

**Entwicklung und Bau eines auf
Proportionalkammern
basierenden Übergangsstrahlungsdetektors
für das AMS-02-Weltraumexperiment**

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Physiker
Stefan Fopp

aus Ibbenbüren

Berichter: Universitätsprofessor Dr. em. K. Lübelmeyer
 Universitätsprofessor Dr. S. Schael

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Mai 2004

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Abstract

The AMS-02 experiment is a large acceptance spectrometer designed to operate in space and measure cosmic-ray fluxes on the International Space Station (ISS) for a data taking period of 3 years. The experiment will allow indirect searches of dark matter candidates with high statistics measurements of positrons from neutralino annihilation. This requires a proton background reduction by a factor 100 - 1000 up to particle energies of 300 GeV from the Transition Radiation Detector (TRD), which is under construction at RWTH Aachen. The design for safe and reliable operation in space consists of 20 layers, each with 20 mm fleece-radiator and modules of 16 straw tubes (diameter: 6 mm) with a total number of 328 modules of lengths up to 2 m . The straw modules are filled with a Xe/CO_2 (80%/20%) gas mixture and operated in proportional mode at a gasgain of 3000. The signals are readout by VA chips. The housing consists of a conically shaped octagon structure made out of CFC-Al-honeycomb material and is closed by a lower and upper honeycomb plate.

In this thesis special emphasis will be focused on the straw module production and space qualification aspects like structural verification, outgassing and gastightness of the straw modules. The gastightness of the modules is the most critical design issue, because of a limited gas storage on the ISS. It is shown, that the constructed AMS-02 TRD flight straw modules are so far within specification and schedule.

Kurzzusammenfassung

Das AMS-02-Experiment ist das bislang größte weltraumgestützte Teilchenspektrometer, das zur Vermessung der Zusammensetzung und Energieverteilung der kosmischen Strahlung für einen dreijährigen Zeitraum auf der Internationalen Raumstation (ISS) installiert werden soll. Seine Hauptaufgaben umfassen die Suche nach kosmischer Antimaterie und nach Dunkler Materie. Mögliche Kandidaten für Dunkle Materie sind Neutralinos, die nur indirekt über Zerfallsprodukte in Annihilationsprozessen, wie z.B. Positronen, nachgewiesen werden können. Zur besseren Separation von Positronen und Protonen wird das AMS-02-Experiment mit einem Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) ausgerüstet. Um einen Protonunterdrückungsfaktor von 100 - 1000 im Energiebereich bis 300 GeV zu erreichen, ist der Detektor modular in 20 Lagen aufgeteilt, die in einer oktagonförmigen, konisch zulaufenden Kohlefaser-Tragestruktur gehalten werden. Jede einzelne Lage besteht aus mehreren Einheiten einer Kombination aus einem 20 mm dicken Faser-Radiator, in dem die Übergangsstrahlung erzeugt wird und einer darunter liegenden Proportionalkammer. Als Proportionalkammer werden 16 dünnwandige Zählgasröhrchen, sogenannte Straws (Durchmesser: 6 mm) zu einem Modul verklebt. Die insgesamt 328, bis zu 2.1 m langen Straw-Module werden über ein Gasversorgungssystem mit einem Xe/CO_2 (80%/20%) Gasgemisch befüllt und bei einer Gasverstärkung von 3000 betrieben. Die Elektronikauslese erfolgt über VA-Chips.

Im Rahmen dieser Arbeit wird neben dem Aufbau und der Produktion der Straw-Module auf besondere Weltraumqualifizierungsverfahren eingegangen. Dazu zählen u.a. Simulationen der mechanischen und thermischen Belastungen der TRD-Bauteile bei einem Space Shuttle-Transport und auf der ISS, die Bestimmung des Ausgasverhaltens der verwendeten Materialien, sowie Messungen zur Gasdichtigkeit der Straw-Module bei einem begrenzten Gasvorrat auf der ISS. Dabei konnte die Weltraumtauglichkeit der Straw-Module gezeigt und die zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit an ungefähr 80% aller Flugmodule gewonnenen Meßergebnisse vorgestellt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Der AMS-02-Detektor	9
2.1	Astrophysikalische Zielsetzungen	10
2.1.1	Präzisionsmessung von geladenen kosmischen Teilchen	12
2.1.2	Suche nach kosmischer Antimaterie	16
2.1.3	Suche nach Dunkler Materie	18
2.2	Aufbau des AMS-02-Detektors	21
2.2.1	Supraleitender Magnet	21
2.2.2	Silizium-Spurdetektor (Tracker)	22
2.2.3	Anti-Koinzidenz-Zähler (ACC)	24
2.2.4	Time of Flight-Zähler (ToF)	24
2.2.5	Ring Imaging Čerenkov-Zähler (RICH)	25
2.2.6	Elektromagnetisches-Kalorimeter (Ecal)	27
2.2.7	Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)	28
2.3	Strahltest mit einem 20-Lagigen Prototypen	29
2.4	Umgebungsbedingungen für ein Weltraumexperiment	31
3	Der Übergangsstrahlungsdetektor (AMS-02-TRD)	37
3.1	Der Übergangsstrahlungseffekt	38
3.1.1	Theorie der Übergangsstrahlung	38
3.1.2	Übergangsstrahlung aus einem Radiator	39
3.2	Nachweis der Übergangsstrahlung	43
3.2.1	Nachweismethoden	44
3.2.2	Gasgefüllte Proportionalkammern: Straw-Module	47
3.3	Aufbau des AMS-02-TRD	51
3.3.1	Mechanische Konstruktion	52
3.3.2	Gasversorgungssystem	56
3.3.3	Front-End-Ausleseelektronik und DAQ	58
3.3.4	Thermisches Modell für den TRD	60
4	Straw-Module: Herstellung und Gasdichtigkeit	65
4.1	Herstellung der Straw-Module	65
4.2	Straw-Module: Messung der Gasdichtigkeit von Einzelkomponenten	71
4.2.1	Diffusion durch eine Membran	71

4.2.2	Aufbau eines Langzeitmeßstandes zur Bestimmung der Gasdichtigkeit der Straws	73
4.2.3	Meßmethoden: Druckabfall- und Massenspektrometermessungen	74
4.2.4	Gasdichtigkeitsmessungen der Polycarbonat-Endstücke	83
4.2.5	Kurzzeitmessungen der Gasdichtigkeit einzelner Straws mit Helium	86
4.3	Langzeitverhalten von zu einem Gaskreislauf angeordneten Straw-Modulen	92
4.3.1	Aufbau eines Langzeitmeßstandes für einen Funktionstest von Straw-Modulen im Vakuum	92
4.3.2	Gasdichtigkeitsmessungen mit Xe/CO_2	95
4.3.3	Langzeitverhalten der Gasverstärkung in Xe/CO_2	99
4.4	Zusammenfassung	105
5	Prüfung der Weltraumtauglichkeit	107
5.1	Oktagon-Tragestruktur	107
5.2	Front-End-Ausleseelektronik	108
5.3	Radiatormaterial	110
5.4	Weltraumtauglichkeit der Straw-Module	111
5.4.1	Untersuchungen während der Herstellung der Straw-Module .	112
5.4.2	Messung der Drahtspannung	113
5.4.3	Rausch-Test: Hochspannungsfestigkeit der Straw-Module . . .	114
5.4.4	Lecktest: Überprüfung der Gasdichtigkeit mit Heliumgas gegenüber Luft	115
5.4.5	Serientest: Gasdichtigkeits- und Dunkelstrommessungen im Vakuum	117
5.4.6	Automatisierte Messung der Gasverstärkung in Ar/CO_2 . . .	121
5.4.7	Resultate der Weltraumtauglichkeitsprüfung	127
5.5	Zusammenfassung	135
6	Serienproduktion der Straw-Flugmodule	137
6.1	Drahtspannungsmessung	138
6.2	CO_2 -Sicherheitsfaktor der Straw-Module	138
6.3	Gasdichtigkeit der Flugmodul-Endstücke	141
6.4	Gasdichtigkeit des Straw-Materials	143
6.4.1	Korrelationen zwischen den Leckraten verschiedener Testgase .	143
6.4.2	CO_2 -Sicherheitsfaktor des Straw-Materials	145
6.5	Elektronisches Verhalten der Flugmodule	146
6.6	Zusammenfassung	148
7	Zusammenfassung und Ausblick	149
A	Anhänge	155
A.1	Strahltest: Analyse der Daten von einem 20-lagigen TRD-Prototypen	155
A.2	Diffusion: Gasdurchgang durch Membranen	158
A.2.1	Lösung der Diffusionsgleichung	158

A.2.2	Bestimmung der Leckrate	159
A.2.3	Langzeitmessung an drei 1.3 <i>m</i> langen Straws	160
A.3	Resultate der Weltraumtauglichkeitsprüfungen mit der FE-Elektronik	163
Abbildungsverzeichnis		165
Tabellenverzeichnis		173
Literaturverzeichnis		175
Danksagung		183
Lebenslauf		185

Kapitel 1

Einleitung

Die astrophysikalischen Untersuchungen beschränkten sich zum Ende des 19. Jahrhunderts auf das von kosmischen Objekten emittierte und mit dem menschlichen Auge sichtbare Licht. Mit der Entwicklung der Radioastronomie in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts konnten die verschiedenen Frequenzbänder dieser elektromagnetischen Strahlung nach und nach erschlossen werden. Die Erfassung von Infrarot-, Röntgen- und γ -Strahlung mit zunächst nur erdgebundenen Teleskopen konnte mit dem Beginn der Raumfahrt auch außerhalb der störenden Erdatmosphäre durchgeführt werden. So wurde z.B. die Rotverschiebung der Spektrallinien entfernter Galaxien sowie die kosmische 2.7 K Hintergrundstrahlung entdeckt und in ihrer räumlichen und spektralen Verteilung genau vermessen. Beide Entdeckungen sind wesentliche Stützen der Urknall-Theorie, welche davon ausgeht, daß das Universum aus einem singulären Augenblick unendlicher Energiedichte entstanden ist und seitdem expandiert.

Neben der Untersuchung der elektromagnetischen Strahlung ist auch die Zusammensetzung und Energieverteilung geladener Teilchen von Interesse, um Hinweise auf die Entwicklung des Universums wie z.B. den Verbleib der nach der Urknalltheorie postulierten Antimaterie und um die Natur der dunklen Materie und dunklen Energie, deren Existenz durch die Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem WMAP-Observatorium [9] belegt wurde, zu erhalten. Die kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Korpuskularstrahlung mit Teilchenenergien bis über 10^{20} eV und Raten von $0.2 - 0.5$ Teilchen/($cm^2 \cdot s$) [1], die sich aus Atomkernen und subatomaren Partikeln, wie Protonen, Elektronen, Positronen und Neutrinos zusammensetzt. Diese primäre kosmische Strahlung könnte je nach Energie ihren Ursprung im extragalaktischen oder galaktischen Raum haben und wird durch Wechselwirkungen mit den Molekülen der Erdatmosphäre in sekundäre Teilchen umgewandelt. Hieraus entsteht der Wunsch, Teilchendetektoren in der oberen Atmosphäre oder im Weltraum zu positionieren.

Ab Beginn der 70er Jahre hat man u.a. mit ballongestützten Experimenten, wie z.B. dem HEAT- [3] und dem BESS-Experiment [4] die primäre kosmische Strahlung vermessen. Diese Teilchendetektoren haben den Nachteil von einer geringen Flughöhe (~ 40 km), einer begrenzten Meßdauer von maximal einigen Tagen, sowie einem geringen Gewicht und einer damit zwangsläufig kleinen Akzeptanz von max.

$0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$. Die Meßdauer kann zwar durch satellitengestützte Experimente wie dem zukünftigen PAMELA-Experiment [5] auf mehrere Jahre ausgedehnt werden, wobei sich aber die Akzeptanz ($0.0021 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$) aufgrund der stärkeren Gewichtsbegrenzung verkleinern wird.

Erst die Internationale Raumstation ISS¹ ermöglicht es, einen relativ komplexen und hochauflösenden Teilchendetektor für einen dreijährigen Zeitraum außerhalb der Erdatmosphäre zu betreiben. Dazu wurde das einem Teilchenspektrometer ähnelnde AMS²-Experiment entwickelt, dessen 6.7 t schwere zweite Ausbaustufe, genannt AMS-02, voraussichtlich im Sommer 2007 auf der ISS installiert werden soll, um eine sehr viel exaktere Vermessung der kosmischen Strahlung durchzuführen (Tracker-Akzeptanz: $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$). Seine Hauptaufgaben umfassen die Suche nach kosmischer Antimaterie und den Zerfallsprodukten von Dunkler Materie. Das Experiment wird in internationaler Zusammenarbeit verschiedener Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriebetrieben entwickelt.

In einer technischen Machbarkeitsstudie, genannt AMS-01, wurde das Kernstück des Detektors, ein magnetisches Spektrometer, mit nicht vollständig bestückten ($\sim 50 \%$) Versionen der einzelnen Komponenten und Subdetektoren während eines mehrtägigen Fluges an Bord des Space Shuttles "Discovery" (Mission STS 91) im Juni 1998 erfolgreich auf seine Funktionsfähigkeit im Weltraum getestet. Die dabei gewonnenen Daten über die primäre und sekundäre kosmische Höhenstrahlung haben bislang unbekannte Phänomene über die Propagation dieser Teilchen im Erdmagnetfeld hervorgebracht. Zudem konnten keine Antikerne nachgewiesen werden, welche schwerer als das Antiproton sind, sowie keine Hinweise auf die Natur der dunklen Materie/Energie erbracht werden [13]. Mit den Erfahrungen aus dieser Studie wird der AMS-02-Detektor entworfen und gebaut (siehe Kapitel 2).

Dieser wird gegenüber AMS-01 mit weiteren Subdetektoren bestückt, so u.a. einem Übergangsstrahlungsdetektor (TRD³). Mit diesem TRD können leichte und schwere Teilchen gleicher Ladung und Energie (p und e^+ ; \bar{p} und e^-) anhand ihres Lorentzfaktors $\gamma = \frac{E}{m \cdot c^2}$ unterschieden werden. Um einen Protonenunterdrückungsfaktor von 10^2 bis 10^3 bei einer Nachweiseffizienz für Positronen von 90% im Energiebereich von $5 - 300 \text{ GeV}$ zu erreichen, ist der Detektor modular in 20 Lagen aufgeteilt, die in einer oktagonförmigen Kohlefaser-Tragestruktur gehalten werden. Jede einzelne Lage besteht aus mehreren Einheiten einer Kombination aus einem Radiator, in dem die Übergangsstrahlung (TR) erzeugt wird und einer darunterliegenden gasgefüllten Proportionalzählkammer, in der die TR-Photonen nachgewiesen werden. Die Theorie zur Übergangsstrahlung bzw. deren Nachweis und eine Beschreibung der einzelnen Subkomponenten des TRDs erfolgt in Kapitel 3.

Die physikalische und ingenieurtechnische Herausforderung bei der Entwicklung und dem Bau der Proportionalzählkammern liegt darin, daß auf besondere weltraumtechnische Gegebenheiten wie z.B. eine Gewichtslimitierung des Detektors, die mechanischen und thermischen Belastungen bei einem Space Shuttle-Transport und

¹International Space Station

²Alpha Magnetic Spectrometer

³engl. Transition Radiation Detector

auf der ISS und damit verbunden die Gasdichtigkeit der Proportionalkammern, eine redundante Auslegung der Datenerfassungssysteme sowie das Ausgasverhalten der verwendeten Materialien Rücksicht genommen werden muß. Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit befaßt sich daher mit verschiedenen Untersuchungen, die im Rahmen der Entwicklung von Proportionalkammer-Prototypen, sowie während der Serienproduktion der Proportionalkammer-Flugmodule in Hinblick auf sicherheitstechnische Aspekte bei einem Raumfahrt-Projekt gemacht wurden. Das Ziel dieser Arbeit ist, neben der Beschreibung der Weltraumqualifizierungsverfahren, die Weltraumtauglichkeit der TRD-Proportionalkammern zu zeigen. Darüber hinaus wird auf ein effizientes Testverfahren zur Qualitätssicherung der Flugmodule eingegangen, sowie die zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit an ungefähr 80 % aller Flugmodule gewonnenen Meßergebnisse vorgestellt (siehe Kapitel 4, 5, 6).

Kapitel 2

Der AMS-02-Detektor

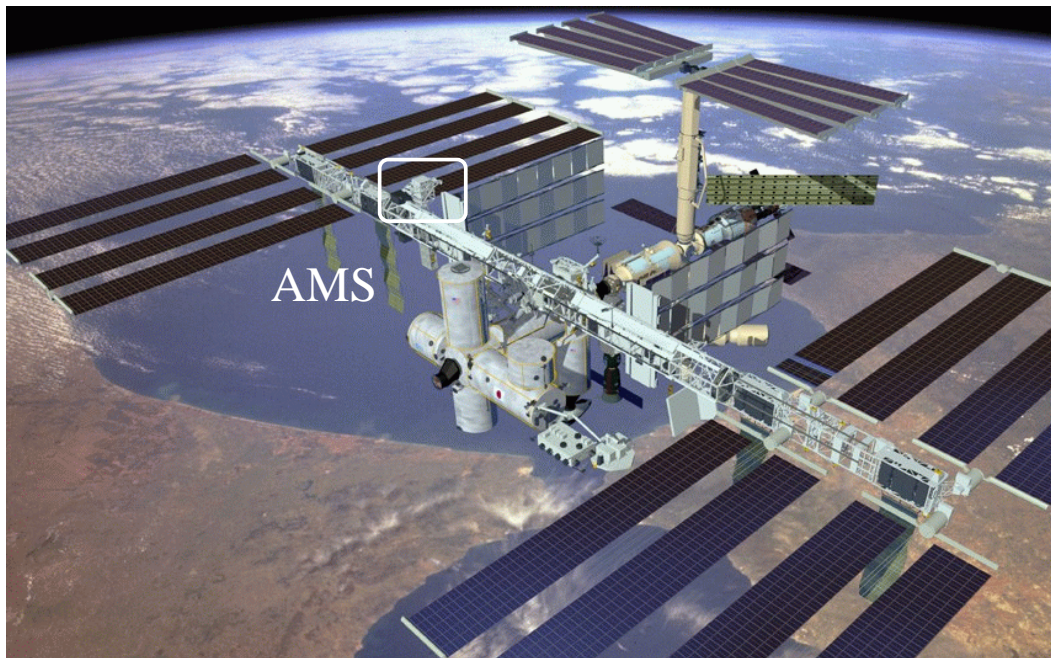


Abbildung 2.1: Der AMS-02-Detektor auf der ISS [2].

Das "Alpha Magnetic Spectrometer-02 (AMS-02)" ist der bislang größte und komplexeste weltraumgestützte Teilchendetektor, der voraussichtlich im Sommer 2007 auf der Internationalen Raumstation ISS installiert werden soll (siehe Abbildung 2.1). Das Kernstück des Experimentes ist ein Silizium-Spurdetektor mit einer Akzeptanz von $0.5 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$, der von einem supraleitenden Magneten umgeben ist und zusammen mit einer Reihe weiterer Detektorkomponenten für ca. 3 Jahre Daten über die Zusammensetzung und Energieverteilung des kosmischen Teilchenflusses im Bereich von 0.5 GeV bis 1 TeV sammeln soll. In einer mittleren Höhe von ca. 400 km über der Erdoberfläche und einem Inklinationwinkel von ca. 52° zum Äquator kann mit dem Detektor außerhalb der störenden Erdatmosphäre gemessen werden. Die mit dieser Anordnung erreichbaren Präzisionsmessungen erlauben eine Vielzahl astrophysikalischer Untersuchungen. Die Herausforderung bei der Konstruktion dieses Detektors liegt darin, einen großflächigen Teilchendetektor für einen Einsatz im Weltraum bei einem auf $\sim 6.7 \text{ t}$ begrenztem Gewicht und einer max. Ver-

lustleistung aller elektronischen Detektorkomponenten von $\sim 2 \text{ kW}$ zu adaptieren. In einer ersten Entwicklungsstufe, dem AMS-01-Detektor, konnte bei einem 9-tägigen Weltraumflug an Bord des Space Shuttles "Discovery" (Mission: STS-91) die technische Machbarkeit eines derartig komplexen Teilchendetektors im Weltraum erfolgreich gezeigt werden (siehe auch Kapitel 2.1.1).

Dem AMS-02-Detektor ähnelnde Detektoren sind die ballongestützten HEAT [3] und BESS [4] Experimente, die aber im Vergleich zu AMS-02 nur in einer geringen Höhe von $\sim 40 \text{ km}$ und einer auf 24 h begrenzten Messdauer Daten aufzeichnen konnten. Darüber hinaus ist die Akzeptanz dieser Detektoren nicht größer als $0.3 \text{ m}^2 \text{ sr}$, wie im BESS-Experiment. Ein weiterer derartiger Detektor ist das PAMELA-Experiment [5], das in der ersten Hälfte 2004 gestartet werden soll und an Bord eines russischen Satelliten drei Jahre lang bei einer mittleren Höhe von $\sim 500 \text{ km}$ Daten nehmen wird. Dieser ebenfalls mit einem magnetischen Spektrometer ausgestattete Detektor hat aber den Nachteil von einer mit $0.0021 \text{ m}^2 \text{ sr}$ geringen Akzeptanz.

2.1 Astrophysikalische Zielsetzungen

Aus der Urknall Theorie, als heute weitgehend anerkannte Theorie, ergeben sich einige Vorhersagen und Konsequenzen, die zum Teil bereits experimentell bestätigt sind. So z.B. die von E.P. Hubble in den zwanziger Jahren untersuchte Rotverschiebung der Spektrallinien des Lichts, das von fernen Galaxien auf der Erde empfangen wird. Aus dieser als Dopplereffekt zu deutenden Rotverschiebung z läßt sich folgern, daß sich alle Galaxien voneinander entfernen, das Universum also expandiert (siehe Abbildung 2.2). Hubble stellte dabei folgende Beziehung zwischen der Relativgeschwindigkeit $v(t)$ zweier kosmologischer Objekte (wie z.B. zweier Galaxienhaufen) und ihrem Abstand $r(t)$ zur Zeit t nach dem Urknall auf [6]:

$$v(t) = H(t) \cdot r(t) \quad (2.1)$$

mit dem Hubble-Parameter $H(t)$ zur Zeit t . Der heutige Wert der Hubble Konstante beträgt [9] ¹:

$$H_0 = 100 \cdot h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \text{ mit } h = 0.71_{-0.03}^{+0.04} \quad (2.2)$$

Ein weiteres Relikt des Urknalls ist die 2.7 K Hintergrundstrahlung (CMBR²), die 1964 von den beiden Radioastronomen A. Penzias und R. Wilson entdeckt wurde.

¹ $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ parsec} = 3.2615 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre} = 3.0856 \cdot 10^{19} \text{ km}$. 1 parsec ist der Abstand unter dem der Radius der Erdumlaufbahn um die Sonne unter einem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint.

²engl. **C**osmic **M**icrowave **B**ackground **R**adiation

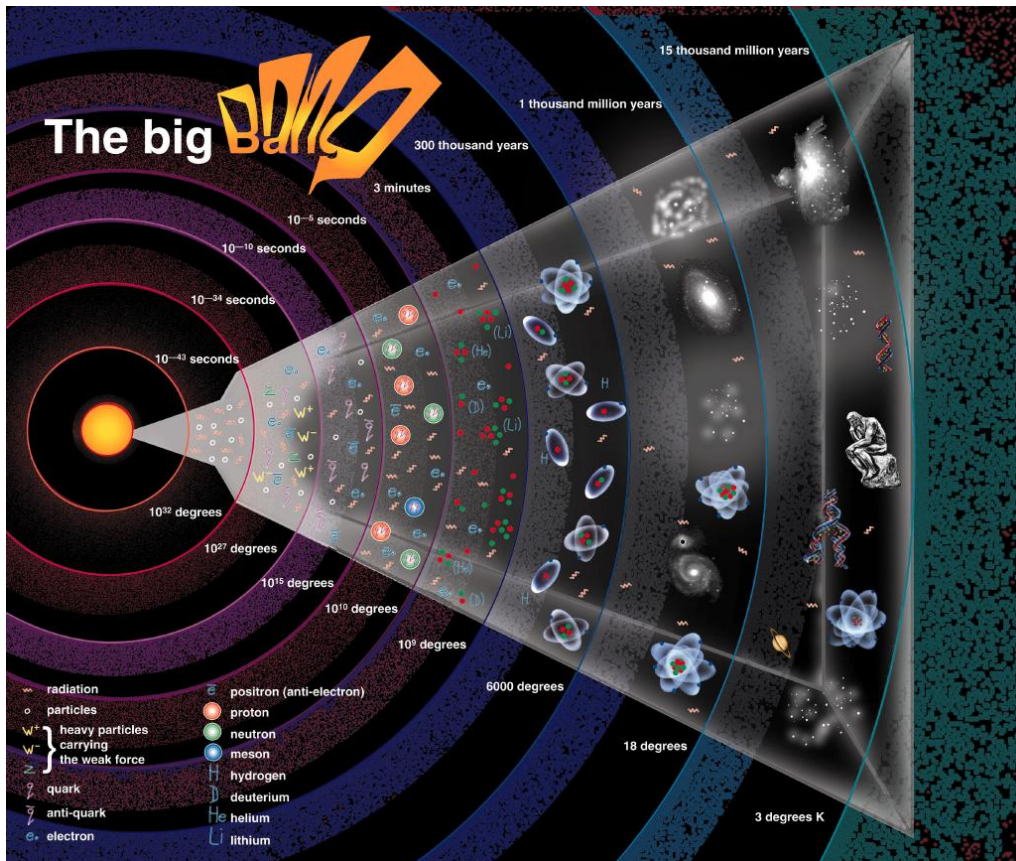


Abbildung 2.2: Die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute [7].

Die Idee dieser Hintergrundstrahlung aus dem frühen Universum geht auf G. Gamov und J. Peebles zurück, die davon ausgingen, daß bei fortschreitender Expansion des Raumes bzw. infolge der oben angeführten Rotverschiebung, die Energiedichte der Strahlung mit der Zeit stärker sinkt als die Stoffdichte im Universum [8]. Die spektrale Verteilung der mit der Materie im thermischen Gleichgewicht stehenden Strahlung ist die einer Schwarzen Strahlung zur jeweiligen Temperatur T . Mit sinkender Temperatur war die Strahlung irgendwann nicht mehr in der Lage, die in der Rekombinationsphase gebildeten Atome zu ionisieren und koppelte somit nach $379_{-7}^{+8} \text{ kyr}^3$ nach dem Urknall bei einer Rotverschiebung von $z = 1089 \pm 1$ von der Materie ab [9].

Die spektrale und räumliche Verteilung dieser CMBR wurde heutzutage sehr genau mit dem WMAP-Observatorium, einem weltraumgestützten differentiellen Mikrowellen-Radiometer vermessen [9]. Sie entspricht einer Schwarzkörperstrahlung von $2.725 \pm 0.002 \text{ K}$ und bestätigt damit die Urknall-Theorie. Die mit WMAP im Frequenzband von 23 bis 94 GHz aufgenommenen Fluktuationen in der räumlichen Verteilung der 2.7 K Hintergrundstrahlung von $\pm 200 \mu\text{K}$ (siehe Abbildung 2.3) können die Keimbildung für die Strukturbildung im Universum gewesen sein.

³1 kyr = 1000 Jahre

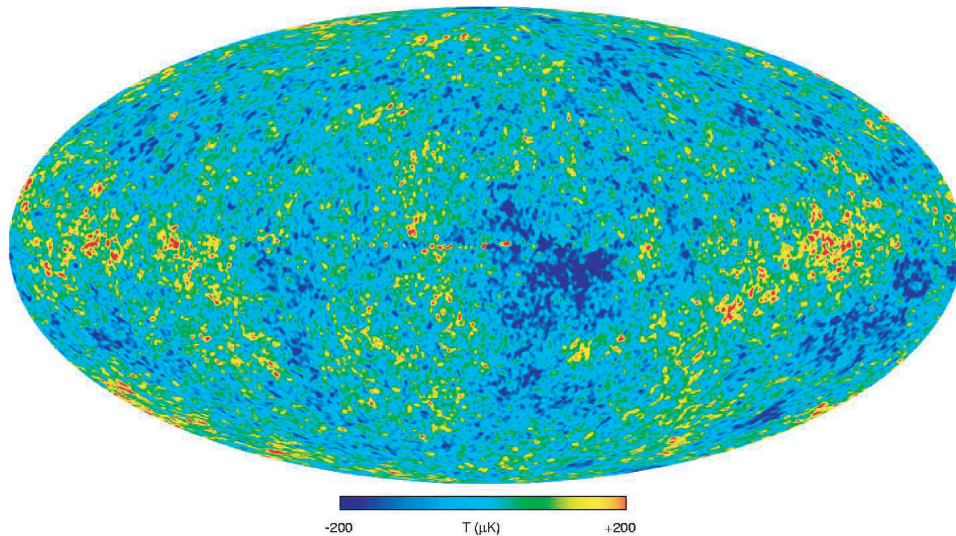


Abbildung 2.3: *Fluktuationen in der 2.7 K Hintergrundstrahlung beobachtet mit WMAP [9].*

Dies wird durch den mit WMAP gemessenen totalen Dichteparameter des Universums von $\Omega = \rho/\rho_{krit} = 1.02 \pm 0.02$ bestätigt ($\rho_{krit} \sim 10 p^+ / m^3$). Das den WMAP-Daten zugrunde liegende beste kosmologische Modell ist somit das eines flachen Universums mit einem Dichteparameter der Baryonen von $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$, einem sogenannten "dunklen" Materie-Dichteparameter von $\Omega_M = 0.27 \pm 0.04$ und einem Dichteparameter der dunklen Energie von $\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.04$. Unter einem flachen Universum versteht man ein Universum, dessen Expansion erst nach unendlich langer Zeit zum Stillstand kommt. Zudem konnte das Alter des Universums zu $13.7 \pm 0.2 \text{ Gyr}$ mit einer Genauigkeit von $\sim 1 \%$ bestimmt werden (siehe auch [9]).

Aus diesem kosmologischen Modell ergeben sich jedoch auch einige Konsequenzen, die bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht experimentell beobachtet wurden, so z.B. von welcher Natur die dunkle Energie und die dunkle Materie sind. Zudem konnte die Frage nach der Existenz von Antimaterie bisher nicht geklärt werden. AMS-02 versucht, einigen dieser Fragestellungen durch eine präzise Vermessung der Zusammensetzung und Energieverteilung der kosmischen Strahlung auf die Spur zu kommen. In den folgenden drei Abschnitten werden daher zunächst die aus den AMS-01-Daten gewonnenen Ergebnisse präsentiert, die als Vorstudie über die Sensitivität des AMS-Detektors auf Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung fungieren und anschließend unter Berücksichtigung verschiedener Modelle, die für den AMS-02-Detektor erwarteten Messergebnisse vorgestellt.

2.1.1 Präzisionsmessung von geladenen kosmischen Teilchen

Kosmische Strahlung (CR⁴) bietet die Möglichkeit, die Zusammensetzung extraterrestrischer Materie in Erdnähe zu analysieren. Diese kosmische Strahlung besteht aus verschiedenen Komponenten, wobei Hadronen den größten Beitrag zum CR-Fluss

⁴engl. Cosmic Radiation

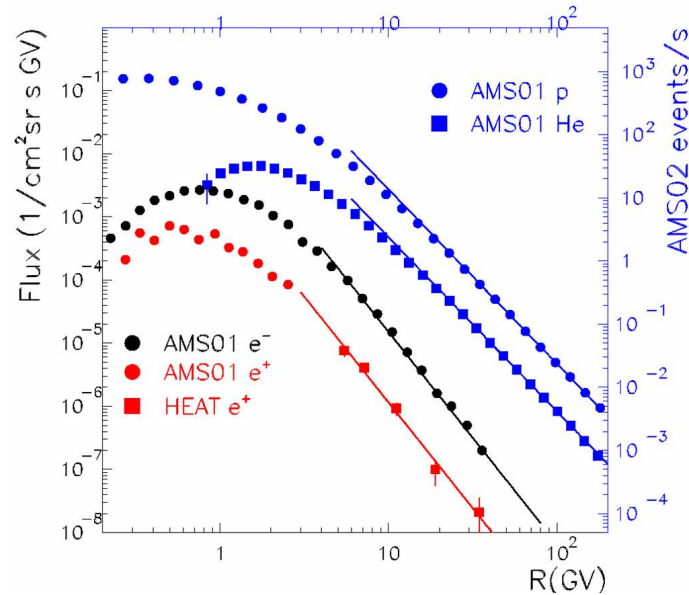


Abbildung 2.4: Das mit AMS-01 und HEAT gemessene Spektrum der kosmischen Strahlung [10].

liefern. Die mit dem HEAT-Experiment und dem AMS-01-Detektor in einer Höhe zwischen 320 und 390 *km* gemessene Rigiditätsverteilung der primären kosmischen Strahlung ist in Abbildung 2.4 dargestellt; die für den AMS-02-Detektor zu erwartende Teilchenrate ist der Skala am rechten Rand des Diagramms zu entnehmen. Hier sei darauf hingewiesen, daß das p^+/e^+ -Verhältnis bei $\sim 10^4$ über einen großen Rigiditätsbereich liegt. Um demnach eine effiziente Positronspektroskopie mit einer p^+ -Kontamination von weniger als 1 % betreiben zu können, ist es nötig den Protonenuntergrund mit geeigneten Detektorkomponenten, wie dem AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor und dem elektromagnetischen Kalorimeter, die im AMS-01-Detektor nicht zum Einsatz kamen, um einen Faktor $> 10^6$ zu unterdrücken. Neben den im Diagramm angeführten geladenen Teilchen und Kernen wurde nach Antimaterie in Form von Antiprotonen und Antiheliumkernen gesucht. Dabei wurden bei $2.86 \cdot 10^6$ detektierten Heliumkernen keine Antiheliumkerne im Rigiditätsbereich von 1 – 140 *GV* gefunden [13].

