und Pionen im TRD sehr gut unterscheiden [TRD01].

3.2 Die Kammern des TRD

Der Detektor ist in radialer Richtung aus 6 einzelnen Schichten aufgebaut, in jeder dieser Schichten liegen in Strahlrichtung 5 Kammern hintereinander, die aufgrund der Detektorgeometrie unterschiedliche Längen haben. Diese Anordnung ergibt ein sogenanntes Supermodul, von denen in azimuthaler Richtung 18 Einheiten verbaut sind, wodurch ein kompletter Ring von 360° um die Strahlachse des ALICE-Detektors gebildet wird. Somit kommt man auf insgesamt 540 Kammern mit einer totalen Fläche von 770 m^2 [TRD01]. Jede der Kammern stellt bereits für sich einen Übergangsstrahlungsdetektor dar.

Eine TRD-Kammer besteht aus einem Radiator (siehe Kap. 3.2.1), der durch eine Driftelektrode von der Driftkammer (siehe Kap. 3.2.2) getrennt wird. In der Driftkammer befindet sich eine Drahtverstärkungszone zur Signalverstärkung. Den Abschluß der Driftkammer bildet eine sogenannte Padplane (siehe Kap. 3.2.3), auf der durch Induktion Ladungssignale erzeugt werden. An die Padplane schließt sich eine 20 mm dicke, mit Kohlefasern verstärkte Nomex-Schicht an und an diese wiederum die Auslese-Elektronik der Kammer. Sie liest die Ladungssignale der Padplane aus und bildet den Abschluß der TRD-Kammer.

3.2.1 Der Radiator

Die Radiatoren der TRD-Kammern haben eine Dicke von 48 mm und werden aufgrund der Resultate der Messungen aus Kap. 5 in folgender Zusammensetzung gebaut:

Ein Radiatormodul wird begrenzt durch 2 Deckel aus Rohacell mit einer Wandstärke von 8 mm (siehe Tab. 5.5 im Kap. 5.4.5), die verstärkt sind durch 0,1 mm dicke Kohlefaserschichten. Bei Rohacell handelt es sich um Polymethacrylimid-Schaum (PMI), ein Material, das sich durch geringe Dichte, hohe mechanische und chemische Stabilität auszeichnet, aber auch eine hohe Produktion von Übergangsstrahlung gewährleistet [TRD01]. Außerdem verfügt Rohacell über eine hohe Strahlungslänge² ($40,6 \text{ g/cm}^2$), um Selbstabsorption im Radiator zu vermeiden.

Auf einer Seite der Deckel befindet sich eine $25 \mu\text{m}$ dünne, aluminiumbeschichtete Mylar-Folie, die bei dem innen liegenden Deckel sowohl den Gasabschluß der Driftkammer, als auch die Driftelektrode, darstellt. Beide Deckel werden verbunden durch eine gitterartige Struktur (sog. Spanten), die ebenfalls aus 8 mm Rohacell besteht. In diese Struktur wird eine Schicht von 7 Polypropylen-Fasermatten (siehe ebenfalls die Tab. 5.5) zu jeweils 5 mm eingesetzt. Messungen haben ergeben, daß die Fasermatten in ihrem Wirkungsgrad bezüglich der Übergangsstrahlung vergleichbar den Folienstapeln sind, die üblicherweise zur Erzeugung von Übergangsstrahlung in Detektoren benutzt werden. Die Fasermatten haben den Vorteil, mechanisch nicht so instabil wie die dünnen Folien zu sein. Ihre Strahlungslänge beträgt $44,6 \text{ g/cm}^2$.

Sowohl die Fasermatten, als auch die Deckel, erzeugen beim Durchflug von geladenen Teilchen mit relativistischer Geschwindigkeit Übergangsstrahlung. Die Strahlung liegt im Röntgenbereich und wird im Zählgas in der auf den Radiator folgenden Driftkammer absorbiert.

3.2.2 Die Driftkammer

An den Radiator schließt sich eine 37 mm breite Driftkammer an, die folgendermaßen aufgebaut ist:

Beginnend bei der Driftelektrode, kommt als erstes die 30 mm breite Driftregion, die von der Kathodendrahtebene begrenzt wird. Nach weiteren 3,5 mm folgt die Anodendrahtebene und schließlich wieder nach 3,5 mm die Padplane. Die gesamte Verstärkungszone erstreckt sich also über 7 mm. Bei einer Driftgeschwindigkeit von $1,5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ benötigt ein Elektron maximal $2 \mu\text{s}$, um

²Die Strahlungslänge eines Photons ist die Strecke [Einheit: g/cm^2 , in Literatur aber auch: cm], nach der seine Energie auf den Faktor $(1/e)$ abgefallen ist.

die Driftregion zu durchqueren. Die nominale Driftgeschwindigkeit erreichen Teilchen, wenn ein elektrisches Feld von $0,7 \text{ kV/cm}$ angelegt wird.

Im Meßbetrieb des TRD wird die positive Verstärkungsspannung, die an der Anode anliegt, 1500 V betragen, die negative Driftspannung, die an die Driftelektrode angelegt wird, -2100 V . Die Kathodendrähte werden ebenso wie die Padplane auf Erdpotential liegen. Diese oder ähnliche Werte werden auch für die Tests der Kammern (siehe Kap. 7.2, 7.4 und 7.5) verwendet.

Die Gasverstärkung wird im Bereich von 5×10^3 liegen, als Gas wird ein Gemisch aus 85% Xenon und 15% CO_2 zum Einsatz kommen. Das gesamte Gasvolumen des TRD mit seinen 540 Kammern beträgt $27,2 \text{ m}^3$, was bei den hohen Kosten für Xenon (11 Xenon kostet ca. $7,50 \text{ Euro}$) eine niedrige Leckrate der einzelnen Kammern notwendig macht (siehe Kap. 7.3).

Das Xenongas besitzt eine hohe Absorptionswahrscheinlichkeit für die im Röntgenbereich liegenden TR-Photonen und setzt dabei Elektronen überwiegend in einer geringen Entfernung vom Eintrittsfenster frei. Der Grund dafür liegt in der geringen Absorptionslänge von ca. 10 mm in Xenon für TR-Photonen mit Energien von 10 keV . Die Absorptionslänge von Xenon ist bei dieser Energie kleiner als die aller leichteren Edelgase [TRD01].

Die erzeugten Elektronen driften zur Anodendrahtebene und ionisieren dabei Gasatome, was vor allem im Bereich der Verstärkungszone unmittelbar um die Anodendrähte herum geschieht. Die vor der Kathodendrahtebene erzeugten, positiven Xenon-Ionen wandern zur negativen Driftelektrode, die im Verstärkungsbereich erzeugten wandern zu den auf Null-Potential befindlichen Elektroden. Von Rekombinationseffekten abgesehen, werden die Xenon-Ionen an den Elektroden neutralisiert und stehen erneut für die Ionisation durch die TR-Photonen zur Verfügung.

Dem CO_2 kommt im Gasgemisch die Rolle des Löschgases zu. Bei der Gasverstärkung kann es neben dem Prozeß der Ionisation auch zur Anregung der Xenonatome kommen. Der Zerfall der angeregten Zustände erfolgt unter Aussendung von Photonen, die aufgrund ihres hohen Energiegehalts mittels Photoeffekt Elektronen in weiteren Xe-Atomen (und auch an der Driftelektrode) auslösen, was zu unerwünschten Nachpulsen führt. Dies vermeidet man durch den Einsatz sogenannter Löschgase (Quencher). Dabei handelt es sich um (im Gegensatz zum atomar vorliegenden Edelgas Xenon) molekulare Gase, die über mehr Freiheitsgrade als die Xe-Atome verfügen. Diese molekularen Gase können die durch Absorption von Photonen aufgenommene Energie in Schwingungs- und Rotationsenergie umwandeln und über Stöße strahlungsfrei wieder abgeben. Beispiele für Quencher sind Methan (CH_4), Ethan (C_2H_4) oder eben das bei den Kammern des TRD zum Einsatz kommende CO_2 [Blu94]. Der Vorteil von CO_2 ist, daß es im Gegensatz zu den zwei genannten organischen

Gasen nicht brennbar ist [TRD01].

3.2.3 Die Padplane

An die Driftkammer schließt sich die Ausleseschicht an. Diese ist ein Verbund aus der Padplane, einer 20 mm dicken, mit Kohlefasern verstärkten Schicht Nomex (das Backpanel) und den Multi-Chip-Modul (MCM) - Mainboards, die den Front-End-Teil der Auslese-Elektronik enthalten. Die Padplanes werden von der Firma Optiprint [OptAG] durch Belichtung von Glasfaserplatten mit den je nach Version der Padplanes verschiedenen Masken hergestellt. Das Design dieser Masken wurde von Dipl. Phys. David Emschermann vom Physikalischen Institut Heidelberg erstellt. Für eine TRD-Kammer werden der Größe wegen 2 bzw. 3 nebeneinanderliegende Padplaneteile benötigt, wobei zwar jede der Padplanes prinzipiell nach dem selben Muster aufgebaut ist, aber doch Variationen in der Größe und dem Design vorkommen.

Aufgebaut sind die Padplanes aus einer doppelseitigen Leiterplatte aus Glasfaserverbund [IsoAG] (printed circuit board, PCB) mit einer Dicke von $360 \mu\text{m}$, bei der sich zu Beginn des Herstellungsprozesses auf beiden Seiten eine $17 \mu\text{m}$ -dünne Kupferschicht befindet. Die Padplane wird nun mit Photoresist bedeckt und beide Seiten werden mit den für sie bestimmten Masken belichtet. Anschließend wird auf den nicht belichteten Stellen der Padplane durch ein Ätzverfahren die Kupferschicht entfernt. Dadurch erhält man auf der Vorderseite der Padplane das Muster der Auslese-Streifen (Pads), auf der Rückseite bleiben lediglich die Leitungen zum Auslesen dieser Pads zurück.

Die Pads sind auf der Padplane nicht rechtwinklig, sondern schräg angeordnet, wobei sie einen Winkel von $\pm 2^\circ$ zu der z-Achse (d. h. zu der langen Seite) der Padplane bilden. Sie haben daher keine Rechteckform, sondern stellen Parallelogramme dar. Ihre Maße betragen im Durchschnitt $85 \times 7,4 \text{ mm}^2$, was eine Fläche von ca. $6,3 \text{ cm}^2$ ergibt. Die Pads sind mittels durchplattierter Löcher mit der Rückseite der Padplane verbunden und werden dort in Gruppen von je 18 Pads über Leiterbahnen zu einer Einheit (Footprint) zusammengeführt. An diese Footprints werden flexible, 22-adrige Flachbandkabel (Flat Flexibel Cable, FFC) angelötet, von deren 22 Leitungen aber die jeweils 2 links- und rechtsaußen liegenden nicht benutzt werden, sie dienen ursprünglich Testzwecken und sind miteinander kurzgeschlossen. Die FFC-Kabel stehen senkrecht von der Rückseite der Padplanes ab, so daß sie durch die hierfür vorgesehenen Öffnungen im Backpanel mit dem MCM-Board verbunden werden können.

Fliegt nun ein Elektron oder Pion durch eine TRD-Kammer, werden durch die lawinenartige Ionisierung des Xenongases in der Verstärkungszone positive Ionen gebildet, die sich zu den auf Null-Potential befindlichen Kathoden bewegen und dabei per elektrischer Induktion ein positives Spannungssignal in den Pads der Padplane erzeugen. Der dadurch fließende Strom wird als analoges Signal durch die FFC-Kabel an die MCM-Boards weitergeleitet, die diese Signale in digitale Form umwandeln und auswerten.

Für die 12 verschiedenen TRD-Kammertypen werden insgesamt 30 verschiedene Typen Padplanes benötigt. Dabei wird es Padplanes mit 4 und mit 6 Reihen geben, in jeder Reihe befinden sich 8 Footprints, d.h. , daß eine Padplane über 32 bzw. 48 Footprints verfügt. Bei 2 bzw. 3 Padplanes pro Kammer und 540 Kammern insgesamt, ergibt das in der Summe 65.664 Footprints für den gesamten TRD-Detektor. Bei 18 Pads, die zu einem Footprint verbunden sind, kommt man so auf 1.181.952 Pads, die bei einer durchschnittlichen Fläche von $6,3 \text{ cm}^2$ eine gesamte Fläche von ca. 740 m^2 ergeben.

Kapitel 4

Die Meßsoftware LabVIEW

Die Software LabVIEW (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) wurde für die Steuerung und Auswertung der Messungen in den Kapiteln 5, 6, 7 und 8 dieser Arbeit verwendet. LabVIEW wird von der US-Softwarefirma National Instruments hergestellt, für die Messungen kam die Version LabVIEW 7 Express zum Einsatz.

LabVIEW ist eine Software, die vor allem auf die Verwendung in Labors, zur Steuerung und zum Simulieren von Meßgeräten entwickelt wurde. Davon abgesehen können mit LabVIEW aber auch alle anderen Arten von Programmen erstellt werden, wie z.B. Programme zur Durchführung komplexer Berechnungen, zur Verwaltung von Daten in Feldern (Arrays), zum Schreiben von Daten in Datenfiles u.v.m.

Um den Anforderungen von Physikern und Ingenieuren bei ihrer Arbeit gerecht zu werden, wurde mit LabVIEW ein System entwickelt, bei dem ein Programm auf zwei Ebenen zugleich erstellt wird. Die erste Ebene stellt eine Art Benutzeroberfläche dar, auf der Meßinstrumente mit ihren Schaltern und Reglern, graphischen und numerischen Anzeigen etc. dargestellt werden, so wie sie auch in einem physikalischen Labor vorkommen. [Lab01]

Auf der zweiten Ebene wird der Programmcode entwickelt. Obwohl auch LabVIEW typische Funktionen hat wie andere Programmiersprachen auch (Schleifen, Fallabfragen, Sequenzen etc.), unterscheidet es sich doch fundamental von herkömmlichen, textbasierten Programmiersprachen wie Fortran oder C. LabVIEWs Programmiersprache heißt *G*, wobei *G* für „graphical programming language“ steht. Das bedeutet, daß statt Textbefehlen bei LabVIEW graphische Symbole verwendet werden. Diese Symbole repräsentieren Programm-Module, sogenannte Virtual Instruments (VIs).

Der Hauptunterschied von LabVIEW zu anderen Programmiersprachen

liegt aber darin, daß die VIs nicht etwa linear hintereinander, sondern frei auf der Programmier-Ebene angeordnet werden. Jedes VI ist über Verbindungen (Konnektoren) mit der Außenwelt verbunden, über die zum einen Daten in das VI gelangen und zum anderen Daten das VI verlassen können. Die VIs werden aber erst dann abgearbeitet, wenn alle Konnektoren, die *zu* einem VI führen, aktiv sind, d. h. wenn an all diesen Konnektoren Daten vorliegen. Daher laufen LabVIEW-Programme nicht linear wie textbasierte Programmiersprachen ab, stattdessen können durchaus mehrere Programmteile gleichzeitig ablaufen (einmal von der technischen Betrachtungsweise abgesehen, daß auf Computersystemen mit nur einem Hauptprozessor natürlich nur ein Rechenbefehl zur selben Zeit abgearbeitet werden kann).

Bei den Daten, die über die Konnektoren der VIs fließen, kann es sich um einen Text handeln, der auf dem Bildschirm ausgegeben wird, um zwei Zahlen (zwei Eingabe-Variablen), die zu einer dritten summiert werden sollen (eine Ausgabe-Variable) oder auch um ein Array von Meßwerten, die eine exponentiell abfallende Kurve repräsentieren, aus denen dann vom VI eine Exponentialfunktion (genauer: deren Exponent, die Amplitude und der Offset, siehe Kap. 7.3.1) gefittet wird.

VIs sind also nichts anderes als Unterprogramme, denen ein bestimmter Satz von Variablen übergeben wird, mit denen Programmschritte durchgeführt werden und die daraufhin andere Variablen zurückgeben. VIs können auch von den Anwendern von LabVIEW selbst erstellt werden. Oftmals empfiehlt sich das sogar, da dadurch einzelne Programmteile universell einsetzbar werden und Programme übersichtlicher bleiben. Zumindest in dieser Hinsicht unterscheidet sich LabVIEW nicht von objekt-orientierten Programmiersprachen wie C++.

Auch wenn LabVIEW-Programme auf den ersten Blick durch ihre grafische Visualisierung einfacher als text-basierte Programmiersprachen erscheinen, steht LabVIEW in seiner Komplexität anderen Sprachen in nichts nach.

Im Gegenteil, dank einer großen Anzahl von mitgelieferten VIs für vielerlei Anwendungen wird die Programmierung komplexer Aufgaben erleichtert. So gibt es beispielsweise über 20 verschiedene VIs, die sich allein mit Array-Funktionen (z.B. Extrahieren, Zusammenfassen, Aufteilen etc.) befassen.

Für Benutzer, die vorher text-basierte Programmiersprachen gewohnt waren, bedeutet die Arbeit mit LabVIEW eine nicht unerhebliche Umgewöhnung, vor allem aufgrund des nicht-linearen Programmablaufs. Hat man sich aber erst einmal in LabVIEW eingearbeitet, stellt man fest, daß man die vielseitigsten

Programmieraufgaben damit umsetzen kann. Das wird dadurch unterstützt, daß LabVIEW-Programme auch in einer Form kompiliert werden können, in der sie ohne das Hauptprogramm lauffähig sind („stand-alone“).

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden zahlreiche Programmieraufgaben mit LabVIEW durchgeführt, unter anderem:

- die komplette Berechnung der statistischen und systematischen Fehler der Radiator-Messungen (Kap. 5.4.3),
- die in Echtzeit erfolgende Auswertung der Kapazitäts-Messungen der Pads auf den Padplanes, zusammen mit der graphischen Anzeige der Pad-Kapazitäten (Kap. 6.2.3). Nach Beendigung der Diplomarbeit wird eine neuere Version der Analysefunktion folgen, die automatisch ermitteln wird, ob bei der Produktion des getesteten FFC-Kabels Fehler aufgetreten und ggf. welcher Art diese Fehler sind,
- das Kammermeßprogramm, das zusammengesetzt ist aus diversen Unterprogrammen, mit denen die Meßgeräte gesteuert und überwacht werden, die Meßwerte graphisch angezeigt, ausgewertet und in Datenfiles sowie in die DCDB geschrieben werden (siehe Kap. 7.1.4),
- die Zusammenstellung und Übertragung von Meßdaten an die ALICE-Detektordatenbank DCDB unter Zuhilfenahme der XML-VIs der Warschau-Gruppe (Kap. 8.3).

Darüber hinaus wurden für verschiedene Anforderungen kleinere LabVIEW-Programme erstellt, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Kapitel 5

Transmissionsmessungen der Radiatoren

5.1 Einführung

Das Ziel der Messungen ist es, den endgültigen Aufbau des ALICE-TRD--Radiators festlegen zu können. Dazu wurden die Transmissionsraten verschiedener Radiatormaterialien bei Röntgenenergien in einem Bereich von 6 bis 40 keV gemessen, wobei die Röntgenstrahlung stellvertretend steht für die beim Betrieb des TRD-Detektors auftretende Übergangsstrahlung. Energetisch betrachtet kommen die Linien von Cu der typischen TRD-Übergangsstrahlung am nächsten.

Da bisher für mit Xenon gefüllte Drahtkammern nur Integralinformationen aus der Meßreihe am CERN [And04] zur Verfügung standen, wurde hier auch eine entsprechende Drahtkammer-Messung durchgeführt, um differentielle Informationen zu erhalten. Der Nutzen von differentiellen Informationen liegt nicht nur darin, prinzipiell zu wissen, wie sich der Radiator und die Driftkammer z.B. bei Übergangsstrahlung der für den TRD typischen Energie von 10 keV verhalten. Auch für die Durchführung der Simulationen von Detektorereignissen sind genaue Meßwerte hilfreich, da sie dabei helfen, die Unsicherheitsfaktoren in den Simulationen zu reduzieren.

Was den Radiator angeht, möchte man eine hohe Transmissionsrate, da die Übergangsstrahlung *durch* den Radiator *in* das Gasvolumen der Kammer gelangen soll, um dort Elektronen-Ionen-Paare zu bilden. Im Gasvolumen (bei der Messung der mit Xenon gefüllten Drahtkammer) möchte man aus demselben Grund eine kleine Absorptionslänge.

Durchgeführt wurden die Messungen am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg mit freundlicher Unterstützung der PIXE-Gruppe (**P**article-**I**nduced **X**-**R**ay **E**mission Spectroscopy).

Ausgehend von den Meßergebnissen wurde der endgültige Aufbau des TRD-Radiators in der Form K8Al + 7 Fasermatten + K8Al beschlossen.

5.2 Experimenteller Aufbau

5.2.1 Versuchsaufbau

Ursprünglich befand sich der Detektor am MPI waagrecht auf einer Tischplatte liegend ohne besondere Befestigung, genauso wie die Quelle, die einfach in einem bestimmten Abstand vor dem Berilliumfenster des Detektors aufgestellt wurde. Davon ausgehend wurde der Versuchsaufbau verändert, indem zunächst einmal alle Teile, deren Position und Ausrichtung für die Versuchsdurchführung von Bedeutung war, fest mit einer 1 cm dicken Aluminium-Platte verschraubt wurden (siehe Abb. 5.1). Dort waren vorher an den entsprechenden Stellen Schraubengewinde vorgebohrt worden, wodurch die Aufbauten automatisch in der richtigen Lage zueinander standen.

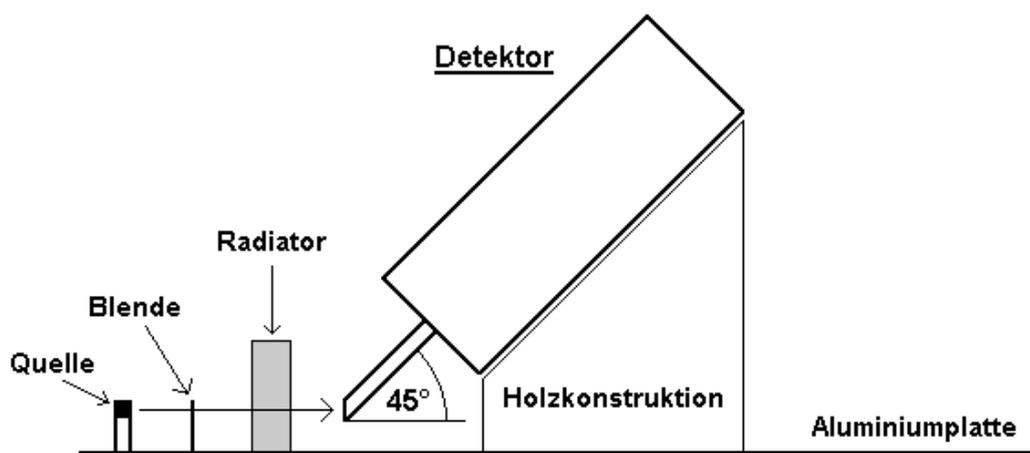


Abbildung 5.1: *Schema des verbesserten Detektoraufbaus. Der Strahlenweg von der Quelle durch die Blende und den Radiator zum Detektor ist eingezeichnet.*

Der Detektor selbst wurde mittels einer Holzkonstruktion in einem Winkel von 45 Grad zur Aluminium-Platte befestigt, so daß durch diese Maßnahmen keine unbeabsichtigten Verschiebungen der Elemente des Versuchsaufbaus mehr möglich waren.

Die zur Produktion von Röntgenstrahlung verwendeten 6 Elemente (zu deren Energien siehe Kap. 5.3) befanden sich in einem drehbaren Zylinder und wurden durch Drehen dieses Zylinders nacheinander einer α -Quelle ausgesetzt. Die Fe-Quelle wurde in die Apparatur mittels eines dafür angefertigten Zylinders eingepaßt, so daß sie genau auf der gleichen Höhe wie die Austrittsöffnung der Quellen im drehbaren Zylinder war und damit natürlich auch wie die Öffnung in der Blende, hinter der sich das Berilliumfenster des Detektors befand. Außerdem wurde gewährleistet, daß sie den gleichen Abstand zum Kollimator hatte wie die Quellen im drehbaren Zylinder.

5.2.2 Der Röntgen-Detektor

Für die Messungen der Röntgenstrahlung wurde der Detektor „SSL 80160“ der Firma Canberra verwendet [CanIn]. Als Szintillator kommt in dem Gerät ein Lithium-dotierter Silizium-Halbleiter-Kristall zum Einsatz, der bei einem Durchmesser von 10,1 mm über eine aktive Fläche von 80 mm² verfügt. Der Kristall hat eine Dicke von 5 mm, seine Qualität ist bestimmt durch die Energieauflösung der Mn-Linie bei 5,9 keV in Höhe von 160 eV.

Der Szintillator wird von einer 12 μ m dünnen Berilliumfolie (Be) von Streustrahlung abgeschirmt. Bei einer Energie von 1 keV beträgt die Transmissionswahrscheinlichkeit für Photonen ca. 29 % [Tra04].

Um konstante Meßergebnisse zu liefern, wurde der Detektor alle 2-3 Tage an der Rückseite mit flüssigem Stickstoff befüllt (Füllvolumen 7l). Während dieser Zeit ruhten selbstverständlich die Messungen.

5.2.3 Auslese

Elektronik

Die Detektorelektronik wertet das Energie-Spektrum der registrierten Photonen verteilt auf 1024 Kanäle aus, zählt also jeweils die Anzahl der Ereignisse (Photonen) pro Kanal.

Software

Nach der Auswertung der Anzahl der Ereignisse in den für die Messung relevanten Bereichen des Spektrums (**R**anges **O**f **I**nterest, ROIs) durch die Detektor-

Software wurde auf einem anderen PC, mit einer speziellen Software, genannt Gupix, eine Analyse der aufgenommenen Spektren durchgeführt. Bei Gupix (**G**uelph **P**ixe **S**oftware **P**ackage) handelt es sich um eine von Physikern der Universität Guelph (Kanada) extra für diese Art von Analysen erstellte Software. Gupix untersucht wesentlich präziser als bei den von Hand gesetzten ROIs mit eigenen physikalischen Routinen die Anzahl der Ereignisse in den Übergangslinien. Sämtliche Tabellen und Grafiken dieser Messungen basieren auf den mit Gupix ermittelten Meßwerten.

Die Detektor-Software mißt die Meßzeit im „Live“-Modus, d.h., daß die Totzeit der Elektronik, die nach jedem gezählten Ereignis auftritt, mit berücksichtigt wird. Bei Elementen mit einer hohen Anzahl der Ereignisse wie Eisen (Fe) führt das bis hin zu einer Verdopplung der eigentlichen Meßzeit. Abgeschätzt wurden die bei den verschiedenen Elementen unterschiedlichen Meßzeiten durch Leermessungen, die vor Beginn der Transmissionsmessungen durchgeführt wurden (siehe Kap. 5.4).

Pile-Up

Bei „Pile-Ups“ handelt es sich um die gleichzeitige Zählung von zwei Photonen durch den Detektor, was vor allem bei Messungen mit der Fe-Quelle auftrat. Aufgrund der hohen Zerfallsrate von Fe (Zählrate ca. 3,8 kHz) kann es vorkommen, daß 2 Photonen in so kurzem, zeitlichen Abstand hintereinander in den Detektor eintreten, daß die Detektor-Elektronik nicht mehr in der Lage ist, beide Zerfälle getrennt zu erfassen. Die Energien der zwei Photonen werden dann vom Detektor addiert und sozusagen als Summenpeak im Spektrum angezeigt.

5.3 Die Quellen

Ziel der Messungen ist, die Absorptionsraten verschiedener Radiatormaterialien für Röntgenstrahlung bei jeweils verschiedenen Energien zu messen. Für die Erzeugung der Röntgenstrahlung wurden die folgenden 6 Elemente benutzt, die sich durch die Energien ihrer Röntgenzerfälle unterscheiden:

- Eisen (Fe)
- Kupfer (Cu)
- Rubidium (Rb)
- Molybdän (Mo)

- Silber (Ag)
- Barium (Ba)

In der Tab. 5.1 (siehe Kap. 5.4.1) befinden sich die Röntgenlinien und andere physikalische Größen dieser Elemente. Die Linien mit dem grössten Verhältnis des Signals zum Untergrund (**Signal to Noise, S/N**) werden im folgenden Text als „Hauptlinien“ bezeichnet. Die weiteren, aber schwächeren Linien der Spektren werden hier „Nebenlinien“ genannt.

Die relativ geringen Unterschiede in den Energien von Linien, bei denen die Übergänge jeweils zwischen zwei gleichen Hauptschalen stattfinden (z.B. der Unterschied zwischen der $K\alpha_1$ - und der $K\alpha_2$ -Linie von Fe), kommen von der Feinstruktur-Aufspaltung dieser Energieniveaus. Die Ausrichtung des Spins eines Elektrons relativ zu seinem Bahndrehimpuls (die Spin-Bahn-Kopplung) führt, je nachdem, ob sie parallel oder antiparallel ist, dazu, daß die Energieniveaus geringfügig zu höheren (d. h. schwächere Bindung, d. h. kleinere Linienenergie) Energien oder zu niedrigeren (d. h. stärkere Bindung, d. h. größere Linienenergie) verschoben werden.

5.3.1 Eisen-Quelle

Bei den Fe-Linien handelt es sich genau genommen um Mangan (Mn) -Linien, da in der benutzten ^{55}Fe -Quelle (mit einer Stärke von 3 mCi) das Fe in atomphysikalisch angeregtes Mn zerfällt, welches dann bei seinem eigenen Zerfall für die Röntgenemissionen sorgt. Für Fe war daher der Einsatz der α -Quelle nicht nötig.

5.3.2 Andere Quellen

Die Elemente Kupfer, Rubidium, Molybdän, Silber und Barium befanden sich in einem drehbaren Zylinder und wurden durch Drehen dieses Zylinders nacheinander einer α -Quelle (^{241}Am , Stärke: 10 mCi) ausgesetzt. Durch die α -Teilchen wurden sie zur Emission von Röntgenstrahlung angeregt.

Die dabei beteiligten Prozesse sind zum einen die Bremsstrahlung beim Abbremsen der α -Teilchen in Kernnähe der Atome, was zu einem mehr oder weniger kontinuierlichen Untergrund führt.

Bei dem zweiten Prozeß handelt es sich um die Anregung von Elektronen aus inneren Schalen der Atome auf höhere Energieniveaus, denen wiederum ein Zerfall auf niedrigere Niveaus folgt. Dabei entstehen die für jedes Element charakteristischen Übergangslinien bei diskreten Energien.

5.4 Messungen

Für die Auswertung wurden stets die zwei Linien mit dem grössten S/N-Verhältnis herangezogen, wobei es sich bei diesen immer um die $K\alpha$ - und $K\beta$ -Linien der 6 Elemente, die sogenannten Hauptlinien, handelt. Die Nebenlinien wurden für die Auswertung nicht verwendet. Da die Anzahl der Ereignisse bei den Hauptlinien im Schnitt um den Faktor 10^2 höher ist als für den Untergrund, lassen sich diese Übergangslinien im Spektrum leicht identifizieren.

Eine Meßreihe bestand darin, bei einer bestimmten Röntgenenergie nacheinander alle Radiatormaterialien in den Strahlenweg zu bringen und die Anzahl der Ereignisse zu registrieren. Am Anfang, in der Mitte und am Ende jeder Meßreihe wurden Leermessungen durchgeführt, d. h. ohne jegliches Material im Strahlengang. Die Leermessungen dienten zum einen dazu, die Transmissionsraten bestimmen zu können, zum anderen zur Berechnung des systematischen Fehlers jeder Messung. Die Transmission R eines Radiators bei einer bestimmten Energie wird berechnet als der Quotient der Anzahl der Ereignisse C_D mit dem Radiator im Strahlenweg und der Anzahl der Ereignisse C_Q der gemittelten Leermessungen bei dieser Energie: $R = C_D/C_Q$. Siehe hierzu Kap. 5.4.3. Die Angabe der Transmission erfolgt stets in Prozent.

Die Länge einer Messung mit einem bestimmten Element wurde im Vorhergehen mittels einer Leermessung abgeschätzt, bei der die Anzahl der Ereignisse des Elements über einen bestimmten Zeitraum registriert wurde. Da sich der statistische Fehler einer Anzahl von Ereignissen als die Wurzel dieses Wertes berechnet, wurde die zukünftige Meßdauer für dieses Element so festgelegt, daß sich dabei der statistische Fehler etwa im Bereich eines Prozents aufhält.

Anhand der nun folgenden Transmissionsmessungen wurde der systematische Fehler einer Messung abgeschätzt. Da ein statistischer Fehler, der kleiner ist als der systematische Fehler eines Experiments, wenig Sinn macht, bildete dann bei Folgemessungen der systematische Fehler eine Obergrenze für den statistischen Fehler bzw. für die damit verbundene Meßzeit.

Beispiele für die bei den verschiedenen Materialien für eine Transmissionsmessung variierenden Meßzeiten, die sich aus den unterschiedlichen Zählraten ergeben, sind 15 min. bei Fe (Zählrate 3,04 kHz), 60 min. bei Rb (Zählrate 12,63 Hz) und 600 min. bei Cu (Zählrate 2,67 Hz).

Das aufgenommene Spektrum besteht aus der Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV auf der Abszisse (verteilt auf 1024 Kanäle) und der jeweiligen Anzahl der Ereignisse auf der Ordinate. Zu Anfang der Messungen wurden ROIs um diejenigen Peaks gelegt, die den Übergangslinien entsprechen.

Nach Ende jedes Meßschritts wurde von der Meßsoftware die gesamte Anzahl der Ereignisse innerhalb jedes ROI berechnet und gespeichert.

5.4.1 Energiespektren der Quellen

In der Tab. 5.1 befinden sich zu den Röntgenlinien der Quellen die Literaturwerte, die bei den Meßreihen I und II gemessenen Energien, zu ausgewählten Linien die Halbwertsbreiten und schließlich die atomphysikalischen Übergänge in den Elektronenschalen der 6 Elemente, die zu diesen Linien führen. Die erste Spalte der Tabelle bezeichnet das untersuchte Spektrum, daher tauchen hier auch die Linien der Verunreinigungen auf. Bei jedem Element stehen am Anfang die sog. *Hauptlinien* (HL), das sind die zwei Energielinien mit den größten

	Linien	Literatur	Mess I	Mess II	FWHM	Erklärung
Fe	HL	5,899 / 5,888	5,89	5,90	0,08	K α 1 / K α 2 Fe
Fe	HL	6,491	6,49	6,49	0,09	K β (alle) Fe
Fe	NL	—	4,11	4,15	—	Escape Fe
Fe	NL	—	11,86	11,85	—	Pile-Up (K α +K α) Fe
Fe	NL	—	12,46	12,45	—	Pile-Up (K α +K β) Fe
Fe	NL	—	12,86	12,92	—	Pile-Up (K β +K β) Fe
Cu	HL	8,048 / 8,028	8,04	8,05	—	K α 1 / K α 2 Cu
Cu	HL	8,905 / 8,903	8,89	8,90	—	K β 1 / K β 3 Cu
Cu	NL	—	24,18	24,22	—	K α 1 / K α 2 In
Cu	NL	—	27,23	27,23	—	K β 1 / K β 3 In
Rb	HL	13,40 / 13,34	13,37	13,39	—	K α 1 / K α 2 Rb
Rb	HL	14,96/14,95/15,19	14,98	14,95	—	K β 1/K β 3/K β 2 Rb
Rb	NL	—	24,19	24,17	—	K α 1 / K α 2 In
Rb	NL	—	27,23	27,22	—	K β 1 / K β 3 In
Mo	HL	17,48 / 17,38	17,47	17,46	—	K α 1 / K α 2 Mo
Mo	HL	19,61/19,59/19,97	19,59	19,61	—	K β 1/K β 3/K β 2 Mo
Mo	NL	—	24,23	24,14	—	K α 1 / K α 2 In
Ag	HL	22,16 / 21,99	22,12	22,14	0,23	K α 1 / K α 2 Ag
Ag	HL	24,94 / 24,91	24,91	24,93	0,24	K β 1 / K β 3 Ag
Ag	NL	25,46	25,42	25,44	0,24	K β 2 Ag
Ba	HL	32,19 / 31,82	32,18	32,11	0,31	K α 1 / K α 2 Ba
Ba	HL	36,38 / 36,30	36,31	36,30	0,35	K β 1 / K β 3 Ba
Ba	NL	—	14,09	14,10	—	K α 1 / K α 2 Sr
Ba	NL	—	24,20	24,12	—	K α 1 / K α 2 In
Ba	NL	—	27,20	27,21	—	K β 1 / K β 3 In
Ba	NL	37,26	37,24	37,23	0,35	K β 2 Ba

Tabelle 5.1: Röntgen-Übergangslinien der 6 benutzten Quellen, aufsteigend sortiert nach der Energie der Hauptlinien. Alle Zahlenangaben sind in keV.