Für jede dieser Teilchenarten - im folgenden sind beispielhaft nur die Protonenspektren aufgeführt - wurden zwei deutlich voneinander getrennte Spektren aufgenommen: ein höherenergetisches Spektrum primärer Teilchen, die zum größten Teil interstellaren Ursprungs sind und mit denen theoretische Modelle zur Beschreibung des Ursprungs und der Propagation der CR verifiziert werden konnten und einem sekundären Spektrum bei niedrigeren Energien unterhalb des geomagnetischen Cutoffs von Teilchen, die durch Wechselwirkungen der CR mit den Molekülen der Atmosphäre entstanden sind. In Abbildung 2.5 sind diese Spektren für die unter verschiedenen geographischen Breitengraden detektierten Protonen separiert nach der Richtung in der sie den AMS-01-Detektor durchqueren, zu sehen. Dieser Breitengrad abhängige Rigiditäts-Cutoff wird durch das Erdmagnetfeld hervorgerufen und beschreibt die minimale Rigidität, die ein von außen kommendes geladenes Teilchen haben muss, um das Magnetfeld der Erde zu überwinden. Durch eine Simulation

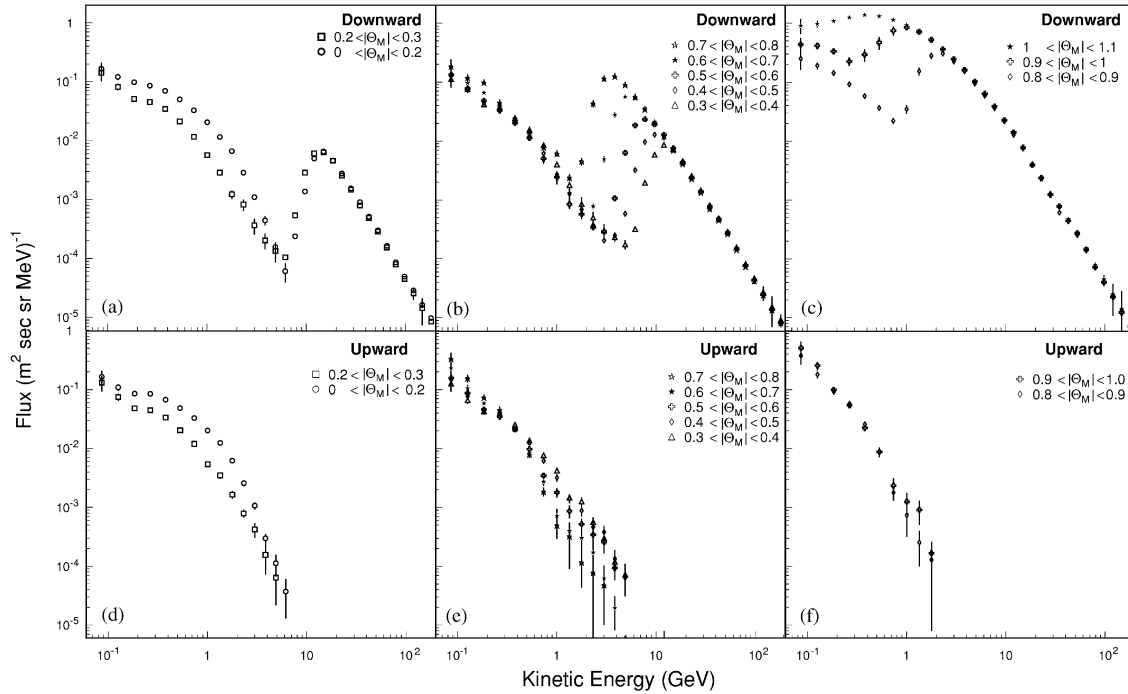


Abbildung 2.5: *Energiespektren der Protonen, welche den AMS-01-Detektor von unten bzw. oben durchqueren* [11], [12].

der Teilchenbahnen konnte gezeigt werden, daß sich die Teilchen bis zu einige Sekunden entlang der Feldlinien des geomagnetischen Feldes bewegen und daß positiv geladene Teilchen (p^+ und e^+) und negativ geladene (e^-) ihren Ursprung in komplementären geographischen Regionen haben. Das zusätzlich mit AMS-01 detektierte Antiproton-Spektrum ist zusammen mit den Daten des BESS-Experimentes in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Energien der mit dem AMS-01-Detektor nachgewiesenen Antiprotonen liegen alle unterhalb des jeweiligen lokalen geomagnetischen Cutoffs und sind demnach in sekundären Prozessen entstanden. Mit dem AMS-01-Detektor konnte damit gezeigt werden, daß es möglich ist, die kosmische Strahlung mit der geforderten Präzision zu vermessen [13]. Der einen größeren Akzeptanzbereich abdeckende und für einen dreijährigen Zeitraum im Weltraum stationierte AMS-02-Detektor wird zu diesen Messungen eine wesentlich höhere Statistik liefern können. Daneben sollen mit dem Detektor aber auch weitere Kerne mit höherer Kernladungszahl bis zu $Z \simeq 26$ im Energiebereich bis $\sim 1 \text{ TeV}/n$ in der CR nachgewiesen werden [24].

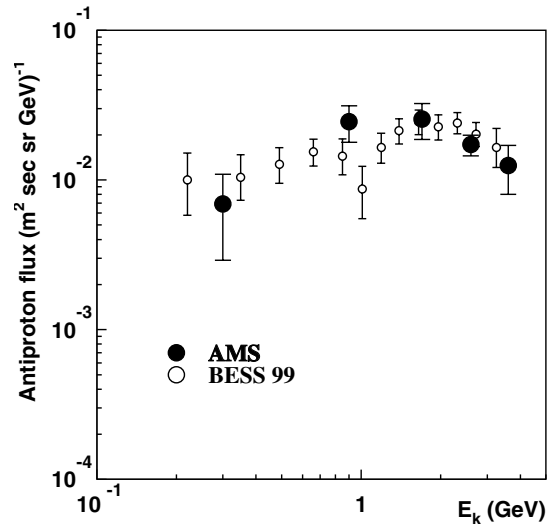


Abbildung 2.6: *Energiespektrum der mit AMS-01 gemessenen Antiprotonen im Vergleich zu den BESS-Daten* [13].

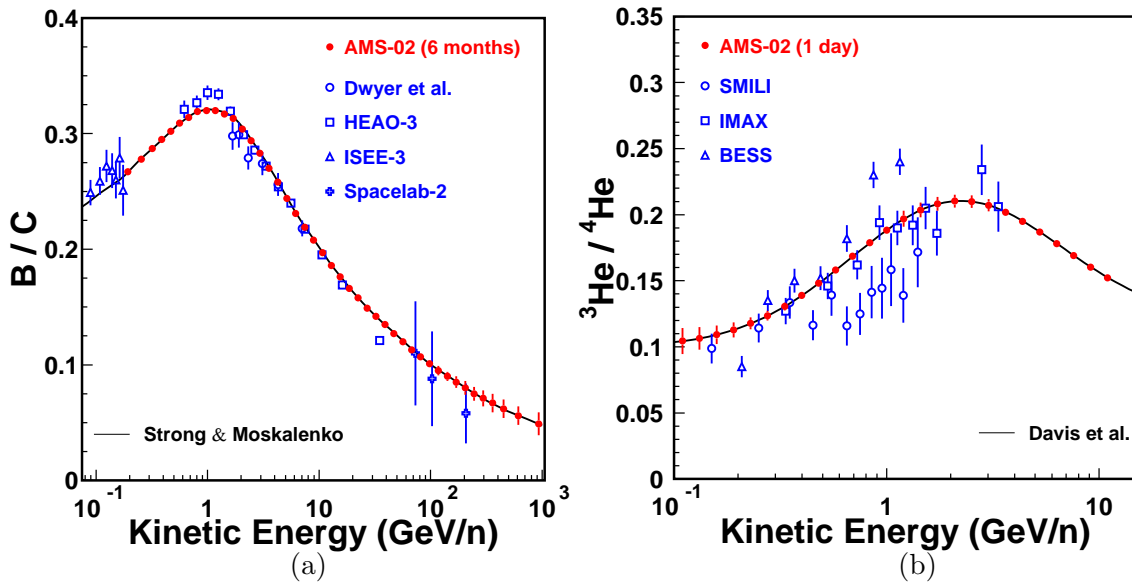


Abbildung 2.7: Erwartetes a) B/C -Verhältnis nach 6-monatiger Datennahme und b) ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ -Verhältnis nach 1-tägiger Datennahme mit AMS-02 im Vergleich zu bisherigen Messungen [24].

Aus dem Verhältnis der Anzahl der detektierten B -Kerne, die als Sekundärteilchen aus Wechselwirkungen der primären C -Kerne mit dem interstellaren Medium entstanden sind, und der C -Kerne läßt sich z.B. die Dichte des interstellaren Mediums bestimmen. Während der dreijährigen Meßzeit von AMS-02 sollen dabei 10^4 B -Kerne im Energiebereich über $100 \text{ GeV}/n$ identifiziert werden können.

In Abbildung 2.7 a) ist die nach einer 6-monatigen Datennahme mit AMS-02 erwartete B/C Sensitivität dargestellt. Die hier angegebene Sensitivität wurde mit dem Modell von Strong und Moskalenko zur Beschreibung der Propagation der CR durch den Weltraum simuliert. Ebenso kann mit dem AMS-02-Experiment zwischen ${}^2\text{H}$ und ${}^1\text{H}$ bzw. ${}^3\text{He}$ und ${}^4\text{He}$ im Energiebereich von $0.1 < E < 10 \text{ GeV}/n$ unterschieden werden. Die Sensitivität auf ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ nach eintägiger Messung mit AMS-02 zeigt Abbildung 2.7 b).

Aus dem Verhältnis der Anzahl des radioaktiven ${}^{10}\text{Be}$ (β -Strahler) zum stabilen ${}^9\text{Be}$ läßt sich die Dicke des galaktischen Halo bestimmen und zudem die Zeit, die sich ein kosmisches Teilchen in einer Galaxie aufhält. Die für AMS-02 erwartete Sensitivität nach einjähriger Datennahme im Energiebereich von $0.15 < E < 10 \text{ GeV}/n$ ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

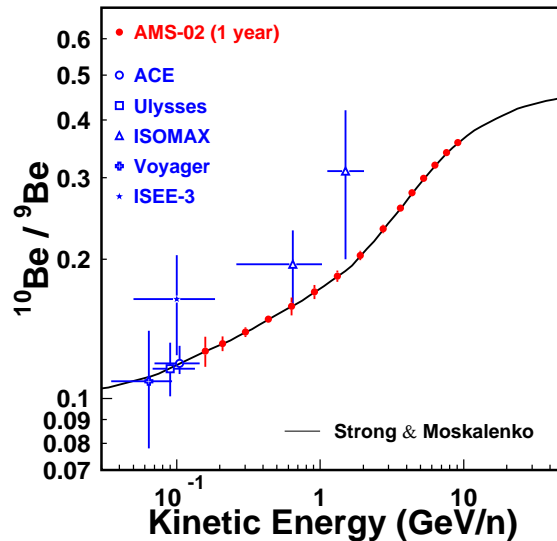


Abbildung 2.8: Erwartetes ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ -Verhältnis nach 1-jähriger Datennahme mit AMS-02 im Vergleich zu bisherigen Messungen [24].

2.1.2 Suche nach kosmischer Antimaterie

Ausgehend von der Urknall-Theorie ergibt sich die bislang ungeklärte Frage, wie sich hieraus das heute beobachtbare materiedominierte Universum entwickelt hat. Nach den aus der Elementarteilchenphysik bekannten Mechanismen müßte beim Urknall genauso viel Antimaterie wie Materie entstanden sein. Die Existenz eines solchen symmetrischen Universums wurde erstmals von P. Dirac im Jahre 1928 mit der relativistischen Quantentheorie postuliert, in der über die Dirac-Gleichung die Zustände ψ eines relativistischen Spin 1/2-Teilchens der Masse m beschrieben werden [16]:

$$(i \gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad (2.3)$$

Hieraus ergeben sich zwei verschiedene Lösungen für die Energie des Teilchens, die sich in ihrem Vorzeichen unterscheiden. Dirac interpretierte dies so, daß zu jedem Teilchen ein Antiteilchen existieren müsse. Tatsächlich wurden auch in den verschiedensten Experimenten zu jedem Quark und Lepton die entsprechenden Antiteilchen gefunden, die sich in ihren ladungsartigen Quantenzahlen (Baryonen-, Leptonen- und Ladungszahlen) im Vorzeichen von den Materieteilchen unterscheiden. Alle anderen physikalischen Eigenschaften sind exakt identisch.

Die Antimaterie könnte demnach genauso wie die Materie Atome, Sterne und Galaxien gebildet haben. Diese "Antigalaxien" wären an dem von ihnen ausgesandten Licht nicht von materiedominierten Galaxien unterscheidbar. Sterne und Supernovae aus Antimaterie würden ebenso wie ihre uns bekannten Gegenstücke aus Materie große Mengen an Antiatomkernen freisetzen, von denen einige weit in die materiedominierten Bereiche des Universums vordringen, und daher auch in Erdnähe nachgewiesen werden könnten.

Während die Bildung von sekundären Antiprotonen aus Wechselwirkungen der kosmischen Strahlung mit dem interstellaren Staub oder den Atomen der Erdatmosphäre bekannt ist, und die Existenz solcher Antiteilchen in der Höhenstrahlung nachgewiesen wurde (siehe AMS-01: Abbildung 2.6), ist die Wahrscheinlichkeit für eine sekundäre Bildung von Antikernen mit Kernladungszahlen $Z \geq 2$ (z.B. Antikohlenstoff \bar{C} oder gar Antieisen \bar{Fe}) in solchen Prozessen derart gering, daß jeder solche Antikern, der die Erde erreicht, in einem Antistern durch thermonukleare Prozesse entstanden sein muss [17]. Der Nachweis von \bar{He} könnte zudem auf die Existenz von premordialer Antimaterie hindeuten.

Neben dieser direkten Suche nach Antimaterie in der kosmischen Strahlung kann Antimaterie auch über die Annihilationsstrahlung, die beim Aufeinandertreffen von Materie und Antimaterie entsteht, indirekt nachgewiesen werden:

$$\bar{p}p \longrightarrow n \pi^0 + m (\pi^+ \pi^-), E_\gamma \approx 65 \text{ MeV} \quad (2.4)$$

$$e^+ e^- \longrightarrow 2 \gamma (3 \gamma), E_\gamma \approx 0.5 \text{ MeV} \quad (2.5)$$

Die bisherigen Experimente konnten weder höhere Antikerne ($Z \geq 2$) noch Annihilationsstrahlung im elektromagnetischen Spektrum der kosmischen Strahlung beobachten. An diesem Punkt gibt es neben analytischen Modellen, welche den Nachweis von extragalaktischer kosmischer Strahlung in Erdnähe aufgrund von Wechselwirkungen mit galaktischer Materie und mit den von Galaxien erzeugten Magnetfeldern nahezu ausschließen [14], folgende mögliche Lösungsmodelle:

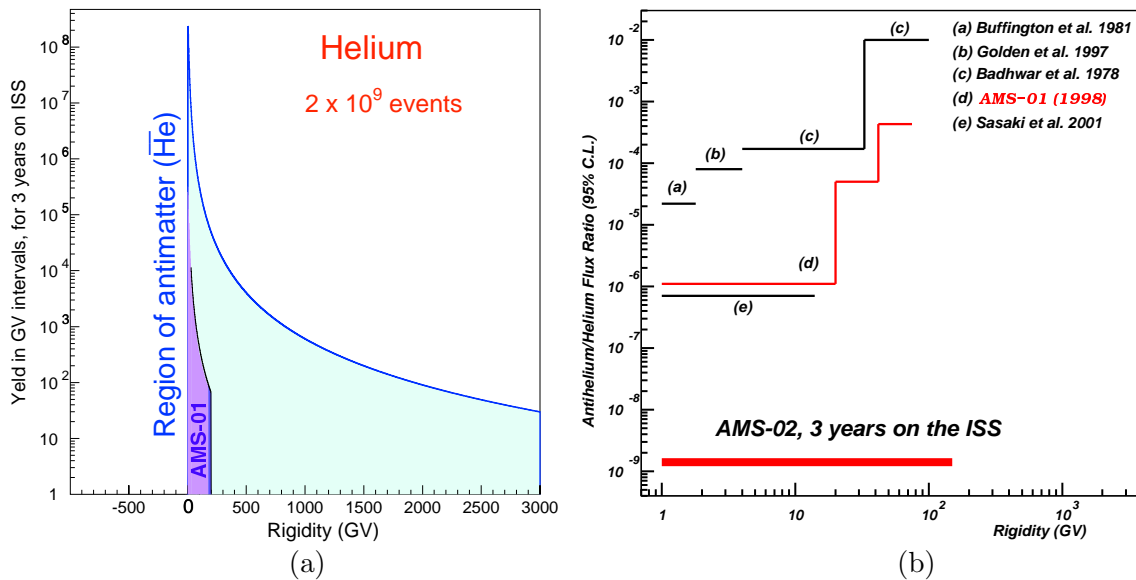


Abbildung 2.9: AMS-02-Erwartungen gegenüber AMS-01 und anderen Experimenten: a) Energiespektrum der He/ $\bar{H}e$ -Kerne; b) Grenzen zur Suche nach kosmischer Antimaterie [15].

1. Die räumliche Trennung von materie- und antimateriedominierten Regionen in einem symmetrischen Universum ist weit größer als der bisher ausgeschlossene Bereich. Eine mögliche Erklärung hierfür liefert das Inflationsmodell.
2. Materie und Antimaterie haben sich in der inflatorischen Epoche des Weltalls nicht exakt symmetrisch entwickelt. Es entstand ein winziger Überschuss an Materie, der nicht mit Antimaterie zerstrahlen konnte und die heute beobachteten Galaxien formte. Die CMBR ist dabei das Resultat dieser Materie-Antimaterie-Annihilationen. Das mit 10^{-9} sehr kleine Verhältnis aus der Anzahl der Baryonen zur Anzahl der CMBR-Photonen im Weltall könnte ein Hinweis für diese Entwicklung sein [18].

Diese Entwicklung zu einem asymmetrischen Universum, auch Baryogenese genannt, wurde zuerst 1967 von A. D. Sakharov formuliert. Seine Theorie basiert auf den folgenden Annahmen:

- die Summe der Baryonzahlen B ist nicht erhalten - ansonsten könnte ein anfänglich bezüglich B symmetrisches Universum sich nicht ändern. Eine Verletzung der Baryonzahlerhaltung wurde bisher in keinem Experiment beobachtet.
- Verletzung der CP -Invarianz, d.h. daß das Produkt aus Ladungs- und Paritätskonjugation keine exakte Symmetrie ist - ansonsten würde man gleiche Zerfallsraten für Materie und Antimaterie erhalten. Eine solche CP -Verletzung wurde bis heute nur bei Kaon- und B -Meson-Zerfällen beobachtet [6], [8].
- das Universum war nicht im thermischen Gleichgewicht - ansonsten hätte das anfängliche Gleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie bestehen bleiben müssen.

Der AMS-02-Detektor ist darauf optimiert, in der kosmischen Strahlung nach Antikernen zu suchen. In Abbildung 2.9 a) ist das erwartete Helium-Spektrum, falls keine Antiheliumkerne gefunden werden, nach dreijährigem Aufenthalt des AMS-02-Detektors auf der Raumstation gegenüber den AMS-01-Daten dargestellt. Abbildung 2.9 b) zeigt das entsprechende Antikern-Kern-Verhältnis für He des AMS-01-Detektors und weiterer Experimente, das mit dem AMS-02-Detektor auf 10^{-9} gesenkt werden soll.

2.1.3 Suche nach Dunkler Materie

Ein weiterer Bereich der Astrophysik beschäftigt sich mit dem Problem, daß im Universum offenbar wesentlich mehr gravitierende Materie vorhanden sein muss, als wir direkt sehen. Diese dunkle Materie kann bisher nur indirekt durch kosmische Trugbilder, wie es in Abbildung 2.10 a) von dem Galaxienhaufen CL0024+1654 dargestellt ist, sichtbar gemacht werden. Das mit dem Weltraumteleskop Hubble erstellte Bild kommt dadurch zustande, daß die elektromag. Strahlung von Hintergrundgalaxien durch die gravitative Wirkung der dunklen Materie abgelenkt wird und somit ihr Bild verzerrt. Durch eine systematische Studie dieser optischen Täuschungen in insgesamt 39 Regionen des Galaxienhaufens CL0024+1654 und deren Darstellung in Falschfarben ergibt sich ein derartiges Trugbild [19].

Zudem läßt sich der Nachweis von dunkler Materie anhand von Messungen des dynamischen Verhaltens von Galaxien und Galaxienhaufen erbringen. Nach dem dritten Kepler'schen Gesetz sollte die Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie mit steigender Entfernung r zum Rotationszentrum mit $\sim r^{-1/2}$ abfallen. Genauere Messungen haben aber gezeigt, daß dies nicht der Fall ist, sondern daß die Rotationsgeschwindigkeiten teilweise sogar weiter mit dem Radius ansteigen, und dies über Bereiche, die weit über die leuchtende Scheibe (Arme) der Galaxien hinausragen (siehe Abbildung 2.10 b)).

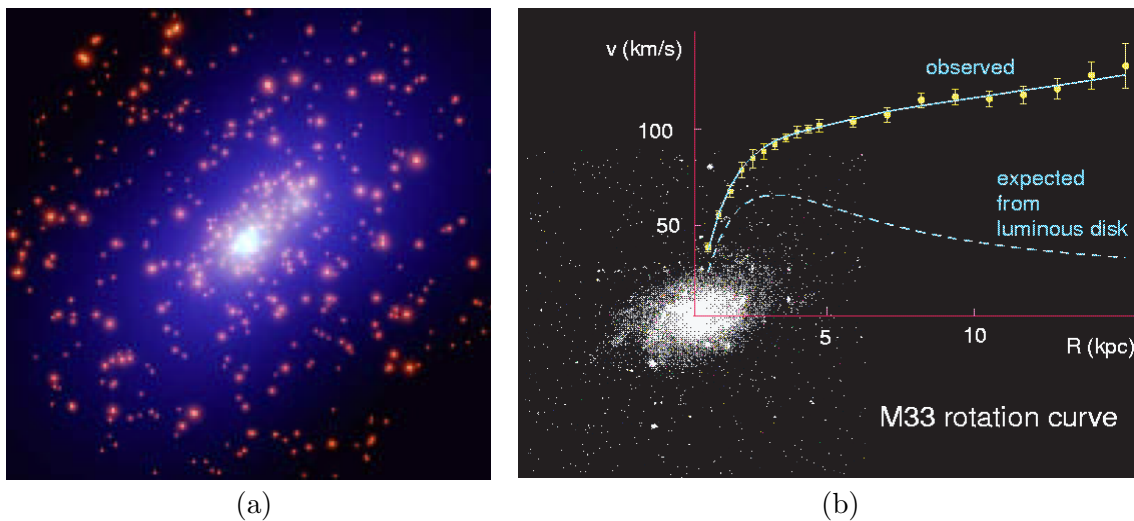


Abbildung 2.10: a) Kosmisches Trugbild des Galaxienhaufens CL0024+1654 (Galaxien: rot, Dunkle Materie: blau), erstellt mit dem Hubble Teleskop [19]; b) Rotationsgeschwindigkeit der Galaxie M33 [20].

Erst die Messungen der kosmischen Parameter eines flachen Universums mit dem WMAP-Experiment zeigen endgültig, daß im Kosmos weit mehr schwere Masse vorhanden ist, als die der sichtbaren baryonischen Materie aus Sternen und Gasnebeln. Dieser Anteil der leuchtenden Materie im Universum läßt sich abschätzen, wobei sich ein Dichteparameter von $\Omega_L \approx 0.005$ ergibt [21]. Da aber der mit WMAP gemessene Dichteparameter der Baryonen bei $\Omega_b = 0.044$ liegt und sich zudem aus der Theorie der Nukleosynthese im Rahmen des Standardmodells ein ähnlicher Wert für den Dichteparameter ableiten läßt, bedeutet dies, daß im Universum eine große Masse nicht leuchtender baryonischer Materie, z.B. in Form von Schwarzen Löchern, Gaswolken, braunen und weißen Zwergen, Neutronensternen etc. existiert. Daneben gibt es aber auch noch einen mit WMAP gemessenen beträchtlichen Anteil von $\Omega_m = 0.23$ an nichtbaryonischer dunkler Materie, die also nicht aus Quarks aufgebaut ist. Unter den Kandidaten für diese stabilen, auch WIMPs⁵ genannten Teilchen finden sich neben bekannten Teilchen wie den Neutrinos, die nach neueren Messungen mit dem Super-Kamiokande-Detektor [22] und dem SNO-Experiment [23] eine endliche Masse besitzen, auch hypothetische Teilchen, wie sie z.B. die supersymmetrischen Modelle (SUSY⁶) der Teilchenphysik durch eine Symmetrie zwischen Fermionen und Bosonen beschreiben.

Diese supersymmetrischen Teilchen sind mit Masse behaftet und gehen keinerlei elektromagnetische Wechselwirkung untereinander und mit normaler Materie ein. Dabei unterscheiden sie sich von Teilchen des Standardmodells (SM⁷) durch eine multiplikative Quantenzahl, der R-Parität, deren Erhaltung im MSSM⁸ vorausgesetzt wird. Die SUSY-Teilchen können daher nur paarweise erzeugt werden, und die anschließende Zerfallskette solcher Teilchen kann am Ende das leichteste LSP⁹, das Neutralino $\tilde{\chi}^0$ enthalten. Daraus folgt, daß das Neutralino stabil ist und wie die Neutrinos nur schwache Wechselwirkungen eingeht, wenn es elektrisch neutral ist. Das Neutralino ist eine quantenmechanische Superposition von elektrisch neutralen SUSY-Fermionen [6]:

$$\tilde{\chi}^0 = N_1 \tilde{\gamma} + N_2 \tilde{Z}^0 + N_3 \tilde{H}_1^0 + N_4 \tilde{H}_2^0 \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^4 |N_i|^2 = 1$$

mit dem Photino $\tilde{\gamma}$, dem Zino \tilde{Z}^0 und die beiden Higgsinos \tilde{H}_1^0 and \tilde{H}_2^0 .

Da das Neutralino ungeladen ist, kann es nur indirekt über Zerfallsprodukte in Annihilationsprozessen nachgewiesen werden. Solche Prozesse für $\chi \bar{\chi}$ -Paare wären z.B. Zerfälle über Z_0 , W^\pm oder $q \bar{q}$ -Paare in "sichtbare" Materie wie Protonen, Elektronen und Neutrinos, sowie deren Antipartner oder aber auch in hochenergetische Photonen [26]. Mit dem AMS-02-Detektor soll dabei in den γ -, \bar{p} -, und den e^+ -Zerfallskanälen der Neutralino-Annihilation nach dunkler Materie gesucht werden.

Nachweis von Antiprotonen: Wie Abbildung 2.11 a) zeigt, liefern die bisherigen Messungen von \bar{p} in der kosmischen Strahlung nur präzise Werte für den Energiebe-

⁵engl. **W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles

⁶engl. **S**uper **S**ymmetry

⁷engl. **S**tandard **M**odel

⁸engl. **M**inimal **S**upersymmetric **S**tandard **M**odel

⁹engl. **L**ightest **S**upersymmetric **P**article

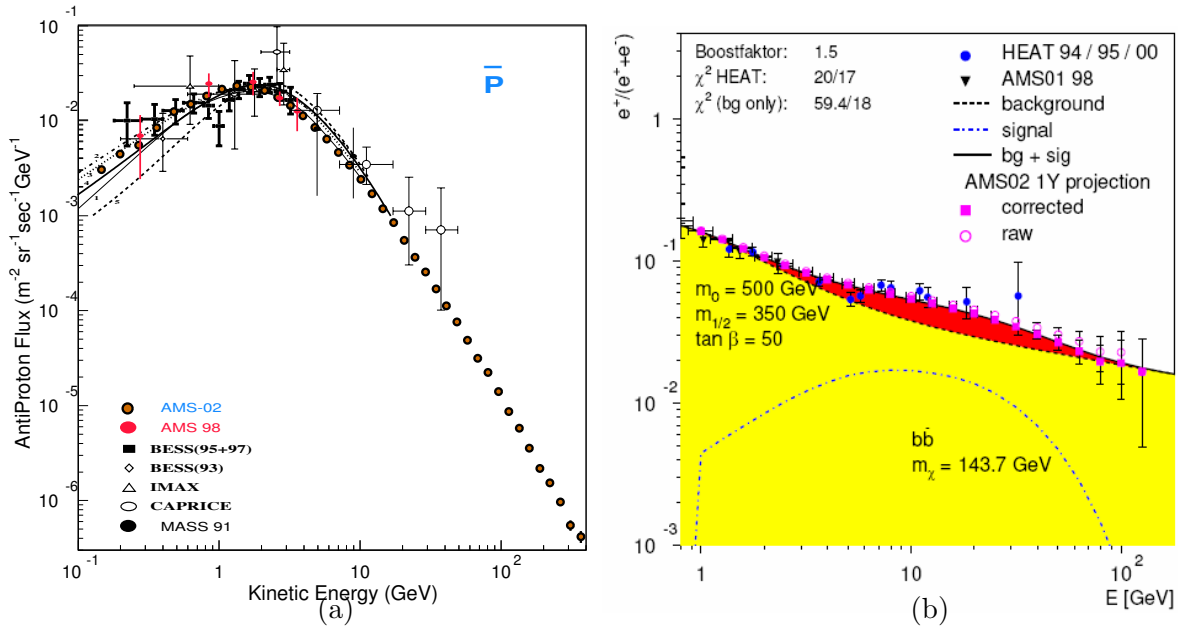


Abbildung 2.11: a) Das mit bisherigen Detektoren gemessene und für AMS-02 erwartete Antiprotonen-Spektrum [25]; b) mit AMS-02 erwarteter e^+ -Anteil im Falle von in $\chi\bar{\chi}$ -Annihilationen entstehende primäre e^+ [27].

reich $< 3 \text{ GeV}$. Die Messungen mit dem CAPRICE-Experiment im Energiebereich bis $\sim 30 \text{ GeV}$ sind aufgrund der geringen Statistik mit einem großen Fehler behaftet. Außerdem ist in der Abbildung 2.11 a) die für den AMS-02-Detektor nach einer dreijährigen Meßzeit erwartete Sensitivität auf \bar{p} dargestellt, ohne die Signatur eines SUSY-Teilchens zu berücksichtigen. Im Falle eines SUSY-Beitrages mit einer hohen Neutralino-Masse würde dieser zu einer Erhöhung des \bar{p} -Flusses im hochenergetischen Teil des Spektrums führen.

Nachweis von Positronen: Abbildung 2.11 b) zeigt neben dem mit dem AMS-01-Experiment gemessenen Positronenspektrum das mit dem HEAT-Experiment detektierte, das einen ersten Hinweis auf ein Neutralino-Signal im Energiebereich $> 5 \text{ GeV}$ liefern könnte. Dieser Anstieg in der Positronrate könnte auf Neutralino-Annihilationen im galaktischen Halo der Milchstrasse zurückzuführen sein, ist aber aufgrund der großen statistischen Fehler nicht beweiskräftig. Zudem ist in der Abbildung das Resultat einer an die HEAT- und AMS-01-Daten angepaßten Simulation der e^+ -Produktion durch annihilierende Neutralinos zusammen mit dem von einem Diffusionsmodell beschriebenen interstellaren Fluß von primären und sekundären Positronen, wie sie dann auch für den AMS-02-Detektor nach einjähriger Meßzeit erwartet wird, dargestellt [27]. Diese Simulation basiert auf einer angenommenen Neutralino-Masse von $m_\chi \approx 140 \text{ GeV}$. Zur Erfassung der Daten muß der simulierte Positronenfluß mit einem sogenannten Boostfaktor von 1.5 multipliziert werden. Dieser Boostfaktor berücksichtigt das die dunkle Materie vermutlich nicht homogen verteilt ist, sondern ähnlich wie die sichtbare Materie sich innerhalb von Galaxien anordnet.