Übergangswahrscheinlichkeiten und daher der höchsten Anzahl der Ereignisse des Elements. Die sog. *Nebenlinien* (NL) sind schwächere Linien, die ebenfalls im Spektrum auftauchen, aber für die Auswertung der Transmission keine Rolle spielen. Die Hauptlinien sind nach abnehmender Übergangswahrscheinlichkeit sortiert, die Nebenlinien nach aufsteigender Linienenergie. Wenn zwei Linien im Spektrum zu eng für eine getrennte Auswertung beieinander liegen, befinden sie sich in der Tabelle in einer Zeile, wobei die stärkere Linie an erster Stelle steht.

Die Energiewerte der Meßreihe I (Mess I) und Meßreihe II (Mess II) sind vollständig aufgeführt, bei den Literaturwerten nur diejenigen der Hauptlinien und bei den Halbwertsbreiten (**F**ull **W**idth **H**alf **M**aximum, FWHM) nur diejenigen der Hauptlinien von Fe, Ag und Ba. Die $K\beta$ -Linien bei Fe wurden nicht explizit aufgeschlüsselt, dafür reichte die Auflösung des Detektors nicht aus. Die Werte der Tabelle gelten sowohl für die Quellmessungen, als auch für die Sandwich-Messungen - die Unterschiede zwischen beiden lagen im Rahmen der Meßgenauigkeit.

5.4.2 Diskussion der Spektren

Sortiert nach aufsteigender Energie der Hauptlinien sind auf den folgenden Seiten für die 6 verwendeten Elemente stets zwei Spektren gezeigt (Abb. 5.2 bis Abb. 5.5), jeweils das der Leermessung („empty“, oberes Bild) und darunter das mit dem vollen Radiator (Erklärung dazu siehe Kap. 5.4.4) im Strahlenweg („full radiator“, unteres Bild). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, verteilt auf die 1024 Kanäle, die die Detektor-Elektronik zur Verfügung stellt. Außer bei Fe wird das Spektrum stets im Bereich von 0-40 keV abgebildet, bei Fe im Bereich 0-25 keV, da hier die interessierenden Linien vor allem im Bereich niedriger Energie liegen. Auf der Ordinate logarithmisch aufgetragen ist die jeweilige Anzahl der Ereignisse (Photonen) bei dieser Energie (Kanal). Die wichtigsten Linien, Auffälligkeiten im Spektrum sowie einige ausgewählte Halbwertsbreiten (σ_E) sind direkt in den Spektren gekennzeichnet.

Eine detaillierte Auflistung der Energien und Erklärung der Peaks befindet sich in Kap. 5.4.1 in der Tab. 5.1 und in den hier folgenden Unterkapiteln.

Eisen-Spektren

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den hier besprochenen Fe-Linien genau genommen um Mn-Linien. Im oberen Teil der Abb. 5.2, der das leere Spektrum von Fe zeigt, sind neben den zwei Hauptlinien $K\alpha$ und $K\beta$ auch die 3

besonders auffälligen Pile-Up-Linien (zu Pile-Up siehe Kap. 5.2.3) dieses Elements mit Pfeilen markiert. Von Linien abgesehen, die durch Verunreinigungen (siehe weiter unten bei „Mo, Cu, Rb“ in diesem Kapitel) entstehen, besteht der gesamte Rest des Fe-Spektrums oberhalb der Linie mit der höchsten Energie (ca. 6,6 keV) ebenfalls aus Linien, die durch Pile-Up-Prozesse entstanden sind. Der Grund liegt darin, daß die Fe-Quelle, im Gegensatz zu den weiteren Quellen, nicht mit α -Teilchen bestrahlt wurde und daher keine Bremsstrahlung der α -Teilchen vorliegt, die zum Spektrum beitragen könnte.

Der Begriff „Escape“ im oberen Bild bedeutet, daß hier ein Röntgenphoton der $K\alpha$ -Linie von Fe einen Teil seiner Energie an ein Elektron im Silizium-Kristall des Detektors abgibt und dieses Elektron den Kristall dann verläßt (Compton-Effekt). Daher bildet sich die Energie dieser Linie aus der Energie der $K\alpha$ -Linie minus der Energie für die Emission des Si-Elektrons. Weitere, hierbei auftretenden Escape-Linien befinden sich im Untergrund und sind daher im Spektrum nicht zu sehen.

Im Vergleich der Fe-Spektren im oberen und unteren Bild fällt auf, wie durch das Einbringen des Radiators in den Strahlenweg der Pile-Up verschwindet, da die Anzahl der Ereignisse dadurch sehr stark abnimmt (ca. $\times 10^{-2}$).

Ag-Spektren

Repräsentativ für die anderen Element-Spektren wird bei der Besprechung des Ag-Spektrums detailliert auf die übrigen atomphysikalischen Übergänge eingegangen, die nicht zu den Hauptlinien zählen und von daher gar nicht oder nur schwach im Untergrund zu sehen sind.

Im Ag-Spektrum (Abb. 5.6) stechen die $K\alpha$ - und $K\beta$ -Linien aus dem Untergrund hervor. Dieser wird größtenteils von der Bremsstrahlung der α -Quelle erzeugt (Streuung der α -Teilchen an den Feldern der Kerne der Ag-Atome). Der andere Beitrag zum Untergrund kommt von den Linien, die sich aus den übrigen, atomphysikalischen Übergängen der Elektronenhülle des Silbers ergeben. Die restlichen K-Linien etwa haben eine geringere Übergangswahrscheinlichkeit als die $K\alpha$ - und $K\beta$ -Linien und gehen deshalb im Untergrund (derjenige mit höheren Energien als die der $K\beta$ -Linie) unter.

Die zweite Gruppe von Übergängen, die sich im Ag-Spektrum beobachten läßt, ist die der Übergänge zwischen der L- und der M-Schale im Bereich abnehmender Energien bei 3 keV, wobei vor allem die Übergänge L2M4 und L3M5 mit ihren relativ hohen Übergangswahrscheinlichkeiten hervorstechen. Die maximale Energie der L-Schale (Übergang O- nach L-Schale) liegt bei etwa 3,5 keV (L2O1), so daß der gesamte Untergrund zwischen 3,5 keV und der

niedrigsten Energie der Übergänge auf die K-Schale von etwa 22 keV ($K\alpha_2$) durch die Bremsstrahlung der α -Teilchen erzeugt wird (abgesehen von Übergängen durch Compton-Effekt (s. o. im Fe-Spektrum), die nicht im Spektrum identifizierbar sind).

(Beispiele für relative Übergangswahrscheinlichkeiten, bezogen auf alle Übergänge, die auf derselben Schale enden: $K\alpha_1$: 0,54, $K\alpha_2$: 0,29, $K\beta_1$: 0,10, $K\beta_2$: 0,03, L_2M_4 : 0,88, L_3M_5 : 0,78, L_2O_1 : 0,0002)

Schließlich fällt beim Vergleich des oberen mit dem unteren Spektrum auf, daß hier, im Gegensatz zu Fe mit seinen Hauptlinien bei niedrigeren Energien, das Einbringen des Radiators in den Strahlenweg die Anzahl der Ereignisse kaum noch verändert (berechnete Transmission für beide Hauptlinien ca. 90 %).

Spektren von Mo, Cu und Rb

Bei den Spektren dieser 3 Elemente gibt es Erscheinungen, die über die prinzipiell immer gleiche Struktur, wie sie anhand der Ag-Spektren beispielhaft besprochen wurde, hinausgehen.

In der Tab. 5.1 werden auch Linien genannt, die nicht zu den 6 für die Messungen verwendeten Elementen gehören. Diese stammen von anderen Elementen, die als Verunreinigungen in den Meßmaterialien vorhanden sind. Dabei handelt es sich in erster Linie um Indium (In), dessen $K\alpha$ -Linie (bei 24,2 keV) in beiden Mo-Spektren (Abb. 5.5) gut zu erkennen ist.

In den Spektren von Cu (Abb. 5.3) und Rb (Abb. 5.4) sticht darüber hinaus auch die bei höherer Energie (27,2 keV) liegende $K\beta$ -Linie von In aus dem Spektrum hervor.

Ba-Spektren

Über die in den Cu- und Rb-Spektren auftauchenden In-Nebenlinien hinaus läßt sich in den Ba-Spektren (Abb. 5.7) zusätzlich die bei 14,1 keV liegende $K\alpha$ -Linie von Strontium (Sr) beobachten.

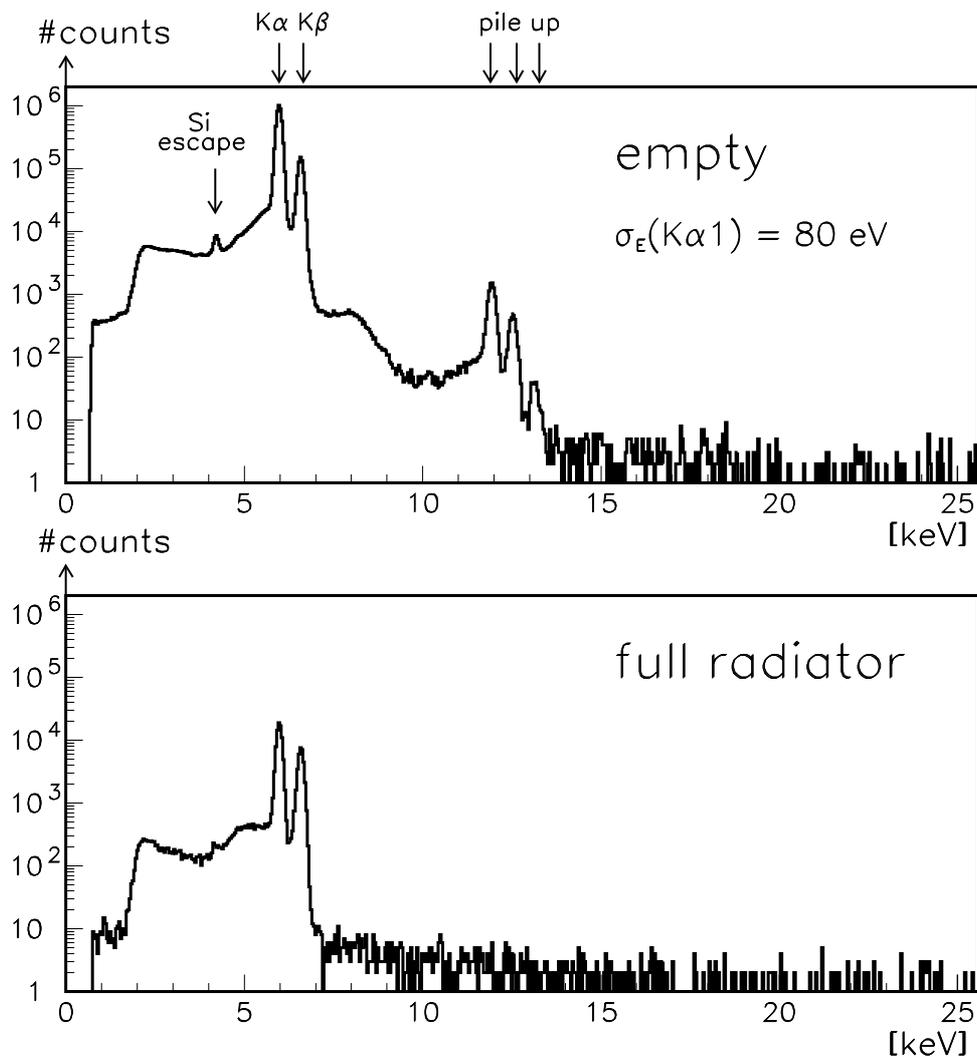


Abbildung 5.2: Eisen-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

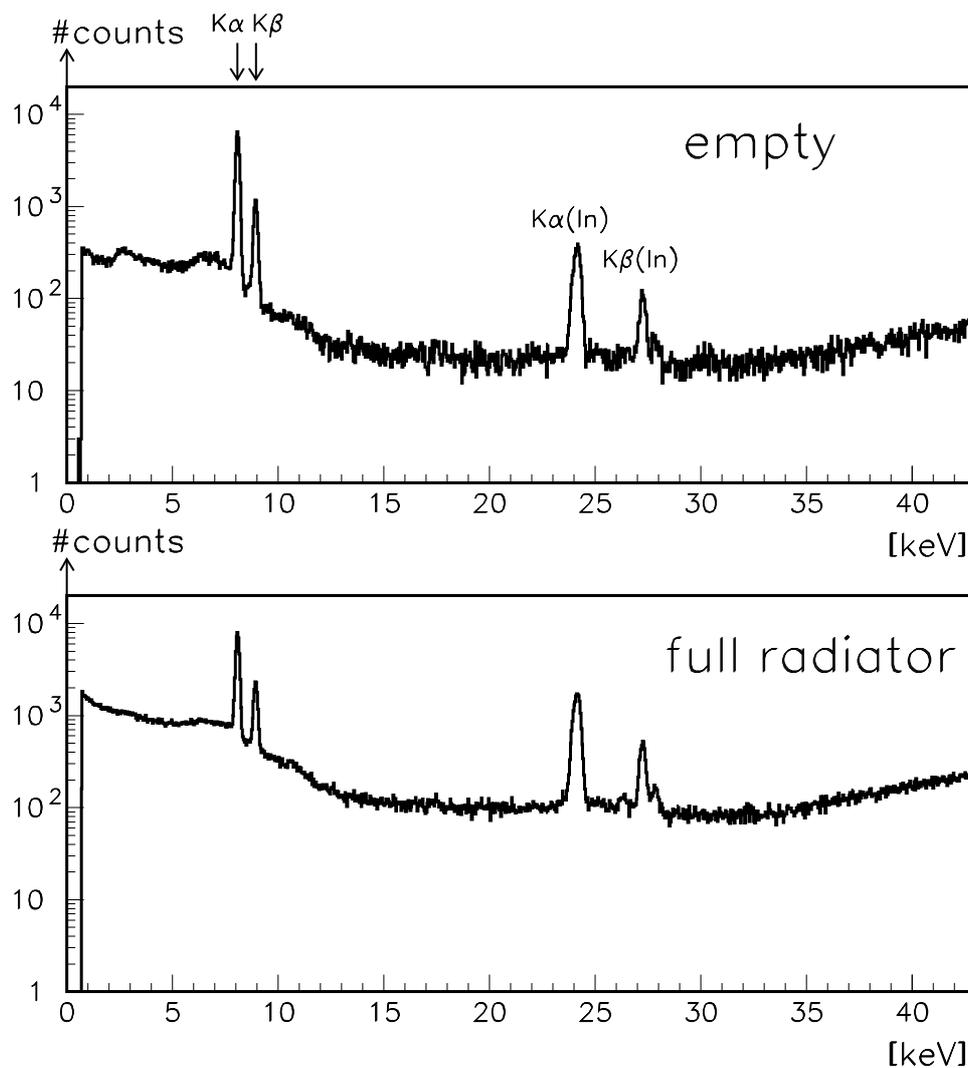


Abbildung 5.3: Kupfer-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

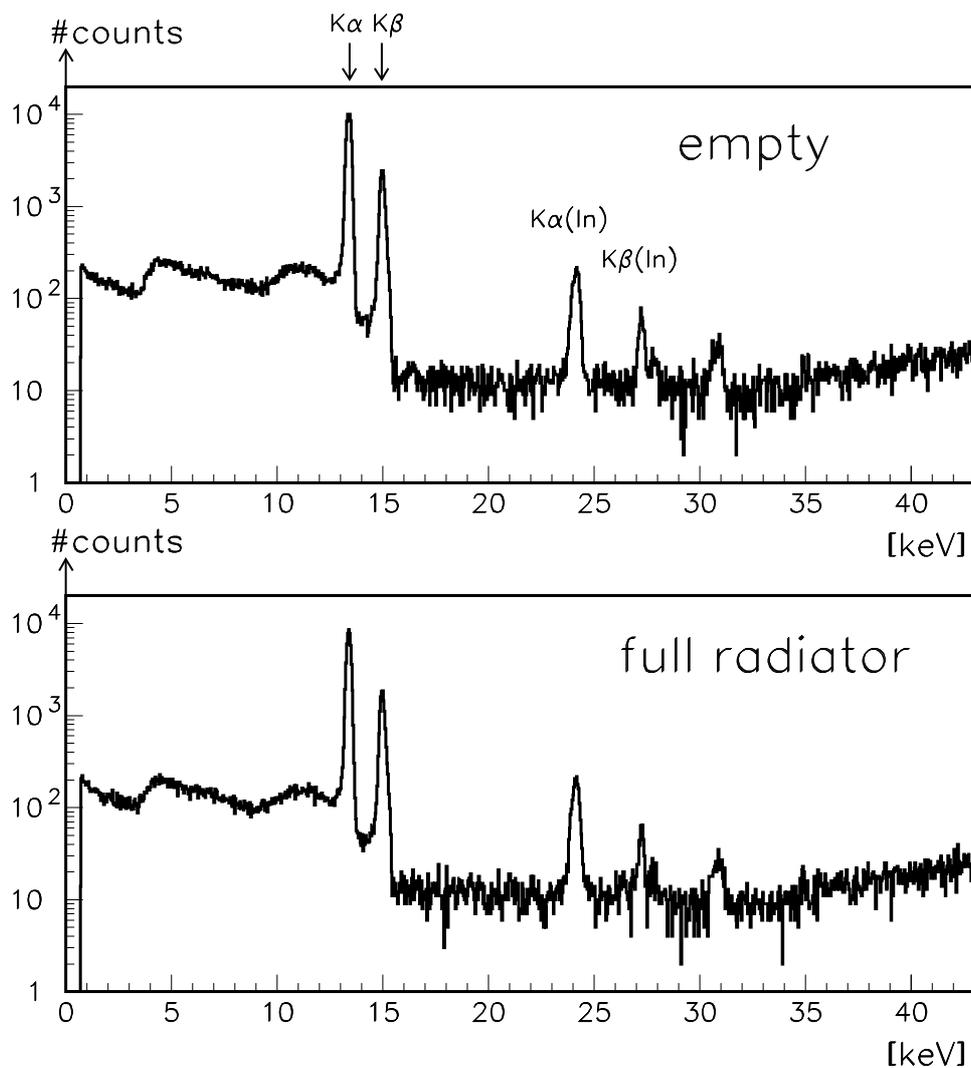


Abbildung 5.4: Rubidium-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

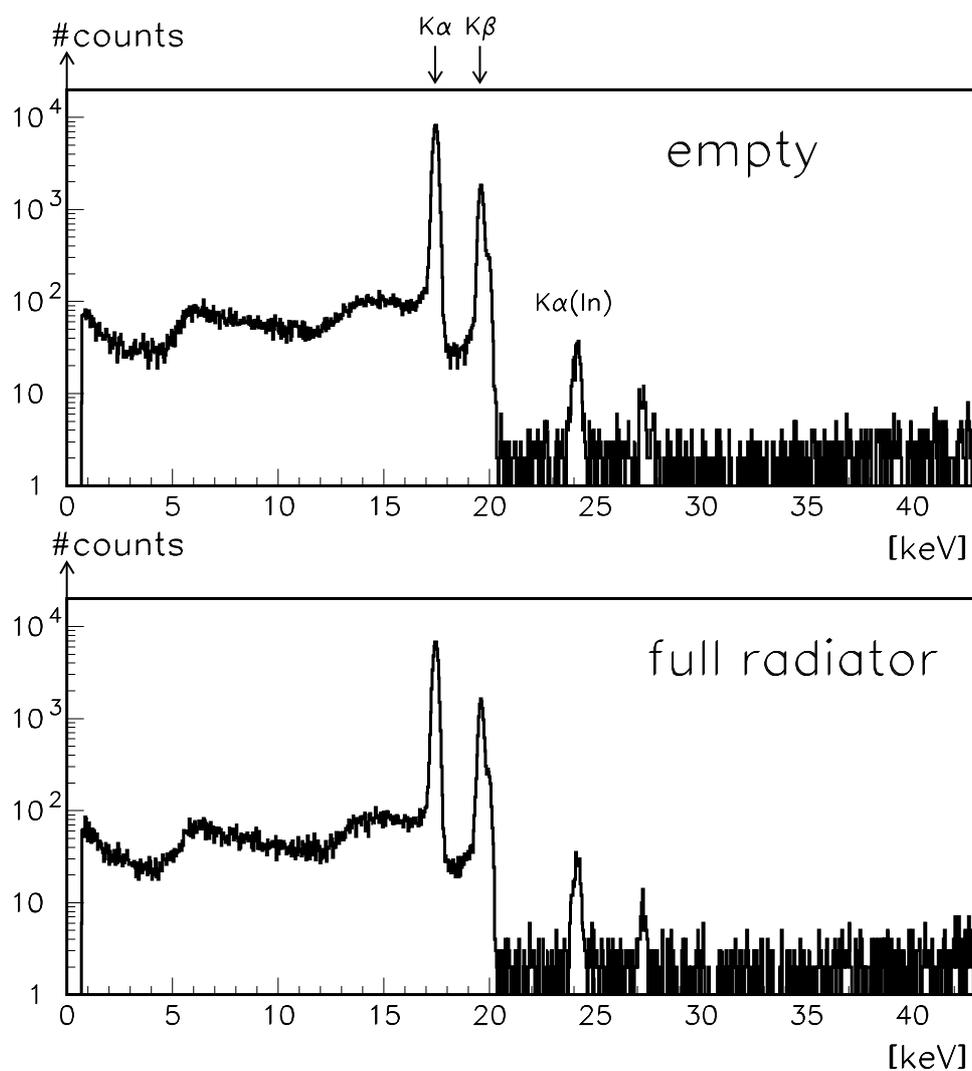


Abbildung 5.5: Molybdän-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

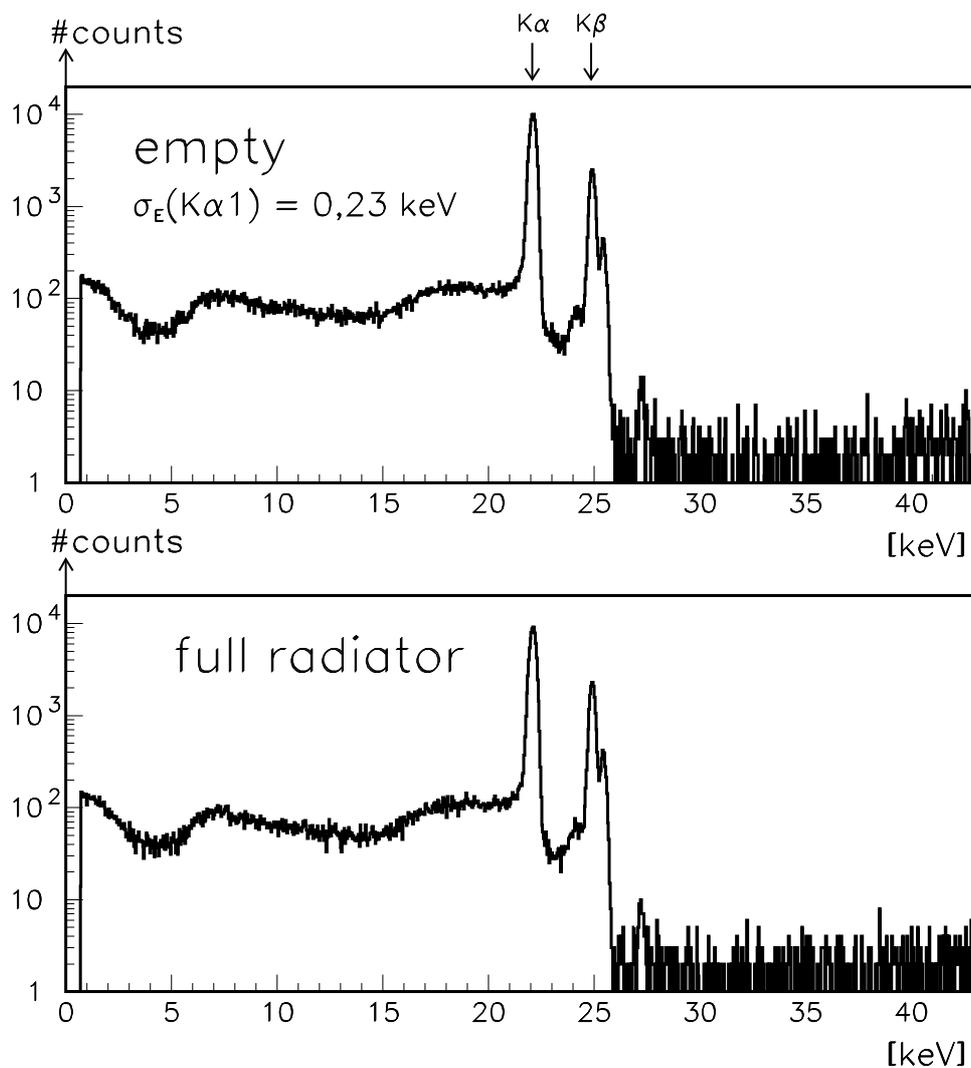


Abbildung 5.6: Silber-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

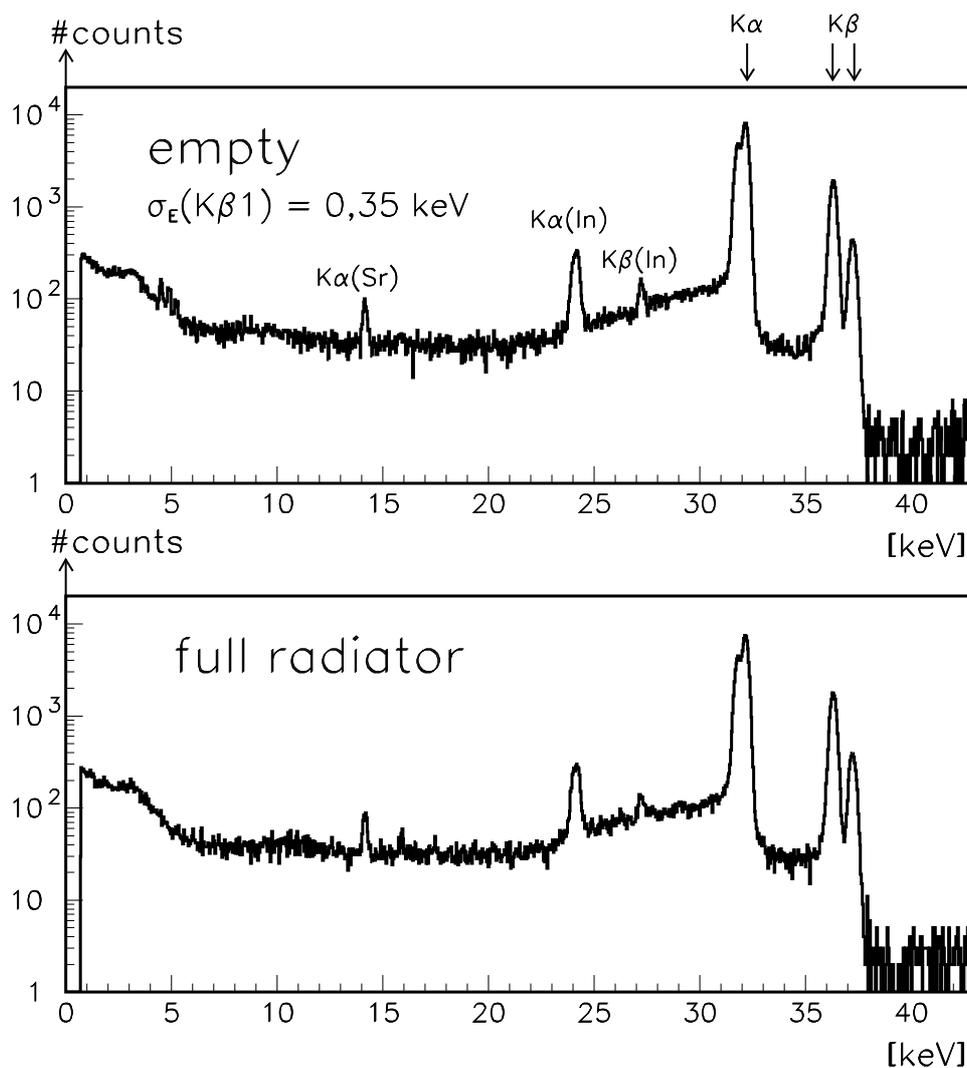


Abbildung 5.7: Barium-Spektrum: leer aufgenommen (oben) und mit dem kompletten Radiator im Strahlenweg (unten). Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Energie der nachgewiesenen Röntgenphotonen in keV, auf der Ordinate logarithmisch die jeweilige Anzahl der Ereignisse bei dieser Energie.

5.4.3 Berechnung der Transmissionen

Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, berechnet sich die Transmissionsrate R eines Radiators bei einer bestimmten Energie als der Quotient der Anzahl der Ereignisse C_D mit dem Radiator im Strahlenweg und der Anzahl der Ereignisse $C_{\langle Q \rangle}$ der gemittelten Quellmessungen bei dieser Energie:

$$\text{Transmission } R = \frac{C_D}{C_{\langle Q \rangle}} \quad (5.1)$$

Die Unsicherheit in der Bestimmung der Transmission R setzt sich zusammen aus einem statistischen Fehler σ_R^{stat} und einem systematischen Fehler σ_R^{syst} . Der statistische Fehler σ_R^{stat} berechnet sich nach den Gesetzen der Gaußschen Fehlerfortpflanzung. Der systematische Fehler σ_R^{syst} ist bedingt durch langzeitliche Änderungen von Parametern, die einen Einfluß auf die Messungen haben können. Zu den hier auftretenden Ursachen für den systematischen Fehler siehe Kap. 5.5.2. Um den systematischen Fehler der Radiator-Messungen bestimmen zu können, wurde stets vor und nach den eigentlichen Transmissionsmessungen eine Quellmessung durchgeführt, aus deren Variationen auf den systematischen Fehler geschlossen werden kann.

Damit ergibt sich für die Berechnung der Transmission R :

$$R \pm \sigma_R^{stat} \pm \sigma_R^{syst} = \frac{C_D \pm \sigma_D^{stat}}{C_{\langle Q \rangle} \pm \sigma_{\langle Q \rangle}^{stat} \pm \sigma_{\langle Q \rangle}^{syst}} \quad (5.2)$$

Gemäß der Fehlerfortpflanzung lautet der statistische Fehler σ_R^{stat} der Transmission:

$$\sigma_R^{stat} = \sqrt{\frac{1}{C_{\langle Q \rangle}^2} (\sigma_D^{stat})^2 + \frac{C_D^2}{C_{\langle Q \rangle}^4} (\sigma_{\langle Q \rangle}^{stat})^2} \quad (5.3)$$

Der systematische Fehler σ_R^{syst} der Transmission berechnet sich als:

$$\sigma_R^{syst} = \frac{C_D}{C_{\langle Q \rangle}^2} \sigma_{\langle Q \rangle}^{syst} \quad (5.4)$$

Der Mittelwert $\langle Q \rangle$ der 3 Quellmessungen Q_1 , Q_2 und Q_3 ergibt sich durch:

$$\langle Q \rangle = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} \quad (5.5)$$

Durch Fehlerfortpflanzung ergibt sich für den statistischen Fehler $\sigma_{\langle Q \rangle}^{stat}$ der gemittelten Quellmessungen:

$$\sigma_{\langle Q \rangle}^{stat} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{Q_1}^{stat})^2 + (\sigma_{Q_2}^{stat})^2 + (\sigma_{Q_3}^{stat})^2}, \quad (5.6)$$

wobei $\sigma_{Q_i}^{stat}$ definiert ist durch:

$$\sigma_{Q_i}^{stat} = \sqrt{Q_i} \quad (5.7)$$

Der systematische Fehler $\sigma_{\langle Q \rangle}^{syst}$ der gemittelten Quellmessungen wird abgeschätzt als:

$$\sigma_{\langle Q \rangle}^{syst} = \frac{1}{3} \sum_i \sigma_i^{syst} \quad , \text{ wobei gilt:} \quad (5.8)$$

$$\sigma_1^{syst} = \left| \frac{Q_1 - Q_2}{2} \right|, \quad \sigma_2^{syst} = \left| \frac{Q_1 - Q_3}{2} \right|, \quad \sigma_3^{syst} = \left| \frac{Q_2 - Q_3}{2} \right| \quad (5.9)$$

Anmerkung: Die numerische Berechnung sämtlicher statistischer und systematischer Fehler dieser Auswertung erfolgte mit mehreren, speziell für diese Anwendung geschriebenen LabVIEW-Programmen.

5.4.4 Meßreihe I

Hier aufgeführt befindet sich zum einen die Tab. 5.2, die für die Meßreihe I sämtliche Transmissionsraten der 6 untersuchten Radiatormaterialien bei den 12 unterschiedlichen Röntgenenergien (den Hauptlinien) enthält, zusammen mit den gemäß der Gleichungen aus Kap. 5.4.3 berechneten Fehler. Mit „2D + M“ ist die Kombination von zwei Deckeln plus den Fasermatten gemeint, das entspricht dem vollen Radiator.

Im Anschluß folgt die Tab. 5.3, in der zu den verwendeten Radiatormaterialien die genauen Materialzusammensetzungen, die jeweiligen Herstellerfirmen und die Materialdicken aufgeführt sind.

Am Schluß dieses Kapitels befinden sich zwei Abbildungen, auf denen die Ergebnisse der Meßreihe I aus Tab. 5.2 grafisch dargestellt werden. In der Abb. 5.8 sind der Deckel, die Matten und der volle Radiator aufgezeichnet, in Abb. 5.9 die Kohlenstoffolie, HF71 und HF71 + Alkylar. Auf der Abszisse aufgetragen ist die Röntgenenergie (in keV), auf der Ordinate die Transmission (in Prozent). Zu jedem Meßpunkt sind die jeweiligen statistischen und systematischen Fehler eingezeichnet, wobei die statistischen Fehler durch eine Linie dargestellt werden, die senkrecht durch den Meßpunkt geht, die systematischen Fehler durch einen Doppelpfeil, der direkt rechts neben den Meßpunkten abgebildet ist.

	Deckel	Matten	2 D + M	C	HF71	HF71Al
Fe: 5,8 keV	43,5	9,8	1,88	84,6	42,2	27,3
stat. Fehler	0,05	0,02	0,01	0,08	0,05	0,04
syst. Fehler	0,3	0,07	0,01	0,6	0,3	0,2
Fe: 6,4 keV	53,4	17,5	5,11	88,2	52,5	37,5
stat. Fehler	0,1	0,06	0,03	0,2	0,1	0,1
syst. Fehler	0,4	0,1	0,04	0,6	0,4	0,3
Cu: 8,0 keV	75,0	41,5	23,4	95,1	71,1	60,0
stat. Fehler	0,5	0,3	0,2	0,9	0,7	0,6
syst. Fehler	0,5	0,3	0,2	0,7	0,5	0,4
Cu: 8,9 keV	82,7	52,4	35,2	95,4	78,4	68,1
stat. Fehler	1,2	0,9	0,6	2,1	1,8	1,7
syst. Fehler	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2
Rb: 13,4 keV	93,6	80,4	69,3	98,4	92,9	89,4
stat. Fehler	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6
syst. Fehler	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Rb: 15,0 keV	95,0	83,4	75,4	101,2	94,9	91,5
stat. Fehler	1,4	1,3	1,2	1,5	1,4	1,4
syst. Fehler	1,3	1,1	1,0	1,4	1,3	1,3
Mo: 17,4 keV	98,4	87,2	80,6	100,4	95,9	94,9
stat. Fehler	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7
syst. Fehler	1,2	1,0	1,0	1,2	1,1	1,1
Mo: 19,6 keV	100,2	91,5	83,3	101,6	97,0	97,1
stat. Fehler	1,6	1,5	1,4	1,6	1,6	1,6
syst. Fehler	2,7	2,4	2,2	2,7	2,6	2,6
Ag: 22,1 keV	96,9	92,0	88,2	100,6	97,8	97,9
stat. Fehler	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
syst. Fehler	1,3	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3
Ag: 24,9 keV	97,9	91,3	90,4	100,5	97,0	98,0
stat. Fehler	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3
syst. Fehler	1,3	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3
Ba: 32,2 keV	97,5	93,2	91,5	99,5	98,5	97,5
stat. Fehler	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
syst. Fehler	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Ba: 36,4 keV	100,1	96,3	93,0	99,0	99,4	97,8
stat. Fehler	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
syst. Fehler	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5

Tabelle 5.2: *Transmissionsraten sowie statistische und systematische Fehler (in %) bei den 12 unterschiedlichen Röntgenenergien (den Hauptlinien) für die 6 untersuchten Radiatormaterialien. (Meßreihe I)*

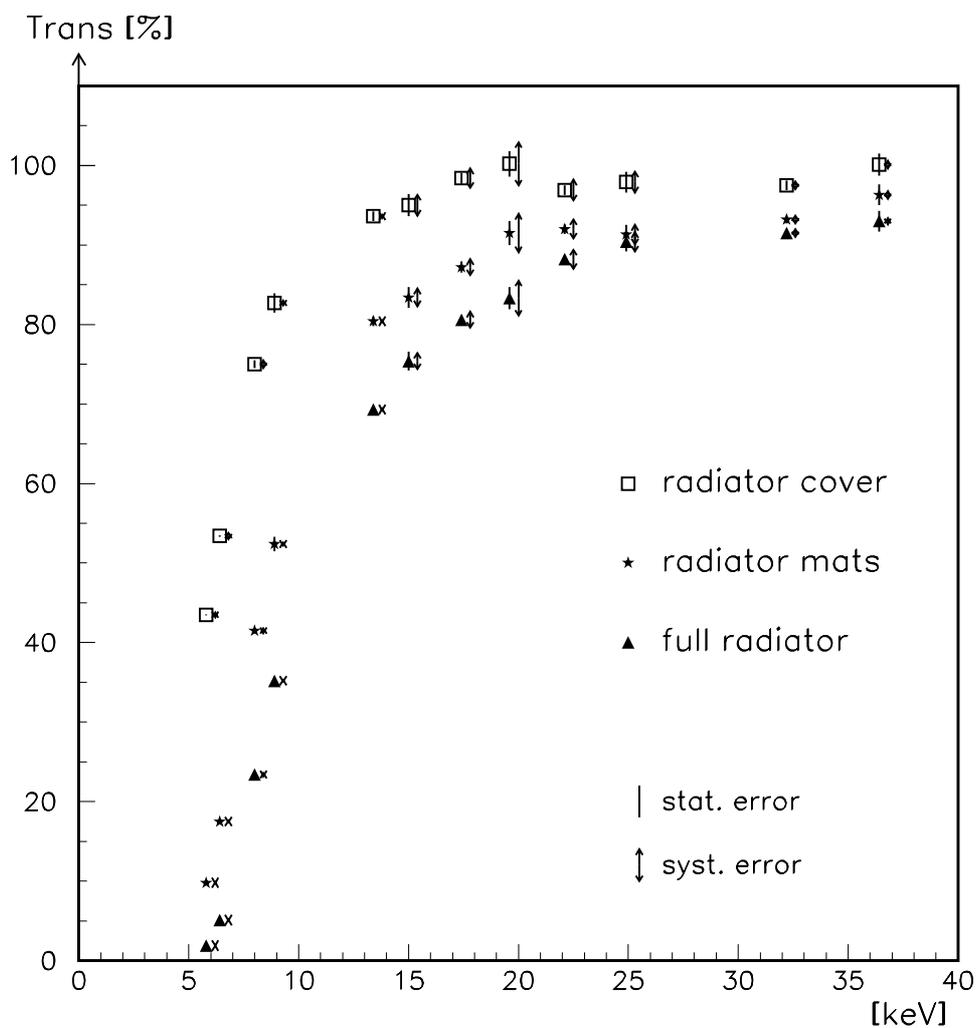


Abbildung 5.8: *Transmissionsraten mit den zugehörigen statistischen und systematischen Fehlern (in %) des Deckels („radiator cover“), der Matten („radiator mats“) und des vollen Radiators („full radiator“), aufgetragen über der Röntgenenergie (in keV). (Meßreihe I)*

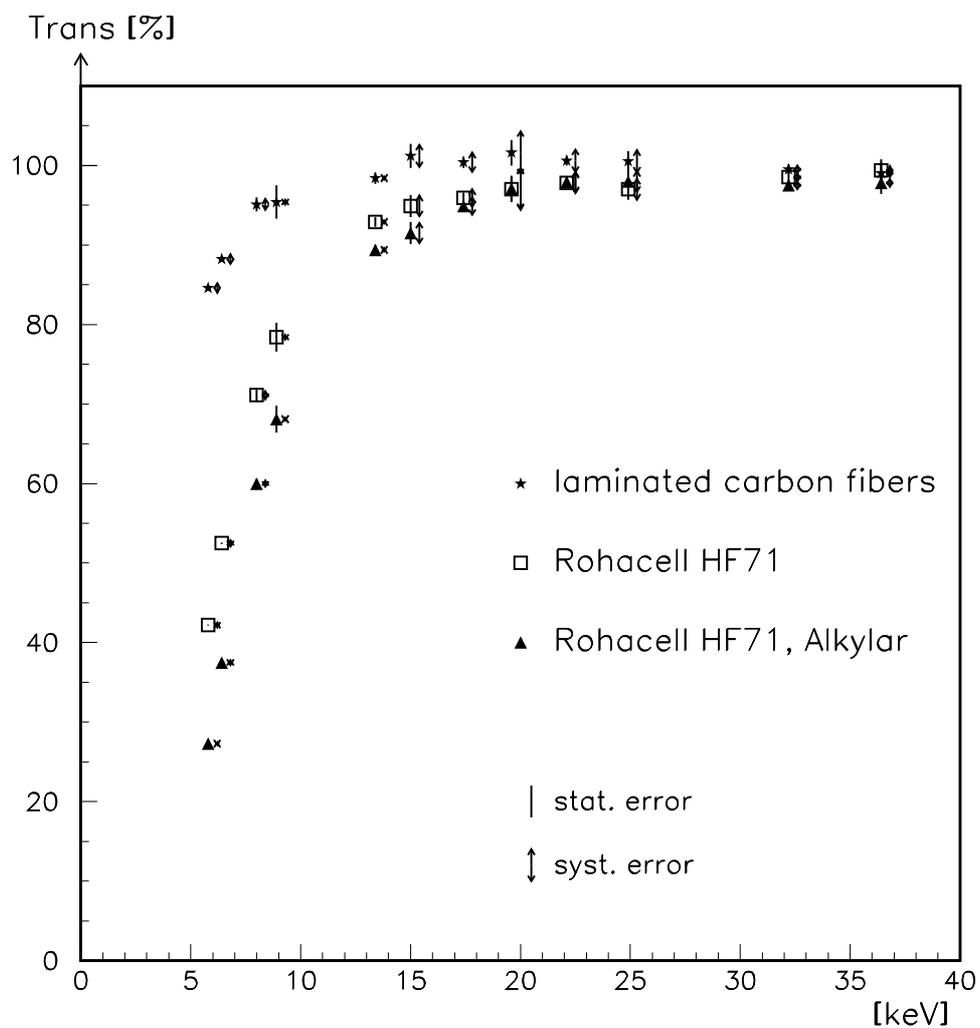


Abbildung 5.9: Transmissionsraten mit den zugehörigen statistischen und systematischen Fehlern (in %) der C-Folie („laminated carbon fibers“), von HF71 („Rohacell HF71“) und HF71 + Alkylar („Rohacell HF71, Alkylar“), aufgetragen über der Röntgenenergie (in keV). (Meßreihe I)

Bezeichnung	Material	Hersteller	Dicke
Deckel	unbeschichtetes HF71	Röhm	6 mm
Matten	LRP375BK	Freudenberg	5mm,8 Stück
2 Deckel + Matten	HF71 + Matten + HF71	Diverse (s.o.)	48 mm
C-Folie	typische Kohlefaserfolie mit einer Dichte von ca. 120g/m ²		
HF71	unbeschichtetes HF71	Röhm	8 mm
HF71 + Alkylar	HF71 + CFK + Mylar/Al	Fischer (FACC)	8 mm

Tabelle 5.3: Erläuterung der Radiatormaterialien, die bei der Meßreihe I zum Einsatz kamen. Aufgeführt sind die jeweiligen Materialzusammensetzungen, die Herstellerfirmen und die Materialdicken.

5.4.5 Meßreihe II

In diesem Kapitel wird zunächst die Tab. 5.4 aufgeführt, die für die Meßreihe II sämtliche Transmissionsraten der 10 untersuchten Radiatormaterialien bei den 12 unterschiedlichen Röntgenenergien (den Hauptlinien) enthält, zusammen mit den gemäß der Gleichungen aus Kap. 5.4.3 berechneten Fehler. Mit „M“ sind die Fasermatten gemeint, mit „S“ das Sandwich.

Im Anschluß folgt die Tab. 5.5, in der zu den verwendeten Radiatormaterialien die genauen Materialzusammensetzungen, die jeweiligen Herstellerfirmen und die Materialdicken aufgeführt sind.

Am Schluß dieses Kapitels befindet sich die Abb. 5.10, auf der die Ergebnisse der Meßreihe II aus Tab. 5.4 für den vollen Radiator grafisch dargestellt werden. Der volle Radiator ist hier nicht exakt identisch mit dem Sandwich aus den Tabellen 5.4 und 5.5. Basierend auf den Messungen wurde entschieden, das Sandwich in der Kombination K8Al + 7 Fasermatten + K8Al aufzubauen und nicht in der Zusammensetzung K8Al + 7 Fasermatten + K8, womit hier gemessen worden war. Daher wurden für die Abb. 5.10 die Transmissionsraten, die für das Sandwich gemessen worden waren, mit dem Quotienten der Transmissionen von K8Al und K8 multipliziert, um rein rechnerisch die Transmission der endgültigen Radiator-Bauform zu ermitteln.

Auf der Abszisse der Abb. 5.10 aufgetragen ist die Röntgenenergie (in keV), auf der Ordinate die Transmission (in Prozent). Zu jedem Meßpunkt sind die jeweiligen statistischen und systematischen Fehler eingezeichnet, wobei die statistischen Fehler durch eine Linie dargestellt werden, die senkrecht durch den Meßpunkt geht, die systematischen Fehler durch einen Doppelpfeil, der direkt

rechts neben den Meßpunkten abgebildet ist.

	HF71	K6Al	K8Al	K6	K8	C8	AIK8	AIK6	M	S
Fe: 5,8 keV	51,7	40,3	29,0	36,5	32,3	21,5	26,9	31,7	12,6	1,20
stat. Fehler	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,04	0,1	0,1	0,03	0,01
syst. Fehler	0,5	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	0,01
Fe: 6,4 keV	61,5	51,3	40,0	47,5	43,4	32,0	38,1	42,6	21,6	3,75
stat. Fehler	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03
syst. Fehler	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,03
Cu: 8,0 keV	81,6	72,4	59,9	70,5	62,0	52,4	60,6	64,4	33,0	12,5
stat. Fehler	1,0	0,9	1,1	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	0,2	0,1
syst. Fehler	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,5	0,3	0,1
Cu: 8,9 keV	81,5	80,0	66,9	76,2	73,4	60,7	67,7	64,8	41,2	19,2
stat. Fehler	2,3	2,2	2,9	3,1	3,0	2,7	2,9	2,8	0,5	0,3
syst. Fehler	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7	0,8	0,8	0,5	0,2
Rb: 13,4 keV	91,1	89,7	88,5	91,5	90,1	87,9	87,6	90,6	83,7	67,6
stat. Fehler	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
syst. Fehler	2,5	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	1,8
Rb: 15,0 keV	93,7	92,4	91,3	93,6	93,5	91,2	88,5	96,8	85,8	75,5
stat. Fehler	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,6	1,7	1,6	1,5
syst. Fehler	2,7	2,6	2,6	2,7	2,7	2,6	2,5	2,8	2,5	2,2
Mo: 17,4 keV	97,9	96,2	94,6	96,1	95,0	92,9	94,6	95,3	91,6	80,9
stat. Fehler	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7
syst. Fehler	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Mo: 19,6 keV	100,7	95,6	93,7	97,0	97,3	93,7	92,8	96,2	90,4	85,0
stat. Fehler	1,7	1,7	1,6	1,7	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6	1,5
syst. Fehler	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
Ag: 22,1 keV	97,8	98,4	97,4	99,2	98,9	97,0	98,0	98,8	94,4	88,4
stat. Fehler	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9
syst. Fehler	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,1
Ag: 24,9 keV	93,3	95,5	92,7	94,5	92,8	96,0	98,9	96,8	94,2	86,9
stat. Fehler	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,0	1,9
syst. Fehler	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2	2,3	2,4	2,3	2,3	2,1
Ba: 32,2 keV	97,0	95,3	96,1	104,2	103,9	99,3	98,0	95,6	94,8	94,9
stat. Fehler	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
syst. Fehler	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
Ba: 36,4 keV	96,9	96,1	98,5	105,9	102,6	100,1	99,8	97,2	96,4	96,9
stat. Fehler	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
syst. Fehler	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

Tabelle 5.4: Transmissionsraten sowie statistische und systematische Fehler (in %) bei den 12 unterschiedlichen Röntgenenergien (den Hauptlinien) für die 10 untersuchten Radiatormaterialien. (Meßreihe II)

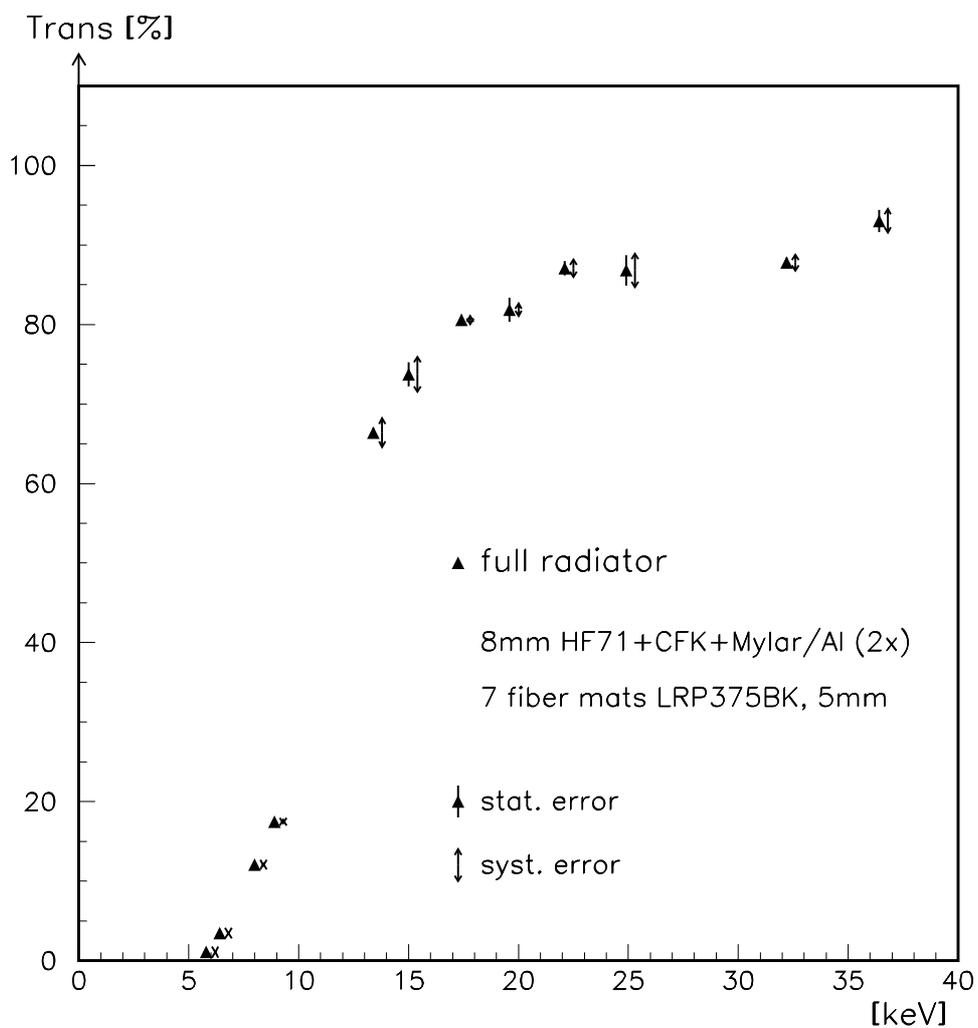


Abbildung 5.10: Transmissionsraten mit den zugehörigen statistischen und systematischen Fehlern (in %) des vollen Radiators („full radiator“), bereits in der endgültigen Zusammensetzung $K\delta Al + 7$ Fasermatten + $K\delta Al$, aufgetragen über der Röntgenenergie (in keV). (Meßreihe II)

Bezeichnung	Material	Hersteller	Dicke
HF71	unbeschichtetes HF71	Röhm	6mm
K6Al	HF71 + CFK + Mylar/Al	Inventor (Krakau)	6mm
K8Al	HF71 + CFK + Mylar/Al	Inventor (Krakau)	8mm
K6	HF71 + CFK	Inventor (Krakau)	6mm
K8	HF71 + CFK	Inventor (Krakau)	8mm
C8	HF71 + CFK	Carbotech	8mm
AIK8	HF71 + CFK	AIK/Stesalit	8mm
AIK6	HF71 + CFK	AIK/Stesalit	6mm
Fasermatten	LRP375BK	Freudenberg	5mm,7 Stück
Sandwich	K8Al + Matten + K8	Diverse (s. o.)	48mm

Tabelle 5.5: Erläuterung der Radiatormaterialien, die bei der Meßreihe II zum Einsatz kamen. Aufgeführt sind die jeweiligen Materialzusammensetzungen, die Herstellerfirmen und die Materialdicken.

5.4.6 Transmissionen der Drahtkammer

Die Messungen der Transmissionswerte der Drahtkammer wurden durchgeführt, weil für die Unterscheidung der durch die TRD-Kammer fliegenden Elektronen von den Pionen der Signalanstieg am Ende des Impulshöhenspektrums (siehe Kap. 3.1.2) essentiell wichtig ist. Diesen erhält man aber nur dann in ausreichender Deutlichkeit, wenn die Absorption der Übergangsstrahlungsphotonen am *Anfang* der Driftzone in der Drahtkammer erfolgt. Das bedeutet, daß man auf eine kurze Absorptionslänge (typischerweise 10 mm bei Energien von 10 keV) der TR-Photonen in Xenon angewiesen ist, was anhand der hier durchgeführten Transmissionsmessungen sichergestellt werden sollte.

Die Messungen der Drahtkammer erfolgten im Rahmen der Meßreihe I. Die Drahtkammer hat ein Fassungsvermögen von 10l und wurde vor Beginn der Messungen mit Xenon (Xe) gefüllt. Dazu wurde die Drahtkammer 3 Stunden lang mit Xe bei einer Durchflußmenge von 10l Gas pro Stunde gespült, um sicherzugehen, daß eine ausreichend hohe Xe-Konzentration erreicht wird. Auch während der Messungen lief die Gasbefüllung weiter, um weiterhin eine konstante Xe-Konzentration zu gewährleisten. Für die Messungen wurden nur die 4 Elemente mit den höchsten Röntgenenergien verwendet, da bereits bei Rubidium nur noch eine Transmission von $R = 0,25\%$ vorlag.

Hier aufgeführt befindet sich als erstes die Tab. 5.6, die für die Drahtkammer-Messungen die Transmissionsraten der 8 höchsten Röntgenenergien (Hauptlinien) enthält, zusammen mit den gemäß der Gleichungen aus Kap. 5.4.3

	Drahtkammer
Rb: 13,4 keV	$0,25 \pm 0,06$
Rb: 15,0 keV	$0,25 \pm 0,13$
Mo: 17,4 keV	$1,00 \pm 0,07$
Mo: 19,6 keV	$3,17 \pm 0,29$
Ag: 22,1 keV	$9,28 \pm 0,19$
Ag: 24,9 keV	$18,29 \pm 0,60$
Ba: 32,2 keV	$41,28 \pm 0,44$
Ba: 36,4 keV	$33,07 \pm 0,92$

Tabelle 5.6: *Transmissionsraten und statistische Fehler (in %) der Drahtkammermessungen bei den 8 höchsten Röntgenenergien (Hauptlinien).*

berechneten statistischen Fehler. Im Anschluß befindet sich die Abb. 5.11, in der die Ergebnisse der Drahtkammer-Messungen aus Tab. 5.6 grafisch dargestellt werden. Auf der Abszisse linear aufgetragen ist die Röntgenenergie (in keV), auf der Ordinate logarithmisch die Transmission (in Prozent). Zu jedem Meßpunkt sind die jeweiligen statistischen Fehler eingezeichnet. Sie werden durch eine Linie dargestellt, die senkrecht durch den Meßpunkt geht.

Mit „AP“ („Anton’s Prediction“) ist die Vorhersage von Anton Andronic gemeint, die er aufgrund seiner Messungen am CERN gemacht hatte [And04]. Dabei wurden dem Teststrahl mehrere Driftkammern zugleich ausgesetzt und ein progressives Ansteigen des Stromsignals von Kammer zu Kammer beobachtet. Wenn man aus den Integralinformationen, die aus dieser Meßreihe am CERN gewonnenen wurden, auf die hier gemessenen differentiellen Werte zurückschließt, sieht man, daß man dabei zwar nicht völlig falsch liegt. Es gibt aber doch einen signifikanten Unterschied (etwa $\times 2$) zwischen der Obergrenze der Fehlertoleranz der CERN-Abschätzung und einer anhand der hier durchgeführten Meßreihe abgeschätzten Transmissionskurve, so daß die Durchführung der differentiellen Messungen im Nachhinein berechtigt erscheint. Dadurch kann nachgewiesen werden, daß der progressive Anstieg der Kammerströme durch Übergangsstrahlung verursacht wird (die nicht völlig in der Kammer, in der sie entsteht, absorbiert wird) und nicht etwa durch Bremsstrahlungseffekte.

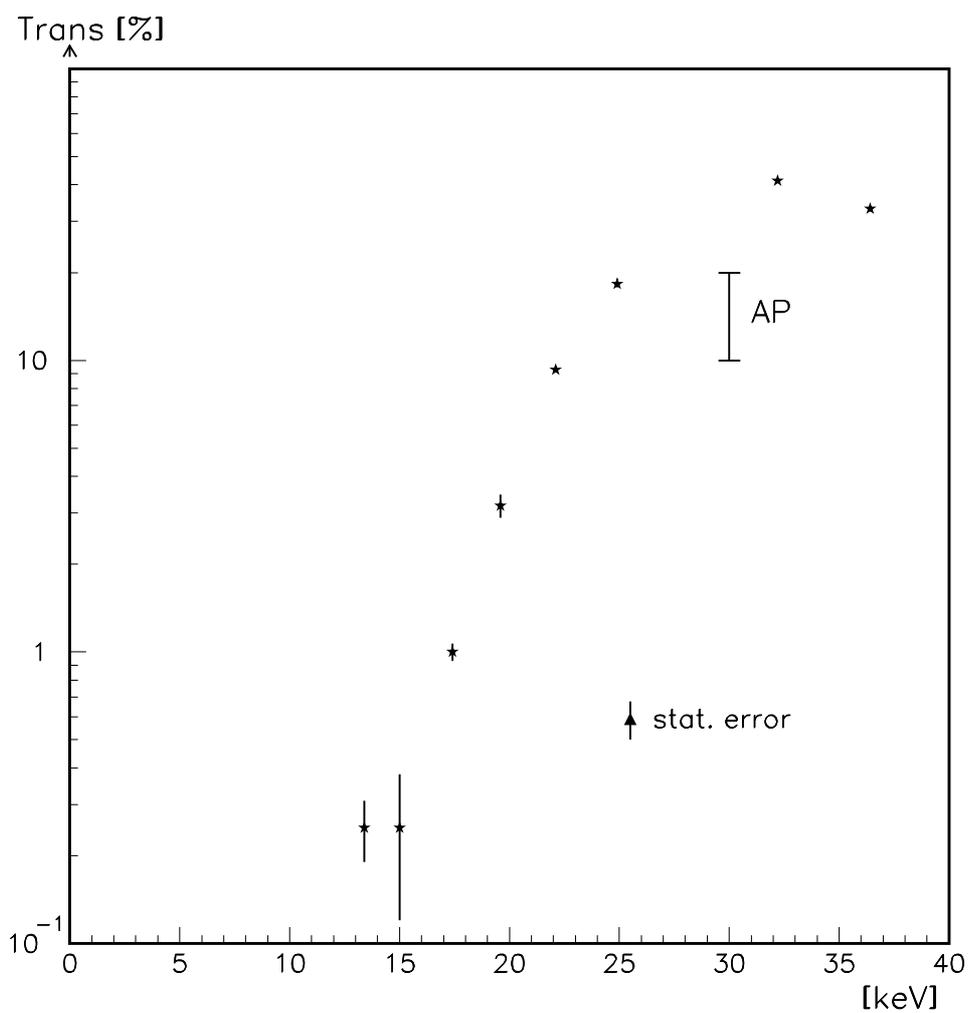


Abbildung 5.11: *Transmissionsraten und statistische Fehler (in %) der Drahtkammermessungen bei den 8 höchsten Linienenergien (Hauptlinien), aufgetragen über der Röntgenenergie (in keV). Die Abszisse hat eine lineare Skala, die Ordinate eine logarithmische.*

5.5 Diskussion

Für den Radiator wird eine nicht zu hohe Absorptionsrate für Röntgenstrahlung angestrebt, damit die Übergangsstrahlung in das Gasvolumen dringen und dort Elektronen-Ionen-Paare erzeugen kann. Wie man in der Abb. 5.10 sehen kann, ist das mit einer Transmission von etwa 19 % bei der für die Übergangsstrahlung des TRD typischen Energie von 10 keV gewährleistet.

In der mit Gas gefüllten Drahtkammer strebt man dagegen eine niedrige Transmissionsrate an. Bei der Energie von 10 keV liegt sie unterhalb von 0,25 %, denn auf diesen Wert war die Transmission bereits bei 13,4 keV, was der Energie von Rubidium entspricht, abgefallen (siehe Abb. 5.11).

5.5.1 Radiator-Aufbau

Die endgültige Entscheidung für die Zusammensetzung des Radiators der TRD-Kammern in der Form K8Al + 7 Fasermatten + K8Al (zur Erläuterung der Materialien siehe Tab. 5.5 im Kap. 5.4.5) basiert vor allem auf Stabilitätsüberlegungen. Damit möglichst wenig Detektorfläche verdeckt wird, schied ein stabiler Metallrahmen zur Halterung des Radiators von vornherein aus [TRD01]. Daher mußte durch den Radiator selbst, bzw. durch seine beiden Deckel, bereits einige mechanische Belastung getragen werden können.

Zwar hätte eine Kombination von jeweils nur 6 mm dicken Deckeln, dafür aber 8 Fasermatten, für mehr Übergangsstrahlung gesorgt, da zwar die Deckel ebenfalls Übergangsstrahlung erzeugen, jedoch weniger, als die Matten. Die Festigkeit der 6 mm Deckel ist aber nicht ausreichend für den Detektor-Aufbau, was man allein daran erkennen kann, daß die 6 mm Deckel oft schon lediglich dadurch zerbrachen, daß man sie in die Hand nahm, ohne sie irgendwelchen zusätzlichen Belastungen auszusetzen [Wes03]. Aus diesem Grund fiel letztlich die Entscheidung auf die dickeren, aber stabileren 8 mm Deckel.

5.5.2 Systematischer Fehler

Nach ersten Testmessungen wurde beschlossen, angesichts zu hoher, systematischer Fehler den am MPI vorhandenen Versuchsaufbau zu verbessern (siehe Kap. 5.2.1). Beide Meßreihen I und II wurden mit dem neuen, verbesserten Meßaufbau durchgeführt, außerdem wurden bei beiden Meßreihen im Vergleich zu den vorhergegangenen Testmessungen die Meßzeiten deutlich verlängert (um einen Faktor zwischen 2 und 30, je nach vorliegender Anzahl der Ereignisse). Trotzdem ließ sich durch diese Maßnahmen der systematische Fehler der

Versuchsreihen nicht weiter reduzieren.

Folgende, mögliche Fehlerquellen kommen in Betracht:

1. Detektor-Temperatur:

- (a) Dagegen spricht, daß bei dem Detektor, nachdem er im warmen Zustand mit flüssigem Stickstoff befüllt worden war, sicherheitshalber eine Wartezeit von 4 h verstreichen gelassen wurde, obwohl der Detektor bereits das Signal für betriebsbereit gegeben hatte. Dies ging auf den Rat der Kollegen vom MPI zurück, dafür zu sorgen, daß der Detektor *wirklich* komplett ausgekühlt war. Für die Transmissionsmessungen wurden nur Meßergebnisse ausgewertet, die nach dieser Wartezeit registriert wurden.
- (b) Dafür spricht, daß die Anzahl der Ereignisse in den 4 h, *nachdem* der Detektor bereits das Signal für betriebsbereit gegeben hatte, bei ansonsten unveränderten Einstellungen trotzdem noch langsam anstieg. Umgekehrt sank die Anzahl der Ereignisse auch in der Zeit schon ab, *bevor* der Detektor sich wegen Erwärmung abschaltete, also in einer Zeit, in der er von seiner eigenen Meßelektronik noch als meßbereit angezeigt wurde.
- (c) Dafür spricht ebenfalls, daß sich bei der Meßreihe II, bei der die systematischen Fehler meist höher lagen als bei der Meßreihe I, der Versuchsraum tagsüber bereits bis auf ca. 28 Grad Celsius aufheizte, weil der Raum direkt unter dem Dach lag und es keinerlei Lüftungsmöglichkeiten gab. Dadurch kam es im Verlauf eines Tages zu Temperaturschwankungen im Bereich von ca. 5 Grad Celsius, was aufgrund der Tatsache, daß manche Messungen in der Tat einen ganzen Tag lang dauerten oder auch über Nacht oder über ein Wochenende liefen, schon eine Rolle gespielt haben kann.

2. Menschliche Einflüsse:

- (a) Mechanisch erscheinen diese kaum möglich, da bei dem verbesserten Versuchsaufbau der Meßreihen I und II alle Teile fest montiert waren und daher nicht z. B. durch versehentliches Anstoßen in ihren Abständen oder Ausrichtungen zueinander verändert werden konnten.
- (b) Die Detektorelektronik wurde nur indirekt über das auf dem Meß-PC arbeitende Programm MCA gesteuert, so daß auch dort keine versehentlichen Fehleinstellungen vorgenommen werden konnten.

- (c) Der Detektor gab seine Ergebnisse direkt an die Meß-Elektronik weiter und diese wiederum an die Meßsoftware MCA. Von dort aus wurden die Daten in eine Datei geschrieben, diese Datei wurde auf einem anderen Rechner eingelesen und von der Analyse-Software Gupix (siehe Kap. 5.2.3) ausgewertet, so daß diese Schritte ohne (unbeabsichtigte) menschliche Eingriffe abliefen.
- (d) Die Versuchsdurchführung wurde begleitet von Mischa Metz, einem langjährigen Experten auf dem Gebiet der Röntgenabsorptionsmessungen am MPI. Allerdings war auch für ihn der für die Messungen verwendete Detektor (siehe Kap. 5.2.2) noch relativ neu, die Gruppe hatte vorher mit einem anderen Detektortyp gemessen.

3. Länge der Meßzeiten:

Dagegen spricht, daß auch bei verlängerten Meßzeiten lediglich der statistische Fehler kleiner wurde, der systematische aber in der selben Größenordnung blieb.

Was die Herkunft des systematischen Fehlers angeht, ist man letztlich auf Mutmaßungen angewiesen, da sich die Fehlerquelle nicht eindeutig identifizieren ließ. Der Grund könnte gewesen sein, daß die Temperaturkurve sowohl des Detektors selbst, als auch die des Versuchsraums, eine entscheidende Rolle gespielt hat. Leider ließ sich durch alle durchgeführten Maßnahmen keine entscheidende Reduzierung des systematischen Fehlers bewirken. In den meisten Fällen aber bewegt sich der systematische Fehler in einem ähnlichen Bereich wie der statistische Fehler, d.h. in einem Bereich von 1 - 2 %.

Kapitel 6

Qualitätstests der TRD-Padplanes

6.1 Einleitung

Die Padplanes werden von der Firma Optiprint [OptAG] produziert, sind danach aber noch nicht einsatzbereit für die TRD-Kammern. Zuvor müssen erst noch die Flachbandkabel (FFC-Kabel) an die Footprints gelötet werden, über die die Stromimpulse an die MCM-Boards zur Analyse gesendet werden.

Eine einwandfreie Verbindung durch den Lötvorgang zwischen dem FFC-Kabel und dem Footprint kann nicht immer gewährleistet werden. Außerdem variiert bei der Produktion der Padplanes durch den Hersteller die Qualität, so gab es wiederholt bis zu einem Dutzend fehlerhafter Pads auf einer Padplane.

Beide Faktoren machen ein Testen der Padplanes und der Lötverbindungen zwischen den FFC-Kabeln und den Footprints *vor* dem Einbau der Padplanes in die TRD-Kammern zwingend notwendig. Wegen der schieren Anzahl der Footprints (65664 Stück), aber auch wegen der besonderen Konstellation der Fehlermöglichkeiten, wurde beschlossen, ein LabVIEW-gestütztes Testverfahren für die Padplanes zu entwickeln. Das Prinzip des Testverfahrens ist, bei einer Padplane an jedem Footprint eine Messung der Kapazitäten jedes einzelnen seiner 18 Pads durchzuführen und die Ergebnisse in einem Balkendiagramm auf dem Monitor anzuzeigen. Liegt z. B. ein Kurzschluss zwischen zwei Pads vor, erhöht sich dadurch deren Kapazität, ihr Wechselstromwiderstand sinkt und ebenso die über den Padkapazitäten abfallende Wechselspannung. Dieser Unterschied gegenüber den anderen, nicht-kurzgeschlossenen Pads lässt sich deutlich erkennen.

6.2 Meßaufbau

Sobald auf einer Padplane an sämtliche Footprints die FFC-Kabel angelötet sind, kann sie getestet werden. Zunächst wird auf eine etwa 10 mm hohe, potentialfreie Aluminiumplatte eine Plexiglasplatte variierender Dicke gelegt und auf diese dann die Padplane (siehe Abb. 6.1 und Abb. 6.2). An die FFC-Kabel schließt man das Meßgerät (siehe Kap. 6.2.2) an, was je nachdem, ob die alte oder die neue Version des Meßgeräts verwendet wird, auf verschiedene Weise geschieht.