Um diese Teilchenspektren vom Spektrum der kosmischen Strahlung separieren zu können, kommen im AMS-02-Detektor, wie schon in Abschnitt 2.1.1 angedeutet, verschiedenen Subdetektoren zur Teilchenidentifikation zum Einsatz.

2.2 Aufbau des AMS-02-Detektors

Der AMS-Detektor wird in zwei Phasen entwickelt. Gegenüber der Konfiguration des AMS-01-Detektors [28] werden für die weitere Ausbaustufe eine Reihe von Veränderungen und Ergänzungen vorgenommen. Der aktuelle Entwurf ist in Abbildung 2.12 zu sehen und umfaßt die folgenden Komponenten.

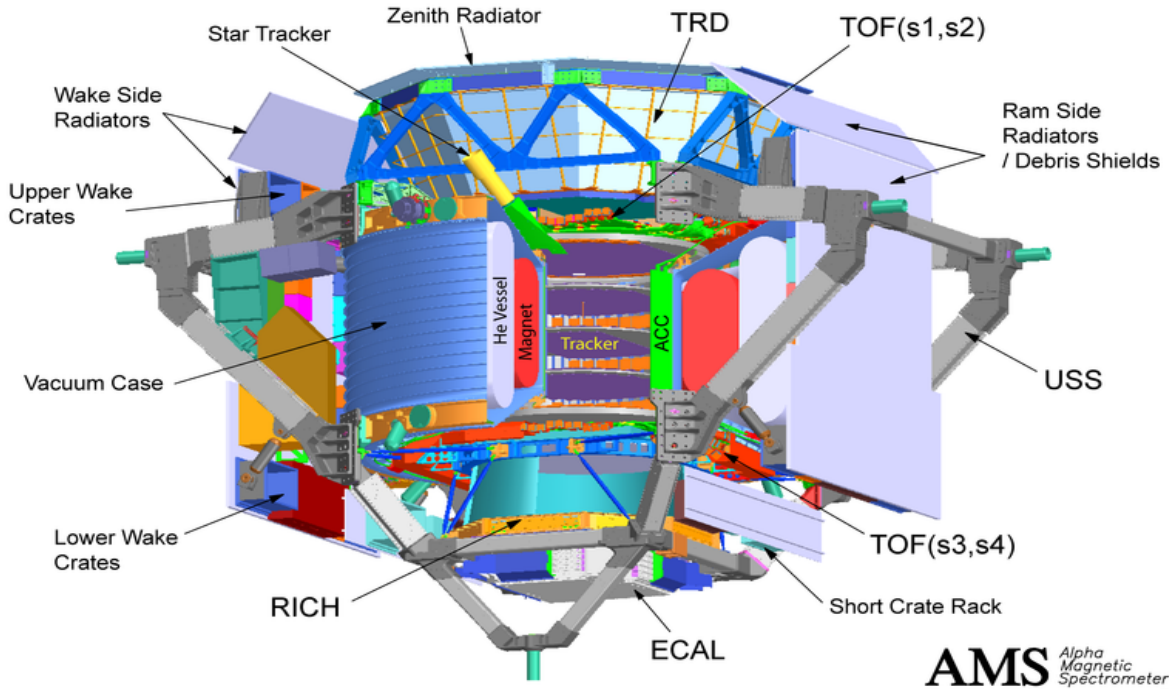


Abbildung 2.12: Aufbau des AMS-02-Detektors [30].

2.2.1 Supraleitender Magnet

Der supraleitende Magnet des AMS-02-Detektors besteht aus zwei größeren Dipolmagnetspulen, die im wesentlichen das transversale Magnetfeld in $+x$ -Richtung des AMS-02-Detektors erzeugen und zwei Serien von je 6 kleineren magnetfeldformenden Spulen (siehe Abb. 2.13). Diese dienen zur Reduzierung des Streufeldes außerhalb des Magneten (Maximum von 4 mT bei einem Radius von 3 m) und des magn. Dipolmomentes des gesamten Systems, um das durch die Wechselwirkung mit dem Magnetfeld der Erde hervorgerufene Drehmoment auf die ISS auf 0.27 Nm zu minimieren. Diese Spulen werden zu einem Ring angeordnet und in einem Vakuumtank positioniert, der bei einer Temperatur von 1.8 K und 20 mbar betrieben wird. Zur Kühlung der Spulen wird superfluides Helium ($HeII$) verwendet, das in einem ringförmigen, 2500 l fassenden Tank gespeichert wird. Durch Verdunstung des superfluiden Heliums über vier Strahlungsschilde wird der supraleitende Zustand der Spulen während der dreijährigen Stationierung des AMS-02-Detektors auf der ISS aufrechterhalten. Zusätzlich wird über Kryokühler an der äußeren Abschirmung des Magneten eine Wärmeleistung von $\sim 12 \text{ W}$ bei einer Temperatur von 68 K abgeführt.

Die aus Niobium-Titan-Draht gewickelten und mit Aluminium verstärkten Spulen sind in Serie geschaltet und werden von einem Strom von 459 A durchflossen. Damit läßt sich im Innern des Magneten ein im Vergleich zum AMS-01-Permanentmagneten um einen Faktor 6 höheres magnetisches Feld von 0.9 T erzeugen ($B \cdot L^2 = 0.78\text{ Tm}^2$), was zu einer Erhöhung der maximalen Rigidität des Detektors auf $\sim 3\text{ TV}$ führt. Das Gesamtgewicht des Magneten liegt bei 2300 kg . Erst die Entwicklung spezieller weltraumtauglicher Phasenabscheider, Thermo-Pumpen und auf kalorimetrische Messmethoden beruhende Geräte zur Bestimmung des Flüssigkeitsanteils im Helium-Vorratstank ermöglicht den Bau dieses bisher größten supraleitenden Magneten im Weltraum (nähere Informationen: siehe auch [29]).

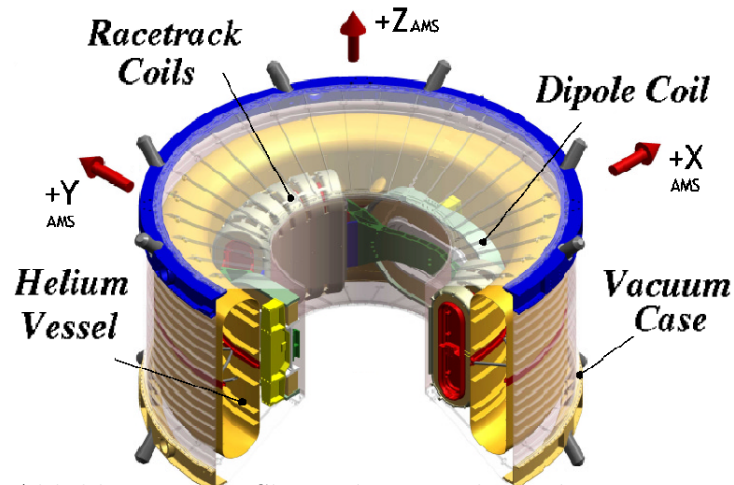


Abbildung 2.13: Skizze des supraleitenden Magneten (Innendurchmesser: 1.1 m ; Außendurchmesser: 2.7 m ; Höhe: 1.55 m) [30].

Das Gesamtgewicht des Magneten liegt bei 2300 kg . Erst die Entwicklung spezieller weltraumtauglicher Phasenabscheider, Thermo-Pumpen und auf kalorimetrische Messmethoden beruhende Geräte zur Bestimmung des Flüssigkeitsanteils im Helium-Vorratstank ermöglicht den Bau dieses bisher größten supraleitenden Magneten im Weltraum (nähere Informationen: siehe auch [29]).

2.2.2 Silizium-Spurdetektor (Tracker)

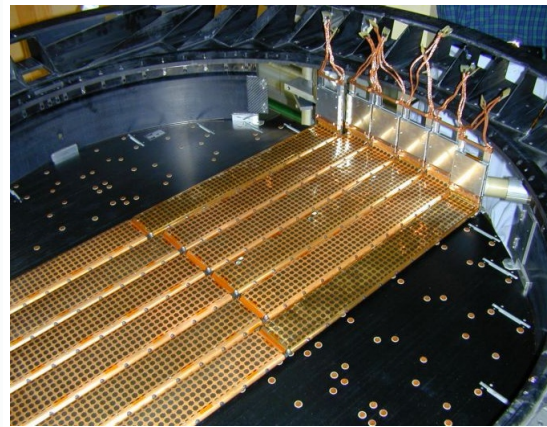
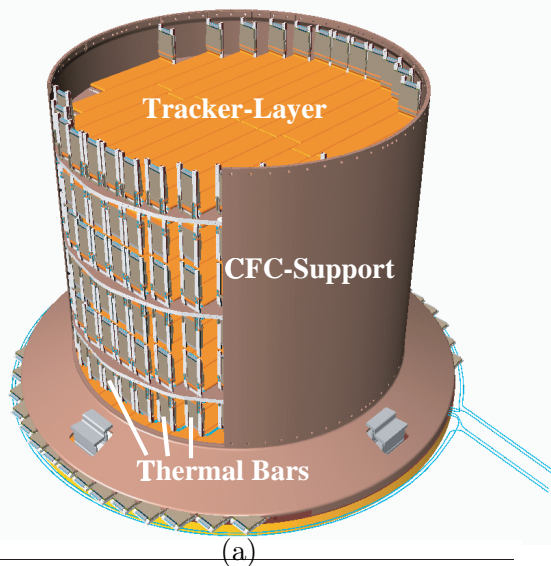


Abbildung 2.14: a) Skizze des AMS-02-Trackers; b) Foto einer Ebene des Si-Spurdetektors mit 5 montierten Leitern [30].

Im inneren Volumen des supraleitenden Magneten befindet sich der AMS-02-Spurdetektor - kurz Tracker - bestehend aus 8 Ebenen mit insgesamt $\sim 8\text{ m}^2$ doppelseitigen Silizium-Streifendetektoren. Bei einer Tracker-Akzeptanz von $0.5\text{ m}^2 \cdot sr$ kann über die Krümmungsradien von den Detektor durchquerenden elektrisch geladenen Teilchen der Impuls und über Energieverlustmessungen die Ladung dieser

Teilchen bestimmt werden. Sechs dieser Lagen werden, jeweils paarweise in drei Ebenen, innerhalb des Magneten auf CFC¹⁰-Al-Wabenplatten angebracht ($X/X_0 \approx 1.3\%$ unter Berücksichtigung der *Si*-Detektoren auf beiden Seiten der Platten). Die beiden äußeren Lagen sind ober- bzw. unterhalb des Magneten ($\approx 10\text{ cm}$) angeordnet und dienen der Bestimmung der Ein- und Austrittsorte der Teilchen.

Die $41.4 \cdot 73\text{ mm}^2$ und $300\text{ }\mu\text{m}$ dicken, n-dotierten Silizium-Wafer haben eine doppelseitige Auslesestruktur. Der Abstand der in x-Richtung verlaufenden ionenimplantierten Streifen beträgt $27.5\text{ }\mu\text{m}$ (Messung senkrecht zum Magnetfeld), wobei nur jeder vierte Streifen ausgelesen wird und der in y-Richtung verlaufenden $104\text{ }\mu\text{m}$, bei Auslese jedes zweiten Streifens. Je 11 - 14 dieser Wafer werden auf sogenannten, bis zu 70 cm langen "Leitern" aufgeklebt, an deren Ende sich die Front-End-Elektronik mit den Vorverstärkern (64 Kanäle/Chip, ca. 1 mW/Kanal) befindet (siehe Abb. 2.14 b)). Diese Elektronik ist zur Ableitung

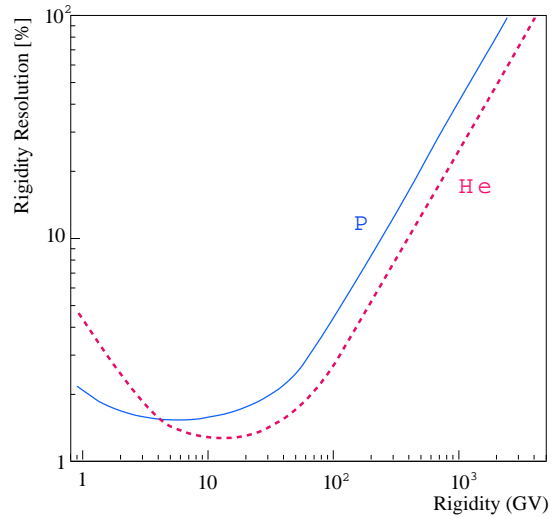


Abbildung 2.15: Impulsauflösung des Silizium Spurdetektors von AMS-02 [32].

der Verlustwärme über Bündel aus thermisch leitenden Kohlefasern ("thermal bars") mit einem Kühlungssystem am oberen bzw. unteren Tracker-Halteflansch verbunden. In Abbildung 2.14 a) sind diese Bündel an den Seiten der Tracker-Tragestruktur zu erkennen. Insgesamt besteht der Tracker aus 192 solcher Leitern und die Elektronik verbraucht bei ~ 200000 Auslesekanälen eine Leistung von $\sim 800\text{ W}$. Mit dieser oben beschriebenen Konfiguration erreicht der Silizium-Spurdetektor bei einer Ortauflösung von 30 bzw. $10\text{ }\mu\text{m}$ in der x- bzw. y-Kordinate eine Impulsauflösung für Protonen von $\sim 3\%$ bei einer Energie von 100 GeV . Bei niedrigen Impulsen ist die Impulsauflösung durch die Vielfachstreuung beschränkt und bei hohen Impulsen durch die Stärke des Magnetfeldes (siehe Abb. 2.15) [31], [32]. Einige der hier angeführten mechanischen Strukturen, wie z.B. die CFC-Aluminiumwaben-Platten werden am I. Phys. Institut der RWTH Aachen gefertigt.

Zur exakten Bestimmung der relativen Positionen der Trackerebenen verfügt der AMS-02-Detektor über ein am I. Phys. Institut der RWTH Aachen entwickeltes Laser-Alignment System. Dazu werden die acht Lagen *Si*-Streifendetektoren an fünf verschiedenen Positionen mit jeweils zwei gepulsten Laserstrahlen der Wellenlänge 1082 nm durchleuchtet. Durch Auswertung der von den *Si*-Streifen gelieferten Signale kann die relative Anordnung der acht Lagen auf $5\text{ }\mu\text{m}$ genau vermessen werden [33]. Zusätzlich verfügt der AMS-02-Detektor über einen Star-Tracker, der am oberen Magnetflansch angebracht wird. Mit diesem aus einem Linsensystem und einer CCD-Kamera aufgebauten Tracker wird ein Fixstern angepeilt, sodaß die Ausrichtung des gesamten AMS-02-Detektors im Weltraum ermittelt werden kann.

¹⁰engl. Carbon Fiber Compound

2.2.3 Anti-Koinzidenz-Zähler (ACC)

Rund um den Spurdetektor befinden sich, an einem 1 mm starken CFC-Zylinder befestigte, 8 mm dicke Plastik-Szintillatoren zum Detektieren von elektrisch geladenen Teilchen, die seitlich ein- bzw. austreten. Neben solchen Ereignissen können auch Mehrspurereignisse, die durch die Erzeugung von δ -Elektronen oder durch Schauerbildung im AMS-02-Detektor entstehen, so z.B. die Rückstreuung von im elektromagnetischen Kalorimeter entstandenen Sekundärteilchen, Spuren im Tracker erzeugen, die fehlinterpretiert werden könnten. Die Analyse der mit dem AMS-01-Detektor aufgezeichneten Daten hat gezeigt, daß der Anti-Koinzidenz-Zähler für mehr als 90 % dieser Ereignisse ein Vetosignal für den Level-1-Trigger liefert. Der ACC ist aus 16 Szintillator-Modulen aufgebaut, die Licht in einem Wellenlängenbereich zwischen 380 und 420 nm emittieren. Das Szintillationslicht wird über 1 mm dicke optische Fibern (Wellenlängenschieber: Emission bei 480 - 500 nm), die in jeweils zwei Bündeln an der Ober- und Unterseite der Module zusammengeführt werden, aus dem Szintillator ausgekoppelt. Über transparente Glasfibern wird das Licht dann den 16 Photomultipliern zugeführt, die am oberen und unteren Magnetflansch befestigt sind. In Abbildung 2.16 ist das im I. Physik. Inst. der RWTH Aachen entwickelte ACC-System dargestellt [34].

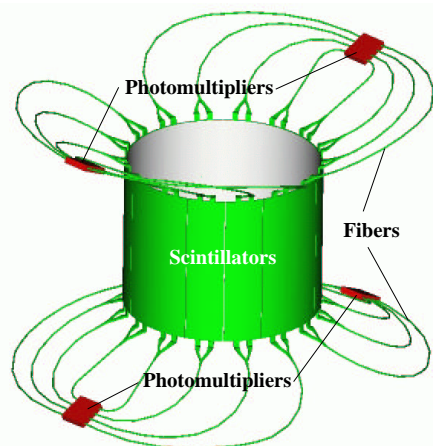


Abbildung 2.16: Anti-Koinzidenz Zähler (ACC) [30].

2.2.4 Time of Flight-Zähler (ToF)

Ober- und unterhalb des Trackers befinden sich je zwei gekreuzte Lagen von insgesamt 34, 10 mm dicken Plastik-Szintillationszählern, die pro Lage eine Fläche von $\sim 1.6 m^2$ abdecken. Eine dieser Lagen ist in Abb. 2.17 dargestellt. Die Szintillatoren werden an beiden Enden über kompakte, transparente Lichtleiter und Photomultiplier ausgelesen, die besonders unempfindlich bezüglich des an ihren Haltepositionen hohen magnetischen Streufeldes sind. Mit diesem ToF-System wird zum einen die Fluggeschwindigkeit ($\beta = \frac{v}{c}$) und -richtung von den Detektor durchquerenden geladenen Teilchen bestimmt, und

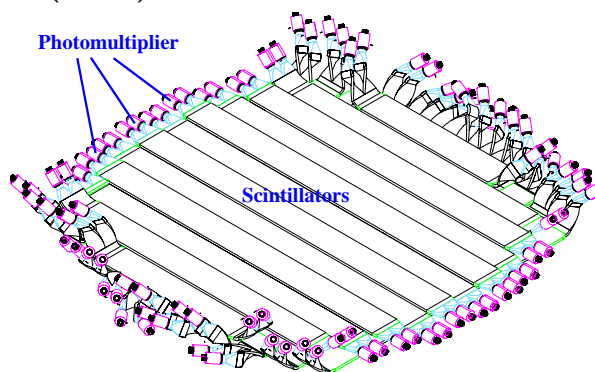


Abbildung 2.17: Time of Flight System (ToF) [30].

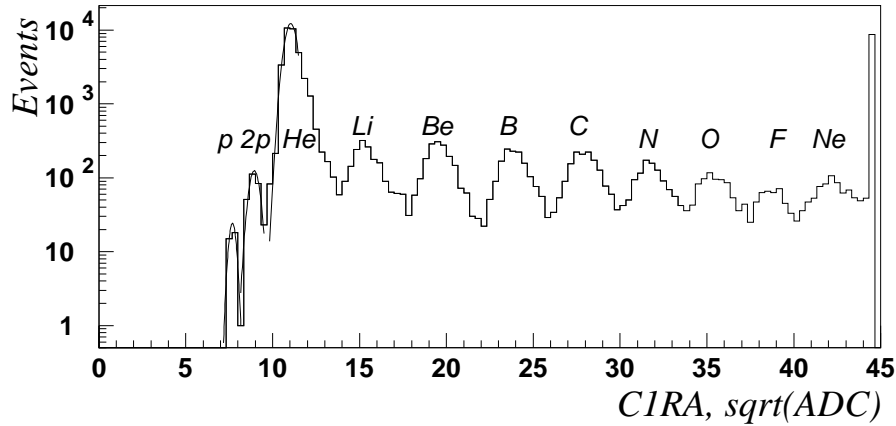


Abbildung 2.18: Anodensignal eines Photomultipliers bei einem Strahltest [35].

zum anderen dient es als Level-1-Trigger für die anderen Detektorkomponenten. Durch die Messung des Energieverlustes der Teilchen im ToF können zusätzlich auch Aussagen über den Betrag ihrer Ladung gemacht werden. Zwei dieser ToF-Zähler wurden von Mitarbeitern des INFN Bologna in einem Strahltest mit einem Ionen-Strahl (Sekundärteilchen mit Lorentzfaktoren > 3) am CERN im Oktober 2002 getestet. In Abb. 2.18 ist das Anodensignal eines dieser Photomultiplier dargestellt. Man erkennt die einzelnen detektierten Elemente mit steigender Kernladungszahl von Helium bis Neon. Durch eine Analyse der Dynodensignale ergibt sich das in Abb. 2.19 dargestellte Auflösungsvermögen in Abhängigkeit der Ladung der Teilchen. Mit dem ToF-System erreicht man demnach eine Zeitauflösung von ~ 120 ps für Protonen, und von 57 ± 1 ps für Teilchen mit höherer Kernladungszahl [35].

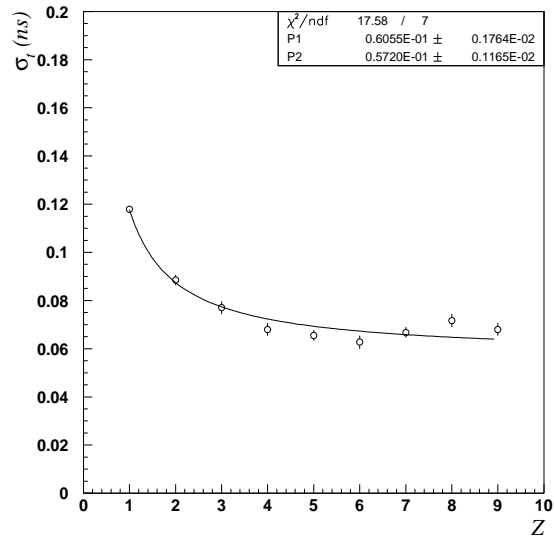


Abbildung 2.19: Auflösungsvermögen des getesteten ToF-Systems in Abhängigkeit der Teilchenladung [35].

2.2.5 Ring Imaging Čerenkov-Zähler (RICH)

Unterhalb der unteren ToF-Lage befindet sich der Ring Imaging Čerenkov Counter (RICH). Wie in Abb. 2.20 dargestellt, besteht dieser Detektor aus einem Radiator an der Oberseite, in dem das Čerenkov-Licht beim Durchgang eines elektrisch geladenen Teilchens mit $v > c_{Medium}$ entsteht. Diese Radiatorlage besteht aus Silica Aerogel (Brechungsindex $n = 1.03 - 1.05$, Dicke: 3 cm). Dabei bilden sich charakteristische Čerenkov-Ringbilder aus, die mit insgesamt 680 Sensoren auf einer im Abstand von 450 mm zur Radiatorlage angebrachten Detektorlage nachgewiesen werden.

Um die Akzeptanz des Detektors zu vergrößern, wird der Zwischenraum von einem konischen Spiegel umschlossen. Jeder Sensor der Detektorlage ist aus einem konisch zulaufenden, lichtleitenden Material, das in eine 4×4 Matrix unterteilt ist, und einem Photomultiplier mit ebenfalls segmentiertem Eintrittsfenster aufgebaut, so daß jedes Segment individuell ausgelesen werden kann. Damit ergeben sich 10880 Auslesekanäle. In der Mitte der Detektor-

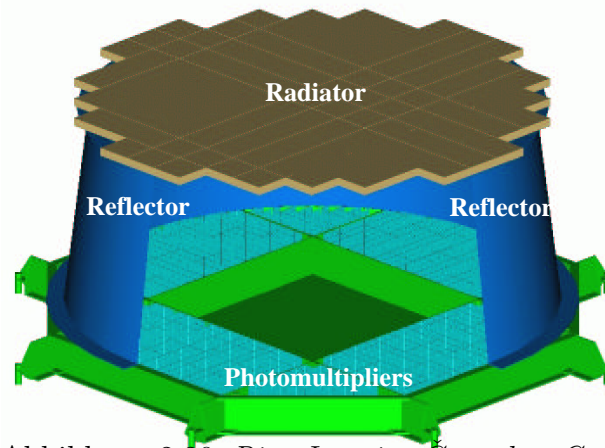


Abbildung 2.20: Ring Imaging Cerenkov Counter (RICH) [30].

lage befindet sich ein Austrittsfenster zum darunter liegenden elektromagnetischen Kalorimeter. Mit diesem Subdetektor können verschiedene Isotope im Massebereich von $A < 15 - 20$ und Impulsbereich von $1 \frac{\text{GeV}}{c} < \frac{p}{A} < \sim 12 \frac{\text{GeV}}{c}$ identifiziert werden. Dazu wird die Ladung der Teilchen mit den weiteren Subdetektoren bis zu einer Kernladungszahl von $Z \simeq 26$ über Energieverlustmessungen $\Delta E/E \leq 8\%$ ermittelt und die Geschwindigkeit aus dem Emissionswinkel der Čerenkov-Ringbilder bestimmt. Dieses ist oberhalb einer Schwelle von $\beta > 0.95$ mit einer Genauigkeit von $\Delta\beta/\beta \leq 0.1\%$ möglich. In Abbildung 2.21 ist die während der dreijährigen Stationierung des AMS-02-Detektors auf der ISS erwartete Rate der sechs leichtesten Isotope separiert nach Masse (durch den RICH-Detektor) und Kernladungszahl (durch den Tracker und die ToF- und RICH-Detektoren) dargestellt [36].

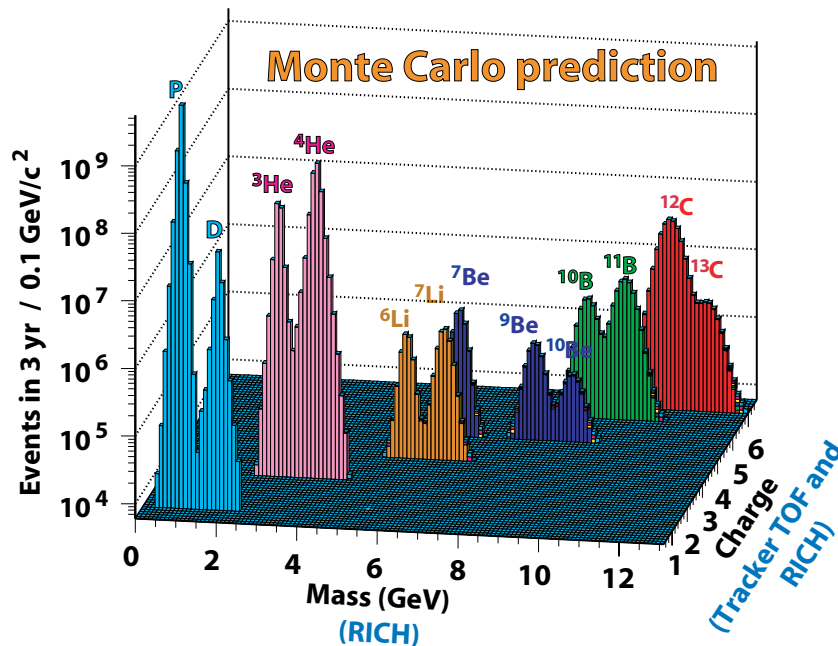


Abbildung 2.21: Für AMS-02 erwartete Rate der sechs leichtesten Isotope während der dreijährigen Stationierung auf der ISS [36].

2.2.6 Elektromagnetisches-Kalorimeter (Ecal)

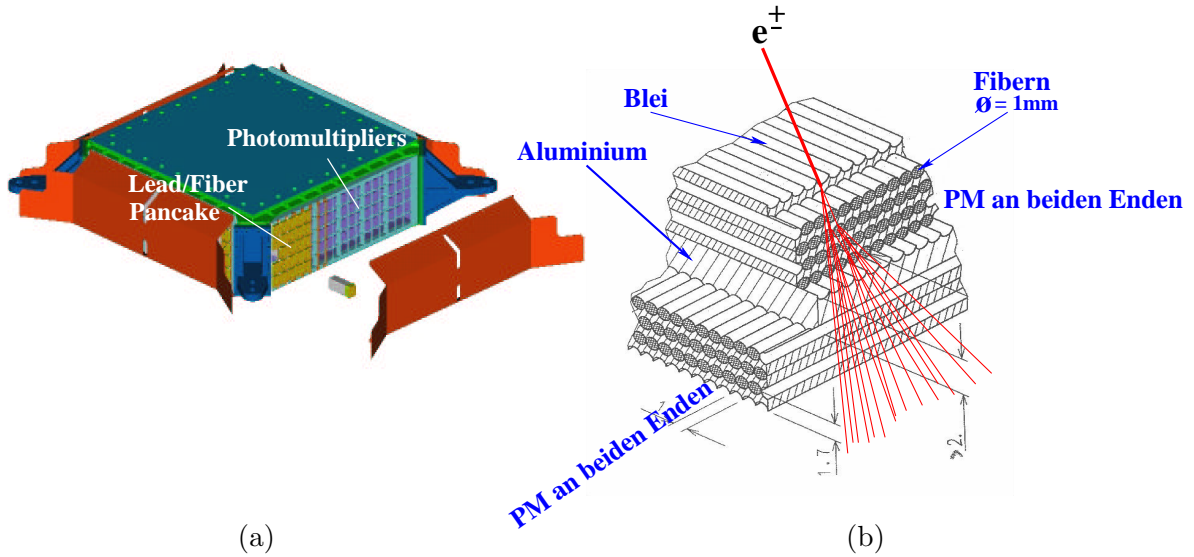


Abbildung 2.22: a) Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL); b) Skizze zweier "Superlagen" [30].

Unterhalb des RICH-Subdetektors befindet sich ein elektromagnetisches Kalorimeter (Ecal) in Form eines Sandwich-Kalorimeters (Höhe: 166 mm, Gewicht: 640 kg), wie es in Abbildung 2.22 a) dargestellt ist. Dieses Kalorimeter besteht aus 9 sogenannten "Superlagen" in einer Tragestruktur aus Aluminium, wobei jede Superlage wiederum aus 10 Lagen einer Kombination aus Blei-Konverter und Szintillationsfibern aufgebaut ist. In diesen Konvertern aus Blei bilden die durchfliegenden Teilchen durch Wechselwirkungen Teilchenschauer aus. Zwischen den Konverterlagen befinden sich die Szintillatorfibern, in denen diese sekundären Teilchen Energie deponieren, und das entstandene Szintillationslicht über insgesamt 324 Photomultiplier an beiden Enden der Fibern ausgelesen werden kann. Das Prinzip der Schauerbildung ist in Abbildung 2.22 b) zu erkennen. Um die Schauerbildung in allen drei Raumrichtungen zu ermitteln, sind die Superlagen alternierend in x- und y-Richtung angeordnet, wobei die Granularität des Kalorimeters in x-y-Richtung bei ~ 0.5 Moliere-Radien liegt und in z-Richtung bei ~ 0.9 Strahlungslängen X_0 . Bei einer gesamten Strahlungslänge des Subdetektors von $\sim 16.5 X_0$ erhält man somit ~ 18 Einträge in z-Richtung. Man erreicht damit eine Energieauflösung des Kalorimeters von $\delta E/E \simeq (12 \pm 0.4\%)/\sqrt{E} \oplus (2.8 \pm 0.1\%)$ (E in [GeV])¹¹.

Aufgrund der unterschiedlichen Signalspektren der einzelnen Szintillatoren und der Form des gesamten Schauers für Protonen/ Antiprotonen bzw. Elektronen/ Positronen und γ -Strahlung, wird eine Teilchenidentifikation ermöglicht. Von der für die Positronspektroskopie geforderten Proton-Untergrundunterdrückung von 10^6 liefert das Kalorimeter einen Faktor 10^3 bis 10^4 in einem Energiebereich von 10 – 500 GeV. Dieser Subdetektor deckt dabei zusammen mit dem im folgenden Abschnitt beschriebenen TRD einen Akzeptanzbereich von $\sim 0.05 m^2 \cdot sr$ ab. Zusätzlich können Photonen mit einer Winkelauflösung von 1° detektiert werden [37], [38].

¹¹ $a \oplus b := \sqrt{a^2 + b^2}$

2.2.7 Übergangsstrahlungsdetektor (TRD)

Der Übergangsstrahlungsdetektor ergänzt an der Oberseite des Spurdetektors das elektromagnetische Kalorimeter bei der Teilchenidentifikation von p/e^+ bzw. \bar{p}/e^- . Im Innern der konischen TRD-Oktagon-Tragestruktur befinden sich 20 Lagen einer Kombination aus Radiator und Proportionalkammern, wobei die oberen und unteren vier Lagen in x-Richtung und die dazwischen liegenden 12 Proportionalkammerlagen in y-Richtung verlaufen.