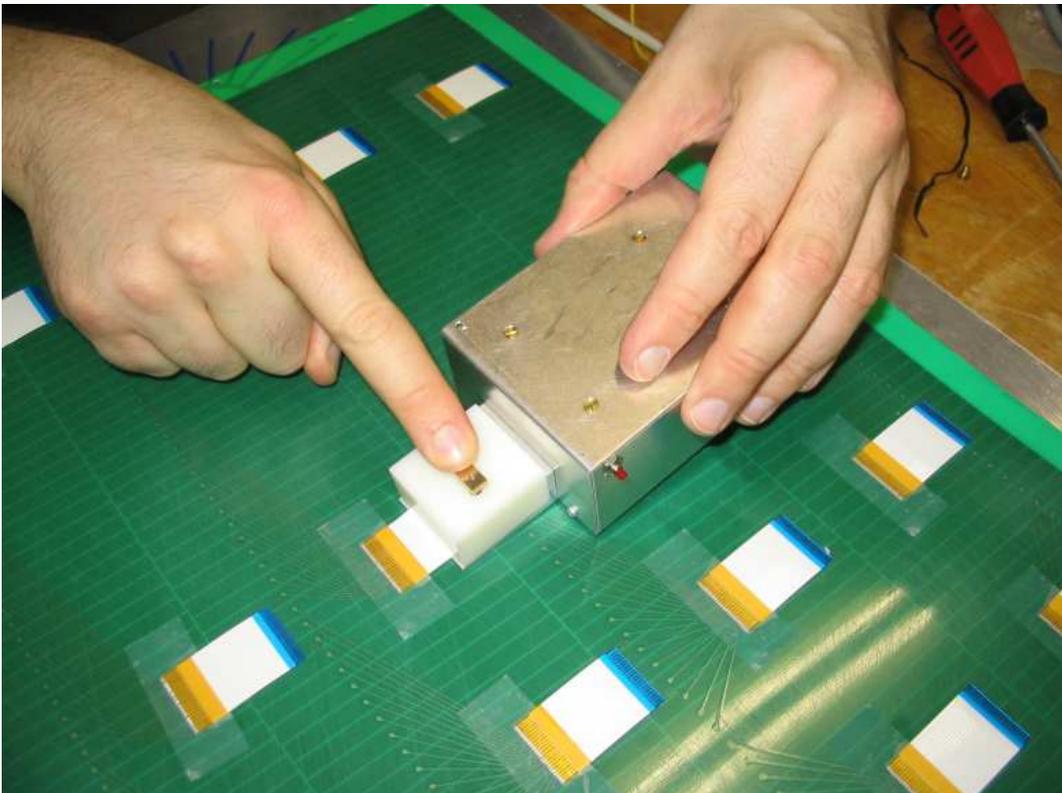


Abbildung 6.1: *Photo des Meßaufbaus bei der Padplane-Messung mit der großen Aluminiumplatte, der Padplane und der neuen Version des Meßgeräts. Zu sehen ist, wie das Meßgerät an das zu testende FFC-Kabel angeschlossen wird und der Bügel zur Herstellung der Meßverbindung gedrückt wird.*

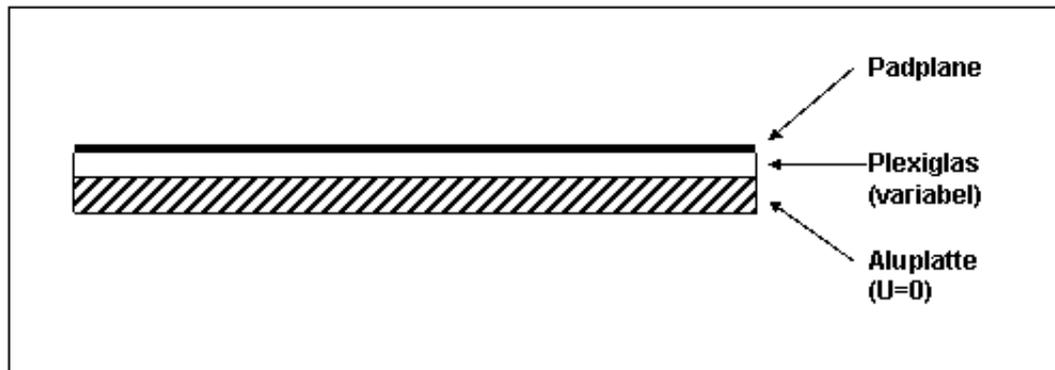


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung des Meßaufbaus bei der Padplane-Messung aus Aluminiumplatte, Plexiglasplatte und Padplane.

Das Meßgerät verbindet man mit einem Windows-PC. Es empfiehlt sich, zuerst mit Hilfe des Windows-eigenen Programms „Hyperterminal“ die Verbindung zum Meßgerät zu testen. Bei erfolgreicher Verbindung kann man damit den Befehlssatz des Gerätes anzeigen lassen und mit Tastatureingaben einzelne Befehle an das Meßgerät schicken.

Die Padplane-Messungen, die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. In der ersten Gruppe wurde eine Padplane auf einer Aluminiumplatte getestet, die nur ca. $1/6$ der Größe der Padplane entsprach. Auch die Plexiglasplatten verschiedener Dicken, die hier zum Einsatz kamen, hatten diese Größe. Das Meßgerät wurde in seiner ersten Version benutzt. In dieser Meßreihe wurde zwar nur eine Padplane getestet, allerdings war diese noch im Prototyp-Stadium, enthielt also noch eine Menge verschiedener Herstellungsfehler. Zusätzlich wurden für das Erfassen aller denkbaren Fehlerarten auch noch von Hand Fehler hinzugefügt.

Ein wesentlicher Grund für den Einsatz der Plexiglasplatten ist die Tatsache, daß die Kapazität eines Plattenkondensators, wie sie hier gemessen wurde, umgekehrt proportional zum Abstand zwischen den Platten ist (siehe Kap. 6.2.1). Die Padplane, die die obere Platte des Kondensators darstellt (die Aluminium-Platte ist die untere), ist nicht völlig eben, so daß man dadurch auftretende Verzerrungen des Meßergebnisses reduzieren muß, indem man entweder den Abstand zwischen beiden Kondensatorplatten durch Verwendung der Plexiglasplatte erhöht, oder die Padplane in dem Bereich des zu testenden FFC-Kabels flach auf die Aluminiumplatte presst.

Bei der zweiten Meßreihe, bei der diesmal 4 Padplanes gemessen wurden, die bereits für Produktionszwecke der TRD-Kammern hergestellt worden waren, kam nun eine Aluminium-Platte der gleichen Größe wie die der Padplane zum Einsatz. Dadurch wurden zusätzliche Verformungen der Padplane beim Aufliegen auf der Aluminiumplatte im Gegensatz zur ersten Meßreihe vermieden. Zwar gab es zu diesem Zeitpunkt noch keine Plexiglasplatte der gleichen Größe, was aber durch besondere Sorgfalt (Anpressen der Padplane auf die Aluminiumplatte mit dafür geeigneten Kunststoffblöcken) in den Messungen ausgeglichen wurde.

Da die Änderungen, die zwischen beiden Meßreihen vorgenommen wurden, nicht dafür gesorgt haben, daß es fundamentale Unterschiede in den Meßresultaten gegeben hat, werden beide Meßreihen in den folgenden Kapiteln auch nicht getrennt voneinander behandelt. Bei jedem der gezeigten Kapazitätsdiagramme wird aber darauf hingewiesen, mit welchem Aufbau es zustande kam. Erst bei zukünftigen Veränderungen des Meßaufbaus wird sich zeigen, ob dadurch wesentliche Verbesserungen vor allem bezüglich der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse möglich sind. In diesem Falle müßten die Ergebnisse dann getrennt von den vorhergehenden besprochen werden.

Es gibt für zukünftige Messungen also noch eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten, die auf eine Verdeutlichung der Meßergebnisse und Vereinfachung der Meßdurchführung hin untersucht werden sollten (siehe Kap. 6.4.1).

6.2.1 Meßprinzip

An den Footprints des zu testenden FFC-Kabels wird ein Meßgerät (siehe Kap. 6.2.2) angeschlossen, das eine Wechselspannung auf den Pads erzeugt und die Kapazität der Pads sowohl gegenüber einem festen Potential (die Aluminiumplatte, s.o.), als auch gegenüber seinen Nachbarn pads mißt (siehe Schaltplan in Abb. 6.3, oberes Bild). Bei der Kapazität C wird von dem anliegenden, gepulsten Stromsignal der Gleichstromanteil entfernt und es bleibt nur der Wechselstromanteil übrig (siehe Abb. 6.3, unteres Bild). Durch einen Widerstand R fließt der Strom zu der Kapazität zwischen dem gemessenen Pad und der Aluminiumplatte (C_{PM}) und zu der Kapazität zwischen dem Pad und seinen Nachbarn pads (C_{PP}).

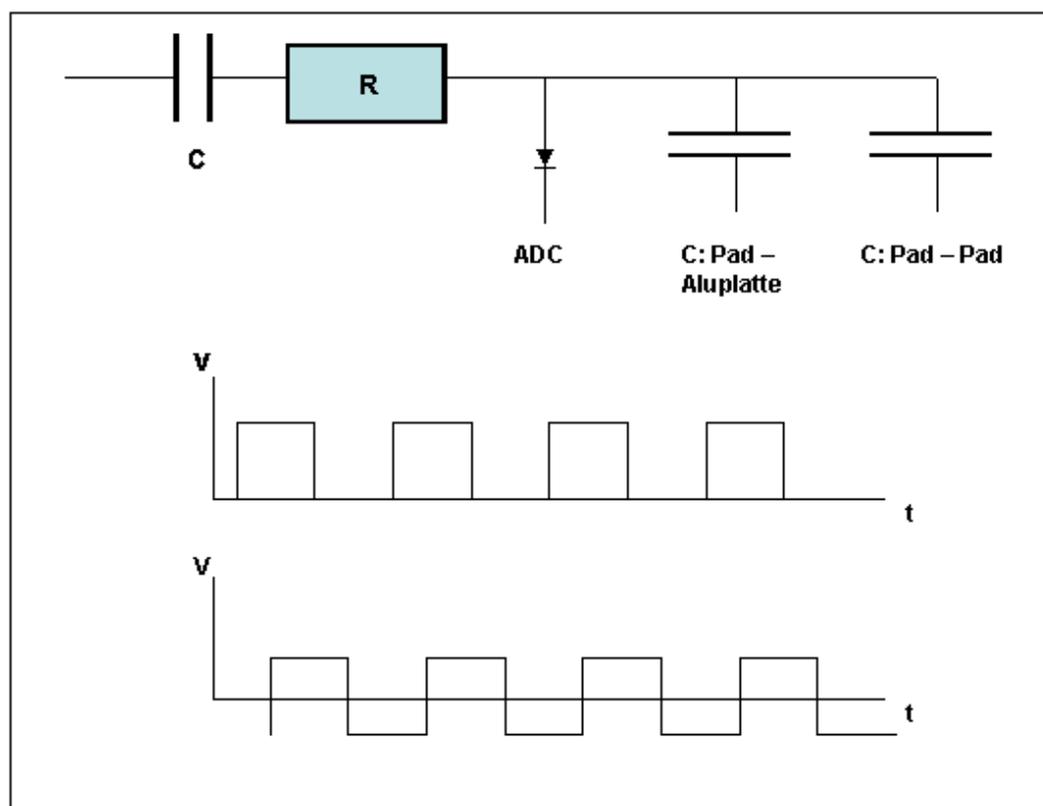


Abbildung 6.3: Schaltplan des Meßgeräts für die TRD-Padplanes (oben) und Umwandlung des gepulsten Gleichstromsignals in Wechselstrom durch die Kapazität C (unten).

Die Kapazität C eines Plattenkondensators berechnet sich als:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \times A}{d} \quad , \quad (6.1)$$

wobei A die Fläche der Platten des Kondensators darstellt, d den Abstand der Platten zueinander und ε_0 die Influenzkonstante (Anmerkung: die relative Dielektrizitätskonstante ε von Luft beträgt 1, daher taucht sie in der Gleichung nicht auf.)

Nun fallen sowohl über dem Widerstand R , als auch über den zwei Kapazitäten C_{PM} und C_{PP} , Spannungen ab, wobei gemäß des Prinzips des Spannungsteilers durch das Abgreifen der Spannung am Analog-Digital-Wandler (Analog Digital Converter, ADC) die über der Summe der Kapazitäten (C_{PM}

+ C_{PP}) abfallende Spannung gemessen wird.

Da es sich um Wechselspannung handelt, muß man den Wechselstromwiderstand (Impedanz) Z an den Kapazitäten ($C_{PM} + C_{PP}$) berechnen gemäß:

$$Z = \frac{1}{j \times \omega \times (C_{PM} + C_{PP})} \quad , \quad (6.2)$$

wobei j der Betrag der Stromdichte ist und ω die Frequenz der Wechselspannung ist.

Das bedeutet, je größer die Kapazitäten ($C_{PM} + C_{PP}$) des gemessenen Pads sind, desto kleiner ist seine Impedanz Z und umgekehrt. Die über diesen Kapazitäten abfallende, am ADC gemessene Spannung U_C berechnet sich als:

$$U_C = U_0 \times \frac{Z}{Z + R} \quad , \quad (6.3)$$

wobei U_0 die vom Meßgerät erzeugte Ausgangsspannung ist.

Daraus folgt nun, daß man bei großen Kapazitäten ($C_{PM} + C_{PP}$) eine kleine Impedanz Z erhält und damit einen kleinen Spannungsabfall U_C am ADC mißt. Aus diesem Grund sind in den Balkendiagrammen von Kap. 6.2.4 und Kap. 6.3 die Balken der kurzgeschlossenen Pads stets niedriger, als die der nicht-kurzgeschlossenen, weil bei den kurzgeschlossenen die Kapazität höher ist.

6.2.2 Meßgerät

Das Meßgerät zum Auffinden der Fertigungsfehler wird an den FFC-Kabeln befestigt. Bei der älteren Version des Meßgeräts geschieht dies über einen am Meßgerät angebrachten FFC-Stecker (siehe Abb. 6.4, linkes Bild). Dieser Stecker ist das Gegenstück zu den FFC-Kabeln und wird normalerweise auf dem MCM-Board verwendet, um die FFC-Kabel, die durch das Backpanel hindurchgeführt werden, an die Elektronik anzuschließen.

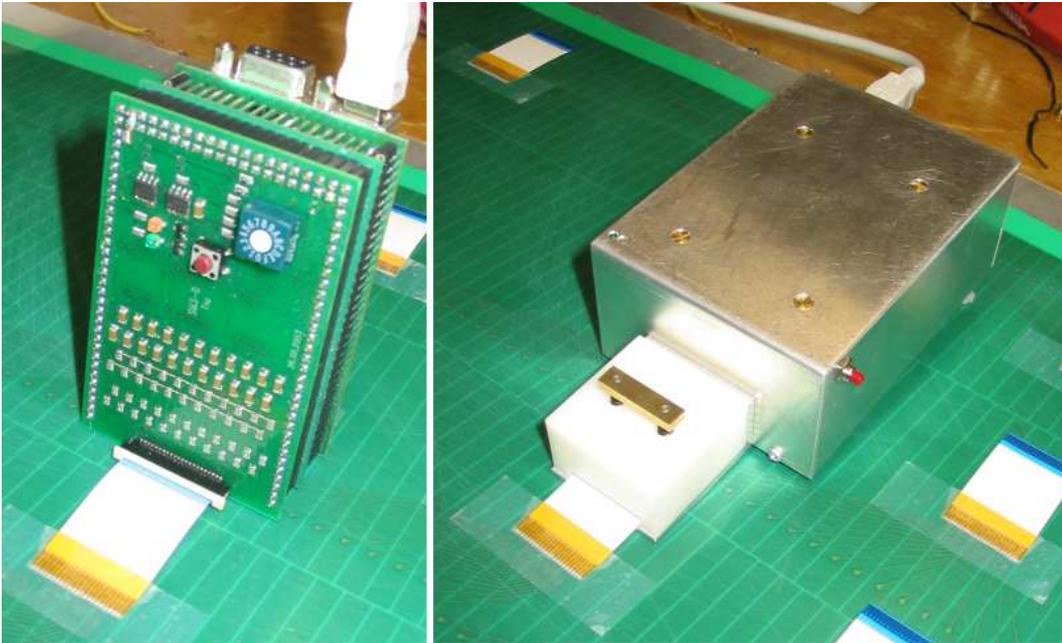


Abbildung 6.4: Photos der älteren (links) und neueren (rechts) Version des Padplane-Meßgeräts.

Das Meßgerät trägt die Bezeichnung „SM3 PAD-Tester“ und wurde von Peter von Walter aus der Elektronik-Werkstatt des Physikalischen Instituts entwickelt. Es ist mit Software-Routinen ausgestattet, über die die Spannungswerte abgefragt werden können, die über den Kapazitäten der einzelnen Pads abfallen (siehe Kap. 6.2.1). Die Routinen ermöglichen außerdem die Kontrolle des auf dem Gerät angebrachten Druckknopfes sowie das Ansteuern der roten und der grünen LED.

Bei der zweiten Meßreihe lag das Testgerät in einer neuen Version vor, bei der im Vergleich zum Original das Gerät nun in einem Aluminium-Gehäuse verbaut ist (siehe Abb. 6.4, rechtes Bild). Der Anschluß an die FFC-Kabel, der vorher relativ umständlich über den FFC-Stecker der Kabel erfolgte, wird nun durch einen einfachen Druckmechanismus hergestellt. Dieser ist allerdings noch nicht ganz ausgereift, was zu Kontaktschwierigkeiten bei dieser Meßreihe führte. Daher wurde ein Stück des für die Clips der Kammer-Erdung (siehe Kap. 7.4.1) verwendeten Antistatikschaums auf die passende Größe zurechtgeschnitten und somit die Messung durchführbar gemacht.

Im Vergleich zum Vorgängermodell dieser zwei Testgeräte, das zum Testen der Padplane-Prototypen benutzt worden war, stellen die neueren Test-

geräte eine wesentliche Weiterentwicklung dar. Das Vorgängermodell kann nur feststellen, ob zwischen zwei oder mehreren Leitungen eines Footprints ein Kurzschluß besteht. Kurzschlüsse zwischen Leitungen benachbarter FFC-Kabel kann dieses Meßgerät nicht auffinden.

6.2.3 Meßsoftware

Die Meßsoftware zur Erkennung der Fertigungsfehler wurde mit LabVIEW geschrieben. Sie dient der Steuerung des Meßgeräts, dem Zurücklesen der Spannungswerte, der Anzeige und der statistischen Auswertung der Meßergebnisse und in Zukunft auch der Fehleranalyse.

Das Meßprogramm als solches soll hier nicht vorgestellt werden, ein Flußdiagramm zum Programm-Ablauf steht am Physikalischen Institut zur Verfügung [LehPP].

Die Kommunikation zwischen LabVIEW und dem Meßgerät basiert auf dem selben Prinzip, wie auch die Kommunikation von LabVIEW mit den Meßgeräten bei den Qualitätstests der TRD-Kammern (siehe Kap. 7.1.4 bei „Kommunikation mit den Meßgeräten“).

6.2.4 Messungen der Padkapazitäten

In den folgenden Kapiteln werden Balkendiagramme abgebildet, in denen von einem LabVIEW-Programm die Kapazitätsmessungen der Pads an einem Footprint wiedergegeben werden. Die Abszissen der Balkendiagramme bestehen aus 22 Einträgen (mit den Nummern 0 bis 21), die den an den Footprint angeschlossenen Leitungen entsprechen. Da es sich bei den jeweils zwei äußersten Leitungen (die Nummern 0 und 1 sowie 20 und 21) um die paarweise miteinander kurzgeschlossenen handelt, sind für die Messungen der Pads nur die mittleren 18 Leitungen bzw. deren Balken im Diagramm von Interesse. Die äußeren sind für die Messungen der Footprints und für die Besprechungen der Ergebnisse nicht relevant. Der Höhenunterschied zwischen ihnen und den restlichen Balken hängt davon ab, ob und wenn ja, mit welcher Dicke einer Plexiglasscheibe gemessen wird.

Die Ordinate der Balkendiagramme gibt die Spannung, die über den Kapazitäten abfällt, in den korrekten Proportionalitäten wieder, die numerischen Werte sind aber von der Elektronik des Meßgeräts vorgegeben (0 bis 1023, 10 Bit).

Leermessung und fehlerfreier Footprint

Die erste Messung, die beim Testen einer Padplane durchgeführt werden sollte, ist eine Leermessung, bei der kein FFC-Kabel an das Meßgerät angeschlossen ist. Das Ergebnis dieser Messung ist im oberen Balkendiagramm der Abb. 6.5 zu sehen. Da die Leitungen des Meßgeräts nur eine sehr niedrige Kapazität im Vergleich zu den Pads der Padplane haben, erhält man für sie gemäß Gleichung 6.2 eine große Impedanz und daher gemäß Gleichung 6.3 einen großen Spannungsabfall über diesen Kapazitäten. Da es eben diese Spannungswerte sind, die im Balkendiagramm abgebildet werden, folgt daraus, daß deren Niveau höher ist, als das der Balken im unteren Diagramm von Abb. 6.5. Hier wurde nun das Meßgerät an einem fehlerfreien FFC-Kabel angeschlossen, die Padplane lag dabei auf der großen Aluminium-Platte auf und die Messung wurde, ebenso wie die Leermessung, mit der neuen Version des Meßgeräts durchgeführt. Im Vergleich zum oberen Diagramm fallen dabei zwei Dinge auf:

Zum einen ist auch das Niveau der nicht mit Pads verbundenen, jeweils äußersten zwei Leitungen im Vergleich zum oberen Diagramm abgesunken, da nun an diesen Leitungen noch zwei Leiterbahnen auf der Padplane hängen. Der Hauptgrund dafür ist aber, daß neben einer Messung der Kapazitäten der Leitungen des Meßgeräts untereinander nun noch die Kapazitäten gegenüber der Aluminium-Platte gemessen werden, auf der die Padplane bei dieser Messung auflag.

Zum anderen ist deutlich der Unterschied zwischen den an den Pads der Padplane angeschlossenen Leitungen und den nicht-angeschlossenen Leitungen am Rand zu erkennen. Die höhere Kapazität der Pad-Leitungen führt zu niedrigeren Spannungswerten.

Die Variationen in den Höhen der Balken des unteren Diagramms lassen sich mit denen der Leermessung vergleichen. Allerdings wurde hier sehr sorgfältig die Stelle um den getesteten Footprint mit zwei Kunststoffklötzen auf die Aluminiumplatte gepreßt, um Schwankungen der Kapazität aufgrund der Unebenheit der Padplane zu vermeiden.

Bei Messungen mit einer Plexiglasscheibe ab einer Dicke von 1 mm aufwärts ist dieser Aufwand bei der Meßdurchführung nicht mehr zwingend notwendig, allerdings verbessert auch hier gleichmäßiger Druck auf die Padplane die Deutlichkeit des Meßergebnisses (siehe Abb. 6.7).

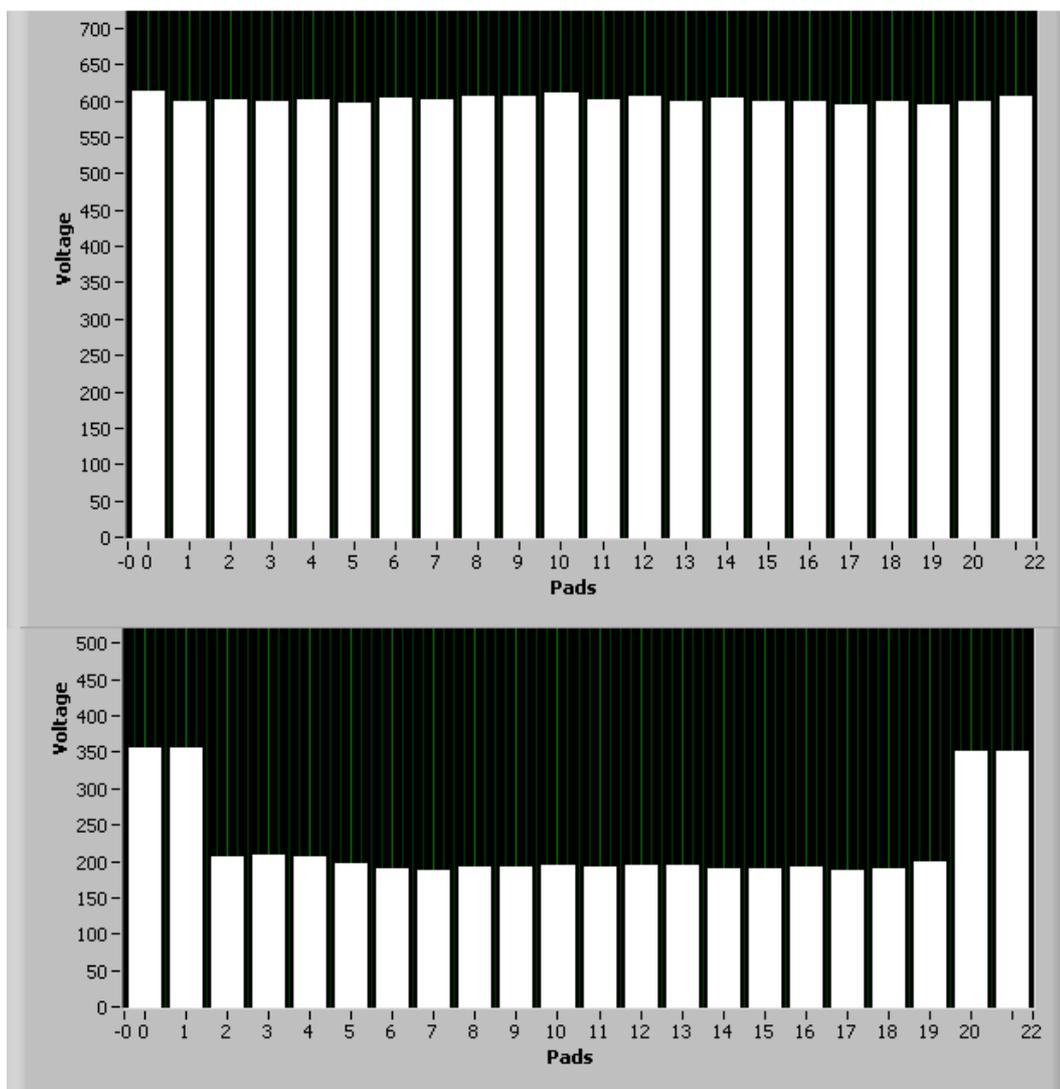


Abbildung 6.5: Das obere Balkendiagramm zeigt das Meßergebnis des Testgeräts, an das kein FFC-Kabel angeschlossen ist. Das untere zeigt das Meßergebnis eines fehlerfreien Footprints.

Erdung der Aluminium-Platte

Die Messung der Pad-Kapazitäten gegenüber einer Aluminium-Platte brachte Fortschritte gegenüber den Test-Messungen ohne diese Platte, bei denen nur die Kapazitäten der Pads untereinander gemessen werden konnten. Diese Testmessungen werden hier nicht dokumentiert.

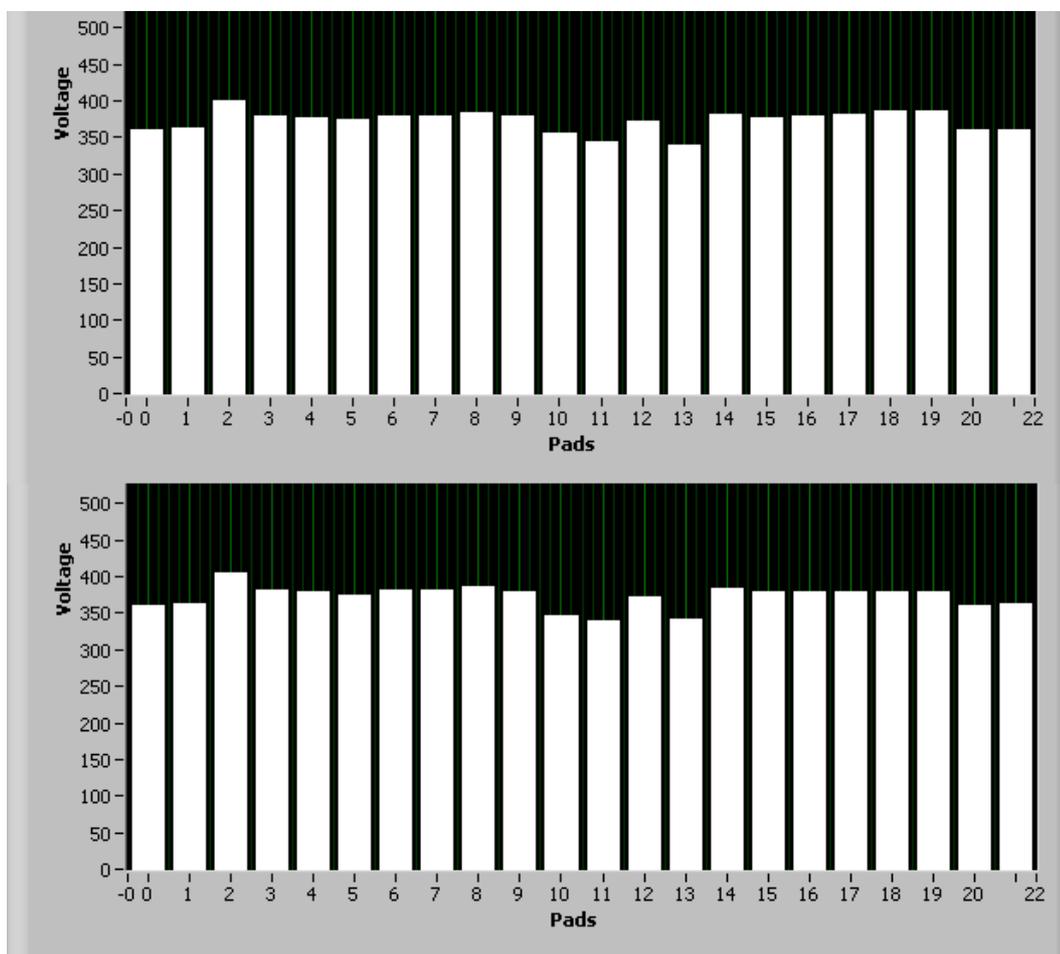


Abbildung 6.6: Gemessen wurde ein fehlerfreier Footprint mit (oberes Diagramm) und ohne Erdung der Padplane. Wie zu sehen ist, ergibt sich dabei kein Unterschied in den Meßergebnissen, der über die minimalen Schwankungen, die das Meßgerät selbst produziert, hinausgehen.

Was nun die Aluminium-Platte angeht, wurde untersucht, ob die Erdung der Platte einen Einfluß auf das Meßergebnis hat. Die Messung erfolgte mit der kleinen Aluminium-Platte und der älteren Version des Meßgeräts. Außerdem befand sich zwischen der Aluminium-Platte und der Padplane zusätzlich eine 2 mm dicke Plexiglasscheibe, die mögliche Variationen im Meßergebnis aufgrund der Unebenheiten der Padplane ausgleichen sollte.

In Abb. 6.6 wurde für einen fehlerfreien Footprint eine Messung durchgeführt, bei der die Aluminium-Platte geerdet war (oberes Diagramm) und eine, bei der sie nicht geerdet war (unteres Diagramm). Wie beim Vergleich

der beiden Diagramme deutlich wird, spielt es keine Rolle, ob die bei den Kapazitätsmessungen eingesetzte Aluminium-Platte geerdet ist, oder nicht. Der Grund dafür ist, daß die nicht-geerdete Platte isoliert ist, d.h., daß keine elektrischen Ladungen auf sie gelangen können.

Variierende Abstände zwischen Padplane und Aluminium-Platte

Die Bedeutung des Abstandes zwischen der zu messenden Padplane und der Aluminium-Platte, auf der sie aufliegt, geht aus Gleichung 6.1 hervor. Aber abgesehen von der Größe der Kapazität an sich wird durch den Abstand auch noch die Varianz der Meßergebnisse beeinflusst, die sich bei wiederholten Messungen desselben FFC-Kabels einstellt. Da, wie oben bereits erwähnt, die Padplane nicht völlig eben ist, kommt dem Ausgleich dieser Unebenheiten eine wichtige Rolle bei der Erzielung eines möglichst eindeutigen Ergebnisses zu.

Um dies zu illustrieren, wurde dasselbe, fehlerfreie FFC-Kabel in 4 verschiedenen Abständen der Padplane zu der Aluminium-Platte gemessen (siehe Abb. 6.7). Dabei kam die kleine Aluminium-Platte und die älteren Version des Meßgeräts zum Einsatz, die alternierenden Abstände wurden durch Plexiglasscheiben verschiedener Dicken erzielt.

Von oben nach unten aufgetragen sind die Meßergebnisse bei einer Plexiglasdicke von 10 mm, 5 mm, 1 mm und schließlich ohne die Plexiglasscheibe. Bei der Messung ohne die Plexiglasscheibe wurde die Padplane nur durch die Plastikfolie (Dicke ca. $50\ \mu\text{m}$), die über die Seite mit den Kupferpads geklebt ist, von der Aluminiumplatte getrennt. Der Abstand zwischen beiden war also nicht auf Null reduziert. Die Signalhöhe der nicht mit Pads verbundenen, jeweils äußersten zwei Leitungen bleibt bei abnehmendem Abstand der Padplane zur Aluminium-Platte konstant (Wert etwa 368). Ganz anders ist es dagegen für die mit den Kupfer-Pads verbundenen Leitungen. Deren Kapazitäten nehmen zu mit abnehmendem Abstand zur Aluminium-Platte und damit nehmen ihre Signalhöhen ab.

Zwar wurde bei jeder der Messungen die Padplane auf die darunter liegende Platte gedrückt, auffällig ist aber, daß die Effizienz dieses Drückens erst bei Plexiglasdicken von weniger als 1 mm wirklich entscheidend für das Meßergebnis wird. Bei einem solchen Meßergebnis, wie es im untersten Diagramm gezeigt ist, wird normalerweise die Lage der Kunststoffklötze korrigiert, mit denen die Padplane auf die darunter liegende Platte gepreßt wird. (Bei gleichmäßigem Druck erhält man dann ein Meßergebnis wie im unteren Diagramm von Abb. 6.5.) Dies wurde hier absichtlich nicht getan, um zu zeigen, wie groß die Variationen trotz des Pressens noch sein können.