Im 20 mm dicken Faserradiator jeder Lage wird in Abhängigkeit der Lorentzfaktoren γ , der den Detektor durchquerenden primären, elektrisch geladenen Teilchen, Übergangsstrahlung im Röntgenbereich erzeugt, die in den darunter liegenden, modular aufgebauten Proportionalkammerlagen nachgewiesen wird. Jedes Modul dieser Lagen besteht aus 16 Röhrcchen mit einem Innendurchmesser von 6 mm und einer Wandstärke von nur 72 μm , die mit Streifen aus einem Kohlefaser-material verstärkt sind. Die insgesamt 328, bis zu 2.1 m langen Module werden über ein Gasversorgungssystem mit einem Gasgemisch aus 80 % Xenon und 20 % CO_2 befüllt. In jedem der Röhrcchen ist ein Hochspannung führender Draht gespannt, über den die von den Primärteilchen bzw. TR-Photonen im Gas erzeugten elektrischen Signale ausgekoppelt werden und den 5248 Kanälen der weiteren Ausleseelektronik zugeführt werden.

Die für den AMS-02-TRD-Detektor gewählte Konfiguration aus 20 Lagen mit 20 mm dicken Faserradiatoren und 6 mm dicken, teilweise orthogonal zueinander ausgerichteten Proportionalkammerlagen basiert auf umfangreichen Monte-Carlo-Simulationen (MC) mit dem Software-Paket GEANT 3.21 und den Implementierungen der HERA-B TRD-Gruppe, die die Erzeugung von Übergangsstrahlungsphotonen in Faserradiatoren und deren Absorption in dünnen Gasschichten beinhaltet. Mit den Randbedingungen von einer auf 60 cm begrenzten Höhe, einer Gewichtslimitierung von 494 kg des gesamten TRDs, einer Minimierung der Strahlungslänge von Materialien im Akzeptanzbereich des Trackers, eine für den Einsatz im Welt- raum ausreichende mechanische und thermische Stabilität und einem limitierten Stromverbrauch und damit verbunden eine begrenzte Anzahl von Auslesekanälen, ist die oben beschriebene Konfiguration das Optimum.

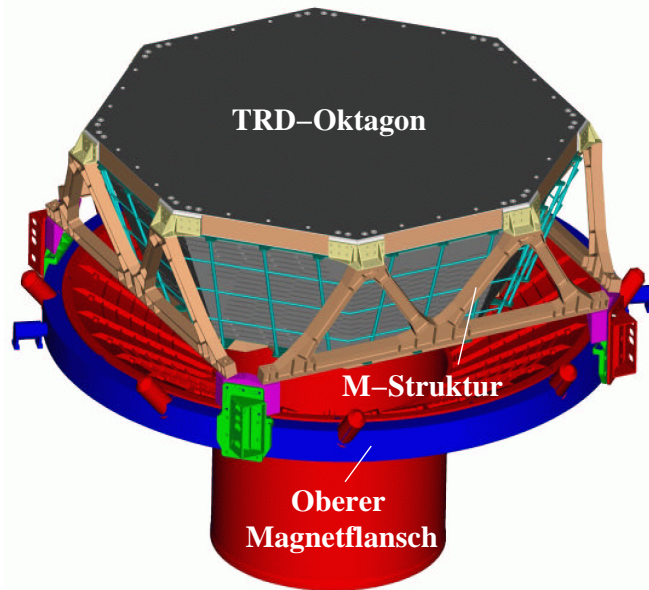


Abbildung 2.23: Der AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) in der am oberen Magnetflansch befestigten M-Struktur [30].

Unter Ausnutzung des Übergangsstrahlungseffektes wird mit dieser TRD-Konfiguration eine Nachweiseffizienz für Elektronen von 90 % mit einem um einen Faktor 10^2 bis 10^3 unterdrückten Protonenuntergrund im Energiebereich von 5 – 300 GeV erreicht. Zusammen mit dem elektromagnetischen Kalorimeter wird demnach der für die Positronspektroskopie notwendige Unterdrückungsfaktor für Protonen von 10^6 erreicht (siehe auch Abschnitt 2.3). Neben der e^+/p^+ -Unterscheidung liefert der TRD neben dem Tracker weitere Spurinformatoren von geladenen Teilchen außerhalb des Feldes des supraleitenden Magneten.

Da die Konstruktion und der Bau dieses Subdetektors am I. Physik. Institut der RWTH Aachen hauptsächlichlicher Bestandteil dieser Arbeit ist, erfolgt eine ausführlichere Beschreibung des TRD in den folgenden Kapiteln.

2.3 Strahltest mit einem 20-Lagigen Prototypen

Um zu überprüfen, ob die im vorherigen Abschnitt beschriebene TRD-Konfiguration die Anforderungen an die Teilchenidentifikation erfüllt, wurde ein 20-lagiger TRD-Prototyp gebaut und in der X7-Strahllinie am SPS¹² des CERN mit hochenergetischen Teilchen getestet. Dieser Prototyp besteht aus 2 x 20 Lagen einer Kombination aus 20 mm dickem Faserradiator mit jeweils einem 40 cm langem Proportionalkammer-Modul dahinter, die zu zwei Türmen in einer Aluminiumhalterung mit zwei Öffnungsfenstern angeordnet werden. Beide Türme sind um den halben Kammerabstand versetzt zueinander angeordnet, wie es in Abbildung 2.24 b) dargestellt ist. Anders als beim endgültigen TRD-Design wurden nur die Lagen 3 + 4 bzw. 17 + 18 um 90° zu den anderen Lagen verdreht, welche aufrecht im Prototypen gehalten werden. Die Anordnung der gesamten Apparatur in der Strahllinie des CERN ist in Abbildung 2.24a) zu erkennen.

Die Kammern werden in 6 offenen Gaskreisläufen von einem an der Aluminiumhalterung angebrachten Gasversorgungssystem mit einem Xe/CO₂(80 : 20)-Gemisch bei einem Fluß von 0.3 l/h gespült. Die jeweils 6 - 8 Module pro Kreislauf sind dabei in Serie geschaltet. Neben dem Gasversorgungssystem ist auch die Hochspannungsversorgung der Module und die Ausleselektronik für 640 Kanäle am Aluminiumgehäuse befestigt, die im wesentlichen aus ladungssensitiven Integrationsverstärkern und Multiplexern besteht, die die elektronischen Signale zu den Analog-Digital-Konvertern weiterleiten. Die Gasversorgung und Elektronikauslese erfolgt über die Stirnseiten der Module. Neben einem allgemeinen Funktionstest des TRD wurden im Prototypen drei verschiedene Faserradiatoren in einem der Türme auf ihre Ausbeute an Übergangsstrahlung hin getestet (näheres hierzu: siehe Kap. 3.1.2).

Während des Strahltests im Sommer 2000 am CERN konnten mehr als 2 Millionen Ereignisse von e^- , μ^- , π^- und p^+ im Energiebereich bis 250 GeV aufgezeichnet werden. Zur Identifizierung der Teilchen wurde die Triggerlogik der Strahllinie verwendet.

¹²Super Proton Synchrotron

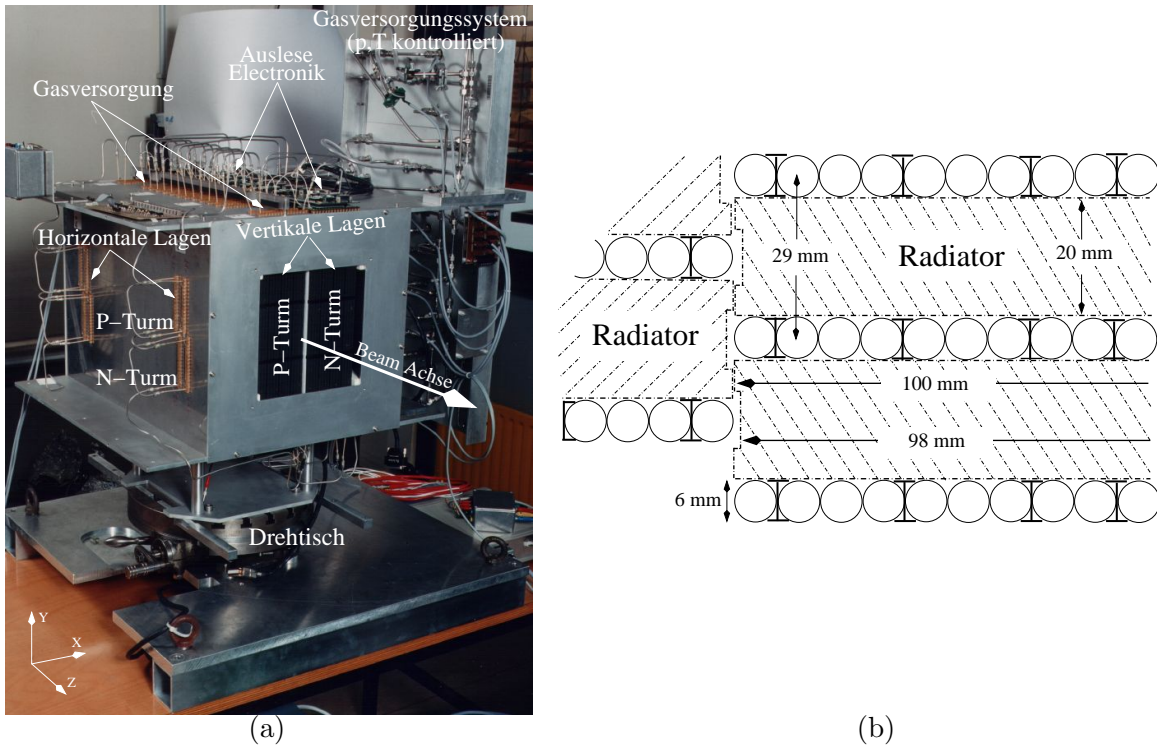


Abbildung 2.24: a) Foto des 20-Lagigen TRD-Prototypen; b) Darstellung des mech. Aufbaus des Prototypen.

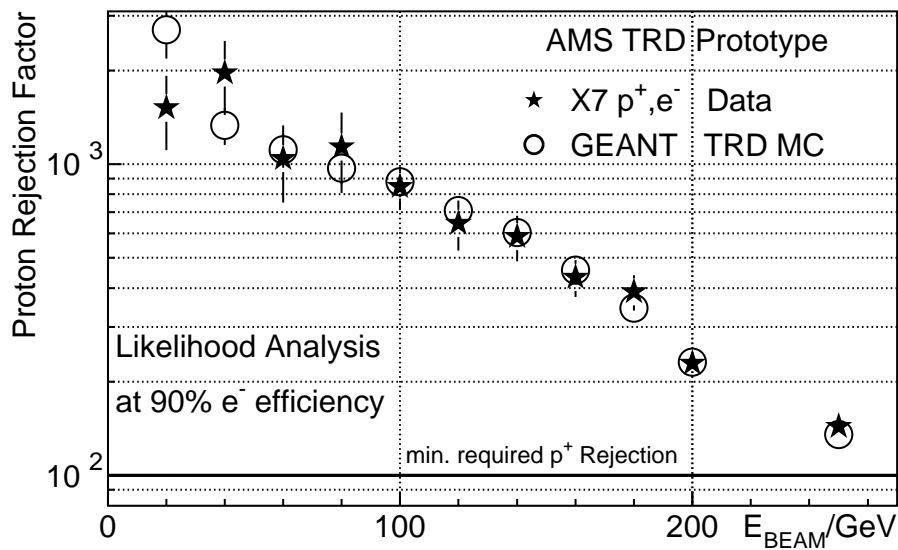


Abbildung 2.25: Gemessener und MC-Simulierter Protonenunterdrückungsfaktor in Abhängigkeit der Strahlenergie [58].

Die Protonenunterdrückungsfaktoren für Teilchenenergien bis 250 GeV , wie sie nach dem im Anhang A.1 beschriebenen Verfahren aus den Strahltestdaten berechnet werden, und die entsprechenden MC-Simulationen des TRD-Prototypen sind in Abbildung 2.25 aufgeführt. Die Unterdrückungsfaktoren liegen im gesamten Energiebereich oberhalb der für die Positronspektroskopie geforderten 10^2 bei

einer Elektronen-Effizienz von 90 % (siehe auch [58]). Die Funktionsfähigkeit eines nach der oben beschriebenen Konfiguration gebauten TRDs konnte somit gezeigt werden.

2.4 Umgebungsbedingungen für ein Weltraumexperiment

Die physikalische und ingenieurstechnische Herausforderung beim Bau des AMS-02-Detektors liegt darin, daß der Detektor über einen Zeitraum von drei Jahren im Weltraum betrieben werden soll (siehe Abbildung 2.26). Bei der Konstruktion und dem Bau muß daher auf besondere weltraumtechnische Gegebenheiten Rücksicht genommen werden. Die genaueren Ausführungen zu den für die AMS-02-Mission sicherheitsrelevanten Tests sind im "Alpha Magnetic Spectrometer - 02 Structural Verification Plan for the Space Transportation System and the International Space Station" der "Space and Life Sciences Directorate Flight Projects Division" der NASA ¹³ (JSC-28792, Rev. C) festgelegt. Welche Auswirkungen diese auf die mit dem TRD und dessen Einzelkomponenten durchzuführenden Prüfverfahren haben, wird im Folgenden aufgezeigt (Kennzeichnung: \longrightarrow):

- Eine Gewichtsbeschränkung des gesamten AMS-02-Detektors auf 14809 *lb*¹⁴ erfordert den Einsatz von Materialien, die einerseits den hohen mechanischen Belastungen standhalten und andererseits das Gewicht des Detektors nicht unnötig erhöhen.
 \longrightarrow Im TRD werden daher hauptsächlich Kohlefaserverbundstoffe, Aluminium und Titan verwendet (siehe Kapitel 3.3.1).
- Während der Stationierung des AMS-02-Detektors auf der ISS besteht nur ein begrenzter Zugang zum Detektor. Nach dem Anbringen des Detektors an der ISS muss dieser demnach voll funktionsfähig sein und es können nur über einen Link Daten bei einer Übertragungsrate von 1 *Mbyte/s* zur ISS übertragen werden. Eine aktive Kontrolle des Detektors von außen ist nicht möglich.
 \longrightarrow Um die Funktionsfähigkeit des TRDs sicher zu stellen, ist der Detektor mehrfach redundant ausgelegt, d.h. beim Ausfall einzelner Systemkomponenten z.B. des Gasversorgungssystems bzw. der Ausleseelektronik können diese automatisch durch gleichwertige ersetzt werden bzw. einzelne Ausleseelemente abgeschaltet werden. Es wird zudem eine direkte Datenreduktion im DAQ¹⁵-System des TRDs vorgenommen (siehe Kapitel 3.3.2 und 3.3.3).
- Die Stromversorgung des AMS-02-Detektors erfolgt von der ISS aus, über ein Verbindungskabel bei einer Spannung von 120 *V*. Alle für den Betrieb der elektronischen Bauteile des AMS-02-Detektors notwendigen Spannungen müssen

¹³National Aeronautics and Space Administration

¹⁴1 *lb* \approx 0.4536 *kg*

¹⁵engl. Data Acquisition.

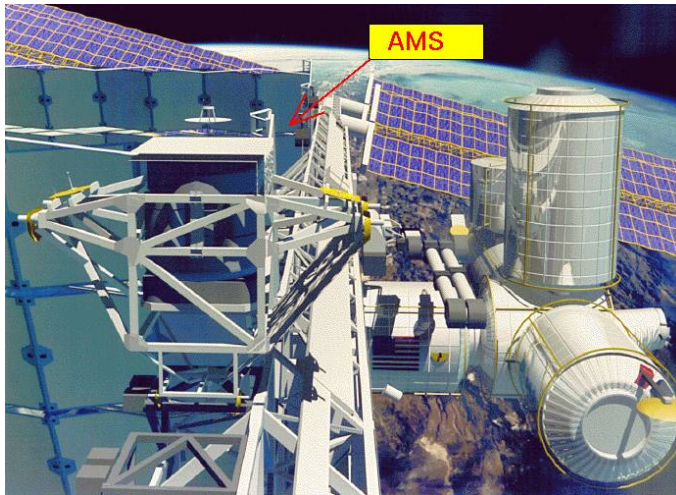


Abbildung 2.26: *Simulation des AMS-02-Detektors an der Tragestruktur der ISS [59].*

über sog. DCDC¹⁶-Konverter im Detektor aus dieser Versorgungsspannung von 120 V erzeugt werden. Dem Detektor steht dabei eine Gesamtstromleistung von 2 kW zur Verfügung, die auf ~ 206000 Auslesekanäle aller Detektor-Subkomponenten verteilt werden muss. Es ist daher zwingend notwendig eine verlustleistungsarme Auslese- und Kontrollelektronik einzusetzen.

→ Die Front-End(FE)-Ausleseelektronik des TRDs verbraucht eine Stromleistung von 16 W bei 5248 Auslesekanälen. Darüber hinaus gibt es für den TRD strikte Beschränkungen, was die elektromagnetische Abstrahlung der Elektronik anbelangt. So darf die Front-End-Ausleseelektronik im Frequenzbereich von 250 kHz bis 10 MHz nicht mehr als 55 dB abstrahlen, was Untersuchungen zur Abschirmung dieser Detektorkomponente zur Folge hat. Daneben müssen die Auswirkungen der elektromagnetischen Einstrahlung von anderen Bauteilen der ISS auf die Funktionsfähigkeit der Elektronik untersucht werden. Beide Fälle werden in einem EMI¹⁷-Test gemessen (siehe Kapitel 5.2).

- Der AMS-02-Detektor wird in einer Hochvakuumumgebung betrieben.
 - In einer Hochvakuumumgebung ist auf die Ausgasraten der verwendeten Materialien zu achten. Die von der NASA vorgegebene, vom TRD verursachte, Niederschlagsrate auf anderen Bauteilen der ISS darf $10^{-14} \frac{g}{s \cdot cm^2}$ nicht übersteigen, was die Messung der Ausgasrate von Materialien mit einer relativ großen Oberfläche, wie das Radiatormaterial, zur Folge hat (siehe Kapitel 5.3).

Bei einem limitierten TRD-Gasvorrat hat diese Vakuumumgebung direkte Auswirkungen auf die Gasdichtigkeit der Proportionalkammern und des weiteren Gasversorgungssystems, deren Produktion in verschiedenen Testaufbauten ständig dahingehend überwacht werden muss (siehe Kapitel 4.2).

¹⁶DC = engl. Gleichstrom

¹⁷engl. **E**lectro **M**agnetic **I**nterference

- Die größten mechanischen Belastungen des gesamten AMS-02-Detektors treten bei den Beschleunigungsvorgängen während des Starts und der Landung des Space Shuttle-Transporters in x- bzw. z-Richtung des Detektors auf. Das nach umfangreichen Analysen der mechanischen Belastungen des AMS-01-Detektors während des Space Shuttle-Fluges von der NASA vorgegebene Design-Ziel für die Funktionsfähigkeit des AMS-02-Detektors liegt bei einer maximalen Erdbeschleunigung von $6.5 g$ in z-Richtung. Diese mechanischen Belastungen werden in Form von Vibrationen über die Primärstruktur des AMS-02-Detektors auf die Sekundärkomponenten übertragen.

→ Zur Verifizierung der Funktionsfähigkeit unter mechanischer Belastung reicht es aus, einzelne Bauteile der TRD-Sekundärkomponente, wie z.B. einzelne Wände der Oktagontragestruktur, einzelne Platinen der Front-End-Ausleseelektronik und ausgewählte Proportionalkammern, einem Vibrationstest zu unterziehen. Diese Messergebnisse sollten mit Finite-Elemente(FE)-Kalkulationen des entsprechenden Bauteils übereinstimmen, was die Eigenfrequenzen und die Durchbiegung anbelangt. Sofern die ersten Eigenfrequenzen der Bauteile oberhalb von $50 Hz$ liegen, kann die Funktionsfähigkeit unter mechanischer Belastung von größeren TRD-Substrukturen mit Hilfe von rechnerischen Modalanalysen verifiziert werden (siehe Kapitel 5.1).

Vibrationstest: Die Erzeugung der Prüfsignale, welche die bei einem Space Shuttle-Flug erwarteten Vibrationen simulieren sollen, wird auf einer elektrodynamischen Schwingerregeranlage realisiert. Dieser Schütteltisch ist zusätzlich mit "g-Aufnehmern" versehen, die aus einem Piezomaterial aufgebaut sind, und mit denen an verschiedenen Positionen des Prüflings lokal die Beschleunigungswerte gemessen werden können. Das Amplitudenprofil der Schwingung kann auch mit einem Laser-Interferometer dargestellt werden.

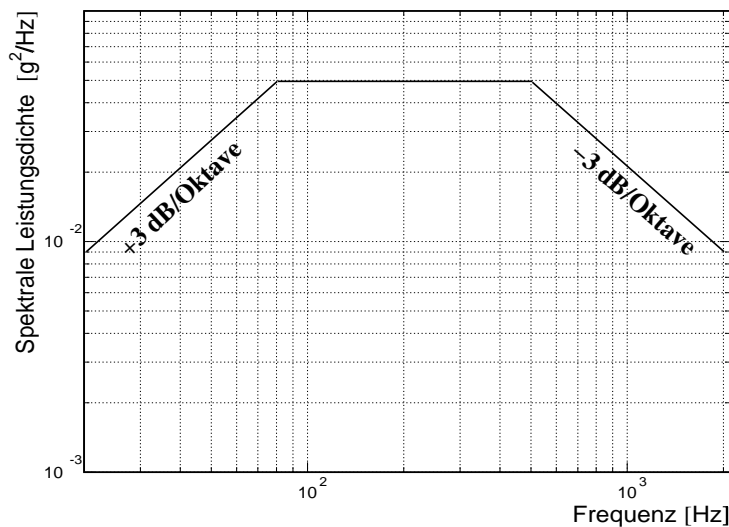


Abbildung 2.27: Rauschprüfung: Verlauf der Spektralen Leistungsdichte.

Die mit der jeweiligen Komponente des TRDs in allen drei Raumrichtungen durchzuführende Resonanzprüfung setzt sich aus mehreren Einzelprüfungen zusammen.

1. Resonanzsuchlauf zum Vermessen der Resonanzfrequenzen vor der Belastung des Bauteils. Es ist eine Sinusprüfung mit gleitender Frequenz über einen vorgegebenen Bereich von 10 bis 2000 Hz mit einer Beschleunigungsamplitude von 0.5 g und einer Geschwindigkeit von 2 oct/min . Dabei ist zu beachten, daß die erste Eigenfrequenz des Prüfobjektes oberhalb von 50 Hz liegt.
2. Belastungstest. Dieser Rauschtest ist durch die in Abbildung 2.27 dargestellte spektrale Leistungsdichte im Frequenzbereich von 20 bis 2000 Hz definiert. Der Effektivwert dieser Beschleunigung liegt bei $a_{RMS} = 6.8 g$. Die Testzeit im Maximum der spektralen Leistungsdichte von 0.04 g^2/Hz liegt bei 90 s .
3. Resonanzsuchlauf zum Messen der Resonanzfrequenzen nach der Belastung des Bauteils. Haben sich die Resonanzfrequenzen verschoben, wegen des Verlust an Steifigkeit bei Rissbildung meist zu kleineren Werten, so deutet dies auf eine Schädigung des Bauteils hin.

Da die größten mechanischen Belastungen des TRDs bei der Landung des Space Shuttles in z-Richtung des Detektors auftreten, wird später ausschließlich das in dieser Raumrichtung gemessene Resonanzverhalten der einzelnen Bauteile vorgestellt (siehe Kapitel 5.1, 5.2 und 5.4.7).

- Bei einem Einsatz des AMS-02-Detektors im Weltraum ist dieser in Abhängigkeit seiner Position zur Sonne großen Temperaturschwankungen von $-180^{\circ}C$ bis $+50^{\circ}C$ ausgesetzt.

→ Durch Abschirmungen nach außen, in Form von MLI¹⁸-Folien, schwankt die Betriebstemperatur im Innern des TRD-Detektors nur zwischen $\sim -13^{\circ}C$ und $\sim +35^{\circ}C$, was im wesentlichen auf die Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist. Mit einem entsprechenden Sicherheitsfaktor muss die Funktionsfähigkeit der Front-End-Ausleseelektronik und der Proportionalkammern in einem Temperaturbereich von $-45^{\circ}C$ bis $+60^{\circ}C$ gewährleisten sein. Dazu werden einzelne Detektorbauteile exemplarisch in einem Thermovakuumtest geprüft.

Thermovakuumtest (TVT): Das zu prüfende Bauteil wird in einem Vakuumtank angebracht, in dem eine Hochvakuumumgebung von $\sim 10^{-6}$ $mbar$ bei gleichzeitiger Temperaturkontrolle im Innern des Tanks über Heiz- bzw. Kühlschleifen erzeugt werden kann. Die Bauteile werden dabei bis auf die FE-Ausleseelektronik nur passiv getestet, d.h. die Funktionsfähigkeit der Bauteile wird erst nach der Thermovakuumprüfung ermittelt.

¹⁸Multi Layer Insulation

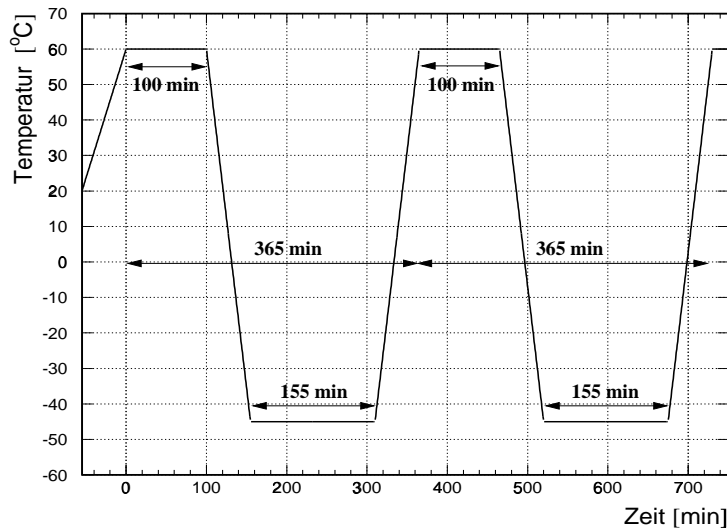


Abbildung 2.28: Verlauf zweier Temperaturzyklen im Thermovakuumtest.

In Abbildung 2.28 ist der Temperaturverlauf von zwei Zyklen zwischen der Minimaltemperatur von -45°C und der Maximaltemperatur von $+60^{\circ}\text{C}$ zu erkennen. Bei einer Zyklusdauer von $\sim 6\text{ h}$ werden insgesamt 8 dieser Zyklen gefahren. Zusätzlich kann mit einem am Vakuumtank angebrachten Massenspektrometer das qualitative Ausgasverhalten der Bauteile bestimmt werden (siehe Kapitel 5.2 und 5.4.7).

Im Innern der TRD-Oktagontragestruktur soll der Temperaturgradient, gemessen über einen Erdumlauf der Raumstation ($\sim 90\text{ min}$) nicht größer als $\pm 1^{\circ}\text{C}$ sein, da ansonsten die in den Proportionalkammerröhrchen gemessene Gasverstärkung zu stark variiert. In thermischen Simulationen des AMS-02-Gesamtsystems konnte die technische Realisierbarkeit gezeigt werden (siehe Kapitel 3.3.4).

Das Prüfverfahren für die ausgewählten Detektorbauteile umfaßt zunächst einen Vibrationstest, woran sich ein Thermovakuumtest des Bauteils anschließt, gefolgt von einem erneuten Vibrationstest.

Die Konstruktion und der Bau der einzelnen Komponenten des TRD-Subdetektors erfolgt aufgrund der umfangreichen Weltraumqualifizierungsverfahren und Simulationen im Vorfeld der AMS-02-Mission in drei Schritten:

1. Bau der Technischen-Module: Zu diesen Modulen zählen u.a. die für den 20-lagigen Prototypen (siehe Abschnitt 2.3) gebauten Proportionalkammer- bzw. Radiator-Module sowie die Elektronik-Module. In dieser ersten Entwicklungsphase wird die technische Realisierbarkeit eines derartigen Vorhabens im Hinblick auf die Weltraumtauglichkeit geprüft. Es erfolgen erste Materialprüfungen und mechanische, thermische und elektronische Belastungstests sowie Simulationsrechnungen hierzu. Der endgültige Aufbau des AMS-02-TRDs als Endergebnis dieser Entwicklungsphase zusammen mit den theoretischen Grundlagen zur Übergangsstrahlung wird in Kapitel 3 dieser Arbeit näher beschrieben.

2. Bau der Qualifizierungs-Module: An diesen Modulen der finalen Bauform werden die Weltraumtauglichkeitsprüfungen vorgenommen. Diese Phase der Konstruktion des TRDs wird in den Kapiteln 4 und 5 näher erläutert. Dabei werden im wesentlichen die Tests an den TRD-Proportionalkammern im Hinblick auf die Weltraumtauglichkeit beschrieben, wobei die Gasdichtigkeit dieser Module eine entscheidende Rolle spielt. Zusätzlich werden die Testapparaturen, die zur Qualitätssicherung bzw. -kontrolle der Module in der Serienproduktion dienen, präsentiert.
3. Bau der Flug-Module: Letztendlich werden die Flugmodule jeder Subkomponente des TRDs gebaut. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse aus der Serienproduktion der TRD-Proportionalkammern vorgestellt.

Kapitel 3

Der Übergangsstrahlungsdetektor (AMS-02-TRD)

Eine Möglichkeit der Teilchenidentifizierung bei höchsten Energien ist durch den Effekt der Übergangsstrahlung (TR) gegeben, welcher heutzutage sowohl in Großdetektoren wie dem ATLAS-TRT¹ als auch in weltraumgestützten Detektoren wie dem AMS-02-TRD oder aber auch dem PAMELA-TRD zur Anwendung kommt [39], [40]. Der von Ginzburg und Frank schon 1945 theoretisch beschriebene physikalische Effekt tritt auf, wenn ein elektrisch geladenes Teilchen die Grenzschicht zwischen zwei Medien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten ϵ_i durchquert [41]. Für hochrelativistische Teilchen wird dabei der Hauptanteil der Übergangsstrahlung im Röntgenbereich abgestrahlt, wobei die abgestrahlte Gesamtenergie in diesem Energiebereich direkt proportional zum Lorentzfaktor γ ist, wie Garibian 1959 zeigte [42]. Aufgrund dieser letzteren Eigenschaft ergibt sich die Möglichkeit der Teilchenidentifikation, wenn sich die Masse der Teilchen deutlich unterscheidet, wie es z.B. für Positronen und Protonen der kosmischen Höhenstrahlung der Fall ist. Da die Wahrscheinlichkeit an einem einzelnen Grenzübergang ein Photon zu erzeugen im Bereich der Feinstrukturkonstanten α liegt, ist es nötig viele solcher Übergänge hintereinander zu einem sog. Radiator anzuordnen. Die in diesen Radiatoren entstandenen Photonen können z.B. in Proportionalkammern nachgewiesen werden, welche mit einem Gas gefüllt sind, das ein hohes Absorptionsvermögen für Röntgenstrahlung hat. Die sich hinter dem Radiator befindlichen Kammern messen dann die Energie des Übergangsstrahlungsphotons zusammen mit dem Energieverlust des primären geladenen Teilchens. Um auf eine für den AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor geforderten Protonenunterdrückung von 10^2 zu kommen, müssen wie im 20-lagigen TRD-Prototypen mehrere solcher Einheiten von Radiator- und Proportionalkammer hintereinander angeordnet werden.

In diesem Kapitel werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Übergangsstrahlung zusammenfassend erläutert. Im Anschluss daran werden geeignete Materialien zum Radiatorbau für den AMS-02-TRD diskutiert. Der zweite Abschnitt beschäftigt sich zunächst mit den Wechselwirkungsmechanismen von Photonen und

¹Transition Radiation Tracker.

geladenen Teilchen mit den gasgefüllten Proportionalkammern, um dann auf die technische Realisierung dieser Proportionalkammern im AMS-02-TRD, den sog. Straw-Modulen, zu kommen. Der prinzipielle Aufbau des gesamten AMS-02-TRD mitsamt seiner Subkomponenten wie das Gasversorgungssystem und die Auslese-elektronik mitsamt der weiteren DAQ wird im letzten Abschnitt dargestellt.

3.1 Der Übergangsstrahlungseffekt

Die im folgenden Abschnitt aufgeführte Zusammenfassung der Theorie der Übergangsstrahlung kann ausführlich in den Artikeln [44], [45], [46] nachgelesen werden.

3.1.1 Theorie der Übergangsstrahlung

Die Entstehung von Übergangsstrahlung an einer Grenzschicht zwischen zwei Medien mit verschiedenen Dielektrizitätskonstanten ϵ_1 und ϵ_2 kann mit dem Modell der Spiegelladung anschaulich beschrieben werden [43]. Bewegt sich ein elektrisch geladenes Teilchen im Medium 2 (ϵ_2) mit der Geschwindigkeit v auf die Grenzschicht zu, so erzeugt es in dieser Ebene (Medium 1: ϵ_1) eine Spiegelladung, die sich ebenfalls mit der Geschwindigkeit v auf die Grenzfläche zubewegt. Zwischen Teilchen und Spiegelladung bildet sich somit ein elektrisches Dipolfeld aus, welches verschwindet, wenn das Teilchen die Grenzfläche durchquert. Nach den Stetigkeitsbedingungen der Elektrodynamik

$$E_{\perp,1} = E_{\perp,2}, \quad \epsilon_1 \cdot E_{\parallel,1} = \epsilon_2 \cdot E_{\parallel,2}$$

wird dabei ein elektrisches Feld, die sogenannte Übergangsstrahlung abgestrahlt (siehe Abbildung 3.1).