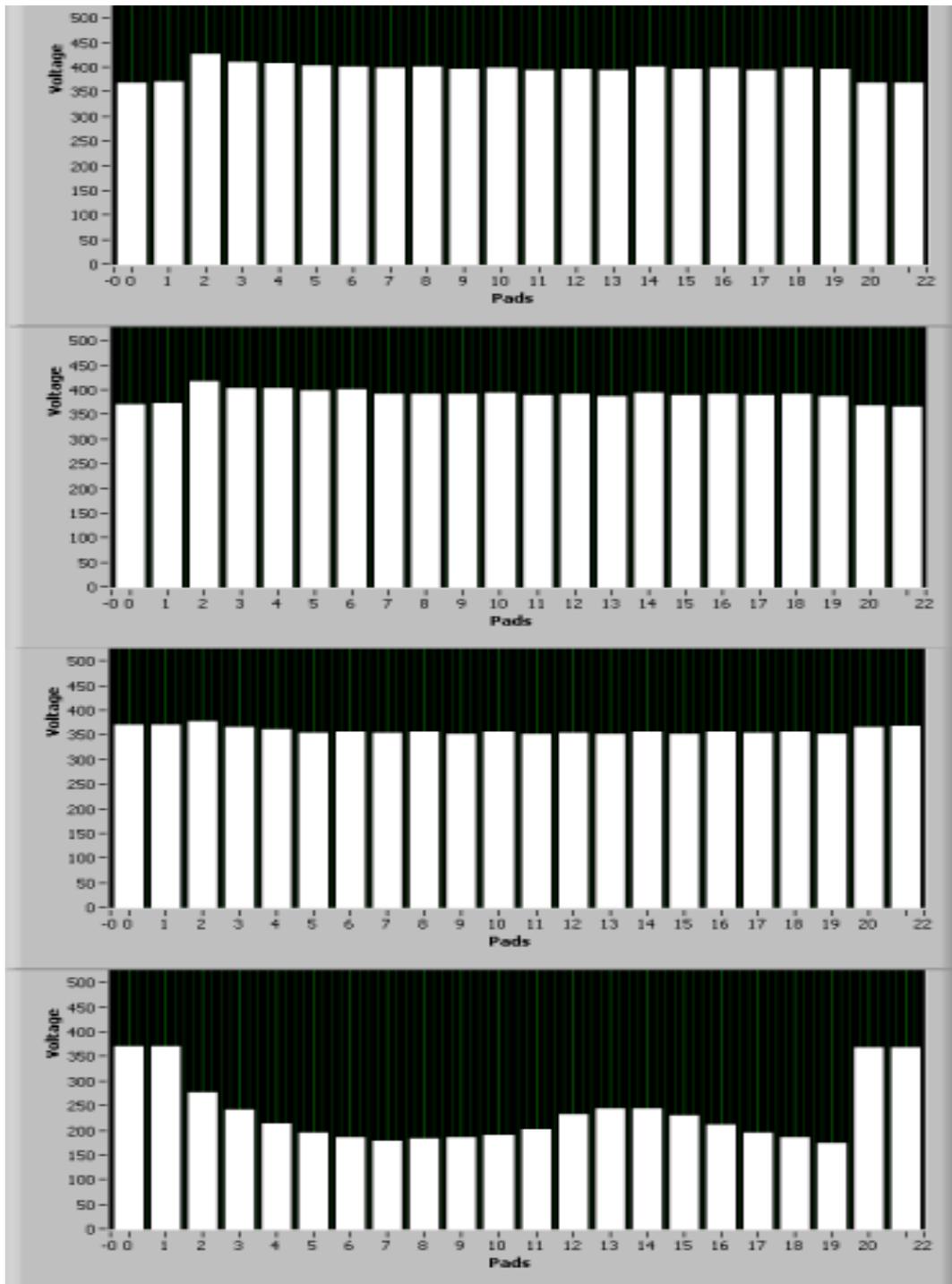


Abbildung 6.7: Gemessen wurde ein fehlerfreier Footprint auf der kleinen Aluminiumplatte bei verschiedenen Plexiglasdicken (von oben: 10, 5, 1 mm und kein Plexiglas).

Bei den Abständen ab 1 mm aufwärts dagegen reicht schon ein durchschnittlich präziser Druck aus, um vernünftige Ergebnisse zu erzielen.

Um in Zukunft mit geringerem Aufwand verlässliche Ergebnisse zu erhalten, sollten einige Verbesserungsvorschläge bezüglich der Durchführung der Messungen auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden (siehe Kap. 6.4).

6.3 Meßergebnisse

Auf der Vorderseite der Padplane befinden sich die Kupferpads, sie bildet das dem Radiator gegenüberliegende Ende der Driftkammer. Auf ihrer Rückseite befinden sich die Footprints, an die die FFC-Kabel angeschlossen werden, die durch das Backpanel zum MCM-Board führen (siehe Kap. 3.2.3). Für beide Seiten der Padplane gibt es unterschiedliche Fehleranfälligkeiten, die in den folgenden Unterkapiteln besprochen werden.

Die verschiedenen Fertigungsfehler der Vorder- und Rückseite werden hier nicht getrennt von den Padplanes, die untersucht worden sind, besprochen. Für die Untersuchungen der Padplanes sind die Fertigungsfehler nur von prinzipiellem Interesse. Im Gegensatz zum Testen der TRD-Kammern (siehe Kap. 7) oder zur Untersuchung verschiedener Radiatormaterialien (siehe Kap. 5) wird hier nicht auf einzelne Padplanes abgezielt. Es gibt auch keine in dem Sinne unterschiedlichen Padplanes, daß sie sich außer von der Größe und damit der Anzahl der Footprints her unterscheiden würden. Stattdessen kommt es bei der Untersuchung der Padplanes nur darauf an, auf die immer gleiche Art nach Fehlern zu suchen, diese zu beheben und dann mit der nächsten Padplane fortzufahren.

6.3.1 Vorderseite der Padplane

Auf der Vorderseite befindet sich die Anordnung der Kupferpads, über die eine dünne Plastikfolie gezogen ist, die das Oxidieren des Kupfers an der Luft verhindert. Da die Padplanes noch nicht in der gewünschten Qualität produziert werden, wurden während der Messungen diverse Fehler festgestellt, die alle auf dieselbe Ursache zurückzuführen sind, sich aber dennoch in den Diagrammen des Testprogramms unterschiedlich bemerkbar machen.

Gemeinsam an allen Fehlern ist ein ungewollter Kurzschluß zwischen zwei oder mehreren Pads. Die Ursache für diesen Kurzschluß liegt darin, daß die

Grenze zwischen zwei Pads von einem Stück Kupfer überbrückt wird, das oft so klein ist, daß es nur mit der Lupe erkennbar wird. Dieses Kupferstück befindet sich aufgrund eines Belichtungsfehlers oder der Verschmutzung der Padplane zwischen den kurzgeschlossenen Pads. Die $250\ \mu\text{m}$ schmale Grenze zwischen diesen Pads, die nun überbrückt ist, besteht lediglich aus dem Glasfaser-Material der Padplane selbst, da durch das Ätzverfahren (siehe Kap. 3.2.3) die Kupferschicht, die zwischen den Pads lag, entfernt wurde.

Es können zwei oder mehrere Pads desselben Footprints verbunden sein, oder zwei, die zu benachbarten Footprints derselben Reihe gehören, oder schließlich auch zwei Pads, die zu untereinander liegenden Footprints gehören. Dabei kam es bei den untersuchten Padplanes auch vor, daß mehrere Fehler kombiniert auftraten, z. B. zwei Pads desselben Footprints, die miteinander verbunden waren und eines der Pads war außerdem mit einem Pad des in der Reihe darunter liegenden Footprints kurzgeschlossen.

Fehler, die auf der Vorderseite der Padplane auftreten, behebt man prinzipiell dadurch, daß man die ungewollte Verbindungsstelle zwischen den Pads mit einem Skalpell wegkratzt. Dazu muß aber die Plastikfolie um die Kurzschlußstelle entfernt werden, da sonst ein sauberes Arbeiten nicht möglich ist. Da die Kupferpads sehr korrosionsempfindlich sind, sollte nach dieser Prozedur die offene Stelle der Padplane mit einem Stück Klebefolie wieder verschlossen werden.

Kurzschluß der Pads innerhalb eines Footprints

Wie im Kap. 6.2.2 beschrieben wurde, wird das durch das Meßgerät ausgelesene Spannungssignal umso kleiner, je größer die an eine Leitung angeschlossene Kapazität ist. Daher beobachtet man bei diesem Fehler das Absinken der Balken im Diagramm (siehe Abb. 6.8), da nun durch den Kurzschluß mit der gemessenen Leitung nicht nur ein Pad, sondern zwei oder mehrere verbunden sind. (Gemessen wurde hier mit der kleinen Aluminium-Platte, der 2 mm dicken Plexiglasscheibe und der älteren Version des Meßgeräts.) Die Signalhöhe sinkt dabei umso stärker ab, je mehr Pads durch Kurzschlüsse verbunden sind. Daher liegen im Diagramm die Balken mit den Nummern 3, 4 und 5, bei denen 3 Pads über einen Kurzschluß verbunden sind, niedriger, als die Balken 18 und 19, bei denen es sich nur um einen Kurzschluß zwischen 2 Pads handelt. Die Signalhöhe in der Anzeige ändert sich allerdings nicht linear, was daran liegt, daß die Spannung beim ADC des Meßgeräts abgegriffen wird, der als Spannungsteiler in der Schaltung wirkt (siehe Gleichung 6.3).

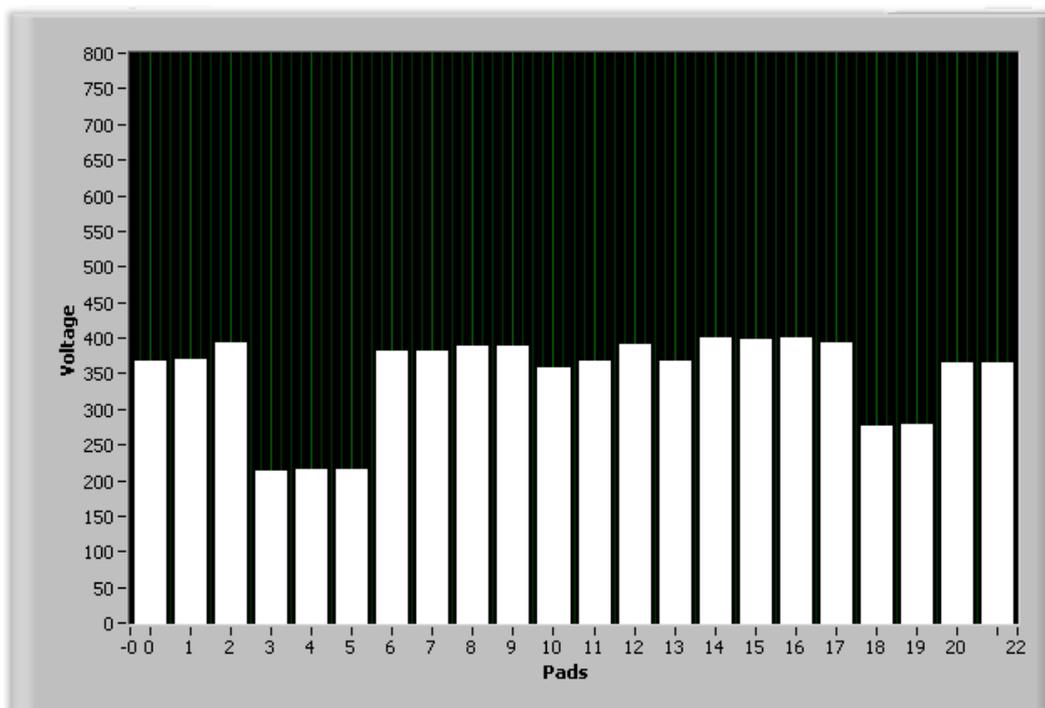


Abbildung 6.8: Kurzschluß von 2 Pads (bei den Leitungen 18 und 19) und 3 Pads (Leitungen 3, 4 und 5) eines Footprints. Das Niveau der Balken bei dem Kurzschluß von 3 Leitungen ist niedriger, da hier die Kapazität größer ist.

Ein anderes, wichtiges Merkmal dieses Produktionsfehlers ist, daß die Signalhöhen der kurzgeschlossenen Pads weitgehend identisch sein müssen, da für alle diese Pads aufgrund des Kurzschlusses dieselbe Kapazität gemessen wird. Außerdem müssen die Balken im Display direkt nebeneinander liegen, da bei Kurzschlüssen immer nur benachbarte Pads betroffen sind.

Kurzschluß der Pads nebeneinander liegender Footprints

Wenn die Padplane auf der Plexiglas- bzw. Aluminiumplatte im Bereich des zu testenden Footprints plan aufliegt, kann es sich bei einem *einzelnen*, tieferliegenden Signal nur um einen Kurzschluß zu einem Pad eines anderen Footprints handeln. In der Abb. 6.9 ist zwar ein Kurzschluß zwischen zwei Pads untereinander- und nicht nebeneinanderliegender Footprints zu sehen, die prinzipielle Erscheinungsform ist aber für beide Produktionsfehler dieselbe.

Dies ist eine der Fehlerkonstellationen, die von dem alten Meßgerät, das nur Kurzschlüsse innerhalb eines Footprints finden kann, nicht hätte aufgedeckt werden können.

Die Leitung des getesteten Footprints, dessen Pad mit dem Pad des daneben liegenden Footprints verbunden ist, hat eine gegenüber den anderen Pads erhöhte Kapazität, d. h. sie taucht im Spektrum als ein einzelnes, niedrigeres Signal auf, das sich am äußersten linken oder rechten Rand (ohne die jeweils 2 äußeren, kurzgeschlossenen Leitungen zu berücksichtigen) befinden muß. Die Pads nebeneinander liegender Footprints teilen sich mit ihrer Längsseite eine viel größere Grenze (durchschnittliche Länge 85 mm), als die Pads untereinander liegender Footprints mit der schmalen Seite der Pads (durchschnittliche Länge 7,4 mm). Daher ist es bei einem Signalabfall am äußersten Rand des Spektrums wahrscheinlich, daß es sich dabei um einen Kurzschluß zwischen Pads nebeneinander liegender Footprints handelt.

Sollte sich dies bei einer Überprüfung der Grenzlinie zwischen den in Frage kommenden Pads als falsch herausstellen, kommt nur ein Kurzschluß zwischen Pads untereinanderliegender Footprints in Frage (siehe nächstes Unterkapitel).

Kurzschluß der Pads untereinander liegender Footprints

Das Balkendiagramm der Pads zeigt bei diesem Fehler einen einzelnen Wert, dessen Niveau niedriger ist, als das der anderen, woraus eine erhöhte Kapazität folgt (siehe Abb. 6.9). (Gemessen wurde hier mit der kleinen Aluminium-Platte, einem Blatt Papier (0,1 mm Dicke) und der älteren Version des Meßgeräts.)

Wenn sich das Signal *nicht* am Rand des Diagramms befindet, was eher auf einen Kurzschluß zwischen Pads benachbarter Footprints hindeuten würde, muß es sich hierbei um einen Kurzschluß handeln zwischen dem Pad, das durch das Signal angezeigt wird und dem Pad, das zu dem Footprint über oder unter dem getesteten Footprint gehört.

Auch diese Fehlerkonstellation konnte von dem Vorgängermodell des Meßgeräts nicht aufgedeckt werden.

6.3.2 Rückseite der Padplane

Auf der Rückseite der Padplane werden die FFC-Kabel an die Footprints gelötet, von denen wiederum Leiterbahnen zu den 18 mit dem Footprint verbundenen Kupferpads führen (siehe Abb. 6.1 in Kap. 6.2).

Hier kann es entweder zu einem Kurzschluß zwischen den Leitungen an der Lötverbindung von Footprint und FFC-Kabel kommen, oder zu einer unterbrochenen Leitungsbahn zwischen einem Pad und dem Footprint.

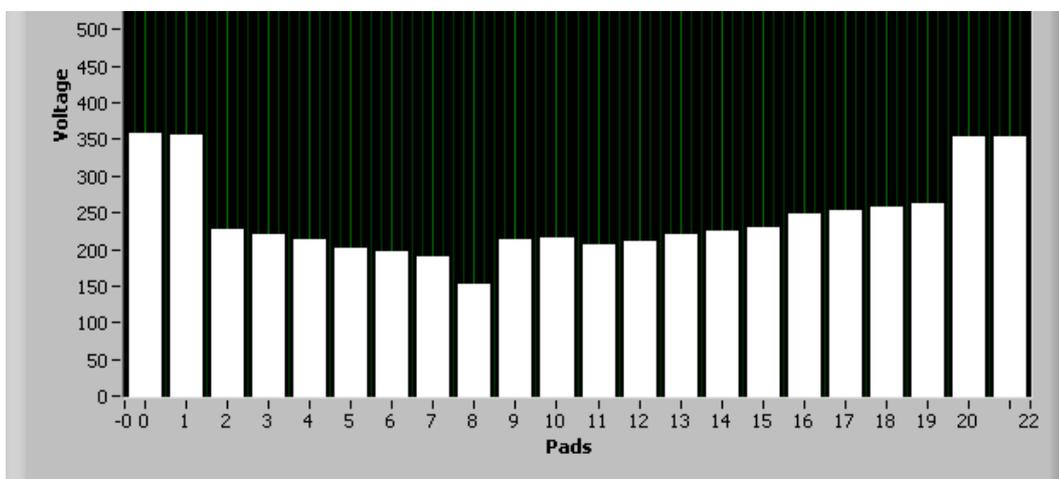


Abbildung 6.9: Kurzschluß von 2 Pads untereinanderliegender Footprints, daher hat in diesem Diagramm nur ein Pad (Nummer 8) eine auffällig geringere Höhe.

Kurzschluß der Leitungen eines Footprints

Beim Anlötvorgang der FFC-Kabel an die Footprints einer Padplane kann es vorkommen, daß durch zu viel Lötzinn oder durch zu niedrige Löttemperatur das Lötzinn einen Kurzschluß zwischen einer oder mehrerer Pad-Leitungen verursacht. Die Erscheinungsform dieses Produktionsfehlers in einem Balkendiagramm ist die gleiche wie die von einem Kurzschluß der Pads innerhalb eines Footprints auf der Vorderseite der Padplane (siehe Abb. 6.8 in Kap. 6.3.1). Da man anhand der Kapazitätsmessungen diese beiden Fehler nicht voneinander unterscheiden kann, muß hier von Hand überprüft werden, auf welcher Seite der Padplane der Fehler zu finden ist.

Man unterbricht diesen Kurzschluß, indem man zunächst die Schutzfolie abzieht, die über der Verbindung zwischen dem abisolierte Ende des FFC-Kabels und dem Footprint angebracht ist. Dann erhitzt man diejenigen Leitungen an dem abisolierten Ende des FFC-Kabels auf ca. 400°C, die zu den kurzgeschlossenen Pads führen. Dadurch wird das Lötzinn, das diese unerwünschte Verbindung hergestellt hatte, wieder verflüssigt und zieht sich auf die Kontaktstelle zwischen FFC-Kabel und Footprint zurück, so daß die Kurzschlußverbindung unterbrochen ist.

Das führt man bei allen Leitungen durch, die an dem Kurzschluß beteiligt sind, wartet, bis sich die Lötstellen abgekühlt haben und überklebt die Kontaktstelle erneut mit der Schutzfolie.

Unterbrechung der Leitungsbahn zwischen Pad und Footprint

Ein weitere Fehlermöglichkeit ist, daß die Leiterverbindung eines Pads zum Footprint unterbrochen ist. Das kam zwar bei den bisher getesteten 6 Padplanes noch nicht vor, ist aber bei der Gesamtzahl von 1512 Padplanes, die für den TRD-Detektor benötigt werden, durchaus vorstellbar. Daher wurde dieser Fehler herbeigeführt, indem auf der Test-Padplane manuell eine Leitung unterbrochen und das Ergebnis mit dem Padplane-Testprogramm untersucht wurde (siehe Abb. 6.10). (Gemessen wurde hier mit der kleinen Aluminium-Platte, der 5 mm dicken Plexiglasscheibe und der älteren Version des Meßgeräts.)

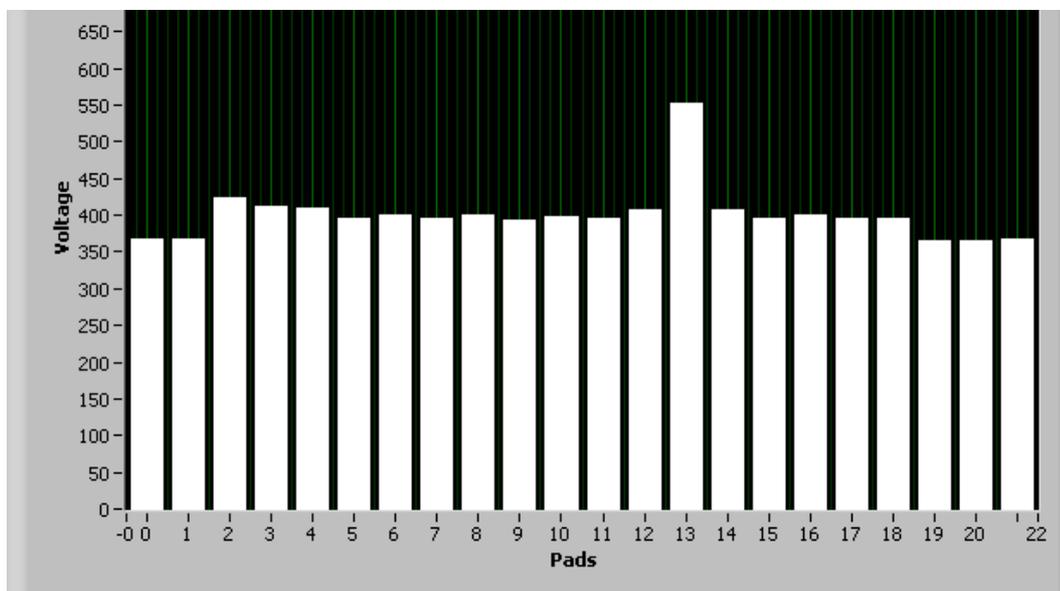


Abbildung 6.10: Das Pad mit der unterbrochenen Leitungsbahn (Balken Nummer 13) hat eine im Vergleich zu den anderen Pads reduzierte Kapazität, daher erhält man hier ein höheres Spannungssignal.

Der Balken mit der Nummer 13 gehört zu dem Pad, dessen Leitungsbahn unterbrochen ist. Sein Signalwert ist höher als der der anderen Pads, da seine Kapazität kleiner ist, dadurch ist seine Impedanz größer und somit fällt bei der Messung mehr Spannung über seiner Kapazität ab.

Um diesen Fehler zu beheben, muß man die Unterbrechung der Leiterbahn zwischen dem Pad und dem Footprint lokalisieren und mit einem Lötvorgang verschließen.

6.4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der hier besprochenen Messungen haben eindeutig gezeigt, wie wichtig es ist, die Padplanes vor dem Einbau in die TRD-Kammern gründlichen Tests zu unterziehen. Auf etwa jeder zweiten der bisher geprüften Padplanes waren Verarbeitungsfehler zu finden. Sowohl die Vorderseiten der Padplanes, als auch die Rückseiten, sind fehleranfällig und müssen überprüft werden.

Aufgrund der Tatsache, daß bei beiden hier durchgeführten Messungen das Meßergebnis stark davon abhing, wie gleichmäßig die Padplane auf die Aluminium- bzw. Plexiglasplatte gedrückt wurde und wie effektiv der Druck auf den Druckknopf des Meßgeräts erfolgte, sind noch Verbesserungen des Meßaufbaus notwendig. Aus den genannten Gründen waren für die Messungen der meisten FFC-Kabel einer Padplane stets zwei Personen nötig.

6.4.1 Meßaufbau

Die Verwendung der großen Aluminium-Platte, die nun gewährleistet, daß die Padplane vollständig aufliegen kann, ist nur ein erster Schritt. Für zukünftige Messungen sollten auch Plexiglasscheiben dieser Größe mit den Dicken von 0,5 und 1 mm verwendet werden, die bei der 2. Meßreihe noch nicht zur Verfügung standen. Dieser Meßaufbau wird daraufhin getestet werden, ob die Schwankungen in den Ergebnissen, die von der Unebenheit der Padplane ausgehen, weniger deutlich ausfallen. Zugleich soll aber der Signalunterschied zwischen fehlerfreien und kurzgeschlossenen Pads im Wesentlichen erhalten bleiben.

Sollte der gewünschte Effekt nicht eintreten, wird als nächstes der im ALICE-Labor befindliche Vakuumentisch für die Messungen getestet werden. Dabei soll sich herausstellen, ob der vom Vakuumentisch erzeugte Unterdruck wirklich in der Lage ist, den Abstand der Padplane zum Tisch in ausreichender Gleichmäßigkeit zu regulieren, so daß kein störender Einfluß mehr davon auf die Kapazitätsmessungen ausgeht.

Sollte der Vakuumentisch nicht den gewünschten Erfolg zeigen, so wird man wahrscheinlich bei der Anordnung mit der Aluminium- und der Plexiglasplatte bleiben müssen. Hierbei wäre aber auch schon ein Erfolg erzielt, wenn die Padplane nicht noch zusätzlich mit den Kunststoffblöcken unmittelbar um den getesteten Footprint herum niedergedrückt werden müßte. Es hat sich gezeigt, daß je nach Lage und Druck der Plastikklötze die Messung im Ergebnis variiert wird, die Messung als solche erschwert wird und zumindest für einen Teil der Footprints zwei Personen zum Durchführen der Tests notwendig sind.

6.4.2 Meßgerät

Das Meßgerät hat die gestellten Anforderungen erfüllt, wenn auch in einigen Details noch nachgearbeitet werden muß. Der Fortschritt im Vergleich zum Vorgänger, der nur Kurzschlüsse innerhalb eines Footprints auffinden konnte, ist jedenfalls beachtlich und auch zwingend notwendig, um alle Fehlertypen finden zu können.

Verbessern ließe sich noch die Verbindungsmechanik zwischen dem in dem Aluminium-Gehäuse befindlichen Meßgerät und den FFC-Kabeln der Padplane. So mußte, um überhaupt die Messungen mit diesem Meßgerät durchführen zu können, der Kontaktschaum, der die freiliegenden Anschlußleitungen der FFC-Kabel an die im Meßgerät vorhandenen Leitungsbahnen presst, durch weicherer Material ersetzt werden. Dies stellt zur Zeit eine noch nicht optimale Lösung dar, da sowohl mit recht großem Druck, als auch möglichst gleichmäßig, auf den Bügel gedrückt werden muß, um die Verbindung herzustellen.

Außerdem wird demnächst der Aluminium-Vorbau des Meßgeräts, der die eben genannte Verbindungsstelle zwischen FFC-Kabel und Meßgerät enthält, durch eine Konstruktion aus Kunststoff ersetzt, um Feldverzerrungen der Ergebnisse der Kapazitätsmessungen durch das Aluminium auszuschließen.

6.4.3 Meßsoftware

Das LabVIEW-Programm, das für den Betrieb, die Anzeige und die Auswertung der Messungen erstellt wurde, erfüllt zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Diplomarbeit bereits alle Kernfunktionen, die für diese Messung benötigt werden.

Da zwar bis jetzt alle Padplanes von Physikern des Physikalischen Instituts vermessen wurden, dies aber in Zukunft nicht mehr nur der Fall sein wird, steht als nächstes die Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus an, der anhand der an den Pads eines Kabels gemessenen Kapazitätswerte selbstständig ermittelt, ob ein Fehler vorliegt und wenn ja, um was für eine Art von Fehler (siehe Kap. 6.3) es sich handeln könnte. Dies wird dann von der Software am Monitor angezeigt werden, woraufhin als nächstes von einem erfahrenen Mitarbeiter der Fehler durch eigenhändige Untersuchung der Padplane verifiziert und anschließend behoben werden muß.

Voraussetzung für eine effektives Funktionieren des Algorithmus ist aber nach wie vor, daß zunächst einmal der große Variationsspielraum bei verschiedener mechanischer Durchführung der Messungen reduziert wird, indem die

hier bezüglich des Meßaufbaus und des Meßgeräts vorgeschlagenen Verbesserungen durchgeführt werden.

Die nächste Version der Testsoftware wird außerdem in einem graphischen Raster anzeigen, welche FFC-Kabel bereits gemessen wurden und welche noch überprüft werden müssen. Nach einer Messung ohne Fehler wird zur Bestätigung die Meldung ausgegeben, daß die Padplane fehlerfrei ist und dieses Ergebnis, zusammen mit der Nummer der Padplane, in der Detektordatenbank (siehe Kap. 8) gespeichert.

Kapitel 7

Qualitätstests der TRD-Kammern

Bevor die Kammern des TRD in die Supermodule eingebaut und diese im ALICE-Detektor montiert werden können, müssen sie getestet werden, um wichtige physikalische Kenngrößen zu ermitteln, aber vor allem auch, um eventuelle Produktionsfehler aufdecken und beheben zu können. Die dafür nötigen Messungen werden gesteuert und ausgewertet durch ein in LabVIEW geschriebenes Kammermeßprogramm (siehe Kap. 7.1.4). Nach Abschluß einer Messung werden von diesem Programm die Meßergebnisse in die DCDB-Datenbank (siehe Kap. 8) eingetragen.

In den folgenden Unterkapiteln werden zuerst die für das Testsystem verwendeten Geräte beschrieben und anschließend kurz das Kammermeßprogramm besprochen. Um einen kompletten Test einer TRD-Kammer durchzuführen, werden die 4 folgenden Messungen benötigt:

Der Hochspannungstest zum Ausschließen von Kurzschlüssen (Kap. 7.2), die Messung der Gasleckrate der Kammer (Kap. 7.3), die Messung der Homogenität der Gasverstärkung (Kap. 7.4) und schließlich die Messung der Verstärkungs-Kennlinie (Kap. 7.5).

Diese Messungen und die Testergebnisse der beiden zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit bereits fertiggestellten TRD-Kammern (mit den Nummer 0001 und 0002) werden anschließend aufgelistet. Einen abschließenden Überblick über die Ergebnisse der 4 Tests gibt es in der Tab. 7.5 im Kap. 7.6.

Durchgeführt wurden die Tests der TRD-Kammern im ALICE-Labor am Kirchhoff-Institut für Physik in Heidelberg (KIP).

7.1 Meßaufbau für die Kammertests

Für die Durchführung der Kammertests wurden 2 Hochspannungsquellen (HV-Quellen, siehe Kap. 7.1.1), 1 HV-Strommeßgerät (siehe Kap. 7.1.2) und ein Gassystem (siehe Kap. 7.1.3) verwendet. Die Steuerung der Geräte sowie die Überwachung und Auswertung der Meßwerte wurde von einem LabVIEW-Programm (siehe Kap. 7.1.4) ausgeführt.

7.1.1 Hochspannungsgeräte

Zur Erzeugung der für die Kammertests notwendigen Hochspannungen (Anodenspannung typischerweise 1500 V, Driftspannung typischerweise -2100 V) wurden zwei Modelle der Präzisions-Hochspannungsquelle (HV-Geräte) „EHQ 104 M“ der Firma ISEG verwendet. Die Geräte liegen im Eurokassetten-Format vor und können für die Kammertests sowohl manuell bedient, als auch über eine RS232-Schnittstelle mit dem seriellen Eingang des Kammermeß-PCs verbunden und von LabVIEW aus gesteuert und ausgelesen werden.

Die HV-Geräte liefern maximal eine Spannung von 4 kV und einen Strom von 3 mA. Ein Strom- und ein Spannungslimit können unabhängig voneinander jeweils in 10-Prozent-Schritten des Maximalwerts eingestellt werden, ebenso kann per Software der maximale Strom programmiert werden [Ise98].

Die Polarität der Ausgangsspannung läßt sich umschalten. Die Auflösung der Strommessung beträgt 100 nA, weshalb für die Anodenstrom-Messung (im nA-Bereich) ein separates Strommeßgerät verwendet wurde (siehe Kap. 7.1.2). Die Auflösung der Spannungsmessung beträgt 1 V.

Die wichtigsten Funktionen des HV-Geräts, die sich per Software einstellen oder abfragen lassen, sind:

- Schreibfunktionen: Sollspannung, Spannungsrampe, Stromtrip
- Schaltfunktionen: Start Spannungsänderung
- Lesefunktionen: Sollspannung, Istspannung, Spannungsrampe, Iststrom, Stromtrip, Statuswort, Gerätestatus, Hardwaregrenze Spannung, Hardwaregrenze Strom

Diese Funktionen wurden durch das in LabVIEW geschriebene Kammermeßprogramm gesteuert (siehe Kap. 7.1.4), bei manueller Steuerung sind nur die Lesefunktionen möglich.

Überprüfen der Funktionalität der Hochspannungs-Geräte

Aufgrund der Berichte von Kollegen, daß bei den hier benutzten Hochspannungsquellen der Firma ISEG von Zeit zu Zeit Spannungsschwankungen auftreten, wurde beschlossen, die für die Kammertests eingesetzten Module auf diese Fehlereigenschaft hin zu prüfen. Die Ursache soll darin gelegen haben, daß aufgrund eines Software-Fehlers das HV-Gerät trotz anliegender Hochspannung glaubt, es seien 0 V angelegt und daraufhin versucht, durch Hochregeln der Spannung die vermeintlich zu niedrige Spannung auszugleichen. Bis das Gerät sich selbst von seinem Fehler überzeugt hat, können durch die zu hohe Spannung und die damit verbundenen zu hohen Ströme Schäden an den Kammern verursacht werden.

Zum Überprüfen dieser möglichen Fehlereigenschaft wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt, das über einen beliebigen Zeitraum hinweg die Istspannung der ISEG-Module überwacht, das Überschreiten einer frei wählbaren Spannungs-Toleranz anzeigt und die dabei anliegende, zu hohe Spannung in ein Datenfile schreibt. Außerdem wird dann auch der über die ISEG-Module fließende Strom und die Uhrzeit weggeschrieben. Das Auslesen der Spannungswerte erfolgt dabei in Abständen von ca. 1 s.

Das Hochrampen der Spannung auf den vorgegebenen Sollwert erfolgt ebenfalls durch das LabVIEW-Programm. Die Bestätigung, daß das Programm einwandfrei funktioniert, wurde dadurch erbracht, daß während der Zeit des Hochrampens der Spannung auf den Sollwert in der Tat so lange Spannungswerte in das Datenfile geschrieben wurden, bis die Istspannung im Toleranzbereich um die Sollspannung lag.

Es erfolgten insgesamt 3 Messungen:

Die erste lief über etwa 68 h, die zweite über etwa 110 h. Bei beiden betrug die an den zwei ISEG-Modulen angelegte Spannung jeweils 1200 V, die Spannungstoleranz ± 3 V.

In der dritten Messung lagen 2000 V an, außerdem war hier in jeden Stromkreis ein $2\text{ M}\Omega$ -Widerstand geschaltet, so daß dabei jeweils ein Strom von 1 mA floß. Die Spannungstoleranz lag bei nur noch ± 2 V, zusätzlich wurde hier auch noch eine Stromtoleranz von $\pm 15\ \mu\text{A}$ programmiert und überwacht.

Die Meßprotokolle aller 3 Messungen zeigen nur die Spannungs- und Stromabweichungen während der ersten 1-2 Minuten, in der auf den Sollwert der Spannung hochgerampft wurde. Sobald die Sollspannung erreicht worden war, gab es, trotz der z.T. langen Laufzeiten der Messungen, keinerlei Einträge mehr in den Datenfiles. Daher kann davon ausgegangen werden, daß die für

die Kammermessungen benutzten ISEG-Module nicht dem berichteten Fehler unterliegen.

7.1.2 Strommeßgerät

Zum Messen der an der Kammer-Anode und -Kathode fließenden Ströme im nA-Bereich wurde das „A310_3 HV Isolated Current Meter“ eingesetzt, das unter der Leitung von Peter von Walter von der Elektronik-Werkstatt des Physikalischen Instituts im NIM-Format gebaut wurde. Da das Gerät über zwei Kanäle verfügt, deren Meßwerte gleichzeitig angezeigt werden, genügte ein Modul zur Messung der Kammerströme. Alternativ zu den Strömen können auch die anliegenden Spannungen angezeigt werden.

Die Isolationsspannung beträgt 5 kV, durch Hinzufügen oder Entfernen von Shunt-Widerständen läßt sich der Meßbereich des Stroms verändern, wobei für unsere Messungen der Bereich von 0 - 1000 nA gewählt wurde. Da am inneren Widerstand des Geräts maximal 2 V abfallen, wurde der Shunt-Widerstand auf $2\text{ M}\Omega$ gesetzt, was zu einem maximal fließenden Strom von $1\mu\text{A}$ führt. Die Auflösung ist durch einen 12 Bit Analog-Digital-Konverter (ADC) vorgegeben, dessen 4096 mögliche Werte bei dem eingestellten Strombereich eine Genauigkeit von 0,25 nA bedeuten, was mehr als ausreichend für die Kammermessungen ist.

Die Spannungsmessung erfolgt über zwei Limitwiderstände von jeweils $100\text{ k}\Omega$, deren Gesamtwiderstand sich aber im Gegensatz zu dem der Shunt-Widerstände nicht ändern läßt. Das Gerät verfügt über eine RS232-Schnittstelle und wurde per Kabel über einen COM-Port mit dem Meß-PC verbunden.

Die wichtigsten Funktionen des Strommeßgeräts, die per Software angesteuert werden können, sind:

- das Auslesen der Stromstärken und Spannungswerte beider Kanäle,
- das Schreiben und Auslesen der Anzahl der Strommessungen, über die zeitlich gemittelt wird
- und zur Sicherheit das Auslesen der Shunt- und Limit-Widerstände der beiden Kanäle.

Diese Funktionen wurden durch das in LabVIEW geschriebene Kammermeßprogramm gesteuert (siehe Kap. 7.1.4).

7.1.3 Gassystem

Das Gassystem wurde unter der Leitung von Rainer Schicker am Physikalischen Institut gebaut. Bei einer Kammermessung werden im Wesentlichen folgende Schritte durchgeführt:

1. Aus zwei Gasflaschen wird über Schläuche aus rostfreiem Stahl dem Gassystem getrennt voneinander Argon und CO₂ zugeführt.
2. Diese Gase werden jeweils durch einen Durchflußbegrenzer mit Massendurchflußsensor geführt, wobei diese so geeicht sind, daß sie für Argon bei maximalem Durchfluß 100 l/h durchlassen, bei CO₂ 30 l/h.
3. Geregelt werden beide Durchflußbegrenzer durch das Steuerungsgerät „Compact 2“ von der Firma WMR, bei dem die Durchflußrate in Prozent des maximalen Durchflusses (siehe Punkt 2) angegeben wird. Dies kann für jeden Durchflußbegrenzer einzeln erfolgen oder so, daß nur der Wert des ersten eingestellt wird und der zweite stets in einem festen Verhältnis (z.B. 85 % : 15 %) dazu arbeitet (Modus: „Blending“).
4. Handelt es sich um eine Kammer, bei der die Verbindungsstelle zwischen der Padplane und dem Distanzrahmen noch nicht verklebt, sondern nur mit Klebeband abgedichtet wurde, so wird die Kammer zur Vorbereitung der Messung an allen 4 Seiten mit Schraubzwingen unter geringem Druck („fingerfest“) zusammengepreßt, um so das Padplane-Panel auf der Kammer zu fixieren.
5. Als nächstes wird das Gasgemisch, das durch die zwei Durchflußbegrenzer hergestellt wird, zur TRD-Kammer geleitet. Hierbei wählt man den vom Gassystem weiter entfernten Gasanschluß der Kammer, man verwendet also für die Gaszuführung den längeren Schlauch. Der Grund dafür ist, daß der Druckabfall, der durch den Gasfluß in dem Schlauch entsteht, so überwiegend bereits *vor* der Kammer erfolgt und nicht erst auf der Leitung, die das Gas von der Kammer zurück zum Gassystem leitet. Dabei würde nämlich ein Überdruck in der Kammer entstehen, was man vermeiden möchte.
6. In der Kammer vermischt sich nun das Argon-CO₂-Gemisch mit der noch in der Kammer verbliebenen bzw. durch Lecks einströmenden Außenluft.
7. Das von der Kammer in das Gassystem zurückfließende Gas wird nun durch einen Sauerstoff-Sensor (siehe Kap. 7.1.3 bei „Der Sauerstoffsensoren“) geleitet, der die Sauerstoff-Konzentration im Gas im ppm (parts per

million) - Bereich misst. Auf diese Weise stellt man fest, wieviel Außenluft in die Kammer und damit in das Argon-CO₂-Gemisch eingedrungen ist, sprich, wie hoch die Leckrate der Kammer ist.

8. Danach läßt man das Gas in die Außenluft entweichen. Davor schaltet man evtl. einen sog. Bubbler, der dazu dient, das Gassystem von der Außenluft abzuschirmen. Allerdings kann sich gerade bei niedrigen Flußmengen und damit niedrigem Überdruck innerhalb der Kammer im Vergleich zur Außenluft der zusätzliche Widerstand des Bubblers negativ auswirken.

Der Sauerstoffsensor

Das Gassystem verfügt zur Messung der Gasleckrate über den Sauerstoffsensor „O₂X1 Oxygen Transmitter“ von der Firma Panametrics. Dieser Sensor kann die O₂-Konzentration eines Gases (mit 1-prozentiger Genauigkeit) in 6 Bereichen zwischen 0 und 250.000 ppm (25 %) messen, wobei für die Gaslekraten-Messungen der Bereich 0 - 1000 ppm gewählt wurde. Die Elektronik des Sensors gibt mit linear ansteigendem O₂-Gehalt einen ebenfalls linear steigenden Strom aus, dessen Bereich von 4 mA bei 0 ppm Sauerstoff bis 20 mA bei 1000 ppm Sauerstoff reicht. Angeschlossen an den Sauerstoff-Sensor ist ein in der Elektronik-Werkstatt des Physikalischen Instituts gebautes Gerät, das der direkten Anzeige des Sauerstoff-Gehalts in der Einheit ppm dient. Dieses Gerät enthält einen Widerstand von 250 Ω, wodurch sich für dieses Gerät ein Spannungsbereich von 1 V bei 0 ppm Sauerstoff bis 5 V bei 1000 ppm ergibt. Diese Spannungswerte werden mit Hilfe von LabVIEW ausgelesen, auf die ppm-Konzentration zurückgerechnet, graphisch dargestellt und auf Festplatte gespeichert (siehe Kap. 7.1.4).

Da die Lebensdauer des O₂-Sensors direkt von der Menge des Sauerstoffs abhängt, der durch den Sensor geströmt ist, wurde zu Beginn einer Messung die Kammer gespült, ohne den Gasabfluß durch den O₂-Sensor zu leiten. Um auch für diese Zeit eine Kontrolle der Sauerstoff-Konzentration zu haben, wurde zusätzlich das Gerät „Model 3600 Analyzer“ von der Firma Orbisphere Laboratories verwendet, dessen Bereich der Sauerstoff-Anzeige vom Prozent-Bereich bis in den ppm-Bereich geht.

7.1.4 Das Kammermeßprogramm

Kommunikation mit den Meßgeräten

Die Kommunikation mit den Meßgeräten läuft ab über den Austausch von ASCII-Zeichen (**A**merican **S**tandard **C**ode of **I**nformation **I**nterchange) über

eine seriellen Schnittstelle des Meß-PCs.

Zunächst sendet man vom Meß-PC aus Befehle an das Meßgerät, das dann auf diese Befehle reagiert. Auch wenn manche dieser Befehle aus mehreren Zeichen bestehen, müssen sie trotzdem einzeln, d. h. Zeichen für Zeichen, an das Meßgerät übertragen werden. Dieses sendet dann das empfangene Zeichen zur Bestätigung zurück („Echo“), so daß dieses Zeichen von LabVIEW aus dem Puffer der seriellen Schnittstelle abgefragt werden muß, bevor weitere Teile des Befehls gesendet werden können.

Nimmt man diese Abfrage nicht vor, sondern überträgt die Befehle, ohne dieses „Echo“ des Meßgeräts abzuwarten, dann werden Steuerbefehle zurückgegeben, wenn die Meßsoftware eigentlich bereits die Meßwerte erwartet. Dabei entstehen zwangsläufig Probleme mit LabVIEW, so daß dies für die Durchführung der Messungen berücksichtigt werden muß.

Nachdem ein Befehl Zeichen für Zeichen gesendet und zurückempfangen wurde, schickt das Meßgerät die Antwort (z. B. den Meßwert) hinterher. Dies erfolgt nun ohne eine Aufteilung in einzelne Zeichen.

Das Meßprogramm

Für die Steuerung der 4 Qualitätstests der TRD-Kammern wurde mit LabVIEW ein Programm geschrieben, das aus mehreren Unterprogrammen aufgebaut ist. Auch wenn das Meßprogramm als solches hier nicht vorgestellt wird, soll hier doch ein Überblick über den funktionellen Ablauf des Programms gegeben werden:

1. Zuerst erfolgt vorsorglich das Löschen der Buffer in den Serial-Ports, um evtl. vorhandene Reste von Befehlsfolgen zu entfernen (s. o. im Unterkapitel "Kommunikation mit den Meßgeräten").
2. Nun werden die Meßgeräte initialisiert und ihr Status abgefragt (betriebsbereit oder nicht). Außerdem werden die Timer, die für die zeitabhängigen Messungen benötigt werden, sowie weitere Zählvariablen, auf Null gesetzt.
3. Im nächsten Schritt werden die Werte, die vom Anwender in die Eingabefelder auf der Benutzeroberfläche (Front Panel) eingetragen wurden, als Befehlsfolgen an die diversen Meßgeräte gesendet. Dabei handelt es sich z. B. um Sollspannungen für die HV-Geräte, oder auch um den zeitlichen Abstand, der bei einer automatisierten Messung zwischen der Erfassung von zwei Meßwerten eingehalten werden soll.

4. Der folgende Schritt im Programmablauf ist eine Dauerfunktion, in der nun die gesamte Messung abläuft, bis das Programm über den Stop-Button beendet wird. Hier werden die Meßwerte, die die Meßgeräte liefern können, abgefragt, wobei auch gleichzeitig Überwachungsfunktionen ablaufen, die z. B. verhindern, daß der Anodenstrom über einen bestimmten Wert ansteigt, welcher vorher am Front Panel eingegeben wurde. Außerdem erfolgt in diesem Programmschritt auch die Darstellung der Meßdaten in Form von Plots auf dem Monitor sowie das Sichern der Meßwerte in einem Datenfile auf dem Meß-PC.
5. Wurde auf dem Front-Panel die Option für das Speichern der Meßdaten in die Detektordatenbank (DCDB) gewählt, dann erfolgt nun der Verbindungsaufbau zu dem Programm „Labserver“ (siehe Kap. 8.3). Danach werden die Meßdaten mit Hilfe der XML-VIs in die Datenbank geschrieben.
6. Zum korrekten Abschluß des Programms werden schließlich die Verbindungen zu den Meßgeräten, die im 2. Schritt hergestellt wurden, wieder geschlossen.

Neben dem Quellcode, dessen Wirkungsweise hier beschrieben wurde, kommt auch dem Front Panel von LabVIEW-Programmen eine wichtige Bedeutung zu. So dient das Front Panel des Kammermeßprogramms zur Steuerung der Meßgeräte, zur Anzeige der Meßergebnisse und zur Kontrolle über weitere Programmaspekte wie die Frage, ob die Meßdaten in die DCDB geschrieben werden sollen, oder nicht (siehe Screenshot in Abb. 7.1). In der obersten Zeile sind von links nach rechts die Bedienelemente für die zwei HV-Quellen („ISEG 1“ und „ISEG 2“) und für das Strommeßgerät („A310“) zu sehen. In der Zeile darunter werden die Stromwerte, die an den zwei Kanälen des Strommeßgeräts gemessen werden, über der Zeit graphisch dargestellt („Current Channel 1/2 (nA)“). Eine Zeile tiefer erfolgt die Steuerung des Gassystems („Gassystem“), des Drucksensors („Pressure“; dieser ist noch nicht im Meßaufbau integriert) und die Kontrolle weiterer Programmfunktionen („Control“). Die letzte Zeile ist reserviert für die graphischen Darstellungen sowohl der Sauerstoffkonzentration, die über den Gassensor ausgelesen wird („Oxygen Content (ppm)“), als auch des zeitlichen Verlaufs des Luftdrucks im Meßlabor („Relative Pressure in Laboratory“).

Die Bedienelemente für die DCDB sind aus Platzgründen nicht auf dem sichtbaren Teil des Front Panels angeordnet, sondern weiter unten angebracht.

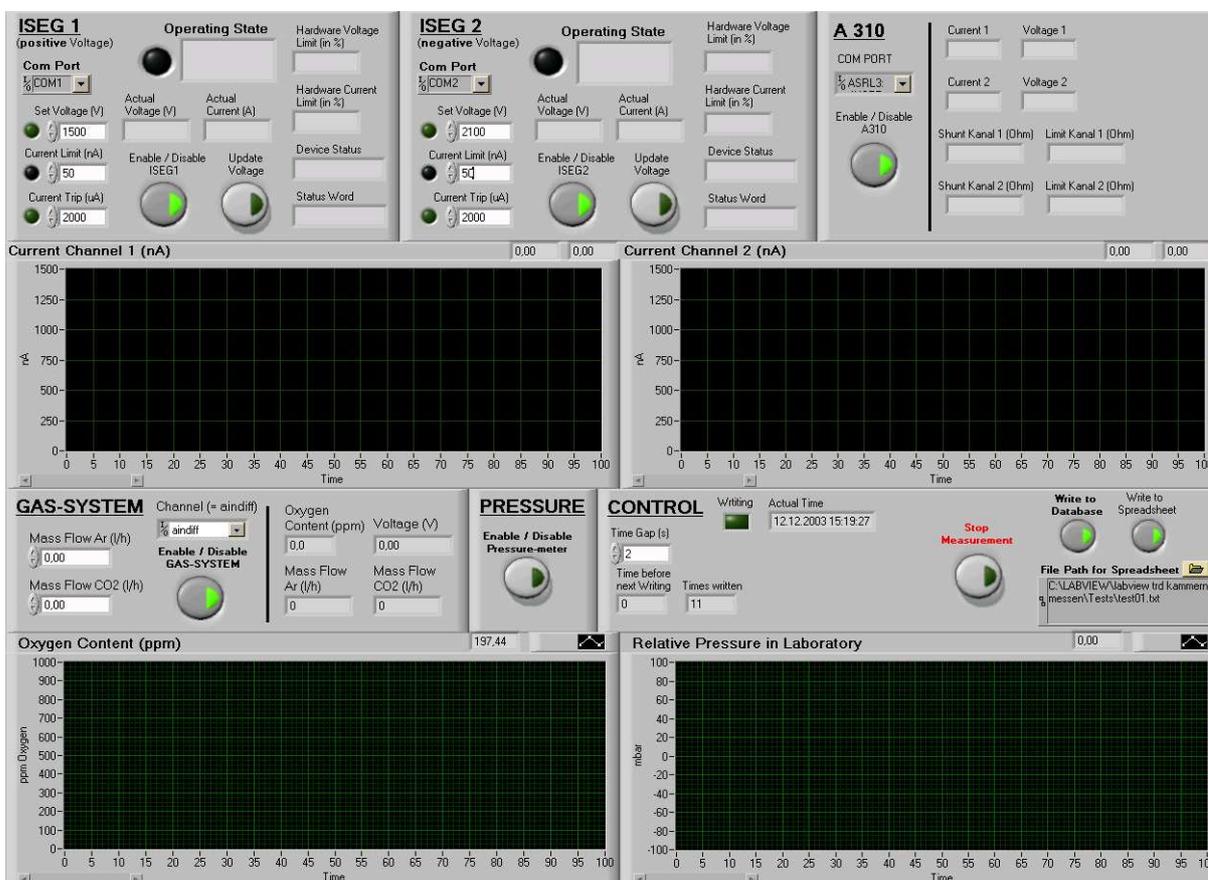


Abbildung 7.1: Das Kammer-Meßprogramm, geschrieben mit LabVIEW. Abgebildet ist die Benutzeroberfläche (Front Panel) des Programms. Hier erfolgt u. a. die Steuerung der Meßgeräte und die Visualisierung der Meßdaten.

7.2 Hochspannungstests zum Ausschließen von Kurzschlüssen

Die Tests zum Ausschließen von Kurzschlüssen sind die ersten Messungen, die bei einer neuen Kammer durchgeführt werden, denn ein Kurzschluß bei einer zu hohen Spannung kann zu einer Beschädigung der Kammer führen. Hinweise auf Kurzschlüsse können Dunkelströme geben. Im folgenden Kap. 7.2.1 werden die verschiedenen Ursachen diskutiert, die für das Auftreten kurz-, aber auch längerfristiger Dunkelströme (an der Anode) verantwortlich sein können.

Erst wenn sichergestellt ist, daß eine Kammer frei von Kurzschlüssen ist, können die weiteren Messungen erfolgen, denn die zwei letzten Messungen (Homogenität der Gasverstärkung, Kap. 7.4 und Messungen der Verstärkungs-

Kennlinien, Kap. 7.5) benötigen Hochspannung zur Durchführung.

7.2.1 Kammereigenschaften

Bei Erhöhung der Anodenspannung reagiert die Kammer immer mit einem kurzfristigen Anstieg des Anodenstroms (bei einer Erhöhung um 50 V jeweils ca. um einige hundert nA, dem „Ladestrom“). Belässt man die Spannung dann auf diesem neuen Wert, dann zeichnet sich eine fehlerlose Kammer dadurch aus, daß der Strom beständig wieder absinkt und nach kurzer Zeit auf einige nA abgesunken ist. Typischerweise wurde mit einer weiteren Erhöhung der Spannung gewartet, bis der Anodenstrom unter 10 nA gesunken war.

Man sollte nie eine Kammer längere Zeit bei zu hohen oder instabilen Stromwerten belassen. In so einem Fall ist zunächst die Spannung wieder zu reduzieren und festzustellen, ob bei niedrigerer Spannung nun eine Abnahme des Anodenstroms festzustellen ist.

Für hohe Dunkelströme in einer neuen Kammer kommen folgende Ursachen in Betracht:

- Die Luftfeuchtigkeit, die in jeder Kammer enthalten ist, die noch nicht mit dem Verstärkungsgas gespült wurde, erhöht deutlich meßbar die Leitfähigkeit der Kammer und damit den Anodenstrom.
- Neben der Luftfeuchtigkeit kann sich auch auf den in der Kammer befindlichen Flächen Feuchtigkeit niedergeschlagen haben, die erst beim Spülen der Kammer mit dem Gasgemisch langsam verschwindet.
- Und natürlich gibt es den stets auftretenden, physikalischen Effekt, daß die Kammer aufgrund der Tatsache, daß sie Anoden- und Kathodendrähte sowie eine Padplane enthält, wie ein Kondensator wirkt. Sowohl bei Spannungserhöhung, als auch Spannungsabsenkung an der Anode kommt es daher zu einem kurzfristigen Stromfluß.

Sinkt der Strom dauerhaft nicht ab, so kann es dafür mehrere Ursachen geben:

- Da auch in einem Reinraum keine Staubfreiheit gewährleistet ist, kann es zum Eindringen von Staub während oder nach den Arbeiten an der Driftkammer kommen. Sollte sich ein Staubfaden zwischen den 3,5 mm voneinander entfernten Anoden- und Kathodendrähten bzw. der Padplane befinden, so kann dieser für einen erhöhten und dauerhaften Stromfluß verantwortlich sein. Ein zu langes Beibehalten der Spannung kann hier zu einem Verkohlen des Staubfadens und damit zum Manifestieren dieser Strombrücke führen.

- Der Epoxykleber, der zum Verkleben der Padplane mit dem Rahmen der Kammer verwendet wird, kann vor der endgültigen Polymerisation stromleitend wirken. Dieser Effekt könnte dafür verantwortlich gewesen sein, daß der Dunkelstrom der Kammer 0001, der bei der ersten Messung noch 50 nA betragen hatte (siehe Tab. 7.1), bei der Wiederholungsmessung nach über 2 Wochen praktisch verschwunden war (ca. 1 nA).
- Derselbe Klebstoff kann, wenn er in einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit verarbeitet wird, selbst Feuchtigkeit binden. Da im Klebstoff die Anoden- und Kathodendrähte eingebettet sind, kann es über diese Feuchtigkeitsbrücke auch zu einem Stromfluß kommen.

Allerdings muß angemerkt werden, daß die hier auftretenden Ströme stets nur im nA-Bereich liegen - woraus folgt, daß bei anliegenden Spannungen von z.B. 1500 Volt Widerstände im Bereich von $G\Omega$ gemessen werden. Daher kann es sich bei den hier angestellten Überlegungen stets nur um Vermutungen handeln, die zwar physikalisch begründbar sind, die genaue Ursache ist aber technisch nur schwer zu beweisen.

7.2.2 Die Messungen

Die mit normaler Außenluft gefüllte Kammer 0002 wurde mit den Hochspannungskabeln verbunden und die Messungen wurden gestartet. Dazu wurde die Anodenspannung in 50 V - Schritten erhöht und abgewartet, bis der Anodenstrom auf einen zweistelligen Wert gefallen war. Die Driftspannung blieb dabei stets unverändert auf 0 V.

Diese Prozedur wurde durchgeführt, bis die Spannung bei 1500 V angeht war, dem Wert für die Anodenspannung, der auch beim Betrieb der TRD-Kammern im ALICE-Experiment zum Einsatz kommen wird. Auch dort wieder fiel der Anodenstrom wieder. Bei einem Wert von etwa 30 nA, der weiter fallend war, wenn auch langsam, wurde die Messung abgebrochen, da dieser Wert bereits aussagefähig genug war, um zu diesem Zeitpunkt einen Kurzschluß in der Kammer auszuschließen.

Wir gingen nun dazu über, auch die Driftspannung anzuheben. Die sich hierbei einstellenden Stromschwankungen an der Anode fielen deutlich kleiner aus, als beim Hochrampen der Anodenspannung. Beim Erreichen der beim ALICE-Betrieb vorliegenden Sollspannung von -2100 V an der Driftelektrode stellte sich an der Anode ein Strom von ca. 100 nA ein, an der Driftelektrode ein Strom von 165 μ A.

Auch dieses Ergebnis weist auf eine bezüglich Kurzschlüsse intakte Kammer hin, womit die Messungen für die Kammer 0002 beendet waren. Die Ergebnisse der Messungen für die Kammern 0001 und 0002 sind in Tab. 7.1 aufgetragen. Dort sind die Anoden- und Driftelektrodenströme bei den zwei verschiedenen Spannungskonfigurationen der Anoden- und Driftspannung angezeigt. Ursache für den dauerhaft bei 50 nA liegenden Anodenstrom der Kammer 0001 (bei Anodenspannung: 1500 V, Driftspannung: 0 V) könnte der noch nicht vollständig polymerisierte Klebstoff gewesen sein (siehe Kap. 7.2.1).

Kammer Nr.:	Anode: 1500 V, Drift: 0 V		Anode: 1500 V, Drift: -2100 V	
	Anode [nA]	Drift [μ A]	Anode [nA]	Drift [μ A]
0001	50	0	70 - 80	165
0002	30	0	100	165

Tabelle 7.1: Meßergebnisse der Hochspannungstests zum Ausschließen von Kurzschlüssen der Kammern 0001 und 0002. Angegeben sind die Anoden- und Driftströme bei zwei verschiedenen Spannungskonfigurationen. Die Kammern waren bei den Messungen mit normaler Außenluft gefüllt.

Die Werte für die Driftströme ergeben sich direkt aus dem Ohmschen Gesetz: Um das elektrische Feld im Randbereich der Kammer zu stabilisieren, sind an den Wänden der Kammer Kupfer-Streifen angebracht, die über 6 aufeinanderfolgende Widerstände ($5 \times 2 \text{ M}\Omega$, $1 \times 1,7 \text{ M}\Omega$, das ergibt eine Widerstandskette von $11,7 \text{ M}\Omega$) die Erde gegenüber der Driftspannung bilden. Liegen also 2100 V an, so folgt daraus bei einem Widerstand von $12,7 \text{ M}\Omega$ (zu der Widerstandskette von $12,7 \text{ M}\Omega$ kommt noch ein Widerstand von $1 \text{ M}\Omega$ in der HochspannungsfILTERBOX hinzu) ein Strom von $165 \mu\text{A}$.

Die gemessenen Driftströme bestätigen damit die funktionierende Installation der Widerstände in der Kammer, die korrekte Anzeige des Strommeßgerät und die richtige Hochspannungsverkabelung der Kammer.

Das Hochrampen der Spannungen kann auch bereits mit dem in LabVIEW programmierten Kammermeßprogramm (siehe Kap. 7.1.4) erfolgen, wobei hier stets überwacht wird, daß der Anodenstrom nicht über einen (frei wählbaren) Grenzwert hinaus ansteigt. Sollte das doch der Fall sein, wird die Spannung nicht weiter hochgeregelt, sondern bleibt auf dem erreichten Niveau stehen, bis der Anodenstrom wieder unter den Grenzwert gefallen ist.

7.3 Messungen der Gasleckraten der Kammern

Der fertige ALICE-Detektor wird über eine Anzahl von 540 TRD-Kammern verfügen. Da keine absolut gasdichte Kammer hergestellt werden kann, wird es stets einen Verlust des Betriebsgases durch Lecks geben. Wie schon erwähnt, setzt sich dieses Gas aus 85 % Xenon und 15 % CO₂ zusammen, wobei aus Kostengründen eine niedrige Gasleckrate der Kammern angestrebt wird. Als Grenzwert gilt hierbei ein Verlust pro Kammer von 3 mbar × l/h, das Ziel liegt allerdings im Erreichen von nicht mehr als 1,5 mbar × l/h. Daher müssen vor der endgültigen Fertigstellung der TRD-Kammern die Gasleckraten gemessen und bei Verfehlung des Grenzwertes die Kammern nachgebessert werden.

Dazu spült man die Kammer mit einem Gemisch aus Argon und CO₂, bis der Gehalt der vorher in der Kammer vorhandenen Raumluft auf einen niedrigen Wert gesunken ist. Zur konkreten Messung erfaßt man dabei den Wert der Sauerstoff-Konzentration mit einem Sensor (siehe Kap. 7.1.3) und spült die Kammer, bis etwa eine O₂-Konzentration von 0,1 % erreicht ist. Dann reduziert man den Gasfluß, beobachtet den exponentiellen Abfall der O₂-Konzentration und wartet, bis sich (im Optimalfall einer sehr gasdichten Kammer) ein Wert im einstelligen ppm-Bereich einstellt.

Aus dem exponentiellen Abfall der O₂-Konzentration fittet man schließlich den Wert, der sich im Gleichgewicht einstellen würde. Aus diesem berechnet man dann die Gasleckrate (siehe Kap. 7.3.1).

7.3.1 Berechnung der Gasleckrate

Für die Berechnung der Leckrate benötigt man den Wert des Sauerstoff-Gehalts, der sich im Gleichgewicht zwischen Spülen der Kammer mit dem Gasgemisch und Eindringen der Luft durch Kammerlecks einstellt. Da der Abfall der O₂-Konzentration exponentiell erfolgt, müßte man auf das Einstellen des Gleichgewichts, bei dem die O₂-Konzentration den Endwert x tatsächlich erreicht hat, theoretisch unendlich lange warten. Stattdessen fitten wir mit Hilfe von LabVIEW eine Funktion der Form

$$F(t) = A \times e^{-\alpha t} + x \quad ; \quad x = \text{Grenzwert} \quad (7.1)$$

an die Meßwerte und lassen den Wert x berechnen. Dieser Wert x , in der Einheit ppm, wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels als die O₂-Konzentration

C_{O_2} bezeichnet.

Die Leckrate L eines Gassystems berechnet sich als das Produkt aus der Flußrate F_{Gas} des Gasgemisches, mit dem die Kammer gespült wird und dem Partialdruck P_{Luft} der in die Kammer einströmenden Luft, der sich im Gleichgewicht einstellt (s.o.).

$$L = F_{Gas} \times P_{Luft} \quad (7.2)$$

In das Gassystem diffundiert von außen Luft hinein, gemessen wird über den Sensor aber nur der Sauerstoff-Gehalt in der Kammer. Bei „Luft“ handelt es sich um ein Gasgemisch, das aus 77 % NO_2 , 21 % O_2 , 1 % Wasserdampf, 1 % Ar und diversen Spurengasen zusammengesetzt ist (Werte gerundet). Da nur Sauerstoff gemessen wird, muß man, um auf die gesamte, einströmende Luft hochzurechnen, den Faktor (100 % / 21 %) ansetzen:

$$P_{Luft} = P_{O_2} \times \frac{100}{21} \quad (7.3)$$

Da der O_2 -Gehalt C_{O_2} in der Einheit ppm angegeben wird und der Luftdruck bei Normalbedingungen 1013 mbar beträgt, ergibt sich der Partialdruck P_{O_2} von Sauerstoff aus dem Produkt der O_2 -Konzentration C_{O_2} und dem Faktor (1013 mbar).

$$P_{O_2} = C_{O_2} \times 1013 \text{ mbar} \quad (7.4)$$

Damit ergibt sich für die Leckrate L eines Gassystems:

$$L = F_{Gas} \times P_{Luft} = F_{Gas} \times C_{O_2} \times 4824 \text{ mbar} \quad (7.5)$$

Die Einheit der Leckrate L lautet:

$$\left[mbar \times \frac{l}{h} \right] \quad (7.6)$$

7.3.2 Die Messungen

Um die Gasleckrate im Labor zu bestimmen, verwendeten wir aus Kostengründen statt des Edelgases Xenon, das im Betrieb des TRD-Detektors am CERN verwendet werden wird, das Edelgas Argon (Ar). Außerdem verwendeten wir CO₂, wobei wir ein Mischungsverhältnis von 85 % Argon zu 15 % CO₂ wählten, so wie es auch im Betrieb des ALICE-Detektors verwendet werden wird. Die Messungen der Gasleckrate führten wir bei spannungslosem Zustand der Kammer durch.

Wie weiter oben bereits erwähnt, läßt der Durchflußbegrenzer von Argon bei 100%iger Öffnung 100 l/h Gas durch, derjenige von CO₂ 30 l/h. Um von diesen fest vorgegebenen Ausgangswerten auf das gewünschte Mischungsverhältnis von 85 % Argon : 15 % CO₂ zu gelangen, muß man für das Öffnungsverhältnis der Durchflußbegrenzer zueinander das Verhältnis 1,7 : 1 wählen. Die Werte für den Gasfluß wurden zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch von Hand am Durchflußbegrenzungsgerät eingestellt - da dieses aber ebenfalls über eine serielle Schnittstelle verfügt, ist geplant, künftig auch den Gasfluß über LabVIEW zu steuern.

Mitte Januar 2004 waren zwei TRD-Kammern fertig gestellt worden. Repräsentativ für die Messungen der Gasleckraten der TRD-Kammern beschreibe ich hier unser Vorgehen beim Messen der Kammer 0002.

Zuerst öffneten wir die Ventile beider Gasflaschen mit einem Überdruck gegenüber Normaldruck von 0,5 bar und spülten die Kammer mit einem gesamten Gasfluß von ca. 118 l/h. Dabei hatten wir einen der 4 Gasanschlüsse der Kammer geöffnet, um die Kammer keinem zu hohen Überdruck auszusetzen. Nach einer Zeit von ca. 3 h war der Sauerstoff-Gehalt auf etwa 3300 ppm gefallen, woraufhin wir den Gasfluß auf 23,5 l/h reduzierten und die LabVIEW-Software zur Auswertung des Sauerstoffgehalts starteten. Über einen Zeitraum von 23 Stunden wurde in Abständen von 5 Minuten von LabVIEW die O₂-Konzentration gemessen, in einem Graphen aufgetragen und in ein Datenfile auf dem Meß-PC gespeichert. Da der Sauerstoff-Sensor (siehe Kap. 7.1.3) nur in einem Bereich von 0 - 1000 ppm arbeitet, standen für die Auswertung natürlich auch nur Meßwerte unterhalb von 1000 ppm zur Verfügung.

Nach ca. 12 h stellte sich stabil ein O₂-Gehalt von etwa 15 ppm ein. An die

in LabVIEW aus den Meßdaten erstellte Kurve fitteten wir eine Exponentialfunktion. In der Abb. 7.2 zeigt das obere Diagramm den gemessenen Abfall des Sauerstoff-Gehalts (Einheit ppm) der Kammer 0001 an, das untere Diagramm bezieht sich auf die Kammer 0002. Gemessen wurde in Abständen von 5 min. Die ausgefüllten Quadrate geben die Meßwerte wieder, die durchgezogene Linie ist die Fitfunktion und die leeren Quadrate zeigen die Abweichungen der Meßwerte von der Fitfunktion an. Die Ordinate der Kammer 0002 beginnt im Gegensatz zu der der Kammer 0001 nicht bereits bei 1000 ppm, weil hier die Meßwerte erst ab 812 ppm aufgenommen wurden.

Das Fitten einer Exponentialfunktion, die auch den Offset mit ausgibt (siehe Gleichung 7.1), muß anhand des Levenberg-Marquardt Algorithmus programmiert werden, da es dafür keine vorhandene Routine in LabVIEW gibt. Zukünftig wird die Fitfunktion dahingehend erweitert werden, diese Berechnung automatisch durchführen zu können. Dies war zu dem Zeitpunkt der Messungen noch nicht wirklich nötig, da stets genügend Zeit für die Messungen zur Verfügung stand und so nicht schon während eines Zeitpunktes, zu dem der Wert der Sauerstoff-Konzentration noch deutlich am Fallen war, die Messungen abgebrochen werden mußten.

Daher wurde zur Bestimmung des Endwertes der Sauerstoff-Konzentration der Mittelwert über die letzten Messungen ermittelt, bei denen der O₂-Gehalt bereits kleiner als 20 ppm war und nicht mehr weiter fiel. Da sich dieser Wert auch nach 2 weiteren Tagen nicht mehr geändert hatte, entspricht er dem Offset schon sehr genau. Für den Fit der Exponentialfunktionen wurde von den gemessenen Werten bereits der jeweilige Endwert der Sauerstoff-Konzentration abgezogen, um mit der gegenwärtig vorhandenen Fitfunktion ein korrektes Ergebnis erhalten zu können.

Für den Plot und die Fitfunktion wurde ein ähnliches LabVIEW-Programm geschrieben wie für den Plot der Messungen der Verstärkungs-Kennlinien (siehe Kap. 7.4).

In der Tab. 7.2 sind die berechneten Meßergebnisse der Gasleckraten-Messungen für die im Rahmen dieser Diplomarbeit gemessenen TRD-Kammern 0001 und 0002 aufgetragen. Zuerst wird die prozentuale Zusammensetzung des Argon-CO₂-Gasgemisches genannt, dann die Flußrate, mit der dieses Gasgemisch durch die Kammern geleitet wurde. Danach kommt die Sauerstoff-Konzentration in der Einheit ppm, die sich nach der als nächstes aufgelisteten Meßdauer stabil eingestellt hatte. Daran schließt sich die Gasleckrate der Kammern (in der Einheit [$mbar \times l/h$]) an, die gemäß der Gleichung 7.5 aus Kap. 7.3.1 berechnet wurde.