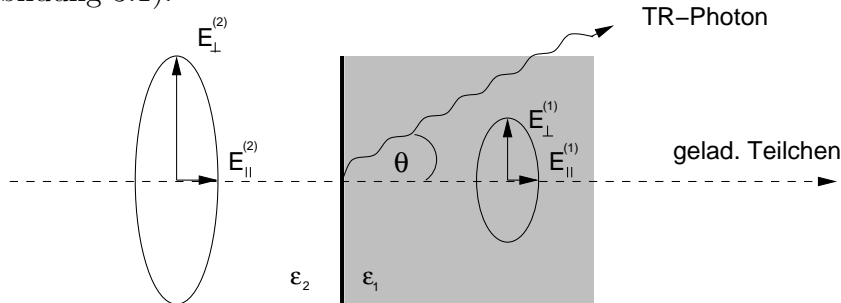


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung zur Entstehung von Übergangsstrahlung an einer Grenzfläche.

Für hochrelativistische Teilchen ($\gamma \gg 1$ bzw. $\beta = \frac{v}{c} \rightarrow 1$) liegt die Energie der Übergangsstrahlung im Röntgenbereich ($E_\gamma = 1 - 15 \text{ keV}$), wie oben schon angedeutet. Die Abstrahlung erfolgt in Flugrichtung des primären durchfliegenden Teilchens, wobei das Maximum der Intensitätsverteilung im Bereich $\theta_{max} \approx \gamma^{-1}$ um die Teilchenachse liegt. Für die abgestrahlte Übergangsstrahlung d^2W pro Raumwinkelintervall $d\Omega$ und Energieintervall $d(\hbar\omega)$ ergibt sich durch Lösung der Maxwell-Gleichungen:

$$\frac{d^2W}{d\theta d(\hbar\omega)} = 2 \cdot \pi \cdot \theta \cdot |a(\omega)|^2 \quad (3.1)$$

mit der Amplitude:

$$a(\omega) = \frac{\sqrt{\alpha} \cdot \theta}{\pi} \cdot \left[\left(\gamma^{-2} + \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + \theta^2 \right)^{-1} - \left(\gamma^{-2} + \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \theta^2 \right)^{-1} \right] \quad (3.2)$$

dabei sind $\alpha \approx \frac{1}{137}$ die Feinstrukturkonstante und ω_i ($i = 1, 2$) die Plasmafrequenzen des jeweiligen Mediums. Unter der Annahme, daß die Elektronen im Material als quasi frei betrachtet werden können, läßt sich die Plasmafrequenz aus der Dichte des Mediums ρ (in $\frac{g}{cm^3}$) und deren Kernladungszahl Z bzw. Ordnungszahl A wie folgt berechnen:

$$\hbar\omega_i [eV] \approx 29 \cdot \sqrt{\rho \cdot \frac{Z}{A}} \quad (3.3)$$

Durch Integration der Gleichung 3.1 über den Winkel θ und über die Photonenenergien erhält man für die gesamte an einer Grenzfläche abgestrahlte Intensität:

$$W = \frac{\alpha}{3} \cdot \hbar \cdot \frac{(\omega_1 - \omega_2)^2}{\omega_1 + \omega_2} \cdot \gamma \quad (3.4)$$

Die an einer einzelnen Grenzschicht abgestrahlte Gesamtenergie ist somit proportional zum Lorentzfaktor γ und ermöglicht eine Teilchenidentifizierung aufgrund der verschiedenen Massen der Teilchen bei gleicher Energie.

Für die mittlere Anzahl der an einer Grenzschicht abgegebenen Photonen $\langle n_\gamma \rangle$ erhält man:

$$\langle n_\gamma \rangle = \int \frac{1}{\hbar\omega} \cdot \frac{dW}{d\hbar\omega} d\hbar\omega, \quad (3.5)$$

Aufgrund der mit α geringen Wahrscheinlichkeit für die Abstrahlung eines Röntgenphotons an einer Grenzfläche ist es notwendig, das Teilchen eine große Anzahl von Grenzflächen durchqueren zu lassen, um eine für die Detektion ausreichende Intensität der Übergangsstrahlungsphotonen zu bekommen. Dies kann mit einem regulären Radiator, bestehend aus N Folien der Dicke l in konstantem Abstand oder aber in einem irregulären Radiator bestehend aus dünnen Fasern, deren Dicke und Abstand nur noch im Mittel bestimmt sind, realisiert werden.

3.1.2 Übergangsstrahlung aus einem Radiator

In diesem Abschnitt soll zunächst der **reguläre Radiator** bestehend aus N Folien der Dicke l_1 im Vakuum behandelt werden (siehe Abbildung 3.2). Um die erzeugte Übergangsstrahlung hinter dem Radiator zu ermitteln, müssen die in ihren Beträgen gleichen Erzeugungsamplituden $a(\omega)$ der Strahlung von Eintritt und Austritt an jeder Folie kohärent unter Berücksichtigung der Absorption der TR-Photonen in den Folien addiert werden. Dabei gilt zunächst für die von einer einzelnen Folie abgestrahlte Energie:

$$\left(\frac{d^2W}{d\theta d(\hbar\omega)} \right)_{Folie} = \left(\frac{d^2W}{d\theta d(\hbar\omega)} \right)_{Grenzfläche} \cdot 4 \cdot \sin^2 \frac{\phi}{2} \quad (3.6)$$

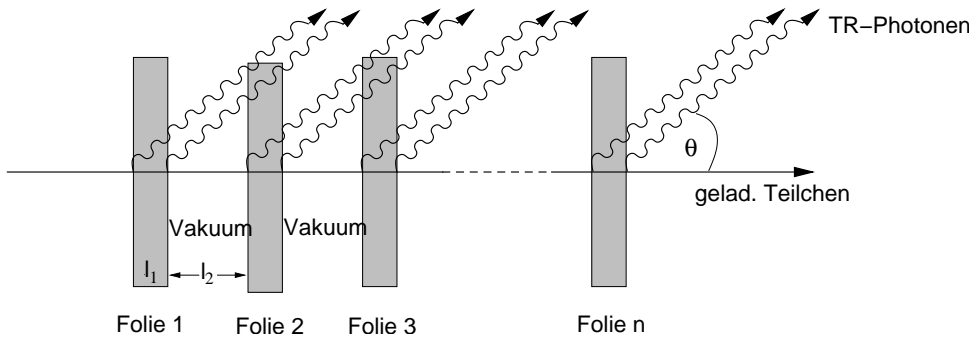


Abbildung 3.2: Prinzip der Entstehung von Übergangsstrahlung an N Folien der Dicke l_1 im Vakuum.

mit der Phasendifferenz

$$\phi = \frac{\omega \cdot l_1}{2 \cdot c} \left(\gamma^{-2} + \theta^2 + \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

Dabei wird die Dicke der Folien dahingehend optimiert, daß die Intensitäten der elektromagnetischen Wellen, die an der Vorder- und Rückseite der Folie entstehen, durch konstruktive Interferenz verstärkt werden (d.h. $\phi = (2 \cdot n + 1) \cdot \pi$ mit $n = 0, 1, 2, \dots$). Unter der Annahme, daß $\gamma \cdot \omega_1 \gg \omega$ ist, ergibt sich folgende Beziehung für die maximal abgestrahlte Energie aus Gleichung 3.7:

$$\hbar \cdot \omega_{max} = \frac{l_1 \cdot \hbar \cdot \omega_1^2}{2\pi \cdot c \cdot (2 \cdot n + 1)} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3.8)$$

Die Lage des Maximums im Energiespektrum ist somit unabhängig vom Lorentzfaktor und kann allein aus der Foliendicke und der Plasmafrequenz des Materials bestimmt werden.

Die Gesamtintensität nach N Folien läßt sich unter Vernachlässigung der destruktiven Interferenz der von verschiedenen Folien ausgehenden elektromagnetischen Wellen bei ausreichend großem Foliend Abstand (ca. 200 – 300 μm), wie folgt berechnen:

$$\left(\frac{d^2 W}{d\theta d(\hbar\omega)} \right)_{NFolien} = \left(\frac{d^2 W}{d\theta d(\hbar\omega)} \right)_{Folie} \cdot N_{eff}(\omega) \quad (3.9)$$

mit der effektiven Foliendzahl

$$N_{eff}(\omega) = \frac{1 - e^{N \cdot \sigma(\omega)}}{1 - e^{\sigma(\omega)}} \quad (3.10)$$

und dem Absorptionskoeffizienten $\sigma_1 = \frac{\mu_1(\omega)}{\rho_1} \cdot l_1$ der Folie sowie dem Röntgenabsorptionskoeffizienten $\mu_1(\omega)$. Die effektive Foliendzahl N_{eff} gibt an, wie viele von N Folien in einem Energiebereich wirklich zur Erzeugung von Übergangsstrahlung beitragen. Bei hohen Energien nähert sich N_{eff} der Gesamtzahl N . Dabei wird der niederenergetische Teil des Spektrums durch Absorption in den Folien unterdrückt wird. Abbildung 3.3 a) zeigt dieses nach Gleichung 3.9 berechnete Energiespektrum eines regulären Polypropylen-Radiators.

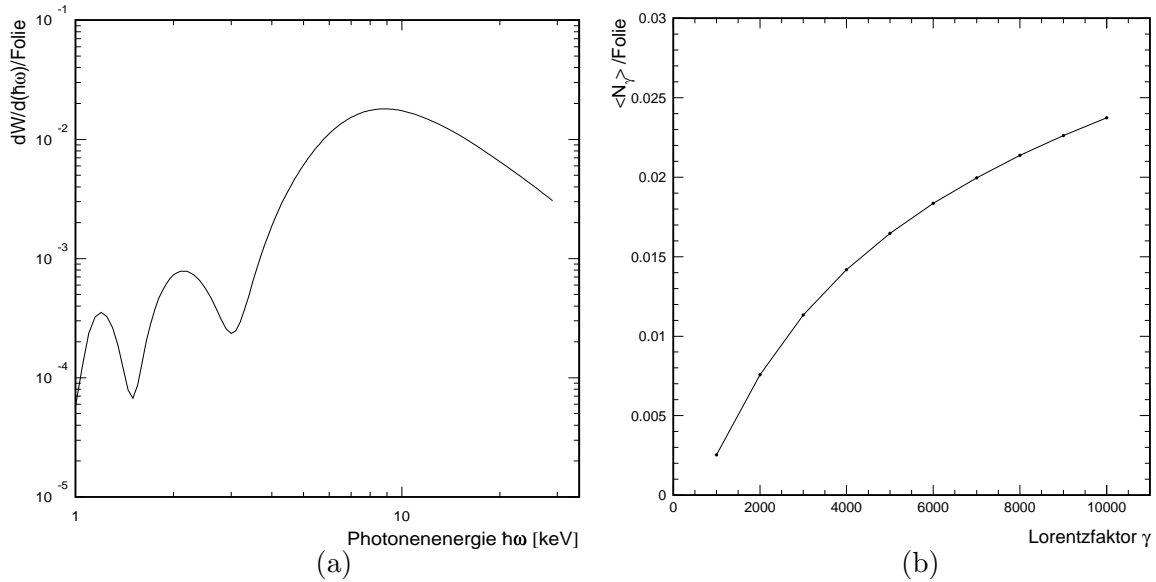


Abbildung 3.3: a) Berechnetes Energiespektrum für einen Radiator aus 200 Polypropylenfolien ($\hbar\omega_1 = 19 \text{ eV}$) der Dicke $20 \mu\text{m}$ mit einem Folienabstand von $200 \mu\text{m}$ im Vakuum, $\gamma \approx 8000$; b) Mittlere errechnete Anzahl der erzeugten Übergangsstrahlungsphotonen als Funktion des Lorentzfaktors des durchgehenden Teilchens.

Für die mittlere Anzahl der von einem Radiator abgestrahlten Photonen N_γ ergibt sich:

$$N_\gamma = \int_0^\infty \frac{1}{\hbar\omega} \cdot \frac{dW(\hbar\omega)}{d\hbar\omega} \cdot d(\hbar\omega) \quad (3.11)$$

Die mittlere Anzahl der erzeugten Übergangsstrahlungsphotonen in Abhängigkeit vom Lorentzfaktor γ ist in Abbildung 3.3 b) dargestellt. Hier bleibt zu beachten, daß für hohe γ -Werte die Erzeugung von Übergangstrahlung aus einem Radiator zunächst ansteigt und dann in Sättigung gerät. Dieser Anstieg z.B. bei hochenergetischen Positronen (100 GeV) ist u.a. der Grund für eine Begrenzung in der e^+/p -Unterscheidung bei Übergangsstrahlungsdetektoren.

Wie bei dem AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor werden in der Praxis häufig sogenannte **irreguläre Radiatoren** verwendet, da sie sich im Vergleich zu Folienstapeln relativ einfach herstellen lassen. Diese Radiatoren bestehen meist aus dünnen faserigen Kunststoffen, wobei die dünnen Fasern die für die Entstehung von Übergangstrahlung nötige Anzahl von Grenzübergängen liefern. Im Sprachgebrauch der regulären Radiatoren sind bei diesen irregulären Radiatoren Foliendicke und der Abstand der Folien nur noch im Mittel bekannt. Der Nachteil gegenüber einem regulären Radiator ist eine geringere Ausbeute an Übergangsstrahlungsphotonen [44].

Im Hinblick auf die Weltraumtauglichkeit des AMS-02-Detektors standen zu Entwicklungsbeginn des TRDs zwei verschiedene faserige Radiatoren zur Verfügung. Dabei handelt es sich zum einen, um einen aus einer $10 \mu\text{m}$ dicken Polypropylen (85 %)-Polyethylen(15 %)-Fasermischung bestehenden Radiator mit der Bezeichnung LRP 375 BK² und der Dichte $\rho = 0.06 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Dieser Radiator wird auch im

²Fa. Freudenberg Vliesstoffe KG

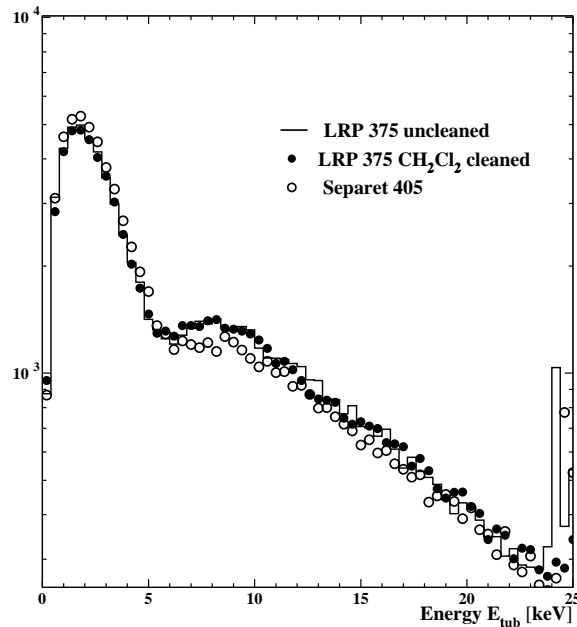


Abbildung 3.4: Einzelröhrchen-Spektren von Übergangsstrahlung aus verschiedenen faserigen Radiatoren gleicher Dicke und primärem Elektron; erzeugt von 20 GeV Elektronen der X7-Strahlinie des CERN [58].

ATLAS-TRT verwendet und erzielt eine um 10 – 15 % verringerte Ausbeute an Übergangsstrahlungsphotonen im Vergleich zu einem regulären Folienstapel wie die ATLAS-Kollaboration zeigte [57]. Dabei sind die Fasern des Radiators orthogonal zur Richtung der primären geladenen Teilchen ausgerichtet. Der andere aus 14 μm dicken Polyacrylfasern aufgebaute Radiator mit der Bezeichnung Separet 405³ hat eine Dichte von $\rho = 0.08 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Der Nachteil des LRP 375 BK-Radiators liegt darin, daß es erst nach der Reinigung in einem Soxhlet-Extraktionsverfahren mit Dichlormethan (CH_2Cl_2) das für die ISS gültige Ausgaslimit erfüllt (siehe hierzu auch Kapitel 5.3). Der Separet 405-Radiator muss hingegen nicht vorbehandelt werden.

Proben gleicher Dicke der verschiedenen Radiatoren wurden während eines Strahltests mit Elektronen der Energie 20 GeV der X7-Strahlinie des CERN in dem schon in Kap. 2.3 beschriebenen 20-lagigen Prototypen auf ihre Ausbeute an Übergangsstrahlung hin getestet. In Abbildung 3.4 sind die Einzelröhrchen-Spektren, normiert auf die gleiche Anzahl von Einträgen, von absorbierten Übergangsstrahlungsphotonen und dem Energieverlust der primären Elektronen für die drei verschiedenen Radiatoren zu erkennen. Vergleicht man den Quotienten aus der Anzahl der Einträge an den Stellen der Maxima des Ionisationsspektrums mit TR-Anteil der verschiedenen Radiatoren, so erzielt der LRP 375 BK-Radiator gegenüber dem Separet 405 eine um 16.5 % höhere Ausbeute an Übergangsstrahlung, wobei die Reinigung mit Dichlormethan keinen Einfluss hat [58]. Aufgrund des geringeren Gewichtes des LRP 375 BK-Radiators und der höheren Ausbeute an Übergangsstrahlung wird dieser Radiator nach der Vorbehandlung mit Dichlormethan im TRD eingesetzt [50].

³Fa. Freudenberg Vliesstoffe KG

3.2 Nachweis der Übergangsstrahlung

Die im vorherigen Abschnitt gezeigten Übergangsstrahlungsspektren haben bei der für den AMS-02-TRD gewählten Radiatorkonfiguration ein Maximum bei $\approx 8 \text{ keV}$. Diese Übergangsstrahlung muß mit einem geeigneten Detektor nachgewiesen werden, wobei man im allgemeinen gasgefüllte Proportionalkammern verwendet. Eine Prinzipskizze dieser Kombination aus Radiator und zylindrischen, mit einem Xe/CO_2 -Gasgemisch gefüllten Proportionalkammern, wie sie für den AMS-02-TRD ausgewählt wurde, ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Da die Flugrichtung des primären Teilchens (e^+ , e^-), welches die Übergangsstrahlungsphotonen erzeugt, mit der der Photonen übereinstimmt, haben die im Detektor erzeugten freien Ladungen als Ur-

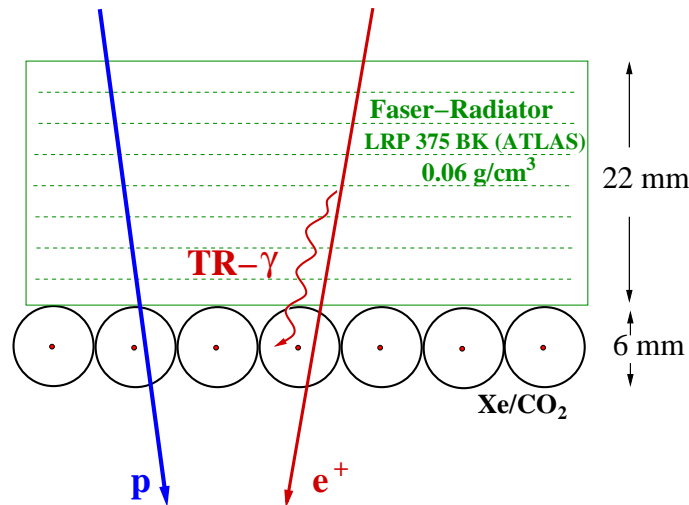


Abbildung 3.5: Prinzipskizze einer Lage des AMS-02-TRDs bestehend aus Radiator und Proportionalkammer.

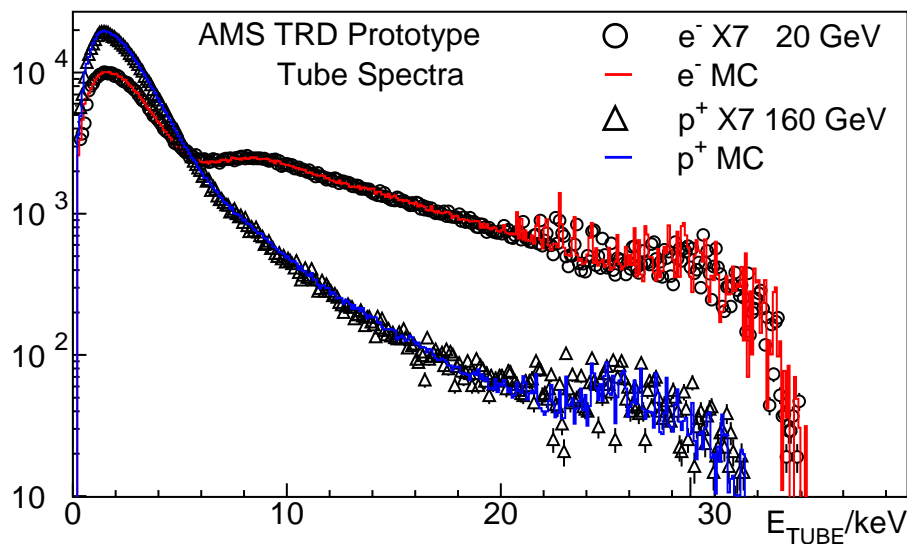


Abbildung 3.6: Daten-MC-Vergleich der Spektren von $20 \text{ GeV } e^-$ ($\gamma \approx 40000$) und $160 \text{ GeV } p^+$ ($\gamma \approx 170$) (gemessen mit dem 20-Lagigen Prototypen) [58].

sache sowohl die Absorption der zu messenden Übergangsstrahlung als auch den Energieverlust der den Detektor durchquerenden primären Teilchen. Die mit dem Detektor aufgenommenen Energiespektren sind demnach eine Überlagerung der Spektren dieser beiden Effekte (siehe Abbildung 3.6). Bei 160 GeV Protonen ist die Wahrscheinlichkeit zur Erzeugung von Übergangsstrahlung dagegen gering, weshalb im Spektrum bei Energien $> 5 \text{ keV}$ im Vergleich zum e^- -Spektrum deutlich weniger Einträge zu erkennen sind.

3.2.1 Nachweismethoden

Die Grundlage jeder Teilchenmessung ist die Wechselwirkung der zu detektierenden Teilchen mit dem Gas der Proportionalkammer. Dabei ist zwischen der Messung geladener und neutraler Teilchen zu unterscheiden. Geladene Teilchen wie z.B. hochrelativistische Elektronen erfahren längs ihrer Bahn einen Energieverlust durch elektromagnetische Wechselwirkung mit den Elektronen der Atomhülle des Detektorgases (Möller-Streuung). Wechselwirkungen mit den Kernen des Detektormaterials sind dabei zu vernachlässigen (elastische Mott-Streuung).

Der mittlere Energieverlust pro Wegstrecke geladener Teilchen in Materie läßt sich durch die Bethe-Bloch-Formel beschreiben [48]:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi N_A e^4}{m_e c^2} \cdot \frac{Z \cdot z^2}{A} \cdot \frac{\rho}{\beta^2} \cdot \left(\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_M}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta(\beta) \right) \quad (3.12)$$

N_A	: Avogadrokonstante
m_e bzw. e	: Elektronenmasse bzw. -ladung
ρ	: Dichte des Absorbermaterials
Z bzw. A	: Kernladungs- bzw. Massenzahl
z	: Ladung des durchfliegenden Teilchens
$\beta = \frac{v}{c}$: Geschwindigkeit des Teilchens in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit
T_{max}	: maximaler Energietransfer pro Stoß
I	: mittleres Ionisationspotential, näherungsweise $I(Z) \approx 13.5 \text{ eV} \cdot Z$
$\delta(\beta)$: Dichtekorrektur

Demnach nimmt der Energieverlust pro Wegstrecke zunächst mit $\sim 1/\beta^2$ ab und erreicht bei $\gamma = \frac{E}{m \cdot c^2} \approx 3$ sein Minimum. Geladene Teilchen mit Energien, die diesem Lorentzfaktor entsprechen, werden als minimal-ionisierende (MIP-⁴) Teilchen bezeichnet. Im Bereich höherer Teilchenenergien steigt der Energieverlust aufgrund relativistischer Effekte logarithmisch an. Dieser Anstieg wird in der Bethe-Bloch-Formel durch die Dichtekorrektur $\delta(\beta)$ berücksichtigt. Im Bereich noch höherer Energien sättigt der Energieverlust pro Wegstrecke aufgrund der Polarisation des Detektormaterials (siehe auch Abbildung 3.8 b).

⁴engl. Minimum Ionizing Particle.

Der für die Absorption von Photonen relevante statistische Prozeß kann durch das Lambert-Beersche Gesetz beschrieben werden. Für die Intensität I eines Photonenstrahls mit der ursprünglichen Intensität I_0 gilt nach dem Durchfliegen eines Absorbers der Dicke x [52]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu(E) \cdot x} \quad (3.13)$$

mit dem energieabhängigen totalen Absorptionskoeffizienten $\mu(E)$.

Der Intensitätsverlust wird durch die drei physikalischen Einzeleffekte Photo-, Compton- und Paarbildungseffekt hervorgerufen. Für die hier betrachteten Röntgenphotonen ist der Photoeffekt dominant, wohingegen der Comptoneffekt bei mehreren 100 keV und die Elektron-Positron-Paarbildung erst ab 1.022 MeV maßgeblich zur Photoabsorption beitragen. Die beiden Prozesse werden daher im folgenden nicht näher betrachtet.

Bei dem Photoeffekt überträgt das im Radiator erzeugte TR-Photon seine gesamte Energie auf ein Hüllenelektron des Detektormaterials, das dann bei ausreichend hoher Energie die Hülle verlassen kann (siehe Abbildung 3.7). Das Elektron erhält dabei eine kinetische Energie, die der Differenz der Photonenenergie und der Bindungsenergie des Elektrons (Ionisierungsenergie) entspricht. Dieser Effekt ist aufgrund der Energie- und Impulserhaltung nur an gebundenen Elektronen möglich. Das dabei entstandene Loch in einer der inneren Schalen des Atoms wird durch ein Elektron der äußeren Schalen besetzt, das durch diese Schalenübergänge seinerseits wieder Fluoreszenzphotonen emittiert. Diese isotrop emittierten Fluoreszenzphotonen können dann zum einen wieder durch Photoeffekt weitere Atome des Absorbermaterials ionisieren. Die Wahrscheinlichkeit, daß das angeregte Atom danach wieder ein Fluoreszenzquant abstrahlt, nimmt mit der Reihenfolge der Schalen K, L, M, \dots ab. Zum anderen kann aber eines dieser Fluoreszenzphotonen im selben Atom absorbiert werden, wodurch ein weiteres Elektron das Atom als sogenanntes Augerelektron verläßt (innerer Photoeffekt). In beiden Fällen wird fast die gesamte Energie des ursprünglichen Röntgenphotons zur Erzeugung freier Elektronen im Detektorgas aufgewendet.

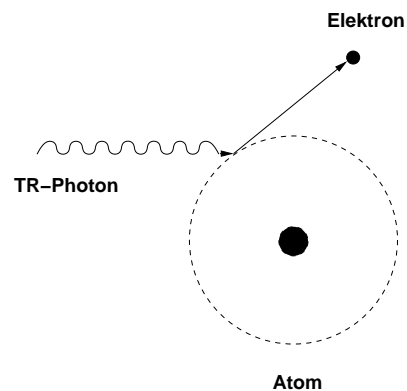


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung des Photoeffektes.

Element	Grenzenergien [keV]				
	K	L_1	L_2	L_3	M_1
Xe	34.56	5.45	5.10	4.78	1.15

Tabelle 3.1: Energien der K -, L - und M -Schale für Xenon [53].

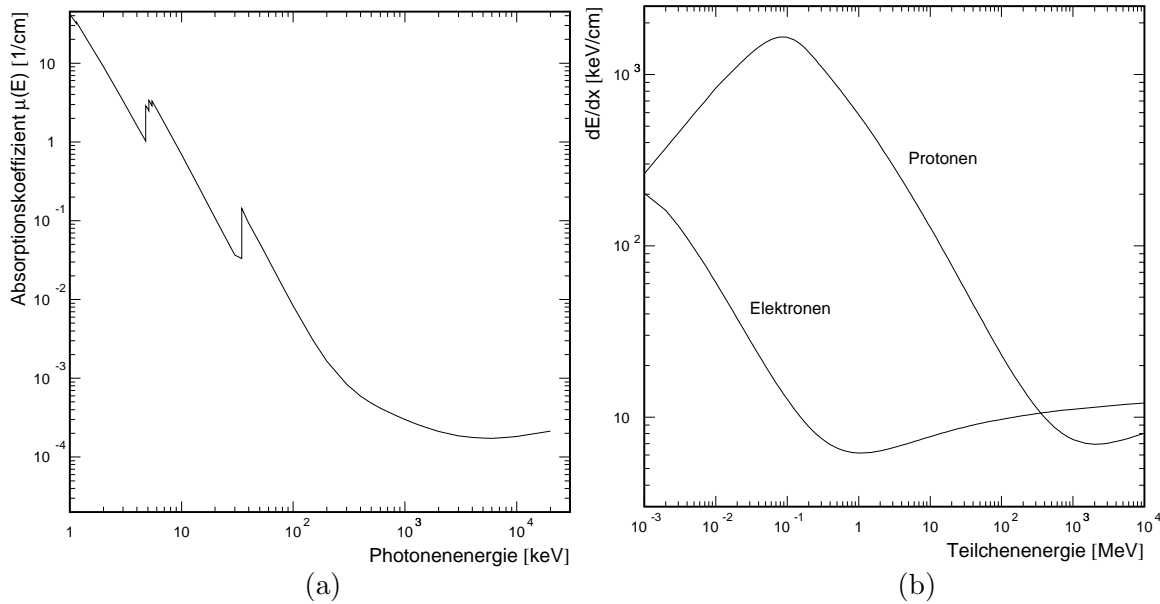


Abbildung 3.8: a) Absorptionskoeffizient $\mu(E)$ als Funktion der Photonenergie [53]; b) Energieverlust von Elektronen bzw. Protonen in $Xe/CO_2(80 : 20)$ als Funktion der kinetischen Energie der Teilchen [51].

Um den durch die Energiedeposition des geladenen primären Teilchens entstandenen Signaluntergrund möglichst zu minimieren, hat man für den AMS-02-TRD 6 mm dicke mit einem $XeCO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch gefüllte Proportionalkammerröhren gewählt. Das CO_2 -Gas dient hierbei als Löschgas. Das Xenongas hat aufgrund seiner hohen Kernladungszahl ($Z=54$) einen hohen Absorptionskoeffizient für Röntgenphotonen (siehe Abbildung 3.8 a). Man erkennt die Absorptionskanten mitsamt ihren Unterstrukturen für Xenon, an denen der Absorptionskoeffizient sprunghaft steigt (siehe Tabelle 3.1). Für hochrelativistische geladenen Teilchen wie z.B. Elektronen bzw. Positronen beträgt die Energiedeposition auf einer Länge von einigen Millimetern nur einige keV , sodaß die Übergangsstrahlung im Spektrum deutlich erkennbar wird. In Abbildung 3.8 b) ist dieser Energieverlust pro Wegstrecke von Protonen und Elektronen in $XeCO_2(80 : 20)$ -Gas in Abhängigkeit ihrer kinetischen Energie dargestellt.

In Abbildung 3.9 erkennt man das mit dem GEANT-Softwarepaket im Radiator der Dicke 20 mm des 20-lagigen TRD-Prototypen erzeugte Energiespektrum der TR-Photonen von 10 GeV Positronen ($\gamma = 20000$) sowie das in den mit $XeCO_2$ -Gas gefüllten Proportionalkammern absorbierte Spektrum. Dabei werden ca. 60 % der erzeugten TR-Photonen in den Proportionalkammern nachgewiesen. Der niedere energetische Teil wird durch Absorption der Photonen im Radiatormaterial und in den Röhrenwänden unterdrückt. Abbildung 3.10 zeigt den Anteil der vor der ersten Lage des 20-lagigen TRD-Prototypen erzeugten Übergangsstrahlungsphotonen, welcher in der darauffolgenden n-ten ($1 < n < 20$) Detektorlage absorbiert wird. Es wird deutlich, daß nahezu 90 % der Übergangsstrahlungsphotonen nach der dritten Detektorlage absorbiert wurden. Dies ist u.a. ein Grund weshalb ein TRD aus mehreren solchen kombinierten Lagen aus Radiator und Detektor besteht.