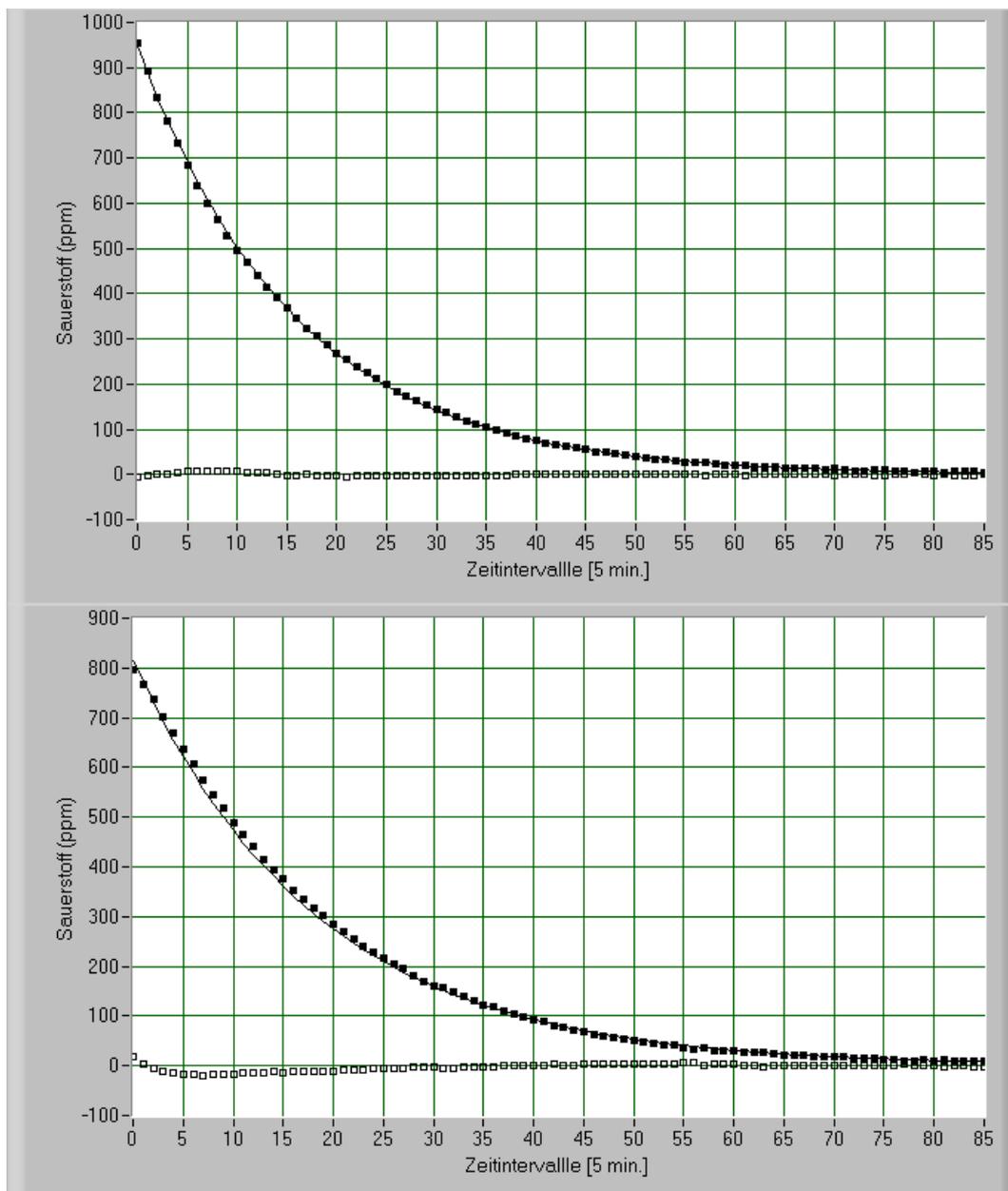


Abbildung 7.2: Die abfallenden Werte der Sauerstoff-Konzentrationen (ausgefüllte Quadrate) der Kammern 0001 (oben) und 0002 (unten) beim Spülen mit dem Argon-CO₂-Gemisch. Die durchgezogene Linie ist die Fitfunktion, die leeren Quadrate zeigen die Abweichungen der Meßwerte von der Fitfunktion an.

Bei der Kammer 0002 resultiert die relativ hohe Leckrate aus dem Umstand, daß die Kammer zum Zeitpunkt der Messung an der Übergangsstelle zwischen der Padplane und dem Distanzrahmen lediglich mit einem Klebeband abgedichtet war. Kammer 0001 dagegen war bereits verklebt.

Kammer Nr.:	Ar : CO ₂ [Prozent]	Flußrate [l/h]	O ₂ [ppm]	Meßdauer [h]	Leckrate [$mbar \times \frac{l}{h}$]
0001	85 : 15	23,5	5	23,5	0,57
0002	85 : 15	23,5	15	23	1,70

Tabelle 7.2: Die Ergebnisse der Messungen der Gasleckraten der TRD-Kammern 0001 und 0002.

Zukünftig werden die Werte der Leckrate jeder Kammer nach Beendigung der Messungen von LabVIEW automatisch berechnet und in die DCDB-Datenbank (siehe Kap. 8) eingetragen werden.

7.3.3 Fazit und Ausblick

Für beide im Rahmen dieser Diplomarbeit getesteten Kammern sind die Ergebnisse der Leckraten-Messungen sehr zufriedenstellend. Der Grund, warum bei der Kammer 0002 die Leckrate mit 15 ppm höher ist als bei der Kammer 0001 mit 5 ppm, liegt darin, daß bei der Kammer 0002 die Padplane noch nicht mit dem Distanzrahmen verklebt war, sondern die Schnittstelle zwischen beiden nur mit einem Klebeband verschlossen war.

Darüber hinaus ließen sich die Leckraten der Kammern noch senken, wenn bei den 4 aus Gummi bestehenden Gasstopfen zusätzlich noch ein Dichtmaterial verwendet werden würde.

Auch wenn die Werte für die Flußraten des Gasmisches, die hier zum Einsatz kamen, für die Messungen gut geeignet waren, so wird doch der Test weiterer Kammern für Werte mit noch optimaleren Flußraten sorgen. Das gilt sowohl für die Reduzierung der Sauerstoff-Konzentration auf den möglichst niedrigen Wert, als auch dafür, bei sich daran anschließenden Tests bei dieser niedrigen O₂-Konzentration zu bleiben.

Die Erfahrung beim Bauen und Testen weiterer Kammern wird in nächster Zeit die Erweiterung des in LabVIEW geschriebenen Kammermeßprogramms

mit sich bringen. So wird es z.B. möglich sein, die Flußraten von Argon und CO₂ am PC vorzugeben oder auch, den Luftdruck im Labor mit LabVIEW zu messen und zu speichern (sobald der Drucksensor im Gassystem eingebaut ist).

7.4 Messung der Homogenität der Gasverstärkung

Zu den Tests der TRD-Kammern gehört auch, festzustellen, ob über die gesamte Fläche der Kammer eine ausreichende Homogenität in der Gasverstärkung (engl. Gain Uniformity, GU) erzielt werden kann. Damit beim Betrieb des TRD-Detektors keine Probleme mit der Auswertung von Meßergebnissen auftreten, sollte die Verstärkung (gemessen über die Größe des Anodenstroms), die bei diesem Homogenitätstest an verschiedenen Stellen der Kammer (und natürlich stets von der selben Quelle) erzeugt wird, in einem Bereich von $\pm 15\%$ um den Mittelwert dieser Verstärkungsmeißreihe liegen.

Da im KIP-Labor kein Teilchenbeschleuniger zur Verfügung steht, benutzt man für diese Untersuchung radioaktive Quellen, in unserem Fall eine ⁹⁰Sr-Quelle. Für die Messungen der Kammern 0001 und 0002 wurde die Position der Quelle auf der Kammer noch von Hand ausgerichtet. An einem Positionierungsgerät, das von LabVIEW gesteuert die Quelle automatisch in einem 2D-Raster über die Kammer führt, wird aber bereits gearbeitet. Vor allem aus Gründen der Strahlenbelastung, aber auch, um die Genauigkeit der Messungen zu erhöhen, wird dieses System entwickelt. Die LabVIEW-Software wird neben der Steuerung der Quelle auch das Auslesen und Speichern des Anodenstroms übernehmen, sowie die Meßergebnisse numerisch auszuwerten und evtl. auch graphisch darstellen. Danach werden die Meßergebnisse in die DCDB-Datenbank eingetragen.

7.4.1 Vorbereitungen

Bei einer neuen Kammer muß man, um Spannung anlegen zu können, zuerst einmal die 6 Anodendrähte sowie den Kathodendraht, der zur Driftelektrode führt, an die Platine in der sogenannten Hochspannungsfiterbox anlöten. In dieser Box sind für jeden Draht ein Kondensator (Größenordnung nF) und ein Widerstand eingebaut, die in ihrer Funktion als Tiefpaß dafür sorgen, daß elektrische Signale an der Anode schneller ausgeglichen werden. Außerdem dienen sie dazu, Störspannungen von der Spannungsversorgung auszufiltern. An

beiden Enden des Hochspannungsfiterbox lassen sich nun die Hochspannungskabel, die durch die zwei HV-ISEG-Module (siehe Kap. 7.1.1) mit Spannung versorgt werden, anschließen. Mit der geerdeten Abschirmung des Anodenkabels verbindet man das System zur Erdung der Padplane-FFC-Kabel (siehe *Erdung der Padplane* in diesem Kapitel).

Gassystem

Für die Messung der Homogenität der Gasverstärkung braucht man eine Kammer, die bereits mit dem Ar-CO₂-Gasgemisch gefüllt ist, da in Luft keine Verstärkung stattfindet. Daher schließt sich sinnvollerweise die Messung der GU direkt an die Messung der Gasleckrate einer Kammer an. Im Folgenden wird daher exemplarisch für eine Messung der GU die Vorgehensweise beschrieben, wie wir sie bei der Kammer 0002 durchführten, auf die sich auch die bisherigen Kapitel der Qualitätstests beziehen.

Wir benutzten also eine Kammer, die bereits soweit mit einem Ar-CO₂-Gasgemisch gefüllt war, daß der O₂-Gehalt bei nur noch 15 ppm lag. Die Kammer wurde weiterhin mit dem gleichen Gasgemisch und einer Flußrate von 23,5 l/h gespült. Der mechanische Aufbau der Kammer wurde, wie im Kap. 7.1.3 beschrieben, dabei beibehalten, d. h., daß die Kammer nach wie vor an den Rändern durch Schraubzwingen verstärkt war.

Erdung der Padplane

Die Erdung der Padplane muß erfolgen, um die Symmetrie des elektrischen Feldes in der Verstärkungszone der Driftkammer zu gewährleisten. Zur Erdung der Padplane waren mehrere Konzepte erdacht worden.

Bei der Kammer 0001 erfolgte die Erdung noch mittels selbstklebenden Kupferfolienstreifen („Shielding Tape“ von der Firma 3M), die an den Padplane-Kabel befestigt und untereinander mit Kupferband verbunden wurden. Der Vorteil dieser Konstruktion ist eine sehr gute Leitfähigkeit der Kupferfolie und damit ein niedriger Widerstand, der Nachteil ist eine kaum vorhandene Wiederverwendbarkeit.

Für die Kammer 0002 verwendeten wir metallene Clips (sog. Foldback-Klammern), die im Bürohandel angeboten werden und zum Zusammenheften von Unterlagen benutzt werden. Zwar sind diese Clips auf der Außenseite lackiert, aber nicht auf der Innenseite. Nach einigen Tests erwies sich eine Konstruktion als optimal, bei der auf der Innenseite der Clips ein schmaler Streifen Doppelklebeband angebracht wird, an dem ein größeres Stück leitenden

Antistatikschaums befestigt wird. Dies erfolgt so, daß der Schaum direkten Kontakt hat zur unlackierten Metalloberfläche und mit der flexibleren Seite des Schaums nach außen weist. Der Zweck der Schaumverwendung liegt darin, daß der Schaum mit seiner hohen Flexibilität gleichermaßen alle Anschlüsse der Padplane-Kabel erfassen kann. Von der besten Position der Befestigung der Clips auf den aus der Kammer herausragenden Padplane-Kabel gibt es einen Bereich der Abweichung von 2 mm nach oben und unten, in dem der Widerstand mehr oder weniger im selben Bereich liegt. Wir testeten zahlreiche der auf diese Weise hergestellten Clips an einem Kabel, das nicht an die Padplane angeschlossen war und maßen die Widerstandswerte. Für eine gute Verbindung ergeben sich Werte zwischen 100 - 250 k Ω , wobei der maximale Bereich, bei dem die elektrische Leitung nicht perfekt, aber noch vorhanden ist, 100 - 500 k Ω beträgt.

Die Clips wurden untereinander verbunden durch Silberdraht, der bei jedem Clip um einen der Metallbügel gewickelt und danach an diesen angelötet wurde.

In Zukunft sollten aber auch die Originalstecker der Padplane-Kabel getestet werden, da diese nach neueren Erfahrungen durchaus zumindest mehrere Dutzend Male angeschlossen und wieder entfernt werden können, ohne kaputt zu gehen. Schließlich muß jeder Stecker auch nicht mehr als ca. 100 mal zum Einsatz kommen, da dies die Größenordnung an Kammern ist, die in Heidelberg gebaut und getestet werden wird.

Nach dem Verbinden der Padplane-Kabel untereinander wurden sie auch mittels Schrauben leitend mit der Kohlefaserschicht, die den oberen Abschluß der Kammer darstellt, verbunden. Abschließend wurde der ganze Verbund an die Erdung des Anoden-Hochspannungskabels angeschlossen.

7.4.2 Die Messungen

Repräsentativ für den Ablauf der Messung der Homogenität der Gasverstärkung wird hier der Meßablauf beschrieben, wie wir ihn bei der Kammer 0002 durchführten. Nachdem die Erdung der Padplane und der Kathodendrähte erfolgt war, erhöhten wir langsam in Schritten von 50 V die Anodenspannung bis auf 1500 V und warteten ggf. darauf, daß ein kurzer Anstieg des Anodenstrom wieder auf einen 1-stelligen Wert im nA-Bereich gefallen war. Nach Erreichen der gewünschten Anodenspannung regelten wir die Driftspannung auf -2100 V, wobei hier kein Anstieg des Anodenstroms beobachtet wurde. Nachdem beide Spannungen ihre Sollwerte erreicht hatten, stellte sich dauerhaft ein Dunkelstrom von ca. 3 nA ein.

Für die Messung der Gasverstärkung im Labor benutzten wir eine ^{90}Sr -Quelle, die wir mittels zweier Lineale auf der Kammer positionierten und in einem Meßraster mit Abständen von jeweils 20 cm auf der Kammer verschoben. Für jede der Positionen wurde der am A310-Strommeßgerät (siehe Kap. 7.1.2) angezeigte Wert des Anodenstroms notiert. Die Abstände zu den Rändern betrugen in z-Richtung der Kammer betrachtet 7 cm und in y-Richtung 10 cm, wobei der Unterschied zwischen beiden Werten auf die geometrische Anordnung der Signalkabel zurückgeht.

Nach ersten Tests mit der ^{90}Sr -Quelle erwies sich das registrierte Stromsignal als bereits zu hoch, da unabhängig von der Position der Quelle auf der Kammer stets das Maximum auf der Skala des Strommeßgerät in Höhe von 1023 nA erreicht wurde. Bei diesem Meßgerät läßt sich nicht die Obergrenze des Stroms, sondern nur der Meßbereich selbst einstellen und dieser befand sich bereits, was die Empfindlichkeit angeht, im gewünschten Bereich. Um wieder auf Ströme unterhalb dieses Grenzwertes zurückzukommen, reduzierten wir die Anodenspannung auf 1400 V und die Driftspannung auf 0 V.

Mit diesen Einstellungen erhielten wir Meßwerte, die im Bereich von 450-750 nA liegen und sich daher für die Messung der GU dieser Kammer gut eignen. In Abb. 7.3 sind die gemessenen Stromwerte als Fläche über dem Kammergrundriß aufgetragen, die Höhenstruktur entspricht dem jeweiligen Stromwert. Unterstützt wird die Visualisierung durch eine stromabhängige Farbskala, deren Farben von blau für ca. 450 nA bis zu rot für ca. 700 nA reichen.

Wie in diesem 3D-Plot gut zu sehen ist, fällt der Verstärkungsstrom deutlich ab, sobald die Strontium-Quelle in die Nähe des Kammerrandes kommt. Der Grund dafür liegt darin, daß die verwendete Quelle nicht besonders gut kollimiert ist, so daß sich aus Sicht der Quelle in dem Raumwinkel, den die Quelle mit ihrer Strahlung erfaßt, im Randbereich der Kammer deutlich weniger Kammerfläche befindet, als im mittleren Bereich der Kammer. Daher wurden zur Berechnung der Homogenitäten der Gasverstärkung nicht die Meßwerte in der Nähe der Kammerränder herangezogen.

Auf den Mittelwert der erzielten Verstärkungsströme der Kammer 0002 von 695 nA bezogen, ergibt sich eine Variation von etwa 3,9% nach oben und unten, so daß sich in einem Bereich von 7,9% um den Mittelwert alle Verstärkungsmessungen aufhalten. In der Tab. 7.3 sind für die Kammern 0001 und 0002 die berechneten Abweichungsbereiche aufgetragen, wobei bei beiden Kammern der

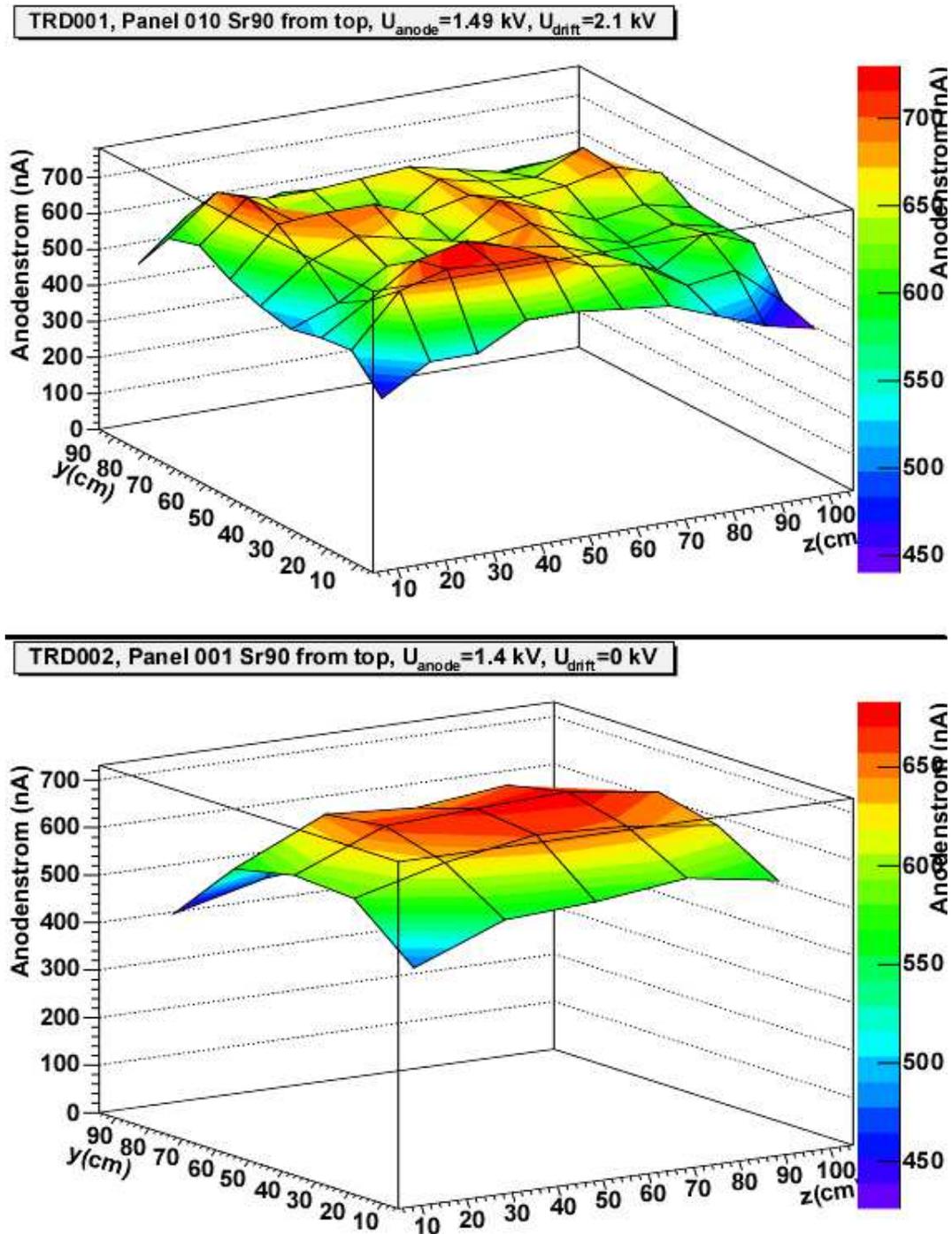


Abbildung 7.3: Graphische Darstellung zu den Messungen der Homogenität der Gasverstärkung der Kammern 0001 (oben) und 0002 (unten). Die Stärke des Anodenstroms wird mittels einer Farbskala über der y- und z-Achse der Kammern wiedergegeben. Die Werte für die Anoden- und Driftspannungen stehen jeweils oberhalb der Grafiken.

Sollwert für die TRD-Kammern von $\pm 15\%$ (d. h. Abweichungsbereich 30 %) unterschritten wird. Die Varianz zwischen den Abweichungsbereichen von 7,9 % bei der Kammer 0002 und den 24,5 % von Kammer 0001 könnte daher kommen, daß bei der Kammer 0001 die Padplane an manchen Stelle etwas uneben ist und daher verschiedene Abstände der Pads zu den Anodendrähten zu variierenden Induktionsimpulsen auf der Padplane führen.

Kammer Nr.:	Anode [kV]	Drift [kV]	Ar : CO ₂ [Prozent]	Dunkelstrom [nA]	Abweichung [Prozent]
0001	1,47	-2,10	80 : 20	30	24,5
0002	1,40	0	85 : 15	3	7,9

Tabelle 7.3: Die Ergebnisse der Messungen der Homogenität der Gasverstärkungen der TRD-Kammern 0001 und 0002.

In der Tabelle stehen außerdem die für die Messungen gewählten physikalischen Parameter, wobei auch deutlich wird, wieso bei der Kammer 0002 als Anodenstrom nur 1400 V und als Driftspannung 0 V gewählt werden konnten: im Gegensatz zur Kammer 0001 mit ihren höheren Spannungswerten war bei der Kammer 0002 das Gasgemisch reicher an Argon, was zum einen bedeutet, daß der prozentuale Anteil des Verstärkungsgases (Ar) höher war, zum anderen gleichzeitig auch der Anteil des Löschgases (CO₂) niedriger. Der rechnerische Unterschied in der Verstärkung zwischen den Argon : CO₂-Konzentrationen von (85 % : 15 %) zu (80 % : 20 %) liegt bei ca. 30% [Mah04].

Der relativ hohe Dunkelstrom von 30 nA bei der Kammer 0001 im Vergleich zur Kammer 0002 mit nur 3 nA kommt daher, daß die Kammer 0001 zum Zeitpunkt der Messung frisch zugeklebt und noch nicht besonders lange gespült worden war. Als die Kammer 0001 jedoch über 2 Wochen später wieder über Nacht gespült wurde, so stellte sich (bei einem Gasfluß von 181/h und einer O₂-Konzentration von 7-8 ppm) nun ein Dunkelstrom von 0 nA bei 1500 V Anodenspannung ein. Zu den für das Absinken des Dunkelstroms möglicherweise verantwortlichen Ursachen siehe Kap. 7.2.1.

7.5 Messungen der Verstärkungs-Kennlinien

Der Zweck der Messung der Verstärkungs-Kennlinie einer Kammer liegt darin, bei angelegter Anodenspannung und Bestrahlung der Kammer mit einer Quelle zunächst einmal festzustellen, ob die Gasverstärkung überhaupt funktioniert und wenn ja, ob der Verstärkungsstrom exponentiell ansteigt. Auch

hier kam wieder, wie bei der Messung der Homogenität der Gasverstärkung, die ^{90}Sr -Quelle zum Einsatz.

Die Messungen wurden stets damit begonnen, die Anodenspannung auf den Anfangswert hochzuregeln und abzuwarten, bis der Anodenstrom auf einen Wert gefallen war, an dem er stabil blieb. Bei diesem Wert wurde nun zuerst der Dunkelstrom gemessen, d.h. die ^{90}Sr -Quelle befand sich nicht auf der Kammer. Dann wurde die Quelle in etwa auf der Mitte der Kammer positioniert und der Strom abgelesen, wiederum, nachdem er sich stabilisiert hatte. Anschließend wurde die Anodenspannung um 50 V (bzw. um einen kleineren Betrag, wenn man sich an die Grenzspannung, bei der das Maximum des Strommeßgerät erreicht wird, annäherte) angehoben und die Messung begann von vorne. Um den genauen Wert der Verstärkung bei der angelegten Anodenspannung zu ermitteln, muß man die Dunkelströme von den Anodenströmen abziehen.

Anode [V]	Kammer 0001		Kammer 0002	
	Anode [nA]	Dunkel [nA]	Anode [nA]	Dunkel [nA]
950	5	0	–	–
1000	9	0	17	1
1050	15	0	30	0
1100	24	0	47	0
1150	40	0	73	1
1200	63	0	118	2
1250	95	0	184	1
1300	155	0	293	3
1325	195	0	–	–
1350	240	0	450	3
1375	300	0	–	–
1400	370	0	729	6
1415	–	–	822	4
1420	445	0	–	–
1430	–	–	954	4
1450	570	0	MAX	11
1470	730	20	–	–
1480	780	20	–	–
1500	MAX	–	–	–

Tabelle 7.4: Die Anoden- und Dunkelströme der Messungen der Verstärkungs-Kennlinien der TRD-Kammern 0001 ($\text{Ar}:\text{CO}_2 = 80:20$, Driftspannung: -2100 V) und 0002 ($\text{Ar}:\text{CO}_2 = 85:15$, Driftspannung: 0 V).

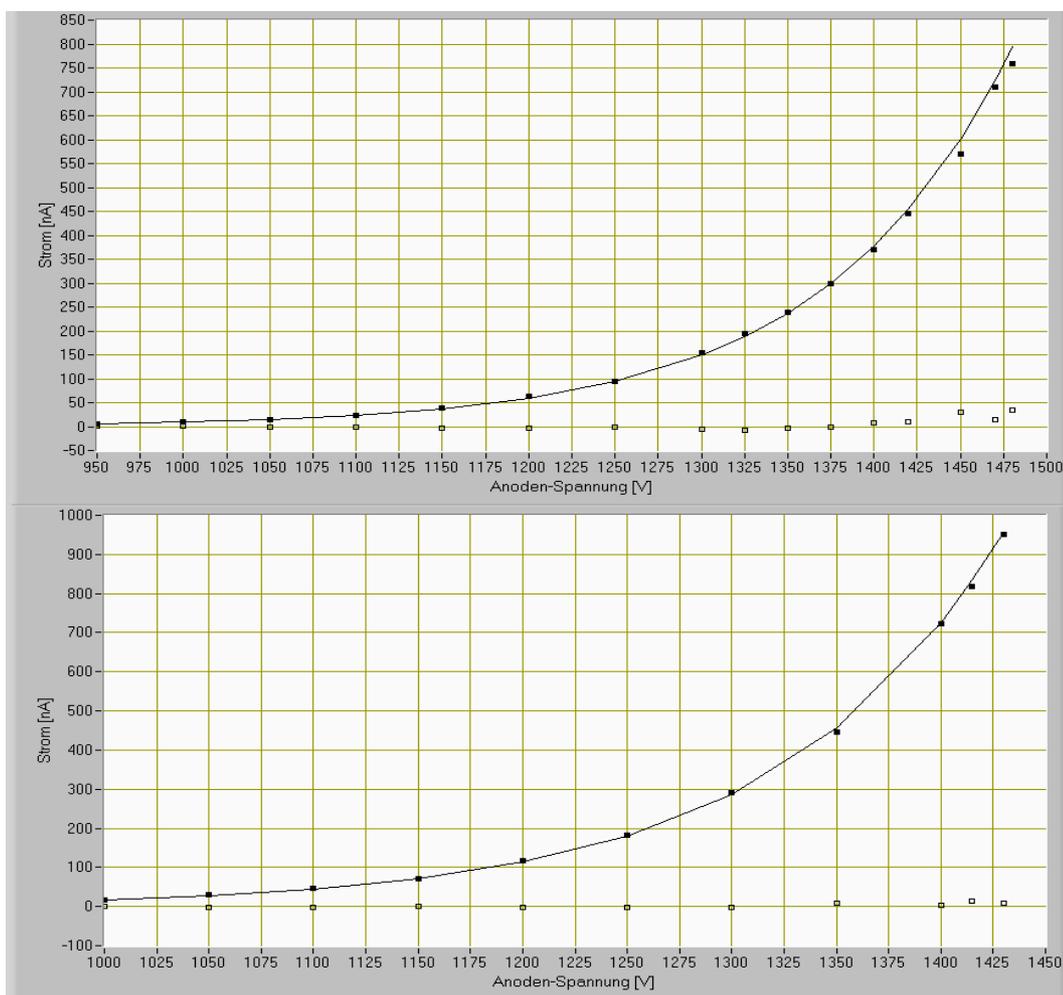


Abbildung 7.4: Hier sind die um die jeweiligen Dunkelströme korrigierten Anodenströme der beiden Kammern 0001 (oben) und 0002 (unten) zu sehen, die bei Bestrahlung der Kammern mit der ^{90}Sr -Quelle bei verschiedenen Anodenspannungen gemessen wurden.

Die gemessenen Anodenströme sind in der Tab. 7.4 aufgetragen, zusätzlich sind sie, um den Wert des jeweiligen Dunkelstroms korrigiert, in der Abb. 7.4 zu sehen. Das obere Diagramm in Abb. 7.4 bezieht sich auf die Kammer 0001, das untere auf die Kammer 0002. Die Strommeßwerte werden durch die ausgefüllten Quadrate dargestellt, die durchgezogene Linie ist die Fitfunktion an diese Meßwerte und die leeren Quadrate stellen die jeweilige Differenz zwischen den Meßwerten und den Werten der Fitfunktion dar. Dabei ist in den graphi-

schen Darstellungen für beide Kammern klar zu sehen, wie nah die Meßwerte den gefitteten Exponentialfunktionen kommen. Bei der Messung der Kammer 0001 war das Gasgemisch zusammengesetzt aus 80 % Argon und 20 % CO₂, die Driftspannung lag bei -2100 V. Bei der Kammer 0002 lag die Gaszusammensetzung bei 85 % Argon und 15 % CO₂, was auch erklärt, wieso die Driftspannung hier auf 0 V gestellt wurde und bereits bei 1450 V für den Anodenstrom das Maximum („MAX“) auf der Skala des A310-Strommeßgerät erreicht wurde: wie bei der Messung der Homogenität der Gasverstärkung kam auch hier bei der Kammer 0002 ein Gasgemisch zum Einsatz, das einen höheren Anteil an Verstärkungsgas und damit zugleich einen geringeren Anteil an Löschgas hatte, als bei der Kammer 0001.

Die leeren Felder in der Tab. 7.4 erklären sich damit, daß, je nachdem, wo bei einer der beiden Kammern der Grenzwert für den Anodenstrom erreicht wurde, zusätzliche Messungen unterhalb dieses Grenzwertes durchgeführt wurden.

Für die Plots und das Fitten der Verstärkungskennlinien wurde ein ähnliches LabVIEW-Programm geschrieben, wie für die Darstellung der Diagramme der Gasleckraten in Kap. 7.3.2.

7.6 Zusammenfassung der Kammermessungen

In der Tab. 7.5 befindet sich ein Überblick über alle 4 Messungen, die für die Qualitätstests der TRD-Kammern 0001 und 0002 im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt wurden.

Kammer Nr.:	Dunkelstrom [nA]	Leckrate [$mbar \times \frac{l}{h}$]	Homogenität [Prozent]	Verstärkung [Ergebnis]
0001	50	0,57	24,5	OK
0002	30	1,70	7,9	OK

Tabelle 7.5: Zusammenfassung der Meßergebnisse der 4 Kammertests für die TRD-Kammern 0001 und 0002.

Im einzelnen sind aufgeführt:

- Der Dunkelstrom der Kammern, der bei einer Anodenspannung von 1500 V und einer Driftspannung von 0 V gemessen wurde. Gefüllt waren die Kammern dabei mit normaler Außenluft. Nach einer längeren Konditionierungsphase fielen die Werte der Dunkelströme beider Kammern über die in der Tabelle angegebenen hinaus noch auf ca. 1 nA ab.

Beide Kammern bestanden diesen Hochspannungstest zum Ausschließen von Kurzschlüssen, der Wert der Kammer 0001 ließ sich nach einer 2-wöchigen Wartezeit noch deutlich senken.

- Die Messungen der Gasleckraten, wobei beide Kammern mit einem Gasgemisch von 85 % Ar und 15 % CO₂ bei einem Gasfluß von 23,5 l/h gespült wurden. Der Endwert der O₂-Konzentration lag bei der Kammer 0001 bei 5 ppm und bei der Kammer 0002 bei 15 ppm. Die Gasleckrate der Kammer 0002 läßt sich noch dadurch reduzieren, daß sie vollständig verklebt wird. Ausgehend von den Meßergebnissen lassen sich beide Kammern zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Grund für diese Einschränkung siehe Kap. 7.3.3) als ausreichend gasdicht einstufen.
- Die Homogenität der Gasverstärkung wurde bei der Kammer 0001 bei einer Anodenspannung von 1470 V, einer Driftspannung von -2100 V und einem Gasgemisch von 80 % Ar und 20 % CO₂ gemessen. Bei der Kammer 0002 lauteten die Werte: Anodenspannung 1400 V, Driftspannung 0 V, Gasgemisch 85 % Ar und 15 % CO₂.

Die Variation der Verstärkungswerte beider Kammern liegt innerhalb von 30 %, so daß auch dieser Test von beiden Kammern bestanden wurde.

- Die Messungen der Verstärkungskennlinien wurden bei der Kammer 0001 bei einer Driftspannung von -2100 V und einem Gasgemisch von 80 % Ar und 20 % CO₂ gemessen, bei der Kammer 0002 bei der Driftspannung 0 V und 85 % Ar und 15 % CO₂. Diese Verstärkungsmessungen liefern kein direktes, numerisches Ergebnis. Die Diagramme in der Abb. 7.4 zeigen aber deutlich, daß die Verstärkung beider Kammern nicht nur funktioniert, sondern auch sehr gut mit der gefitteten Exponentialfunktion übereinstimmt.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt scheinen die 4 Kammertests gut zur Durchführung der Qualitätstests der TRD-Kammern geeignet zu sein. Die Ergebnisse der Kammertests liegen alle innerhalb der gewünschten Sollwerte und bestätigen damit eine geeignete Produktionsweise der Kammern.

Kapitel 8

Die Detektordatenbank

8.1 Einleitung

Die Detektordatenbank (**D**etector **C**onstruction **D**atabase, DCDB) des ALICE-Detektors wird von einer Gruppe der Universität Warschau entwickelt, deren Mitglieder von der Fakultät für Elektronik und Informationstechnologie und von der Fakultät für Physik stammen. Geleitet wird die Gruppe von Wiktor Peryt. Die DCDB dient der Aufnahme der Konstruktions- und Testdaten der Subdetektoren von ALICE, also auch der des TRD-Detektors [DCDB1]. Durch diesen Ansatz befinden sich alle wichtigen Daten, die ALICE betreffen, zentral an einer Stelle, was u. a. für die Fehlersuche im Rahmen der ersten Testläufe des fertigen Detektors von Nutzen sein wird.

Die Arbeiten an dieser Datenbank begannen im Jahr 2001 und waren zu Beginn des Jahres 2004 noch nicht beendet. Die TRD-Gruppe am Physikalischen Institut der Universität Heidelberg ist die erste, die die DCDB im Rahmen des ALICE-Projekts einsetzt. Da die Arbeiten an der DCDB zu diesem Zeitpunkt aus der reinen Entwicklungsphase heraustreten und mehr praxisorientiert erfolgen, treten naturgemäß Fehler im Aufbau und in der Handhabung der Datenbank zu Tage. Auch zeigen sich nun zahlreiche Änderungswünsche der Benutzer, die erst beim tatsächlichen Umgang der Benutzer mit der Datenbank auffällig werden können.