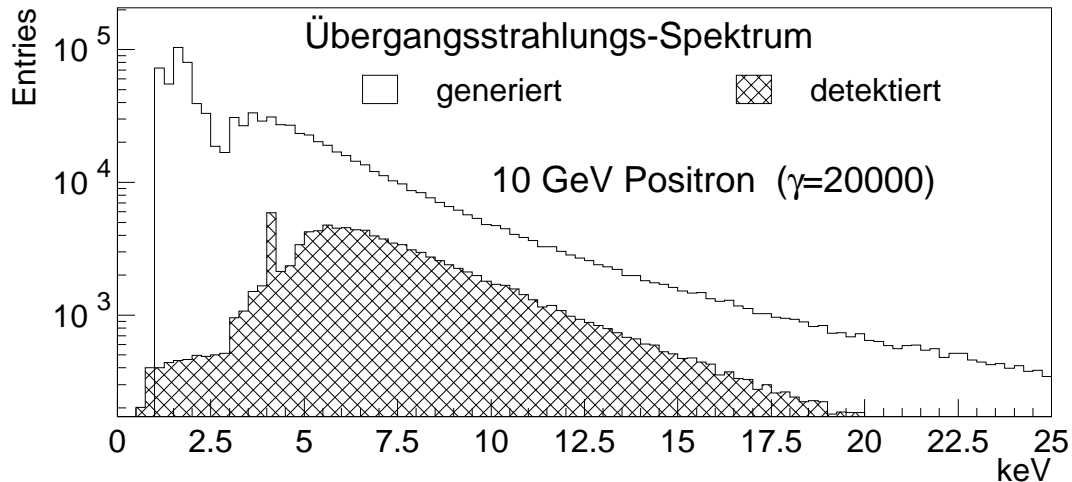


Abbildung 3.9: *GEANT-Simulation des 20-lagigen TRD-Prototypen: Spektren von im Radiator erzeugten und in Proportionalkammern absorbierten Übergangsstrahlungsphotonen [54].*

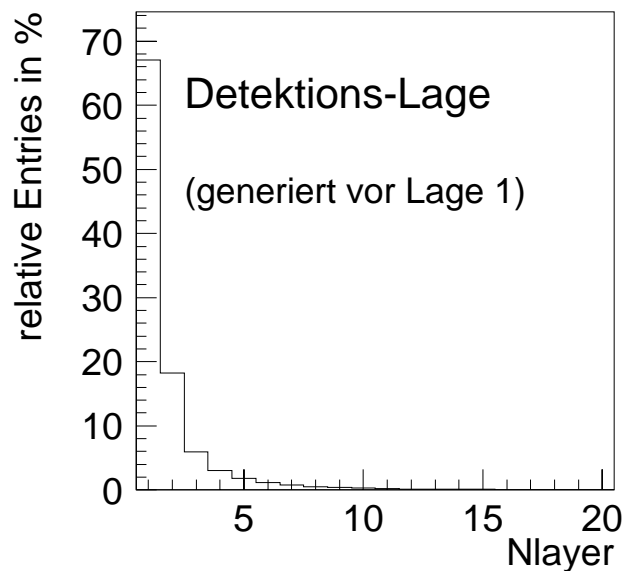


Abbildung 3.10: *GEANT-Simulation des 20-lagigen TRD-Prototypen: Anteil der in der n-ten Detektorlage absorbierten TR-Photonen [54].*

3.2.2 Gasgefüllte Proportionalkammern: Straw-Module

Wie im vorherigen Abschnitt schon angedeutet, sind die AMS-02-TRD Proportionalkammern aus 16 zylindrischen Röhrcchen, auch Straws genannt, mit einer Wandstärke von $72 \mu\text{m}$ und einem Innendurchmesser von 6 mm aufgebaut, die mit einer Gas Mischung aus $80 \% \text{ Xe}$ und $20 \% \text{ CO}_2$ befüllt sind. Die Länge dieser Module liegt zwischen 0.9 und 2.1 m . Den schematischen Aufbau der Proportionalkammerröhrcchen zeigt Abbildung 3.11. Sowohl die Signalauslese und HV-Versorgung als auch

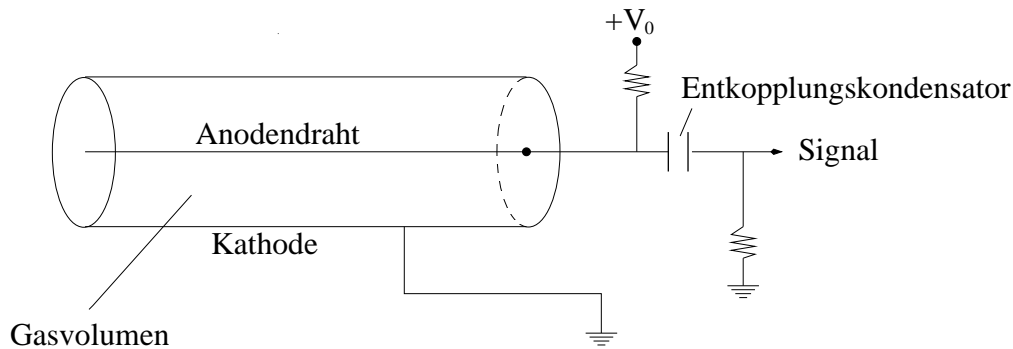


Abbildung 3.11: *Prinzipskizze eines Proportionalkammerröhrchens.*

die Gasversorgung der fertigen Straw-Module erfolgen jeweils von den gegenüberliegenden Stirnseiten der Röhren über Modulendstücke. Im Innern der Röhren ist ein $30\ \mu\text{m}$ dicker, vergoldeter Wolframdraht gespannt, der gegenüber der elektrisch leitenden Röhrenwand über einen $2\ \text{M}\Omega$ Schutzwiderstand auf positive Hochspannung $+V_0$ gelegt wird. Über einen $150\ \text{pF}$ Kondensator werden die elektrischen Signale vom HV⁵-Stromkreis entkoppelt und der weiteren DAQ-Elektronik zugeführt. Die letzteren Elektronikbauteile für die 16 Auslesekanäle eines Straw-Moduls befinden sich neben der Masseanbindung auf einer sogenannten UTE⁶-Platine.

Die Endstücke an der Gasversorgungsseite sind dabei so aufgebaut, daß das einlaufende Gas gleichmässig auf die ersten 8 Röhren verteilt wird, die somit parallel vom Gas durchflossen werden. An der Ausleseseite erfolgt dann die Gasumkehr auf die verbleibenden 8 Röhren. Die Verbindung zur Gasversorgung des gesamten AMS-02-TRD erfolgt über Edelstahlröhren. In Abbildung 3.12 ist ein Foto eines fertigen Straw-Moduls mit Gasein- und auslaß sowie angebrachter UTE-Platine zu sehen.

Die nach den im Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Prozessen, im Gasvolumen entstehenden, primären Elektron-Ion Paare werden im elektrischen Feld zwischen Draht und Kammerwand beschleunigt, die Elektronen zum Anodendraht und die Ionen zur Röhrenwand. In der Umgebung des Drahtes ist die elektrische Feldstärke so hoch, daß die Elektro-

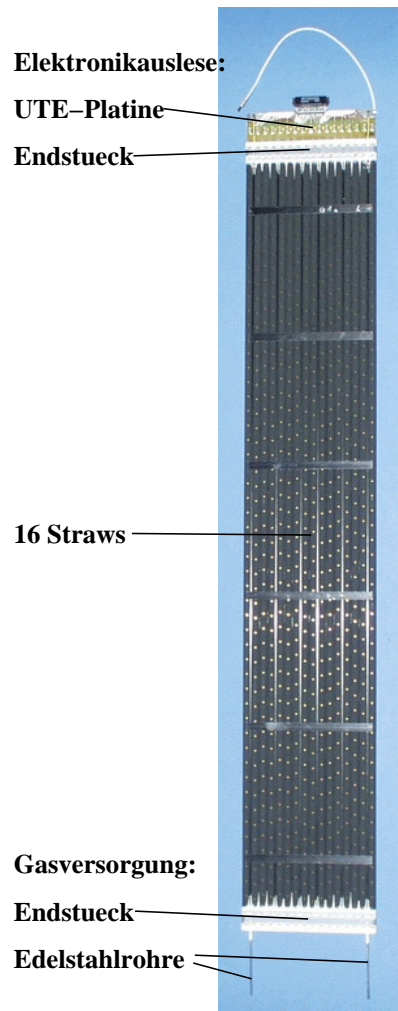


Abbildung 3.12: *Bild von einem 57 cm langen Straw-Modul.*

⁵engl. **H**igh **V**oltage.

⁶Uebergangsstrahlung **T**ube **E**ndpiece

nen durch die Beschleunigung im Feld genug Energie gewinnen, um durch Ionisation weiterer Gasatome Sekundärelektronen zu erzeugen. Diese werden wiederum beschleunigt, so daß sich letztendlich eine Lawine von Ladungen ausbildet und ein meßbares elektrisches Signal auf dem Anodendraht entsteht. In einem bestimmten Bereich der Drahtspannung ist die Stärke des Signals proportional zur Anzahl der primären Ladungen und damit zur Energie, die das Photon bzw. geladene Teilchen im Gas deponiert haben. Dieser Prozess wird Gasverstärkung genannt. Infolge der Lawinenbildung können im Xenon weitere Gasatome angeregt werden, die aufgrund der hohen Anregungsenergien des Xenons ein UV-Photon abstrahlen, das über den Photoeffekt eine erneute Lawine auslöst. Aus diesem Grund wird dem Xenon-Proportionalgas im AMS-02-TRD 20 % CO_2 als Löschgas hinzugefügt. Das CO_2 absorbiert diese UV-Quanten und gibt die aufgenommene Energie in Form von Dissoziation oder elastischen Stößen wieder ab [49].

Die theoretische Beschreibung der Gasverstärkung im Proportionalbereich beruht auf dem ersten Townsend Koeffizienten α , der die Vervielfachung der Elektron-Ion-Paare im Detektorgas beschreibt [71]:

$$dN = N \cdot \alpha \cdot ds \quad (3.14)$$

mit dem Ansteigen der Elektronenzahl dN pro Wegstrecke ds . Die Konstante α ist durch die Anregungs- und E -feldabhängigen Ionisationswirkungsquerschnitte im Gas bestimmt und kann daher nicht berechnet werden, sondern muß für jedes Gasgemisch gemessen werden. Die Gasverstärkung G läßt sich nun unter der Annahme, daß im Abstand s_{min} vom Draht die elektrische Feldstärke ausreicht, um Sekundärelektronen zu erzeugen, wie folgt berechnen (a = Drahtradius):

$$G = \frac{N}{N_0} = \exp \left(\int_{E(s_{min})}^{E(a)} \frac{\alpha(E)}{dE/ds} dE \right) \quad (3.15)$$

Das elektrische Feld in Drahtnähe ergibt sich für $a \ll r$ zu:

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \cdot r} \quad (3.16)$$

wobei λ die Ladung pro Einheitslänge L ist. Damit ergibt sich für die Gasverstärkung:

$$G = \exp \left(\int_{E(s_{min})}^{E(a)} \frac{\lambda \cdot \alpha(E)}{2\pi\epsilon_0 \cdot E^2} dE \right) \quad (3.17)$$

Mit der Vorgehensweise von Diethorn, der davon ausgeht, daß α proportional mit E ansteigt, also:

$$\alpha = \beta \cdot E \quad (3.18)$$

ergibt sich:

$$\ln G = \frac{\beta \cdot \lambda}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \cdot a \cdot E_{min}}. \quad (3.19)$$

Ersetzt man noch β durch $\ln 2/\Delta V$ (mit $e \cdot \Delta V =$ mittlere effektive Ionisationsenergie) und berücksichtigt weiterhin, daß E_{min} linear mit der Gasdichte ρ ansteigt ($\rho_0 =$ Dichte des Gases bei Standardbedingungen):

$$E_{min}(\rho) = E_{min}(\rho_0) \cdot \frac{\rho}{\rho_0} \quad (3.20)$$

so erhält man:

$$\ln G = \frac{\lambda \cdot \ln 2}{2\pi\epsilon_0 \cdot \Delta V} \cdot \ln \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 \cdot a \cdot E_{min} \cdot (\rho/\rho_0)}. \quad (3.21)$$

Mit der Ladungsdichte λ für die TRD-Röhrchengeometrie ($R =$ Straw-Radius) bei der angelegten Hochspannung U

$$\lambda = \frac{Q}{L} = U \cdot \frac{C}{L} = \frac{2\pi\epsilon_0 \cdot U}{\ln \frac{R}{a}} \quad (3.22)$$

läßt sich schließlich die Gasverstärkung berechnen:

$$G = \left(\frac{U}{\ln \frac{R}{a} \cdot a \cdot E_{min}(\rho_0) \cdot \frac{\rho}{\rho_0}} \right)^{\frac{\ln 2 \cdot U}{\ln \frac{R}{a} \cdot \Delta V}} \quad (3.23)$$

E_{min} und ΔV sind die sogenannten Diethornparameter. Wie oben schon angedeutet, hängen sie von der Art der verwendeten Gase und deren Mischungsverhältnis ab und damit auch die Gasverstärkung (siehe Kapitel 4.3). Zudem bestehen Korrelationen zwischen der am Anodendraht angelegten Hochspannung U , sowie der Dichte ρ des verwendeten Gasgemisches und der Gasverstärkung. Die dazu durchgeführten Messungen mit einem Xe/CO_2 -Gemisch sind in Kapitel 4.3.3, die mit einem Ar/CO_2 -Gemisch durchgeführten in Kapitel 5.4.6 zu finden.

Aus der Formel von Diethorn (3.23) wird deutlich, daß die Gasverstärkung stark von den mechanischen Toleranzen der Straw-Module bzw. von der exakten Positionierung der Anodendrähte in der Mitte jedes Röhrchens abhängt. Bei einer Ablage des Anodendrahtes um die Strecke Δx aus der Röhrchenmitte ergibt sich für die Ladung pro Einheitslänge (siehe auch Abbildung 3.13):

$$\lambda = \frac{Q}{L} = U \cdot \frac{C}{L} = U \frac{2\pi\epsilon_0}{\operatorname{arcosh} \frac{a^2 + R^2 - \Delta x^2}{2 \cdot a \cdot R}} \quad (3.24)$$

und somit für die relative Änderung der Gasverstärkung (aus Formel 3.21):

$$\frac{\Delta G}{G} = \left(\ln G + \lambda \cdot \frac{\ln 2}{\Delta V \cdot 2\pi\epsilon_0} \right) \frac{\Delta \lambda}{2 \cdot \lambda} \quad (3.25)$$

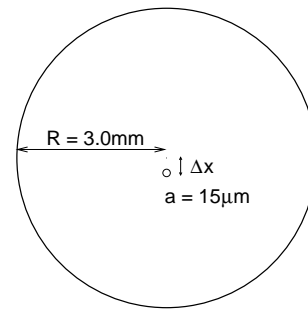


Abbildung 3.13: Skizze: Mechanische Ablage eines Anodendrahtes aus der Röhrchenmitte.

Mit $\operatorname{arcosh} \frac{a^2+R^2-\Delta x^2}{2 \cdot a \cdot R} \rightarrow \ln \frac{R}{a}$ für $\Delta x \rightarrow 0$ ergibt sich für die AMS-02-TRD-Geometrie:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{1}{R^2 \cdot \ln \frac{R}{a}} \cdot \left(\ln G + \frac{U \cdot \ln 2}{\Delta V \cdot \ln \frac{R}{a}} \right) \cdot (\Delta x)^2 \quad (3.26)$$

Die mechanische Ablage des Drahtes Δx_{mech} erhöht sich noch aufgrund der elektrostatischen Anziehung zwischen Anodendraht und Röhrenwand auf $\Delta x_{ges} = \Delta x_{mech} + \delta x_{es}$. Diese totale Ablage eines Drahtes läßt sich wie folgt berechnen [72]:

$$\Delta x_{ges} = \Delta x_{mech} \left(1 + \frac{1}{\frac{k^2 m_t}{U^2} \cdot \left(\frac{R}{L} \cdot \ln \frac{R}{a} \right)^2 - 1} \right) \quad (3.27)$$

mit der Masse m_t , mit der der Draht gespannt wird und $k^2 = 1.43 \cdot 10^9 \frac{V^2}{g}$.

Es ergibt sich somit die Möglichkeit von der an einem Straw-Modul gemessenen Homogenität der Gasverstärkung auf die mechanische Ablage der Anodendrähte aus der Mitte der Röhren bzw. die mechanische Toleranz des Moduls zu schliessen (siehe Kapitel 4.3.3 und 5.4.6).

Befüllung: Xe/CO ₂ (80 : 20)	zu finden in Kapitel
$\Delta G/G (T, p, \rho, U)$	4.3.3
$\Delta G/G$ (mech. Toleranz)	
$\Delta G/G (CO_2 - \text{Konz.})$	
Befüllung: Ar/CO ₂ (82 : 18)	zu finden in Kapitel
$\Delta G/G (T, p, \rho, U)$	5.4.6
$\Delta G/G$ (mech. Toleranz)	

Tabelle 3.2: Gasverstärkungsmessungen in dieser Arbeit.

3.3 Aufbau des AMS-02-TRD

In diesem Kapitel soll zunächst kurz auf die mechanische Oktagon-Konstruktion zur Unterstützung der TR-Einheiten bestehend aus Radiator und Proportionalkammer eingegangen werden. Daran schließt sich eine Beschreibung der Gruppierungen von Gasversorgung und Front-End-Elektronik der einzelnen Straw-Module an. Das außerhalb der Tracker-Akzeptanz angebrachte Gasversorgungssystem mit den Vorratsbehältern für Xe und CO₂ und dem Mischungssystem sowie die weitere Ausleselektronik mit der Datenreduktionselektronik, der Slow-Control-Elektronik und dem HV-Versorgungssystem werden in den darauf folgenden Abschnitten behandelt. Die dabei eingesetzten Materialien wurden so ausgewählt, daß sie weltraumtauglich sind und den hohen mechanischen und thermischen Belastungen im All standhalten.

3.3.1 Mechanische Konstruktion

Zum besseren Verständnis der TRD-Konstruktion ist in Abb. 3.14 eine Explosionszeichnung des AMS-02-TRDs mit den einzelnen Komponenten angeführt. Wie schon im einleitenden Kapitel über den AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor angedeutet, werden die 328 Straw-Module mit Radiator an der Oberseite, in 20 Lagen in einer konischen Oktagon-Tragestruktur versetzt angeordnet. Um Teilchenspuren in x- und y-Koordinate vermessen zu können und damit neben dem Tracker weitere Spurinformatio- nen zu erhalten, verlaufen die oberen und die unteren vier Lagen parallel zum Magnetfeld des supraleitenden Magneten, also in x-Richtung, und die mittleren 12 Lagen senkrecht dazu. Zur Gewährleistung der mecha- nischen Stabilität werden die Straw- Module an zwei Positionen, den soge- nannten Schottwandpositionen, von 5 mm dicken CFC-Platten zusätzlich unterstützt. Die Module liegen somit an den Schottwand-Positionen und an den Polycarbonat-Endstücken auf der Tragestruktur auf und werden so- wohl an den Schottwänden als auch

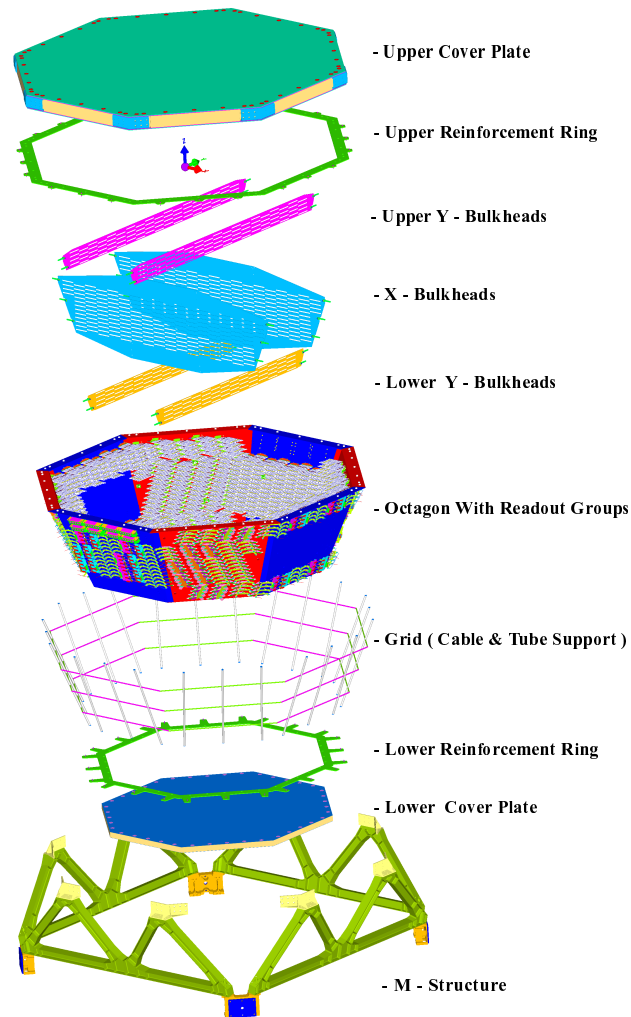


Abbildung 3.14: *Explosionszeichnung des AMS-02-TRD [60].*

an der Innenseite der Oktagonwände über Aluminiumbleche fixiert. Einen Eindruck von der Anordnung aller Schlitze für die Modul-Durchführungen im TRD erhält man in den Darstellungen 3.15 und 3.16. Die einzeln gefertigten und nachher zu einem Oktagon verklebten Wände der Tragestruktur bestehen aus einer 26 mm dicken Aluminiumwabenschicht, die beidseitig mit 2 mm starken CFC-Häuten bedeckt ist.

Die Modul-Schlitze wurden mit einer Präzision von 100 μm in diese mehrschichtige Struktur gefräst, um Deformationen der Straw-Module und eine damit verbundene Variation der Gasverstärkung zu minimieren (siehe auch vorheriges Kapitel). Durch zwei Verstärkungsringe aus CFC-Material an der Ober- und Unterseite der Oktagonwände wird die mechanische Konstruktion verstärkt. Des weiteren wird ein das gesamte Oktagon umspannende Gitter aus Kohlefaser-Rohren an den beiden Verstärkungsringen befestigt. An diesem Gitter werden die HV-Versorgungs- und Signalkabel sowie die vom Gasversorgungssystem kommende Verrohrung angebracht.

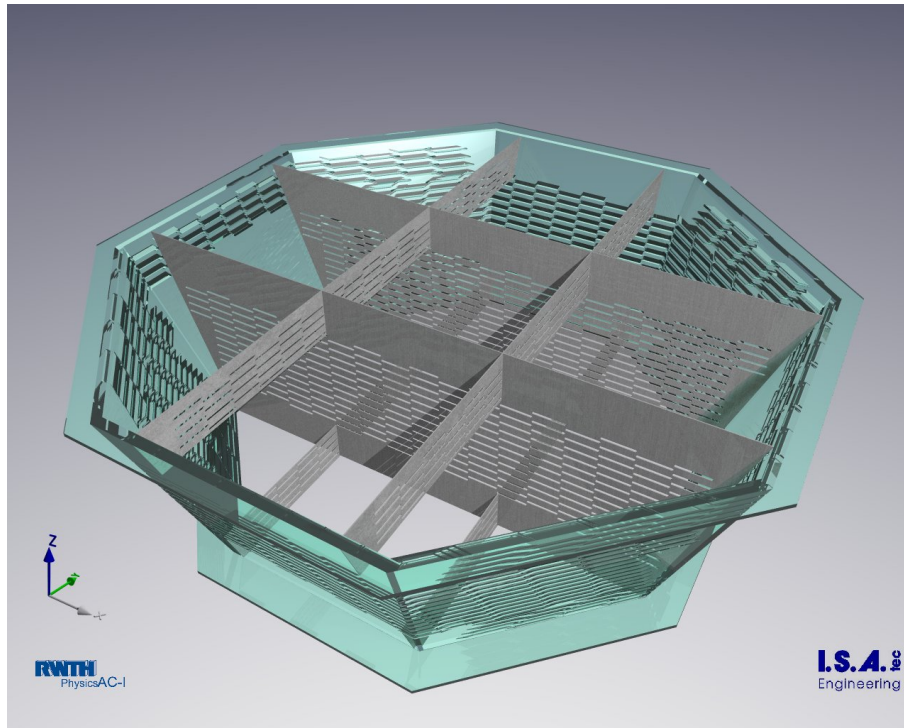


Abbildung 3.15: Achteckige Tragstruktur des TRDs (Oktagon) mit Durchführungen für die Module [73].



Abbildung 3.16: Foto von der Oktagon-Tragstruktur mit Schottwänden (Stand: Januar 2004).

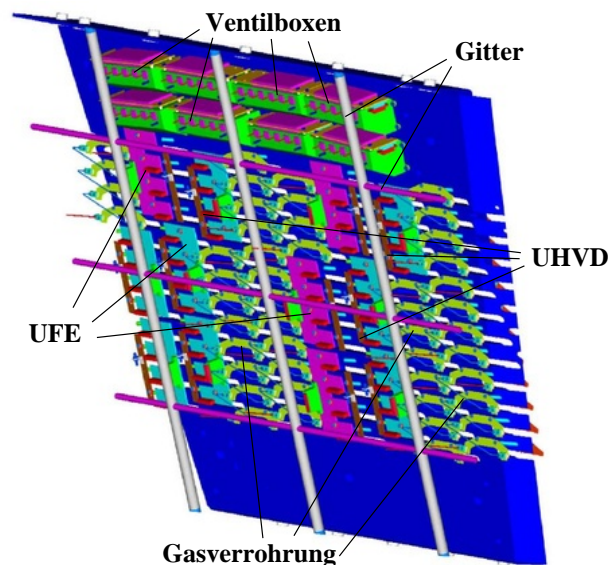
Zur weiteren mechanischen Stabilisierung und zur elektrischen und thermischen Isolation wird das Oktagonvolumen oben und unten von Platten begrenzt, die aus einem ähnlichen Material wie das der Seitenwände aufgebaut sind. Die untere Platte hat eine Materialdicke von 41 mm mit 0.5 mm starken CFC-Häuten, wohingegen die

Komponenten	Gewicht [<i>kg</i>]
Radiator + Straw-Module	114
$Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gas	50
Oktagon + Support + Abschirmung + Front-End-Elektronik	214
Gasversorgung	63
(Crate-)Elektronik	53
Gesamter TRD-Detektor	494

Tabelle 3.3: *Gewicht der TRD-Einzelkomponenten.*

obere Platte 94 *mm* dick ist und 1 *mm* starke CFC-Häute verwendet wurden. Über Winkel aus Titan wird der TRD an der oberen Abdeckplatte mit der sogenannten M-Struktur verbunden. Diese aus Aluminium gefertigte M-Struktur stellt dann die Verbindung zum USS⁷ des gesamten AMS-02-Detektors her. Letztendlich wird das gesamte TRD-Volumen zur thermischen Isolation in eine MLI-Folie eingehüllt (siehe auch Kapitel 3.3.4). Das Gewicht der Einzelkomponenten des TRDs ist in Tabelle 3.3 aufgeführt.

Die Gruppierung von Gasversorgung und Front-End-Elektronik ist an einer der 90°-Oktagonwände in Abbildung 3.17 schematisch dargestellt. Im mittleren Bereich der Oktagonwand sind die 12 Lagen der in *y*-Richtung verlaufenden Straw-Module

Abbildung 3.17: *Darstellung der Gasversorgungs- und Front-End Elektronikgruppierung an einer Oktagonwand (90°-Wand) [60].*

⁷Universal Support Structure

zu erkennen. Oberhalb davon sind 8 Ventil-Boxen angebracht, auf die im Abschnitt 3.3.2 näher eingegangen wird. Aus Redundanzüberlegungen bilden jeweils vier übereinander liegende Straw-Module einen Turm, der über eine an der Oktagonwand befestigten, sogenannten UFE⁸-Platine ausgelesen wird (hier in hellblau und magenta dargestellt). Auf die Funktionsweise dieser UFE-Platinen wird im Abschnitt 3.3.3 näher eingegangen. Neben den UFE-Platinen befinden sich die HV-Verteilungsplatinen (UHVD⁹-Platinen) für die vier Module des jeweiligen Turmes (hier dunkelrot eingefärbt). Um den gesamten TRD mit Hochspannung zu versorgen und die elektronischen Signale der Straw-Module weiter zu verarbeiten, benötigt man demnach 82 dieser UHVD- bzw. UFE-Platinen.

Die Gasversorgung erfolgt jeweils von der gegenüber liegenden Oktagonwand aus. Dazu werden zwei Türme, d.h. 8 Module so verrohrt, daß sie seriell vom Xe/CO_2 -Gas bei einem Gasfluß von 1 l/h durchflossen werden. Insgesamt ergeben sich 41 separate, zirkulierende Gaskreisläufe, die von einem Vorratssystem aus gespeist werden. Aus Platzgründen wird die Gasverrohrung und die Front-End-Elektronik alternierend auf die jeweils gegenüber liegenden Oktagonwände verteilt. In Abbildung 3.18 a) ist eine Skizze der Gasversorgungsseite eines Turmes von der 90°-Oktagonwand dargestellt. Das Gas strömt von Ventilboxen kommend unten links in den Turm ein und oben rechts wieder hinaus. Von dort erfolgt dann die Rohrverbindung zum zweiten Turm. Die dazwischen liegenden Straw-Module werden über Brücken aus Edelstahlrohr, die mit sogenannten Doppel-O-Ring-Kupplungen an die Gaseinlass- und Auslassrohre der Straw-Module angekoppelt werden, seriell mit Gas versorgt. Abbildung 3.18 b) zeigt eine Skizze dieser am I. Physikalischen Institut entwickelten gasdichten Kupplungen. Die Kupplungen werden über Aluminiumbleche an den Oktagonwänden fixiert.

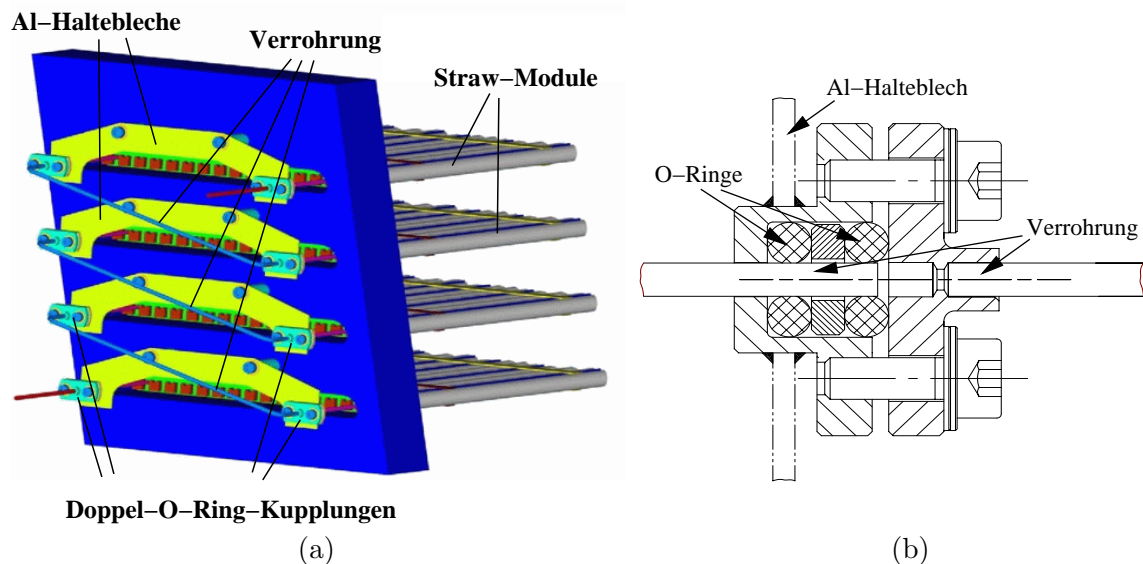


Abbildung 3.18: a) Außenansicht der Gasversorgungsseite eines Turmes an einer 90°-Oktagonwand [60]; b) Skizze einer Doppel-O-Ring-Kupplung.

⁸Uebergangsstrahlung Front End

⁹Uebergangsstrahlung High Voltage Distribution

3.3.2 Gasversorgungssystem

Das zirkulierende Gasversorgungssystem des AMS-02-TRD ist so ausgelegt, daß es für einen dreijährigen Zeitraum in einer Vakuumumgebung ohne äußere Wartung betrieben werden kann. Dazu ist das vom MIT¹⁰ entwickelte, aus hochvakuumfesten Komponenten aufgebaute System mehrfach redundant ausgelegt, d.h. womöglich ausfallende Druck- und Temperatur-Sensoren, Ventile oder Gasfilter können von anderen Systemkomponenten automatisch überbrückt werden.