Zu den Daten, die für jeden Subdetektor von ALICE in die Datenbank geschrieben werden sollen, gehören:

- die Messungen der physikalischen Eigenschaften der Komponenten des Subdetektors,
- die Ergebnisse der Komponenten-Tests,

- im Falle komplizierter Bauelemente (z.B. DCS-Board des TRD) die dazugehörigen Schemata,
- die Herkunft der Bauteile, aus denen die Komponenten zusammengesetzt werden,
- die Aufenthaltsorte dieser Bauteilen vor ihrem Einbau in den Subdetektor.

8.2 Aufbau der DCDB

Die Subdetektoren von ALICE werden weltweit an verschiedenen Standorten entwickelt, u.a. in Europa, USA und Indien. Um dem Rechnung zu tragen, wurde ein System aufgebaut, bei dem jede Gruppe ihre Daten in eine lokale Datenbank (Satelliten-Datenbank) eingibt und diese Daten dann an eine zentrale Datenbank übertragen werden, die sich am CERN befindet (siehe Bild 8.1). Die Satelliten-Datenbank der ALICE-TRD-Gruppe befindet sich an der Gesellschaft für Schwerionen-Forschung (GSI) [DBgsi].

Die Übertragung der Daten zwischen den einzelnen Satelliten-Datenbanken und der zentralen Datenbank wird durch den Austausch von XML-Daten (siehe Kap. 8.2.2) vollzogen. Dabei geht die Kommunikation immer von den Satelliten-Datenbanken aus und wird für die Anwender auf das Anklicken eines entsprechend gekennzeichneten Menüpunktes reduziert sein.

Dieses System soll für mehr Datensicherheit sorgen, da die Satelliten-Datenbanken der Verantwortung der lokalen Gruppen unterstehen und so Datenverlusten im Falle einer Unterbrechung von Netzwerkverbindungen zur zentralen Datenbank am CERN vorgebeugt werden kann. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Dezentralisierung ist die Möglichkeit, daß für jede Gruppe eine individuelle Variante der Software zur Datenabfrage (RABBIT, siehe Kap. 8.2.4) erstellt werden kann. Außerdem können so im Fall von Datenverlusten in Satelliten-Datenbanken diese Daten aus der zentralen Datenbank wiederhergestellt werden [DCDB1].

Für die enormen Datenmengen, die beim Bau eines Detektors wie ALICE anfallen, wird ein professionelles Datenbank-System (**Data Base Management System**, DBMS) benötigt. Für die zentrale Datenbank am CERN fiel daher die Wahl der Warschau-Gruppe auf Oracle [Oracl]. Die Datenmengen bei den Satelliten-Datenbanken sind oftmals bedeutend kleiner, daher reichen hier auch frei erhältliche DBMS wie MySQL oder PostgreSQL aus, die bei vielen anderen ALICE-Gruppen zum Einsatz kommen. Da der TRD-Gruppe Kapazitäten

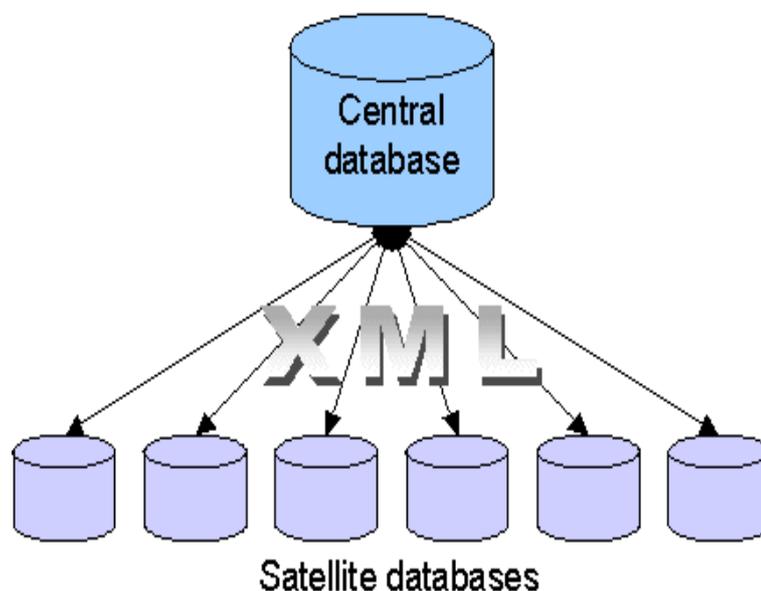


Abbildung 8.1: DCDB-Struktur: Der Austausch der Daten zwischen der zentralen Datenbank (Central Database) und den Satelliten-Datenbanken (Satellite Databases) erfolgt über die Scriptsprache XML [DCDB1].

der GSI zur Verfügung stehen, nutzt das Physikalische Institut Heidelberg die Oracle-Datenbank der GSI als Lösung für seine TRD-Satelliten-Datenbank. Was die Benutzerfreundlichkeit angeht, lautet das Ziel der Datenbank, daß sie auch von nicht extra dafür geschultem Personal in den Labs benutzt werden kann. Auf dem Weg zu diesem Ziel werden die Kollegen aus Warschau von den Mitgliedern der Arbeitsgruppen von ALICE unterstützt.

8.2.1 Die generische Struktur der DCDB

Die Detektordatenbank DCDB verfügt über eine sogenannte „allgemeine Struktur“ (generic structure). Das bedeutet, daß die Warschau-Gruppe speziell auf die Anforderungen der ALICE-Subdetektoren ausgerichtet eine Struktur der Daten und ihrer Beziehungen (**E**ntity **R**elationship **D**iagram, ERD) erstellt hat. Das ERD enthält eine feste und vordefinierte Anzahl von Tabellen. Dadurch unterscheidet sich die DCDB wesentlich von herkömmlichen Datenbanken. In den vorgegebenen Tabellen der DCDB können direkt Elemente verschiedener Strukturen gespeichert werden, wogegen in einer herkömmlichen Datenbank für jede Gruppe von Daten oder Eigenschaften neue Tabellen oder

zumindest Tabellenspalten hinzugefügt werden müssen.

So würde z.B. bei einer herkömmlichen Datenbank für jede Kammer des TRD eine eigene Tabelle erstellt werden müssen, in der die ganzen technischen Daten, Meßergebnisse etc. der Kammer gespeichert wären. Bei 540 Kammern hätte man ebensoviele Tabellen, außerdem müßte man für jede Änderung oder Erweiterung der Datenstruktur der Kammern jede einzelne dieser Tabellen entsprechend ändern. Denkbar sind natürlich auch andere Ansätze der „klassischen“ Verwaltung der Daten, entscheidend ist aber, daß jede Änderung oder Erweiterung von Datenstrukturen aufwendige und unübersichtliche Prozesse zur Folge hätte.

Bei der DCDB dagegen gibt es eine prinzipielle Aufteilung der Tabellen des ERD (siehe Abb. 8.2) in solche Tabellen, in der die Datenstrukturen des Subdetektors abgebildet werden (im Bild die grauen Kästchen) und in Tabellen, die der Aufnahme der Daten dienen (im Bild die weißen Kästchen).

Diese Aufteilung macht die Erweiterung der Datenstruktur sehr einfach. So muß z. B. für die Aufnahme eines neuen Komponenten-Typs des TRD in die Datenbank nur ein weiterer Eintrag (eine Zeile) in der Tabelle „Component Type“ erfolgen. Von da an steht dieser Komponententyp zur Eingabe von Einheiten dieser Komponente zur Verfügung steht. Bei einer Standard-Datenbank, die natürlich nicht auf die besonderen Anforderungen des ALICE-Detektors ausgelegt sein kann, würde diese Erweiterung komplizierter erfolgen und wäre für die Benutzer weniger transparent.

Im Folgenden wird beispielhaft der Aufbau des ERD anhand der Speicherung einer Messung und ihrer Ergebnisse in die DCDB beschrieben. Diese Messung soll „Messung A“ heißen. Die folgenden Punkte geben der Verständlichkeit halber den Vorgang auf das Wesentliche reduziert wieder:

1. Zuerst einmal muß der *Typ* der Messung A in der Tabelle „Definition Of Process“ angelegt werden. Bevor man dies nicht getan hat, können keine Meßwerte in der DCDB gespeichert werden.
2. Will man eine Meßreihe durchführen, muß man nun in der Tabelle „Process“ eine Messung (z. B. „Messung_KIP_001“) des Typs „Messung A“ erzeugen. Diese zeichnet sich u. a. durch das Datum und die Uhrzeit aus, zu der sie angelegt wird, ebenso wie durch die Person, die die Messung durchführt. Dies kann von LabVIEW aus oder über RABBIT erfolgen.

3. Die Messung „Messung_KIP_001“ entspricht nun einer Zeile der Tabelle „Process“. In der Spalte „Value Table“ dieser Zeile trägt man nun die Daten ein, die im Rahmen der Messung „Messung_KIP_001“ gewonnen wurden. Auch der Datenbestand wird in Form einer Tabelle in die DCDB eingetragen.

8.2.2 Die Scriptsprache XML

XML steht für **eXtensible Markup Language** (erweiterbare Auszeichnungssprache) und ist ein Quasi-Standard zur Erstellung strukturierter Dokumente im World Wide Web oder in Intranets. XML wird „erweiterbar“ genannt, weil man hier seine eigenen Auszeichnungs-Tags erstellen kann. Tags dienen außer zur Formatierung auch zur Kennzeichnung bestimmter Elemente in einem Dokument (wie Überschriften, Fußnoten, Kopfzeilen), zur Indizierung und zur Verknüpfung (durch Links) [NLx03]. In XML werden Tags benutzt, um Inhalte zu beschreiben. So könnte z. B. das Tag `<TELNUM>` darauf hinweisen, daß die folgenden Daten eine Telefonnummer bezeichnen. Abhängig von der Anwendung, die auf dem Zielrechner läuft, kann der Nutzer entscheiden, ob die Telefonnummer nur gezeigt, gespeichert oder angewählt werden soll.

8.2.3 Das Anlegen der Datenstrukturen

Das Anlegen und Ändern der Datenstrukturen der Detektordatenbank geschieht mit dem Dictionary Wizard (DW) [DBdiw]. Ebenso wie die Benutzerschnittstelle der Datenbank RABBIT (siehe Kap. 8.2.4) war dieses Programm früher in PHP programmiert, jetzt aber in Java. Die Installation des DW befindet sich an der Universität Warschau und wird auch im späteren Verlauf der Datenbankentwicklung dort bleiben. Als Benutzer meldet man sich am DW an und legt z. B. neue Komponententypen des Detektors an, die anschließend als neue Struktur auf die Datenbank an der GSI übertragen werden. Dies geschieht aber aus Integritätsgründen der Datenbank nicht automatisch, sondern muß erst von einem Kollegen der Warschau-Gruppe überprüft und dann umgesetzt werden. Die Struktur der Daten selbst nennt man das Data Dictionary (Datenbeschreibungsverzeichnis).

8.2.4 Die Benutzerschnittstelle der Datenbank

Mit der Benutzerschnittstelle der Datenbank (früher: User Application, jetzt: **R**emotely **A**ccessible **B**ase-**B**rowsing **I**nterface **T**oolkit, RABBIT) erfolgt der Zugriff der Benutzer auf die in der Datenbank gespeicherten Informationen [DBrab]. Mit RABBIT können Daten eingegeben, überprüft, geändert, gelöscht

oder visualisiert werden. Jede Gruppe des ALICE-Projekts hat neben einer eigenen Satelliten-Datenbank auch eine eigene Installation von RABBIT. Dies erhöht die Unabhängigkeit und Stabilität des Datenbank-Systems. Die Version von RABBIT der Heidelberger ALICE-TRD-Gruppe befindet sich auf dem gleichen PC installiert, wie die für LabVIEW benötigte Software Labserver (siehe Kap. 8.3).

Mit RABBIT lassen sich eingegebene Daten nicht nur numerisch, sondern auch visuell anzeigen. Bereits implementiert sind graphische Darstellungen von Meßdaten in Form von XY-plots und als Histogramme. Dies wird mit carrot erzeugt, in Zukunft sollen auch weitergehende Plots wie das Fitten von Exponentialfunktionen möglich sein. Die Ergebnisse von verschiedenen Messungen, die alle zu einem gemeinsamen Meßprozeß zusammengeführt sind, sollen in Zukunft auch alle auf einem Fenster auf dem Monitor abrufbar sein.

Auch sind diverse Sicherheitsfunktionen integriert. So können bei RABBIT falsch in der Datenbank gespeicherte Detektor-Komponenten nicht gelöscht, sondern nur auf den Status „nicht akzeptiert“ (not accepted) gesetzt werden. Ähnliches gilt z. B. für mit falschen Einstellungen durchgeführte Messungen. Deren Werte könnten nur einzeln überschrieben werden. Einfacher ist es da, die Meßreihe als Ganzes für ungültig zu erklären, wobei sie aber nicht aus der Datenbank entfernt wird.

8.3 Verbindung von LabVIEW zur DCDB mit Labserver

Der überwiegende Teil der Daten, die bei den Tests der Komponenten von ALICE anfallen, werden mittels der Software LabVIEW (siehe Kap. 4) gewonnen. Die Meßdaten können jedoch von LabVIEW aus nicht direkt in die Satelliten-Datenbank geschrieben werden. Der Weg, den die DCDB dafür vorsieht, führt zunächst über die Umwandlung der Meßdaten in das frei definierbare XML-Format (siehe Kap. 8.2.2). Dies geschieht mit Hilfe der von der Warschau-Gruppe programmierten XML-VIs (siehe Kap. 8.3.2). Der Vorteil dieser Methode liegt in der Verallgemeinerung des Übertragungsweges durch XML, da bei dieser Lösung auch andere Programme als LabVIEW auf die gleiche Art und Weise Daten in die Datenbank schreiben können.

Eines der verwendeten XML-VIs sendet die umgewandelten Meßdaten an das Programm Labserver weiter (siehe Abb. 8.3). Labserver kann dabei auf

dem selben PC installiert sein, auf dem auch LabVIEW die Messungen ausgewertet. Ein weiterer Grund dafür, diese Methode der Datenübertragung zu wählen, liegt darin, daß in Labserver die Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen von Datenbanken (MySQL, PostgreSQL und Oracle), die als Satelliten-Datenbanken eingesetzt werden, berücksichtigt werden können.



Abbildung 8.3: *Der Weg der Daten-Übertragung: von LabVIEW aus werden die Daten mit Hilfe der XML-VIs in Form von XML-Anweisungen an das Programm Labserver geschickt, das diese Anweisungen in SQL umwandelt und sie an die Datenbank weiterleitet.*

Das Programm Labserver wandelt die in Form von XML vorliegenden Meßdaten in SQL-Anweisungen um und schickt diese an die Datenbank. SQL steht für **S**tandard **Q**uery **L**anguage (Standard Abfrage Sprache) und ist eine Datenbank-unabhängige Sprache, die als Standard für die meisten, gebräuchlichen Datenbanken eingesetzt wird.

Wie man Labserver installiert, kann in einer hierfür am Physikalischen Institut erhältlichen Anleitung nachgelesen werden [LehLa].

Mit der Kombination aus LabVIEW und Labserver können die gleichen Datenoperationen an der Datenbank wie mit RABBIT vorgenommen werden. Man braucht RABBIT nicht, um z. B. vom Meß-PC aus eine neue Detektor-Komponente anzulegen und deren Meßwerte zu speichern. Allerdings ist die Handhabung solcher Vorgänge mit LabVIEW recht kompliziert, falls sie nicht schon im Programm angelegt sind.

Um für den Fall einer Unterbrechung der Netzwerkverbindung vom Messlabor zur Satelliten-Datenbank vorzubeugen, empfiehlt es sich, alle Messdaten auch lokal in Datenfiles zu speichern.

8.3.1 Installation und Konfiguration von Labserver

Zu einer vollständigen Labserver-Installation gehören 4 Software-Module:

- Der Oracle Client für Linux ermöglicht unter Linux den Zugriff auf eine Oracle-Datenbank.
- Bei der Bibliothek (Library) „lbsqlora“ handelt es sich um eine einfache C-Library, mit der man den Zugriff von Labserver auf eine Oracle-Datenbank durchführen kann.
- Die in C geschriebenen Libraries „libxml2“ benötigt man, damit Labserver die in einem XML-Code eingebetteten Messwerte zu SQL-Anweisungen verarbeiten kann.
- Das File „Labserver“ selbst ist derjenige Teil des Installationspakets, der von den Mitgliedern der Warschau-Datenbank-Gruppe erstellt wurde. Labserver ist in der Programmiersprache C erstellt und muss vor Benutzung kompiliert werden.

Zur Zeit gestaltet sich die Installation von Labserver noch sehr komplex und ist kaum dokumentiert. Daher kann sie nicht ohne die Hilfe der Kollegen der Warschau-Gruppe durchgeführt werden.

8.3.2 Die DCDB-XML-VIs für LabVIEW

Den VIs muß für ein erfolgreiches Schreiben der Daten in die Datenbank unter anderem Folgendes mitgeteilt werden:

- Name des Subdetektors (z. B. „Transition Radiation Detector“)
- Typ der Komponente des Subdetektors, für die die Messung durchgeführt wird (z. B. „TRD Readout Chamber“)
- der Hersteller der Komponente (z. B. „PI Heidelberg“)
- falls für eine Komponente gemessen werden soll, die schon in der Datenbank angelegt ist, dann deren Kennzeichnung und der Vermerk an das VI, daß diese Komponente schon vorhanden ist; falls die Komponente neu angelegt werden soll, dann deren neue Kennzeichnung (z. B. „Kammer_0001“)
- Typ der Messung (z. B. „Kammer_Messung_A“)
- das Datum und der Name der Person, die die Messung durchführt
- außerdem natürlich noch die Webadresse und die Zugangsdaten der Satellitendatenbank etc.

Dabei müssen den VIs exakt die selben Bezeichnungen übergeben werden, wie sie im DW angelegt wurden, sonst ist ein erfolgreicher Eintrag in die Datenbank nicht möglich.

Die Verbindung der XML-VIs untereinander sowie mit den VIs, die im Rahmen des Kammermeßprogramms verwendet werden, erfolgt nach einem komplexen Schema, das hier nicht wiedergegeben werden soll.

8.4 Fazit und Ausblick

8.4.1 Fehlerquellen

Auch wenn der Aufbau der Datenbank schon sehr weit fortgeschritten ist, gibt es doch noch viele Gebiete, die sich in der Entwicklung befinden. Fehler können entstehen, weil viele verschiedene Software-Pakete ineinandergreifen müssen, so z.B.:

- unterschiedliche Linux-Versionen, die in mancher Beziehung nicht zueinander kompatibel sind,
- mehrere Datenbanksysteme, die als Satelliten-Datenbanken eingesetzt werden,
- RABBIT und die von ihm genutzten Java-Bibliotheken, die bisher keine stabile Verbindung zur Datenbank an der GSI aufrecht erhalten konnten,
- der Dictionary Wizard, bei dem Veränderungen an der Datenstruktur durchgeführt werden, die stets der Warschau-Gruppe mitgeteilt werden müssen.

Auch die unterschiedliche Bezeichnung von Elementen in den verschiedenen Modulen der Datenbank können zu Fehlern bei der Eingabe von Meßdaten oder Detektorspezifikationen führen. Der Grund dafür ist, daß die verschiedenen Module alle von unterschiedlichen Mitarbeitern bearbeitet werden.

8.4.2 Fazit

Zusammenfassend stellt sich die Gesamtstruktur der Detektordatenbank DCDB für die ALICE-TRD-Gruppe der Universität Heidelberg so dar:

Mit Hilfe des Dictionary Wizard, der sich an der Universität Warschau befindet, legen die Benutzer die Struktur ihrer eigenen Satellitendatenbank fest.

Diese Struktur wird von den Kollegen aus Warschau auf die Datenbank an der GSI übertragen. Per RABBIT oder Labserver, die beide auf einem PC an der Universität Heidelberg installiert sind, werden Daten in die Datenbank an der GSI geschrieben oder ausgelesen. In regelmäßigen Abständen werden die Daten von der Satellitendatenbank an die zentrale Datenbank am CERN überspielt.

Die Verantwortlichkeiten teilen sich so auf:

- Dictionary Wizard: Warschau-Gruppe
- zentrale Datenbank am CERN: Warschau-Gruppe
- GSI-Datenbank: Warschau-Gruppe und Michael Dahlinger (Mitarbeiter der GSI)
- Labserver-Installation und Betrieb: jede ALICE-Gruppe selbst (mit Hilfe der Warschau-Gruppe)
- RABBIT Installation und Betrieb: jede ALICE-Gruppe selbst (mit Hilfe der Warschau-Gruppe)

Die gesamten Bereiche der DCDB, angefangen von der Installation und Handhabung von RABBIT und Labserver, über das Verständnis der Generic Structure bis hin zur Erstellung neuer Strukturen in der Datenbank, ist komplex und für Außenstehende anfangs schwer zu durchschauen. Solange die DCDB nicht völlig ausgereift ist, viele Prozesse noch nicht vereinfacht wurden und keine zufriedenstellende Anleitung vorliegt, sind die Benutzer-Gruppen auf Hilfe aus der Warschau-Gruppe angewiesen. Desweiteren muß es Mitglieder der Gruppen geben, die sich mit den hier im DCDB-Kapitel genannten Bestandteilen der Datenbank vertraut machen. Für die Installations- und Startphase sollte in jedem Fall ein Kollege aus Warschau vor Ort Unterstützung leisten. Vor allem, wenn auch aus LabVIEW heraus in die Datenbank geschrieben werden soll.

Der Support der Gruppe aus Warschau funktioniert gut, allerdings gibt es wegen der Komplexität der Datenbank und der Menge an Modulen, aus dem das Ganze aufgebaut ist, oft keine schnelle Lösung für anstehende Probleme. Wegen der Komplexität gibt es keinen Experten für das gesamte Datenbank-System. So gestaltet sich die Fehlersuche oft schwierig: Die Ursachen liegen entweder bei der DCDB-Software an sich, an der Oracle-Datenbank an der GSI, an der Installation oder Konfiguration der Software oder am Zusammenwirken aller.

Von LabVIEW aus ist das Schreiben von Meßdaten in die Datenbank nun möglich. Auch lassen sich die Daten auslesen und verändern. Zwar ist noch viel Detailarbeit nötig, was aber den Gruppen, die bereits mit der Datenbank arbeiten, die Gelegenheit gibt, die endgültige Konfiguration der Datenbank nach ihren Wünschen mitzugestalten.

Die DCDB ist als Konstruktionsdatenbank für den Detektor ALICE geeignet.

8.4.3 Ausblick

- An aktuellen Problemen wird stetig gearbeitet, die Warschau-Gruppe besteht aber bis auf 2 Kollegen nur aus Studenten. Allerdings wurde das Team in letzten Monaten vergrößert.
- Durch die Erprobungsphase an der Universität Heidelberg wird sich weiteres Fachwissen bezüglich möglicher Probleme der Datenbank bilden. Bis auf weiteres und bis komplette Anleitungen vorhanden sind, sollten sich die Gruppen, die die DCDB einsetzen, untereinander austauschen.
- Was eine umfassende Anleitung der DCDB angeht, wäre eine weitere Entwicklung wünschenswert. Bisher sind Informationen nur verteilt auf z.T. veraltete Präsentationen und Ähnliches vorhanden. Das wäre ein wichtiger Schritt, um den Einstieg in die DCDB und ihre Nutzung durch die anderen Gruppen von ALICE zu vereinfachen.
- Die Verbindung der XML-VIs untereinander sowie mit den VIs, die für die Messungen verwendet werden, erfolgt nach einem recht komplexen Schema, das noch vereinfacht werden könnte.
- In Zukunft sollen mit RABBIT alle Plots von Subprozessen eines übergeordneten Prozesses auf einer Seite am Monitor darstellbar sein. Im Falle des TRD würde das z. B. bedeuten, alle Meßergebnisse einer Kammer zusammengestellt anzeigen lassen zu können.
- Die Verbindung von RABBIT zur GSI-Datenbank ist noch nicht stabil.
- Weitere Verbesserungsvorschläge sind erwünscht und können an die Adresse der zentralen Datenbank am CERN übermittelt werden [DBCen].

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Beiträge geleistet zur Festlegung des Radiatormaterials der ALICE-TRD-Kammern, zur Qualitätssicherung der Padplanes und der TRD-Kammern sowie zur Verwaltung des Detektors in der Detektordatenbank DCDB.

Zunächst wurden am MPI für Kernphysik in Heidelberg mehrere Meßreihen durchgeführt, bei denen diverse Radiatormaterialien, die für die Kammern des TRD in Frage kommen, auf ihre Transmissionsraten für Röntgenstrahlung untersucht wurden. Die Energien lagen dabei zwischen 0 und 40 keV, wobei vor allem die Werte um 10 keV von Bedeutung sind, da diese Energie der typischen Übergangsstrahlung des TRD entspricht. Neben den Radiatormaterialien wurden auch die Transmissionswerte für eine mit Xenon gefüllte Drahtkammer gemessen.

Für den Radiator der TRD-Kammern wird eine nicht zu hohe Absorptionsrate für Röntgenstrahlung angestrebt, damit die Übergangsstrahlung in das Gasvolumen dringen und dort Elektronen-Ionen-Paare erzeugen kann. Bei einer Transmission von etwa 19 % für eine Energie von 10 keV ist das gewährleistet. Die endgültige Entscheidung für die Zusammensetzung des Radiators der TRD-Kammern in der Form K8Al + 7 Fasermatten + K8Al, bei der die Deckel eine Dicke von 8 mm haben, basiert vor allem auf Stabilitätsüberlegungen.

In der mit Gas gefüllten Drahtkammer strebt man dagegen eine niedrige Transmissionsrate an. Bei der Energie von 10 keV liegt sie bereits unterhalb von 0,25 %. Die hohen Transmissionswerte bei höheren Energien (z. B. 30 keV) erklären, warum in der Meßreihe am CERN von Kammer zu Kammer progressiv ansteigende Stromwerte gemessen wurden. Der Grund war in der Tat Übergangsstrahlung und nicht Bremsstrahlung.

Die statistischen und systematischen Fehler der Messungen lagen im Schnitt bei 1-2 %. Der systematische Fehler konnte trotz des verbesserten Meßaufbaus und verlängerter Meßzeiten nicht reduziert werden. Abhilfe hätte vielleicht ein

Wechsel des Laborraums bzw. des Gebäudes, in dem die Messungen durchgeführt wurden, erbracht.

Für die Padplanes der TRD-Kammern haben sich die Qualitätstests als wichtig und unverzichtbar erwiesen. Leider war etwa die Hälfte der bisher getesteten Padplanes noch mit Fehlern behaftet, die zum überwiegenden Teil vom Hersteller Optiprint zu verantworten sind. Die Messung der Fehlerquellen, die sich auf der Vorder- und Rückseite der Padplanes befinden können, läßt sich vollständig nur mit dem neuen, auf den Kapazitätsmessungen beruhenden, Meßgerät durchführen. Das Vorgängermodell konnte nur Kurzschlüsse zwischen den Pads eines Footprints erkennen und war daher für die Qualitätstests der Padplanes nicht geeignet.

Für die Messungen wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt, mit dem man das Meßgerät ansteuert, seine Meßwerte ausliest, sie auswertet und am Monitor anzeigt. Das Programm wird in Zukunft in seinen Funktionen dahingehend erweitert, daß es in die Lage versetzt wird, selbstständig einen Fehler zu erkennen und auch die Fehlerursache benennen zu können.

Zwar läßt sich mit der nötigen Erfahrung und Präzision jedes FFC-Kabel hinreichend genau auf seine Fehlerfreiheit hin testen, allerdings gibt es bei der Versuchsdurchführung noch zu große Variationen des Meßergebnisses. Dies liegt daran, daß die Padplanes nicht völlig eben sind und bei Kapazitätsmessungen der Abstand der Kondensatorflächen eine entscheidende Rolle spielt. Für die Vereinfachung der Meßdurchführung werden in Zukunft verschiedene Ideen auf ihre Wirksamkeit überprüft werden müssen.

Neben den Bauteilen der TRD-Kammern wie dem Radiator und der Padplane muß auch für die Kammern selbst gewährleistet sein, daß sie die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Daher wurden für diese Diplomarbeit an den fertiggestellten Kammern 4 verschiedene Messungen durchgeführt und ausgewertet.

Zunächst wurden die Kammern auf unerwünschte Dunkelströme getestet, indem sukzessiv auf 1500 V hochgerampft und gewartet wurde, ob der Anodenstrom auf einstellige nA-Werte absinkt. Anschließend wurde die Gasleckrate der Kammern aus dem exponentiellen Abfall der Sauerstoffkonzentration beim Spülen mit einem Argon-CO₂-Gemisch bestimmt. Als nächstes wurde die Homogenität der Gasverstärkung über die gesamte Fläche der Kammer hinweg durch Bestrahlung mit einer radioaktiven ⁹⁰Sr-Quelle gemessen. Schließlich wurde der exponentielle Anstieg des Anodenstroms mit zunehmender Spannung verifiziert, wobei ebenfalls die ⁹⁰Sr-Quelle zum Einsatz kam.

Für die Messungen wurde ein LabVIEW-Programm erstellt, das die Hochspannungsgeräte und das Strommeßgerät steuert sowie die Werte beider Geräte

und die des Gassystems ausliest. Die registrierten Werte werden am Monitor graphisch dargestellt. Es können vom Programm selbstständig Messwerte über einen beliebigen Zeitraum in frei wählbaren Abständen erfaßt, in einem Datenfile auf der Festplatte gespeichert und am Ende der Messung in die Detektordatenbank geschrieben werden. Das Programm wird in Zukunft durch die Erfahrung weiterer Messungen optimiert werden.

Die Messaufbauten erwiesen sich als zweckmäßig und ausreichend für die Durchführung der Messungen, die getesteten Kammern liegen bezüglich ihrer Meßergebnisse bei den 4 Tests innerhalb der Sollwerte.

Die Warschau-Gruppe hat die Detektordatenbank DCDB speziell auf die Bedürfnisse des ALICE-Detektors und seiner Subdetektoren zugeschnitten. Noch befindet sich die DCDB in der Entwicklungs- und Erprobungsphase. Das Grundmodell der Datenstruktur ist zwar weitgehend festgelegt, in vielerlei Hinsicht müssen aber noch Veränderungen an den Details und Fehlerbeseitigungen durchgeführt werden. Das Fehlen einer durchgängigen und aktualisierten Anleitung erschwert die Benutzung der Datenbank durch die Mitglieder der Arbeitsgruppen, so daß zur Zeit ohne den Support der Kollegen der Warschau-Gruppe vor Ort keine Installation und Nutzung der Datenbank möglich ist. Trotzdem bietet die DCDB bereits vieles, was für die Eingabe, Verwaltung, Suche und Anzeige der Detektordaten benötigt wird. Sie kann und soll nach den Wünschen der Anwender optimiert werden. Die DCDB ist für die Benutzung als Datenbank des ALICE-Detektors geeignet.

Literaturverzeichnis

- [And04] Andronic, Anton: private communication (2004)
- [ATP95] ALICE Collaboration: *Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC*, CERN/LHCC 95-71
- [Blu94] Blum, Walter und Rolandi, Luigi: *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer (1994)
- [CanIn] Canberra Industries, USA; <http://www.canberra.com/>
- [DBCen] DCDB: zentrale DB am CERN: <http://dcdb.cern.ch>, Verbesserungsvorschläge an: <http://dcdb.cern.ch/alidoc>
- [DBdiw] DCDB: Dictionary Wizard:
<http://det-dbalice.if.pw.edu.pl:8080/dictwizard>
- [DBgsi] DCDB: Satelliten DB an der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt: <http://www.gsi.de/>, Ansprechpartner: Michael Dahlinger, M.Dahlinger@gsi.de
- [DBrab] DCDB: RABBIT: <http://alicedb.physi.uni-heidelberg.de:8080/gsi/>
- [DCDB1] DCDB: ALICE Detector Database Group:
<http://det-dbalice.if.pw.edu.pl/det-dbalice/alice.html> (2004)
- [Ise98] iseg Spezialelektronik GmbH: *EHQ 102M / 103M / 104M / 105M - Bedienungsanleitung für Präzisions-Hochspannungsquellen der Baureihe EHQ im Eurokassetten-Format* (1998)
- [IsoAG] isola AG: Hersteller der Padplanes aus Glasfaserverbund, Produktname: FR4 halogenfrei, www.isola.de
- [Lab01] Bishop, Robert H.: *Learning with LabVIEW 6i* (2001)
- [LehLa] Lehmann, Thomas: *Installations-Anleitung für Labserver unter Linux* (2003)

- [LehPP] Lehmann, Thomas: *Scheme of Padplane-Testing Program (written in Labview)* (2003)
- [Mah04] Mahmoud, Tariq: private communication (2004)
- [NLx03] Akademie.de: Netlexikon, <http://www.net-lexikon.de> (2003)
- [OptAG] Optiprint AG, 9038 Rehetobel, Schweiz
- [OracI] Oracle Corporation, USA: <http://www.oracle.com/de/>
- [Sta99] Stachel, Johanna: *Towards the Quark-Gluon-Plasma*, Nucl. Phys. A654 (1999)
- [Tra04] Traxel, Kurt: private communication (2004)
- [TRD01] ALICE Collaboration: *Technical Design Report of the Transition Radiation Detector*, CERN/LHCC 2001-021
- [Wes03] Wessels, Hannes: private communication (2003)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die bei der Entstehung dieser Arbeit mitgeholfen haben. Mein besonderer Dank gilt:

- Frau Prof. Johanna Stachel für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit und die sehr interessante und vielseitige Mitarbeit in der ALICE-TRD-Gruppe,
- Herrn Dr. Rainer Schicker für die nette Zusammenarbeit und für die Betreuung und Unterstützung während der Diplomarbeit,
- Dr. Andres Sandoval, Dr. Wiktor Peryt, Dr. Michael Dahlinger, Marek Szuba, Karol Stanislawek, David Emschermann und Dr. Holger Brand für die gute und erfolgreiche Zusammenarbeit, was die Detector Construction Database angeht,
- Dr. Clemens Adler für die erfolgreiche Zusammenarbeit beim Durchführen der Kammertests und für das Überprüfen des Kammermesskapitels auf Aktualität der technischen Daten der Kammern,
- David Emschermann für Hilfe in Linux-Fragen und für das Überprüfen des Padplane-Kapitels auf Aktualität der technischen Daten der Padplane,
- Herrn von Walter und Herrn Rausch von der Elektronik-Werkstatt des Instituts für die gute Zusammenarbeit bei den Vorbereitungen zu den Messungen der Padplanes,
- meinen netten und während der 13 Monate meiner Diplomarbeit immer wieder wechselnden Zimmerkollegen, allen voran Markus Merschmeyer, ohne dessen Hilfe in Linux-Fragen ich oft nicht weiter gekommen wäre,

- Dr. Ken Oyama und Jorge Mercado für die Mithilfe bei den Vorbereitungen für den Aufbau der Padplane-Erdung bei den Kammertests,
- Dr. Mischa Metz und Dr. Kurt Traxel aus der PIXE Gruppe des Max-Planck-Instituts für Kernphysik Heidelberg, für ihre ausdauernde und geduldige Hilfe bei den Transmissions-Messungen der Radiatoren,
- Roman Sinreich und Andreas Leopold für ihre Ratschläge bezüglich LaTeX und ihre Hilfe in formalen Dingen der Diplomarbeit,
- und last, but not least, möchte ich meinem Vater speziell für das Korrekturlesen und meinen beiden Eltern vor allem dafür danken, daß sie mich stets in vielfältiger Weise während meines Studiums unterstützt haben.

Erklärung

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

Heidelberg, den

.....

Unterschrift