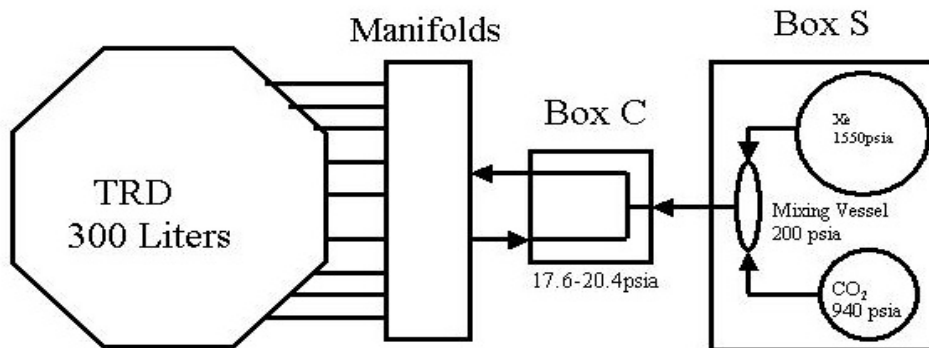


Abbildung 3.19: *Prinzip-Skizze des AMS-02-TRD Gasversorgungssystems [74].*

In Abbildung 3.19 ist eine Prinzipskizze des TRD Gasversorgungssystems dargestellt. Die Verrohrung der einzelnen Gaskreisläufe wird über die Ventilboxen¹¹ mit jeweils vier Sicherheitsventilen pro Kreislauf zusammengeführt, welche bei einem plötzlich auftretenden Druckabfall in einem der Gaskreisläufe von dem Kontrollcomputer geschlossen werden können. Der Druck in jedem Kreislauf soll unter Betriebsbedingungen zwischen 1000 *mbar* und 1100 *mbar* liegen. Die Ventilboxen bilden zusammen mit den 41 TRD-Segmenten und der "Box C (UGBC¹²)" einen geschlossenen Gaskreislauf.

In der Box C befinden sich die Zirkulationspumpen und weitere Kontrollelektronik, wie z.B. ein CO_2 -Analysegerät zur Kontrolle des CO_2 -Anteils im Gasgemisch (Spirometer), Temperatur- und Drucksensoren, Gasdurchflussmesser, elektromagnetisch betätigbare Ventile sowie sogenannte Monitor-Röhrchen. In diesen Röhrchen werden über Änderungen der mit $^{55}_{26}Fe$ -Quellen gemessenen Gasverstärkung, Schwankungen in der Gaszusammensetzung und der Dichte des TRD-Gasgemisches aufgezeichnet.

Die Box C wird über eine Verrohrung von der "Box S (UGBS¹³)" aus gespeist. Diese Box besteht im wesentlichen aus zwei separaten aus einem Kohlefasermaterial aufgebauten Vorratsbehältern in denen 46 *kg* Xenon- ($p = 100 \text{ bar}$) und 4 *kg* CO_2 -Gas ($p = 65 \text{ bar}$) mitgeführt werden. Dies entspricht einem Volumen unter Standardbedingungen ($p = 1013 \text{ mbar}$, $T = 20^\circ C$) von 8100 *l* Xenon und 2000 *l*

¹⁰Massachusetts Institute of Technology

¹¹engl.: Manifolds

¹²Universal Gas Box Circulating

¹³Universal Gas Box S

CO_2 . Bei einer dreijährigen Stationierung des Detektors im Weltraum wird diese Menge Gas unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors zum Ausgleich der durch die Strawwände und Rohrkuppungen des TRDs diffundierenden Gasmenge benötigt. Da Xe und CO_2 unterschiedlich hohe Diffusionsraten haben, ändert sich mit der Zeit die Gaszusammensetzung im TRD, welche mit den oben angeführten Apparaturen kontrolliert wird (siehe auch Kap. 4.2). Bei Abweichungen vom Sollwert können pro Tag in mehreren Schritten bis zu 7 l des Gasgemisches in den Weltraum abgelassen werden und durch "frisches" Gas ersetzt werden. Dazu wird in einem zusätzlichen "Mix"-Volumen¹⁴ der Box S das Gas aus den Vorratsbehältern in passendem Verhältnis vorgemischt und an Box C abgegeben. In Abbildung 3.20 ist eine dreidimensionale Zeichnung des TRD-Gasversorgungssystems wie es nachher in einem Eckpunkt der USS-Halterung befestigt wird, dargestellt (das Mixvolumen ist nicht zu erkennen, da es sich an der Rückseite dieses Gassystems befindet).

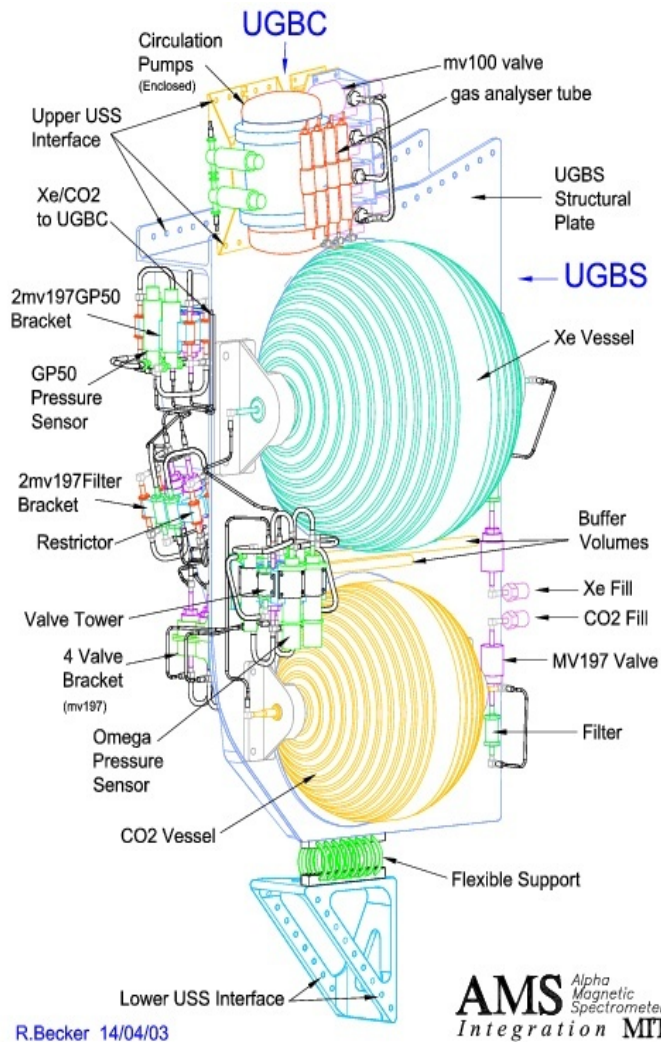


Abbildung 3.20: 3D-Zeichnung des AMS-02-TRD Gasversorgungssystems [75].

Alle Elektronikbauteile des Gasversorgungssystems werden von einer am INFN Rom entwickelten "USCM"¹⁵-Elektronik aus gesteuert, die sich zusammen mit der Stromversorgung des Systems in einer separaten, an der USS-Halterung angebrachten Elektronikbox¹⁶ befindet. Zusätzlich stellt diese USCM-Elektronik die Verbindung zur höheren DAQ des AMS-02-Detektors her. Für weitere Informationen zum Gasversorgungssystem und zur Slow-Control-Elektronik siehe [74], [76] [77].

¹⁴engl.: mixing vessel

¹⁵Universal Slow Control Module

¹⁶engl.: Electronic Crate

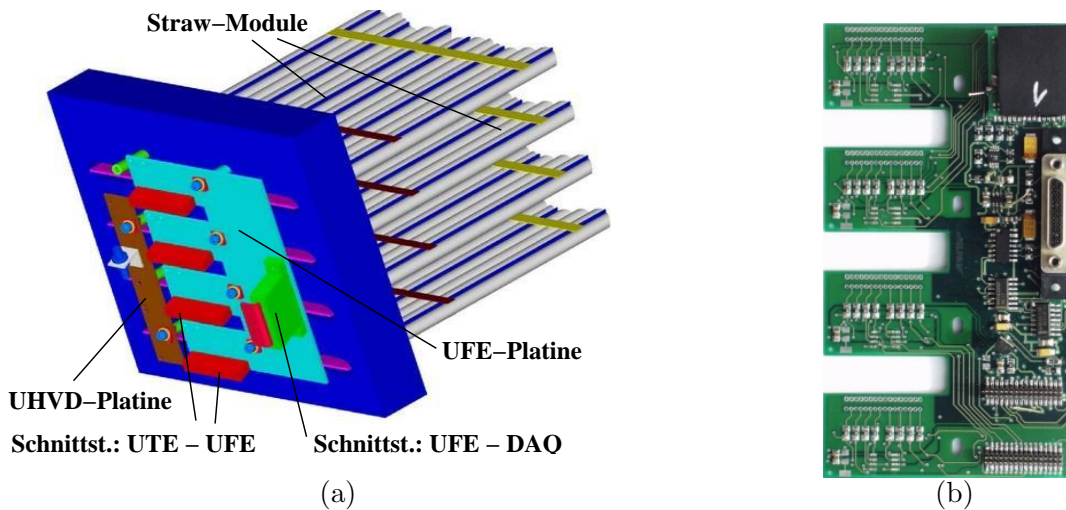


Abbildung 3.21: a) Außenansicht der Ausleseseite eines Turmes an einer 90°-Oktagonwand [60]; b) Foto von einer UFE-Platine.

3.3.3 Front-End-Ausleseelektronik und DAQ

Das DAQ-System des AMS-02-TRD kann in die Front-End-Ausleseelektronik (UTE, UFE, UHVD), deren Gruppierung schon in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt wurde, und die sogenannte Crate-Elektronik, die in einem zur Elektronik des Gasversorgungssystems separaten, an der USS befestigten Box untergebracht wird, unterteilt werden. Auch diese Elektronik wird redundant ausgelegt, um mögliche Ausfälle einzelner Komponenten zu kompensieren. Im folgenden werden die einzelnen Elektronikbausteine, die im Hinblick auf ihre Weltraumtauglichkeit und geringe Verlustleistung ausgewählt wurden, näher beschrieben.

In Abbildung 3.21 a) ist eine dreidimensionale Skizze von der Elektronikausleseseite eines Turmes der 90°-Oktagonwand (siehe auch Abb. 3.17) mit UFE- und UHVD-Platine dargestellt. Das Kernstück dieser UFE-Platine bilden zwei integrierte Schaltkreise, die sogenannten VA-Elektronikchips¹⁷ mit denen die über die vier UTE-Platinen aus den Straw-Modulen ausgekoppelten elektrischen Signale weiterverarbeitet werden. Ein Foto einer nicht vollständig bestückten UFE-Platine ist in Abb. 3.21 b) dargestellt. Man erkennt einen VA-Chip in der oberen rechten Ecke der Platine (der VA-Chip in der unteren rechten Ecke fehlt) sowie den dazwischen liegenden Verbindungsstecker zur weiteren DAQ. Die Aussparungen auf der linken Seite der Platine dienen als Durchführungen für die Verbindungskabel zwischen den UTE- und UFE-Platinen.

Abbildung 3.22 zeigt eine schematische Skizze der Front-End-Ausleseelektronik. Ein VA-Chip besitzt 32 Eingangskanäle und zeichnet sich durch eine geringe Verlustleistung von 1.7 mW/Kanal aus. Jeder Kanal des Chips hat eingangsseitig einen ladungssensitiven Integrationsverstärker, der hochohmig angekoppelt wird. Der dynamische Eingangsbereich liegt zwischen 0 und $\sim 1.5 \text{ pC}$ bei einer Abweichung von 2 % von der Linearität, was einer Ladung von bis zu 34 MIPs bei einer Gas-

¹⁷VA32-HDR12, Fa. IDEAS (Integrated Detectors & Electronics AS)

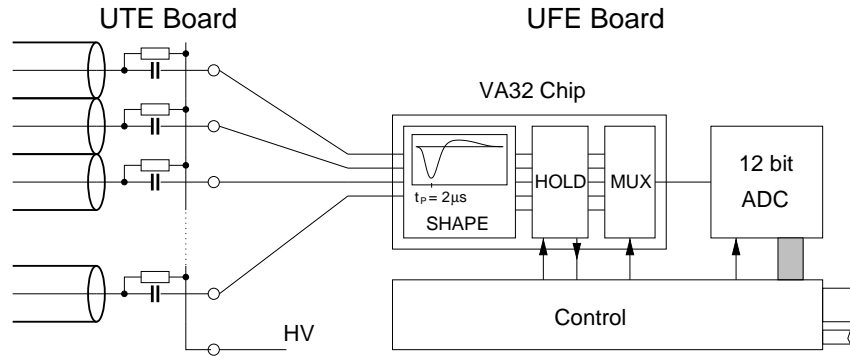


Abbildung 3.22: Schema der Front-End-Ausleseelektronik der Straw-Module [66].

verstärkung von ~ 3000 ($U \approx 1480$ V) entspricht. Jedem Vorverstärker folgt ein CR-RC-Shaper, der das integrierte Signal in einen semigaussischen Puls umwandelt, der nach $2 \mu s$ sein Maximum erreicht. Das externe Triggersignal wird um diese Zeit verzögert, damit das Signal aus dem Halteglied¹⁸ in das Signalmaximum fällt. Alle 32 Kanäle werden seriell mit einem Multiplexer ausgelesen, der die Analogsignale auf einen separat auf der UFE-Platine befindlichen 12 bit Analog-Digital-Konverter (ADC) weiterleitet. Über eine interne Testkapazität wurde die Verstärkung jedes Kanals bestimmt. Sie liegt bei ~ 2 ADC-Kanälen/fC und schwankt um bis zu 1 %. Das Pedestal liegt innerhalb von 600 ADC-Kanälen bei einem elektronischen Rauschen von ~ 2 ADC-Kanälen. Näheres hierzu siehe auch [79], [80]. Neben diesen VA-Chips und dem ADC befinden sich weitere Schaltungen zur Kontrolle der Elektronikbauteile auf der UFE-Platine, was zu einer gesamten Verlustleistung von 190 mW/UFE-Platine führt. Die Weiterverarbeitung und Speicherung der digitalisierten Daten erfolgt dann über das DAQ-System in den Elektronik-Crates.

Die weitere DAQ des AMS-02-TRD wird nach dem in Abbildung 3.23 dargestellten Schema einer Hälfte der Ausleseelektronik in vier Elektronik-Crates (2x U-Crate

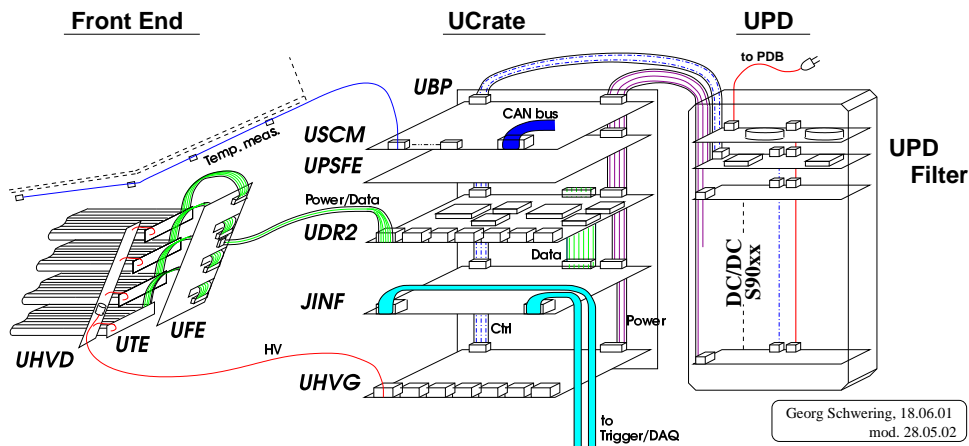


Abbildung 3.23: AMS-02-TRD Elektronik-Design (ohne Gasversorgungssystem) [67].

¹⁸engl.: Hold

(Entwicklung: IEKP, Universität Karlsruhe), 2x UPD¹⁹) an der USS-Haltestruktur untergebracht. Die UPD-Boxen werden über die Energieversorgung des AMS-02-Detektors mit einer Spannung von +120 V versorgt und erzeugen mit 2-fach redundant ausgelegten DCDC-Konvertern sämtliche für die Ausleseelektronik benötigten Niederspannungen von ± 2.0 V bis +120 V. Diese Spannungen werden jeweils auf eine Steckplatte (UBP²⁰) in einem der U-Crates übertragen, welche die Kommunikation zwischen den weiteren Ausleseelektronikplatinen herstellt.

Auf dieser UBP-Platine befinden sich die UPSFE²¹-Platine, welche die einzelnen UFE-Platinen mit den benötigten Spannungen versorgt und die USCM-Platine mit der, ähnlich wie beim Gasversorgungssystem, die Temperatur im TRD-Oktagon und den Crates überwacht wird. Auf der vom MIT entwickelten UHVG²²-Platine wird die Eingangsspannung von +120 V auf die nachher an den Anodendrähten benötigten $U = 1480$ V hoch transformiert und von dort auf die UHVD-Platinen der jeweiligen Türme verteilt.

Der zentrale Baustein der Ausleseelektronik ist die UDR2²³-Platine, welche die digitalisierten Daten von 42 UFE-Platinen ausliest. Die UDR2-Platine ist in 6 baugleiche, doppelt redundante UDR-Bereiche unterteilt, welche jeweils nach Erhalt des Level-1-Triggers vom ToF-System, die 7 ADCs der angeschlossenen UFE-Platinen über ein Gate-Array parallel auslesen und eine Pedestal-Subtraktion vornehmen. Gleichzeitig wird die Kommunikation zur ebenfalls doppelt redundant ausgelegten JINF-Platine hergestellt, die die Daten aller UDR-Platinen sammelt und zum höheren DAQ-System des AMS-02-Detektors transferriert. Für weitere Informationen sei auf [81] verwiesen.

3.3.4 Thermisches Modell für den TRD

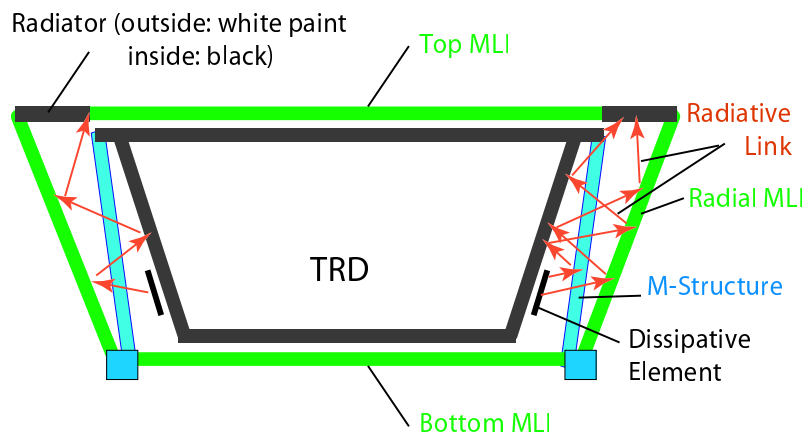


Abbildung 3.24: *Thermisches Abschirmungsmodell für den AMS-02-TRD [82].*

¹⁹Uebergangsstrahlung **P**ower **D**istribution

²⁰Uebergangsstrahlung **B**ack **P**lane

²¹Uebergangsstrahlung **P**ower **S**upply **F**ront **E**nd

²²Uebergangsstrahlung **H**igh **V**oltage **G**eneration

²³Uebergangsstrahlung **D**ata **R**eduction

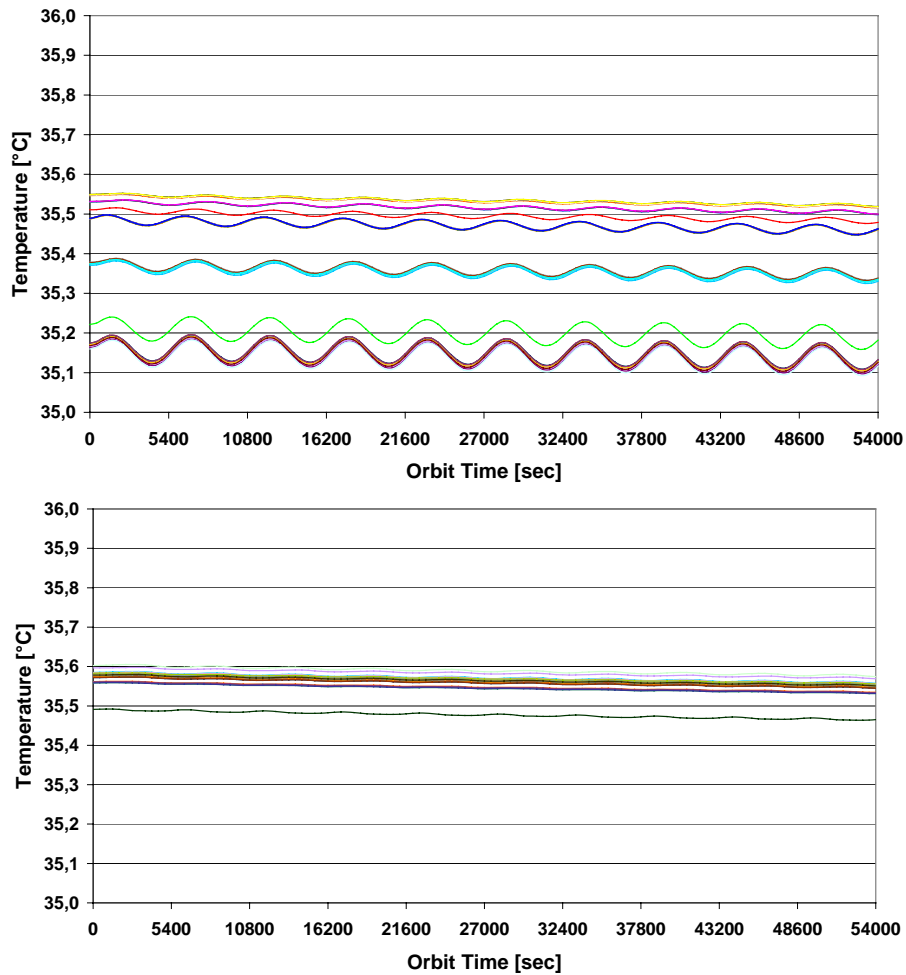


Abbildung 3.25: *Thermische Analyse: Höchste Temperaturen an verschiedenen Punkten auf der oberen (oberes Diagramm) und unteren (unteres Diagramm) CFC-Platte ($\beta = +75^\circ$, $YPR = -15 + 15 + 15$) [83].*

Wie in den obigen Kapiteln schon angedeutet, ist die thermische Stabilität im Innern des TRD entscheidend für dessen erfolgreichen Betrieb auf der ISS, da große Temperaturschwankungen zu Gasdichteveränderungen in den Straw-Modulen und damit zu erheblichen Gasverstärkungsänderungen führen würden. Um diese Gasverstärkungsvariationen im Rahmen der mit dem 20-lagigen TRD-Prototypen gemessenen Fehler in den Signalhöhen der Ereignisse von $\sim 2\%$ zu halten, liegt das Design-Ziel für die äußere Abschirmung des AMS-02-TRDs bei einem maximalen Temperaturgradienten von $\pm 1^\circ\text{C}$ im Oktagon. Aufgrund der viel größeren Masse der Oktagon-Tragestruktur wird der Temperaturgradient über die Straw-Module durch die Temperatur auf den Oktagonwänden bestimmt.

Um den TRD vor der Wärmeeinstrahlung von außen zu schützen, erweist sich eine MLI-Folie als geeignetes weltraumtaugliches Abschirmungsmaterial, in die der komplette TRD eingewickelt wird. Eingebettet in dieses Folienmaterial befindet sich an den äußeren Rändern der oberen TRD-Abdeckung ein Radiatorbereich, der die in der FE-Elektronik entstandene Wärme in Form von Wärmestrahlung in den Welt-

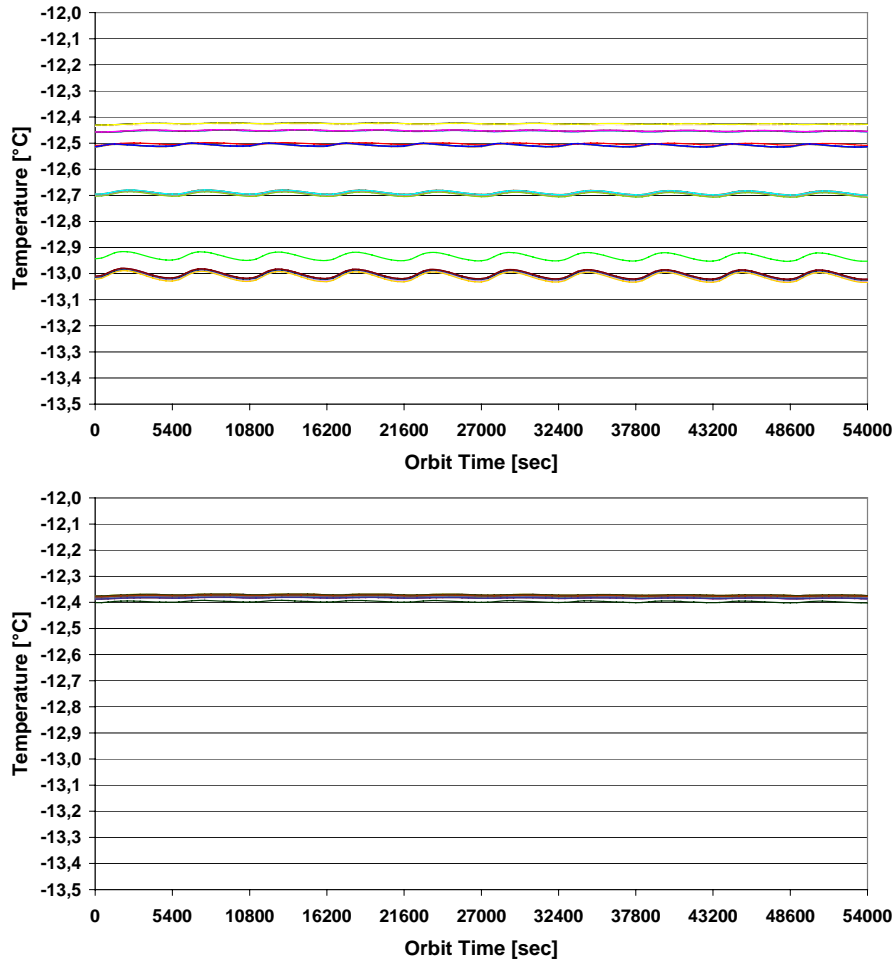


Abbildung 3.26: *Thermische Analyse: Niedrigste Temperaturen an verschiedenen Punkten auf der oberen (oberes Diagramm) und unteren (unteres Diagramm) CFC-Platte ($\beta = +75^\circ$, $YPR = -15 - 20 - 15$) [83].*

raum ableitet (siehe Abbildung 3.24). Die Wärmeübertragung von der FE-Elektronik zum Radiator erfolgt größtenteils durch Infrarotstrahlung, die nach Mehrfachreflexionen an der hoch reflektiven Innenseite der MLI-Folie und der äußeren Oktagonhaut, an der Innenseite des Radiatorbereiches absorbiert wird.

Um die Funktionsfähigkeit der äußeren Abschirmung zu zeigen, wurde ein thermisches Modell für den gesamten AMS-02-Detektor entwickelt, welches sowohl die Wärmeeinstrahlung von Außen (im Wesentlichen von der Sonne) und die Wärmeabstrahlung in den Weltraum über Radiatoren, als auch die durch die Ausleseelektronik der einzelnen Subdetektoren im Innern erzeugte Wärme (z.B. TRD-Verlustleistung: 16 W), sowie die Wärmeflüsse zwischen den Subdetektoren berücksichtigt ²⁴.

Als Resultat dieser Analyse ergeben sich die Temperaturverläufe an verschiedenen Punkten auf den CFC-Abdeckungsplatten an der Ober- bzw. Unterseite des TRD-Oktagons und damit auch Temperaturgradienten im gesamten Oktagon. Die Temperaturverläufe im Bereich der Extremtemperaturen von $T_{min} \approx -13^\circ\text{C}$ und

²⁴In Zusammenarbeit mit Fa. OHB-System AG

$T_{max} \approx +35^{\circ}C$ (minimale und maximale TRD-Betriebstemperatur) sind in den Abbildungen 3.25 und 3.26 dargestellt und treten bei einem β -Winkel²⁵ von $+75^{\circ}$ und bestimmten YPR²⁶-Faktoren auf. Die simulierten Temperaturen auf den CFC-Platten können dabei je nach Orbit-Position des Detektors um bis zu $\sim 0.1^{\circ}C$ schwanken (obere Platte bei $T_{max} \approx 35^{\circ}C$). Da die temporären Temperaturwerte aber nicht mehr als $\sim 0.6^{\circ}C$ voneinander abweichen, wird obiges Design-Ziel für die äußere Abschirmung des AMS-02-Detektors erreicht.

Die Temperatur an den Oktagon- und Schottwänden wird mit Hilfe von 202 Temperatursensoren²⁷ kontrolliert, welche auf insgesamt 20 unterschiedlich langen, über die Oktagon-Tragestruktur verteilten Temperaturbändern aus einem Kaptonmaterial angeordnet werden. Mit diesen Sensoren kann die Temperatur im Bereich von $-55^{\circ}C$ bis $+125^{\circ}C$ mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5^{\circ}C$ gemessen werden [69]. Das System ist doppelt redundant ausgelegt und wird von einer USCM-Elektronik ausgelesen.

²⁵ β -Winkel: Winkel unter dem die Sonne von der Erdumlaufsebene aus gesehen wird. Bei einem Inklinationwinkel der ISS zum Äquator von $\sim 52^{\circ}$ kommt es zu Variationen des β -Winkels zwischen $-75^{\circ} < \beta < +75^{\circ}$. [78]

²⁶**Y**aw **P**itch **R**ole-Faktoren: Relative Ausrichtung der ISS zu ihrer Flugrichtung

²⁷DS18S20, Fa. Dallas Semiconductor Inc.

Kapitel 4

Straw-Module: Herstellung und Gasdichtigkeit

In diesem Kapitel wird zunächst das Herstellungsverfahren der Proportionalkammern beschrieben, sowie die Messungen zur Bestimmung der Gasdichtigkeit einzelner Straws und von Modulprototypen mitsamt der Theorie zur Gaspermeation. Daran schliessen sich Messungen des Langzeitverhaltens der Gasdichtigkeit der Straws mit Xe/CO_2 und der Polycarbonat-Endstücke mit CO_2 an, sowie die Ergebnisse von Kurzzeitmessungen mit Helium. Die Übertragbarkeit der an einzelnen Komponenten eines Moduls gemessenen Gasdichtigkeiten auf fertige Module wird schließlich in einem Langzeittest mit Modulprototypen überprüft. In dem folgenden Kapitel wird dann ausführlich auf die mit Straw-Modulprototypen durchgeführten Vibrations- und Thermovakuumtests, sowie zusätzlichen Voruntersuchungen während der Produktion dieser Prototypen eingegangen.

4.1 Herstellung der Straw-Module

Bei der Konstruktion der TRD-Kammerkörper aus zylindrischen Röhren von 6 mm Innendurchmesser und einer Wandstärke von nur 72 μm standen Gewichtsüberlegungen im Vordergrund. Daneben müssen die Röhren den Beschleunigungsvorgängen während des Starts und der Landung eines Space Shuttles standhalten und aufgrund des dreijährigen Betriebes auf der ISS in einer Vakuumumgebung, eine geringe Diffusionsrate für Xenon-Proportionalgas und CO_2 -Löschgas, bei gleichzeitig geringen Materialausgasraten der Röhrenwände aufweisen.

Man entschied sich für ein aus einem Verbund verschiedener Materialschichten aufgebautes Röhrenmaterial. Den Kern bilden zwei mit einer 10 μm dicken Polyurethan-Schicht verklebte Lagen des Polyimids Kapton¹ von jeweils 25 μm Stärke. Durch eine dünne Aluminium-Metallisierung an der äußeren Oberfläche der beiden Kaptonlagen und einer darüber befindlichen, 6 μm starken Kohlefaser-Polyimid-Verbundschicht wird die elektrische Leitfähigkeit des Kammerkörpers gewährleistet. In Abbildung 4.1 ist der Querschnitt einer solchen Röhrenwand darge-

¹Fa. Du Pont.

stellt. Das Material hat dabei eine Dichte von $\rho = 1.28 \frac{g}{cm^3}$ und einen elektrischen Widerstand von $2.16 \Omega/m^2$.

Diese sogenannten Straws werden industriell gefertigt². Dazu wird das Grundmaterial in Streifen geschnitten, wobei die Streifen einer ersten gelieferten Charge $\approx 10 \text{ mm}$ breit und die einer zweiten Charge $\approx 12.5 \text{ mm}$ breit sind. Jeweils zwei dieser Streifen werden mit einem Versatz von einer halben Streifenbreite über einen Drehkern aufeinanderfolgend zu einem Straw gewickelt. Dabei ergeben sich Bereiche von einigen $100 \mu\text{m}$ Breite, wo das Kaptonmaterial der innen liegenden Folie sichtbar wird. Das Röhrenmaterial wird bei dem Prozess auf $150^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}$ erhitzt, so daß beide Folien über die wärmehärtenden Polyurethanschichten zu einem Straw verklebt werden.

Das Prinzip dieses Herstellungsprozesses sowie Bilder von Straws aus der ersten bzw. zweiten Charge sind in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Weiterverarbeitung der Straws findet am I. Physikalischen Institut³ statt, wo die Röhren einem ersten Dichtigkeitstest unterzogen werden (siehe dazu auch Abschnitt 4.2.5). Für den Einsatz im TRD werden je 16 dieser Straws zu Modulen zusammengefaßt. In Abb. 4.3 ist der Querschnitt eines dieser TRD-Module skizziert. Zur mechanischen Stabilisierung werden die Röhren mit sechs CFC⁴-Streifen in Längsrichtung, an den skizzierten Positionen verklebt. Quer dazu befinden sich symmetrisch zur Spiegel-

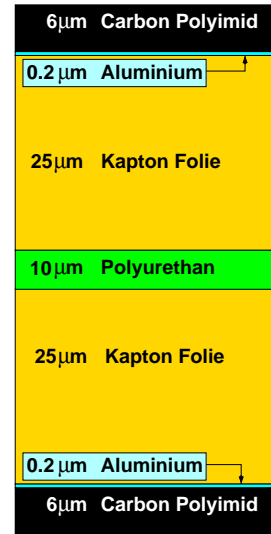


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau der Röhrenwände.

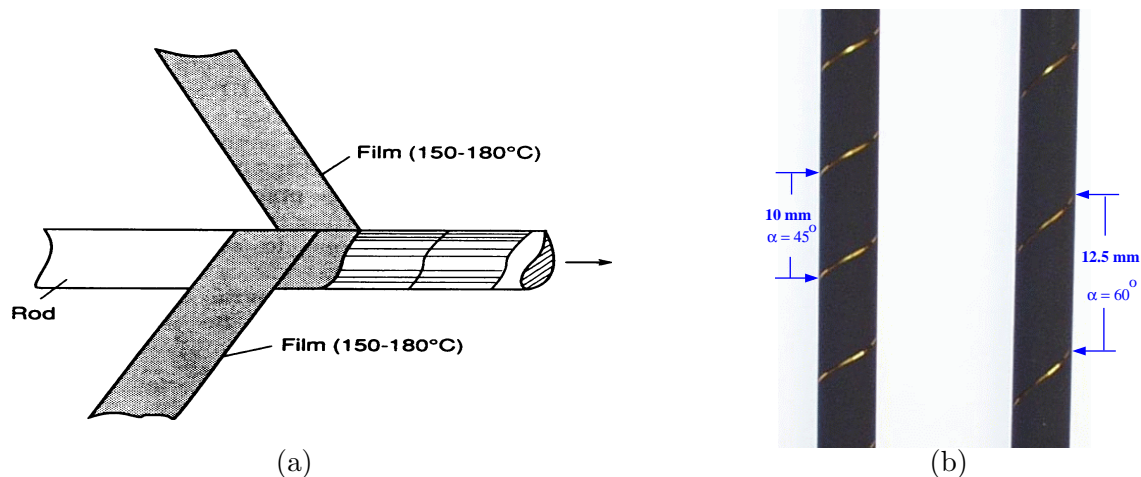


Abbildung 4.2: a) Schematischer Aufbau zur Herstellung der Röhren (Straws) [57]; b) Fotos von Straws der ersten (linkes Bild) und zweiten (rechtes Bild) Charge.

²Fa. Lamina Dielectics Ltd.

³RWTH Aachen

⁴Carbon Fiber Compound: Tenax UMS 2526 385 GPa, Fa. Secar

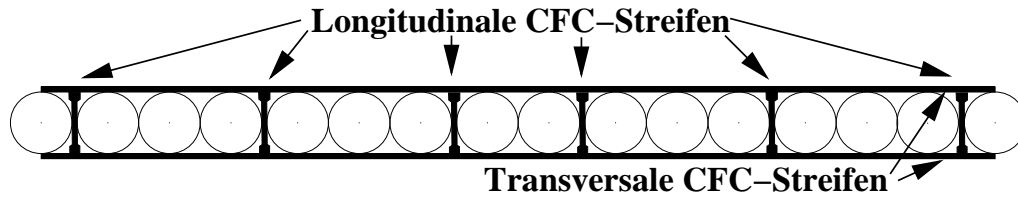


Abbildung 4.3: Schnitt durch ein TRD-Modul.

achse auf halber Kammerlänge, in 10 cm Abständen weitere CFC-Streifen, so daß die Module die für die Raumfahrt erforderliche mechanische Stabilität bekommen. Zwei dieser Querstreifen im Abstand von jeweils 328 mm von der Mitte der Kammer dienen nachher in der TRD-Tragestruktur als Auflagepunkte in Schottwänden.

Das Schneiden der einzelnen Straws auf die passende Modullänge sowie das Verkleben der Straws mit den CFC-Streifen nach dem oben dargestellten Schema zu einem Modul erfolgt unter Reinraumbedingungen in einem Industriebetrieb⁵. Mit der in den Abbildungen 4.4 dargestellten Klebevorrichtung lassen sich gleichzeitig zwei Module bearbeiten. In Abbildung a) erkennt man zwei, links und rechts von einem CFC-Rohr liegende Module, deren Straws sich auf kammförmigen Auslegern befinden, die in der Mitte an diesem Rohr befestigt sind. Über dieses CFC-Rohr erreicht man eine mechanische Toleranz der Apparatur von $< 100 \mu m$. Für die in

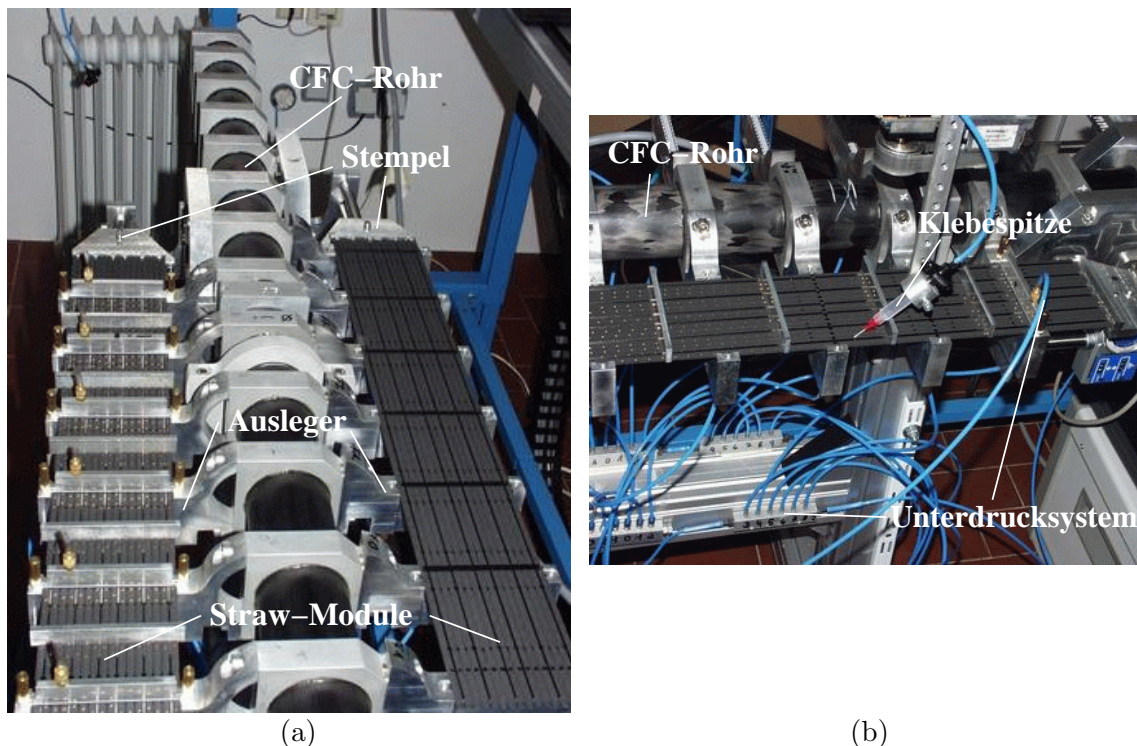


Abbildung 4.4: a) Klebevorrichtung zur Herstellung der Straw-Module; b) Automatisiertes Klebeverfahren.

⁵FVT Faserverbundtechnik GmbH

Längs- und Querrichtung zu den Straws verlaufenden CFC-Streifen gibt es Aussparungen in den Auslegern, wobei die Querstreifen an den Schottwandpositionen für eine präzise Positionierung über ein Unterdrucksystem angesaugt werden. Über pneumatisch verstellbare Stempel an den Stirnseiten der Straws lassen sich die individuellen Modullängen einstellen. Abbildung b) zeigt die automatisch positionierbare Klebspitze mit der das niedrigviskose Epoxid-Gießharz⁶ (Viskosität bei 25°C: 650 mPa · s) aufgebracht wird. Dieser Kleber erfüllt die Weltraumspezifikationen und härtet in $\approx 8 h$ bei Raumtemperatur vollständig aus [61]. Die fertigen Kammerkörper werden dann im Reinraum des I. Physik. Institutes weiterverarbeitet.

Die Modulendstücke bestehen jeweils aus einem Polycarbonat-Gehäuse in das mittels sogenannter PEEK⁷-Zentrierstücke die 16 Röhren mittig positioniert werden (siehe Abbildung 4.2.4). Über eine goldbeschichtete Polyimidfolie, die vor dem Anbringen der Endstücke um das Röhrenende geklemmt wird, wird die gemeinsame Erdung der beiden elektrisch leitenden Kohlefaser-Polyimidschichten auf der Innen- und Außenseite der Röhrenwand sichergestellt. Eine Dichtung aus Polyimid verhindert das Eindringen von Klebstoff in die Gasversorgungsnut. Die Endstücke an der Gasversorgungsseite sind dabei so aufgebaut, daß das einlaufende Gas über die Nut gleichmässig auf die ersten 8 Röhren verteilt wird. Die Verbindung zur Gasversorgung des gesamten AMS-02-TRD erfolgt über Edelstahlröhren, die über Polycarbonat-Rohradapter für eine elastische Ankopplung mit dem gassseitigen Endstück verklebt sind (siehe auch Abbildung 4.6). Für die Gasumkehr an der Ausleseseite verläuft die Nut dort über die gesamte Breite von 16 Röhren.

Vor dem Anbringen der Endstücke am Kammerkörper werden die zu verklebenden Kunststoffbauteile, wie die Endstücke, die Polycarbonat-Rohradapter sowie die Polyimid-Dichtungen aufgrund ihrer schlechten Klebeeigenschaften in einem Sauerstoff-Niederdruckplasma vorbehandelt. Das Ziel dieser Plasmavorbehandlung ist eine Oberflächenaktivierung der zunächst noch unpolaren Kunststoffoberflächen

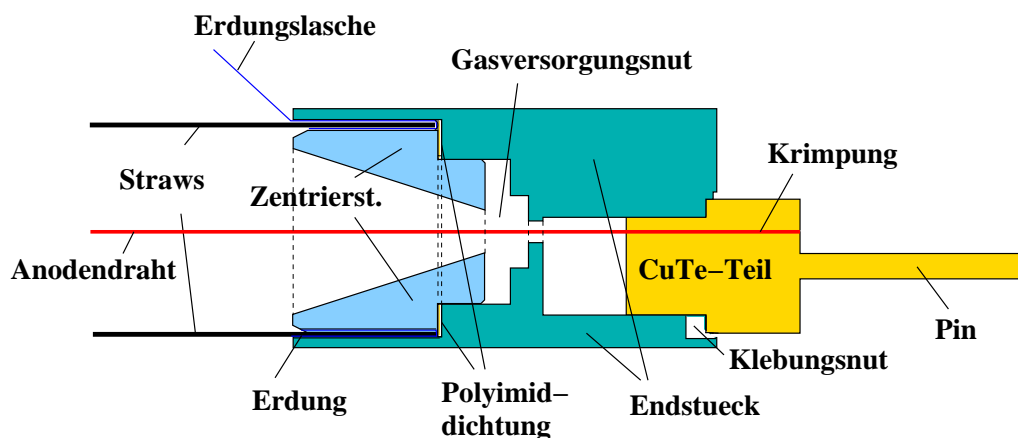


Abbildung 4.5: Schnitt durch ein Modulendstück der Elektronikausleseseite.

⁶Stycast 1266, Fa. Stycast

⁷PolyEtherEtherKeton; PEEK 30 GF, Fa. Ensinger

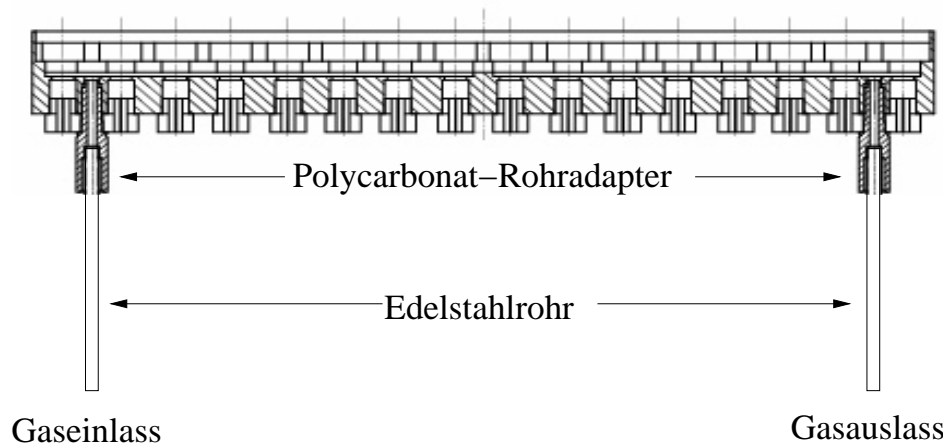


Abbildung 4.6: Schematische Aufsicht auf ein gaseitiges Modulendstück.

und damit eine Erhöhung der Oberflächenspannung. Diese Behandlung wird in einer industriellen Anlage⁸ durchgeführt. Dabei wird das mit einem Fluss von 300 ml/min in eine vorher auf 0.5 mbar evakuierte Reaktionskammer, in der sich auch die Kunststoffbauteile befinden, einströmende Sauerstoffgas mit Mikrowellen der Frequenz 2.45 GHz in ein Plasma umgewandelt (Leistungsaufnahme des Mikrowellengenerators: 850 W)[64].

Im Sauerstoffplasma werden in großer Anzahl atomarer Sauerstoff oder energetisch angeregte Sauerstoffmoleküle sowie Plasma-UV-Strahlung gebildet [62]. Die Sauerstoffatome sind in der Lage die Bindungsenergien der aus Kohlenwasserstoffketten bestehenden Kunststoffe zu überwinden und diese Ketten aufzubrechen. Der Einbau der im Gasraum gebildeten chemisch aktiven Teilchen erfolgt auf der gesamten Oberfläche, da die Teilchen zum größten Teil elektrisch neutral sind, ungerichtet auftreffen und an alle Oberflächenbereiche auch komplexer Geometrie diffundieren können. Dabei können funktionelle Gruppen wie Hydroxyl- (OH), Carbonyl- ($\text{C} = \text{O}$) oder Carboxylgruppen (COO) in die Oberfläche eingebaut werden oder aber auch Polymerketten durch Radikalbildung aufgrund der UV-Strahlung untereinander vernetzt werden [63]. Beide chemischen Prozesse führen zu einer Verbesserung der Adhäsionsfestigkeit von Kunststoffbauteil und Kleber. Nach 20 minütiger Plasmavorbehandlung ließ sich eine Erhöhung der Oberflächenspannung der Bauteile, gemessen mit einer Testflüssigkeit⁹, von 45 mN/m auf $60 - 65 \text{ mN/m}$ erreichen. Diese kann über einen vierwöchigen Zeitraum, in dem die Bauteile verarbeitet werden, aufrechterhalten werden.

In einem weiteren vorbereitenden Schritt werden die vorher an den Klebungsstellen silikatisierten Edelstahlröhrchen für den Gaseinlass und Auslass mit den Polycarbonat-Rohradaptern sowie die 16 Zentrierstücke mit der Polyimid-Dichtung und dem Endstück mit einem Epoxidharz¹⁰ verklebt (siehe Abbildung 4.7 a)). Dieses ebenfalls weltraumtaugliche Epoxidharz erreicht nach einer Härtungsdauer von 3 h bei 50°C eine ausreichende Zugscherfestigkeit [65]. Nach dem Anbringen der beiden

⁸Fa. TC-Kleben: Microwave Plasma System 400, Fa. TePla AG

⁹Fa. Arcotec: Quicktest 38

¹⁰Araldit AW134/HY991, Fa. Ciba-Geigy

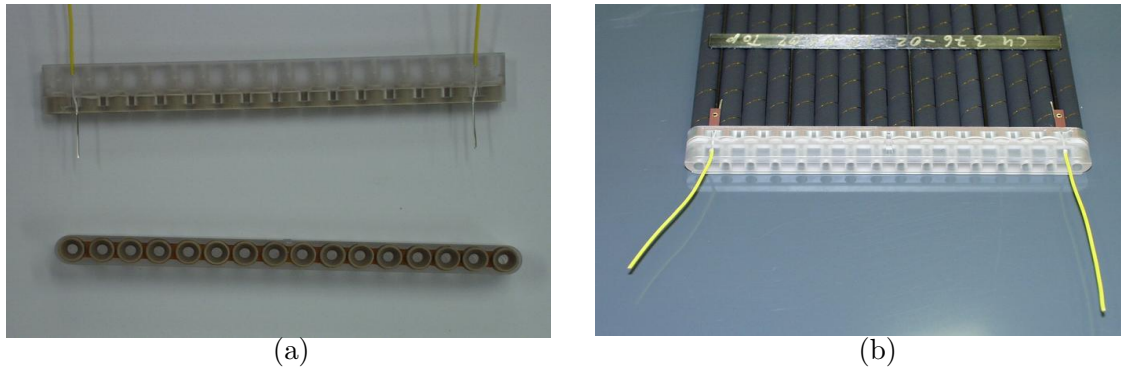


Abbildung 4.7: a) Auf- und Seitenansicht eines vorbereiteten Modul-Endstückes; b) Verklebung der Endstücke mit einem Straw-Modul.

Erdungsfolien am Kammerkörper werden dann die vorbereiteten Endstücke an der Gasversorgungsseite und der Ausleseseite aufgesteckt und mit obigem Epoxidharz verklebt (siehe Abbildung 4.7 b)), wobei die Klebung in speziell angeordneten Heizungen bei 50°C aushärtet. Zuvor werden die zwei Verbindungskabel zwischen der Erdungsfolie und der später angelöteten UTE-Platine im Endstück eingefädelt und mit den Erdungslaschen der Folie verlötet.

Der nächste Schritt in der Herstellung der Kammermodule ist das Spannen und Befestigen der Anodendrähte in den einzelnen Straws. Dabei wird der $30\ \mu\text{m}$ dicke vergoldete Wolframdraht mit Preßluft in die Straws eingefädelt und an den Endstücken des Modules mit Kupfer-Tellurstücken (1.5 % Tellur) unter einer auf den Draht einwirkenden Kraft von $1\ \text{N}$ befestigt. Die hierzu verwendete Krimptechnik als Verbindung zwischen den Wolframdrähten und den Kupfer-Tellurstücken wurde am I. Physikalischen Institut¹¹ zur Produktion des L3 Hadron-Kalorimeters und der L3 Myonkammern entwickelt[68]. Nach dem Krimpen wird jedes einzelne Kupfer-Tellurstück mit einem Tropfen eines ebenfalls weltraumtauglichen Hysol-Klebers¹² fixiert.

Nachdem ein Modul erste Teststände zur Bestimmung der Drahtspannung und der HV-Festigkeit durchlaufen hat (siehe auch Abschnitt 5.4.1), werden die UTE-Platine an der Ausleseseite an die Kupfer-Tellurstücke und das Verbindungskabel zwischen Erdungsfolie und Platine angelötet und die Lötstellen gereinigt. Zusammen mit den vorbereiteten Edelstahlröhrchen für Gasein- und Auslass wird das gesamte Modul an beiden Endstücken nacheinander, im zeitlichen Abstand der Aushärtezeit, mit einem Epoxidharz¹³ gasdicht vergossen. Aufgrund der dünnen Klebungsschicht an der Modulunterseite befindet sich dort eine weitere Nut, in der Kleber einlaufen kann. Dabei ergibt sich eine Klebungsnahat ähnlicher Stärke wie an der Moduloberseite. In einem letzten Arbeitsschritt werden dann die Lötstellen mit dem Hysol-Kleber hochspannungsfest verklebt. Nach dem hier beschriebenen Verfahren lassen sich nach einwöchiger Vorlaufzeit unter optimalen Bedingungen zwei gasdichte Straw-Module pro Arbeitstag mit einer durch die Klebungen und das Anbringen der End- und Kupfer-Tellur-Stücke bedingten mechanischen Toleranz von $< 100\ \mu\text{m}$ bauen.

¹¹RWTH Aachen

¹²Hysol EA 934NA, Fa. Loctite Aerospace

¹³Araldit AW134/HY991, Fa. Ciba-Geigy

4.2 Straw-Module: Messung der Gasdichtigkeit von Einzelkomponenten

Von entscheidender Bedeutung für den dreijährigen Betrieb des TRDs auf der ISS bei einem begrenzten Gasvorrat von 8100 l Xenon und 2000 l CO_2 sind die Weltraumtauglichkeitsuntersuchungen zur Gasdichtigkeit der einzelnen Proportionalkammer-Röhrchen. Der aus dem voraussichtlichen Betriebsdruck des Gasgemisches in den Straws von $p_{TRD} \approx 1013 \text{ mbar}$ gegenüber Vakuum im Außenraum resultierende Gradient des Gasdruckes über die 72 μm dicken Straw-Wände, führt zu einer ständigen Permeation des Gases durch die Wände, auch wenn diese mechanisch unbeschädigt sind. Die Röhrchenwände können dabei als mehrschichtige Membran aufgefaßt werden. Es ist daher notwendig, die Permeation des Xe/CO_2 -Gasgemisches sowie von Helium als Prüfgas durch die Wände der Röhrchen quantitativ zu bestimmen.

Die Permeation beruht auf den physikalischen Vorgängen der Sorption des zu untersuchenden Gases in den verschiedenen Membranschichten und der Diffusion durch die Grenzflächen zwischen den jeweiligen Schichten sowie den Schichten und dem Außenraum. Die im folgenden zur Messung des Gasverlustes in den Straws benutzte Größe, die Leckrate q_0 ist definiert als $q_0 = \left| \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} \right|$ und beschreibt die pro Zeiteinheit durch eine definierte Fläche der Membran transportierte Stoffmenge. Die Umrechnung der Größe $p \cdot V$ in eine Teilchenzahl erfolgt nach der Idealgasgleichung $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ($R = 8.31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$). Da ein Unterschied in der Geschwindigkeit des Diffusionsvorganges für Xenon und CO_2 aufgrund des großen Masseunterschiedes und der unterschiedlichen Stoßquerschnitte zu erwarten ist, werden die Leckraten der Komponenten des Gemisches einzeln, mit Hilfe eines Massenspektrometers ermittelt.

4.2.1 Diffusion durch eine Membran

In diesem Abschnitt soll einer kurzer Überblick über die Diffusionsphänomene eines Gases durch eine dünne, einschichtige Membran gegeben werden. Da die für die Straws verwendete Membran aus 7 verschiedenen, in ihren Diffusionseigenschaften unterschiedlichen Materialschichten aufgebaut ist, und zudem eine Wickelgeometrie aufweist, die zu einer ortsabhängigen Diffusion führt, ist es nicht möglich, die Permeation bzw. Diffusion allein mit numerischen Methoden zu erfassen. Im Folgenden

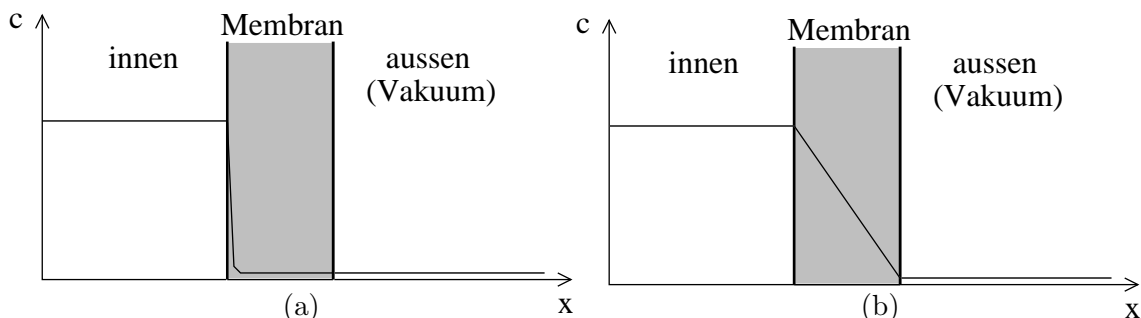


Abbildung 4.8: Gaskonzentration a) zu Beginn des Diffusionsvorganges, b) im stationären Zustand.

wird daher nur soweit auf die zugrundeliegende Diffusionstheorie eingegangen, wie sie später für das Verständnis der Messungen notwendig ist (siehe auch [85], [86]).

Die Grundlage der Diffusionstheorie bilden die beiden Fick'schen Gesetze. Nach dem 1. Fick'schen Gesetz ist der Gasfluß J ¹⁴ durch eine dünne Membran proportional zum Konzentrationsgefälle¹⁵:

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (4.1)$$

mit der Diffusionskonstante D ¹⁶. Diese ist sowohl abhängig von der Beschaffenheit der Membran als auch vom Gas und bestimmt die Geschwindigkeit des Diffusionsvorganges. Zusammen mit der Kontinuitätsgleichung der Konzentration

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -div J \quad (4.2)$$

ergibt sich das 2. Fick'sche Gesetz, die sogenannte Diffusionsgleichung (siehe Anhang A.2.1):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (4.3)$$

In Abbildung 4.8 ist der Konzentrationsverlauf über einer Membran zu Beginn eines Diffusionsvorganges und nach Erreichen eines stationären Zustandes dargestellt. Zu Beginn der Diffusion strömt das Gas an der Innenseite der Membran aufgrund des großen Konzentrationsgefälles mit hoher Rate in die Membran hinein. Der Gasverlust und damit auch die Leckrate im Innenvolumen ist hoch, wohingegen der Gasfluß in das äußere, evakuierte Volumen klein ist. Setzt man die Anfangsbedingungen $c_{Innen} = c_I$, $c_{Außen} = 0$ und $c_{Wand} = c_W = 0$ in die Diffusionsgleichung 4.3 ein, so ergibt sich die zeitliche Änderung der Konzentration c_g an der Außenseite (Herleitung: siehe Anhang A.2.1 und A.2.2):

$$\frac{dc_g}{dt} = k_1 + k_2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 \cdot D \cdot t} \quad (4.4)$$

mit den Parametern k_1 und k_2 , die Funktionen von D , c_I und der Dicke d bzw. der Fläche A der Membran sind. Nach einiger Zeit stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der dadurch gekennzeichnet ist, daß gleichviel Gas von innen in die Membran hineindiffundiert, wie außen ins Vakuum abfließt. Dabei ist das äußere Volumen in der Regel so groß, daß auch bei Erreichen des stationären Zustandes die Konzentration des Gases im Außenraum vernachlässigbar klein bleibt. Bei einer konzentrationsunabhängigen Diffusionskonstanten beschreibt der Konzentrationsverlauf in der Membran dann eine Gerade (siehe auch Anhang A.2.1, Gleichung A.12).

Aufgrund der Proportionalität der Konzentration des Gases c_g zu seinem Druck p , kann in der obigen Beziehung in gleicher Weise p verwendet werden. Aus der Mes-

¹⁴ $[J] = \frac{\text{Teilchen}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}$

¹⁵Konzentration $c = \frac{\text{Teilchen}}{\text{Volumen}}$, $[c] = \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$

¹⁶ $[D] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

sung des Druckanstieges in dem anfänglich evakuierten, äußeren Volumen läßt sich die Diffusionskonstante nach der sogenannten Time-Lag-Methode berechnen. Dabei besteht folgender Zusammenhang zwischen dem Schnittpunkt L einer bei Erreichen des stationären Zustandes, an die Druckkurve angepaßten Asymptoten mit der Zeitachse, auch Zeitverzögerung genannt, und der Diffusionskonstanten D :

$$D \approx \frac{d^2}{6 \cdot L} \quad (4.5)$$

4.2.2 Aufbau eines Langzeitmeßstandes zur Bestimmung der Gasdichtigkeit der Straws

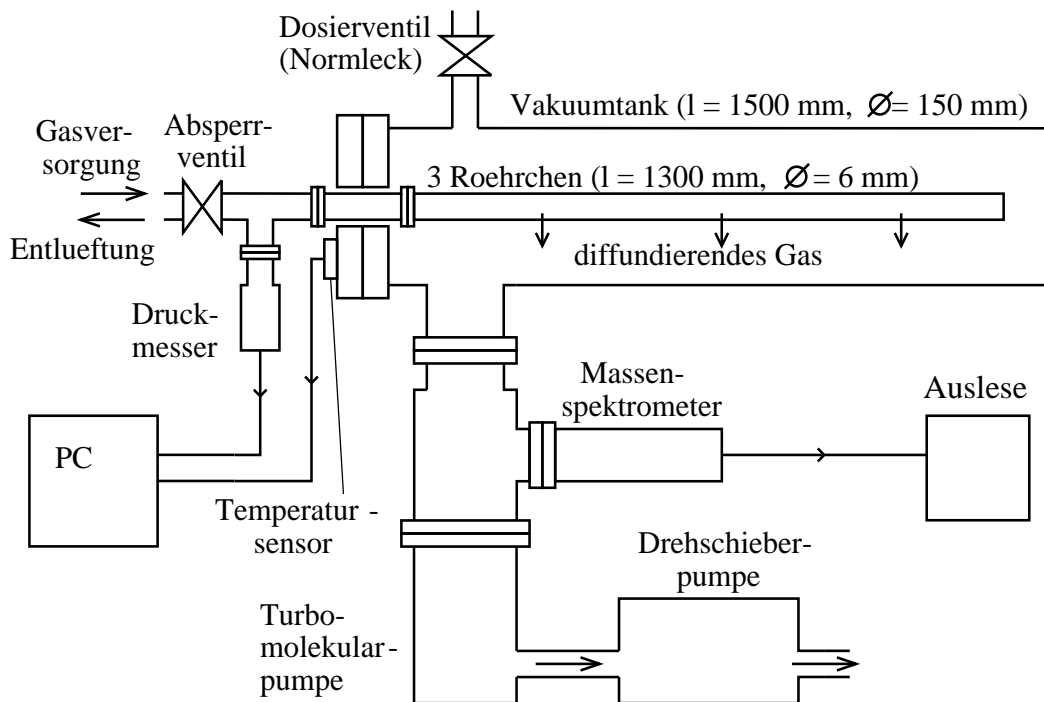


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Langzeitmeßstandes.

Die Langzeitmessungen zur Bestimmung der Gasdichtigkeit werden an drei 1.3 m langen Straws durchgeführt, die parallel zueinander angeordnet sind und von einer Stirnseite über ein hochvakuumtaugliches Gasversorgungssystem mit Gas befüllt werden können. Um sicherzustellen, daß das Gas in den Röhren nur durch die Wände entweichen kann, werden an der anderen Stirnseite anstelle der Polycarbonat-Endstücke metallische Verschlußstopfen eingefügt und verklebt. Das Innenvolumen von Straws und Gasversorgungssystem beträgt $V = (161.8 \pm 0.7) \text{ cm}^3$. Diese Vorrichtung wird in einem 1.5 m langem Vakuumentank mit einem Durchmesser von 15 cm positioniert, der mit Hilfe einer Turbomolekularpumpe mit einem nominellen Saugvermögen von $150 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ auf ein Endvakuum von $1 - 2 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$ evakuiert werden kann. Das durch die Bauart der Anlage bestimmte, am Vakuumbehälter wirksame,

effektive Saugvermögen S_{eff} konnte durch Verwendung eines Normlecks in Form eines Dosierventils zu $S_{eff} = (40 \pm 2) \frac{l}{s}$ bestimmt werden.

Zur Messung des temperaturkorrigierten Innendruckes in den Straws befindet sich im Gasversorgungssystem ein elektronischer Druckmesser (Auflösungsvermögen: 0.7 mbar) sowie ein Temperatursensor (Auflösungsvermögen: 0.03°C). Zusätzlich ist am Vakuumtank ein kalibriertes Quadrupol-Massenspektrometer angebracht, mit dem die Gaszusammensetzung außerhalb der Straws untersucht wird. Der genaue Aufbau der Apparatur ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise eines Quadrupol-Massenspektrometers sowie einer Turbomolekularpumpe sei auf die Literatur verwiesen [87], [88].

4.2.3 Meßmethoden: Druckabfall- und Massenspektrometermessungen

Im folgenden werden die beiden Meßmethoden zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von drei 1.3 m langen Straws erläutert, sowie die Messergebnisse mit einem $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch und Prüfgasen (CO_2 , He) vorgestellt. Zur besseren Übersicht sind in Tabelle 4.1 die mit den verschiedenen Prüfgasen in den Straws bzw. Endstücken (siehe nächsten Abschnitt) gegen Luft bzw. Vakuum gemessenen Leckraten aufgeführt. Die Bestimmung der Gasdichtigkeit nach der Druckabfallmethode wird im übrigen auch in verschiedenen Testständen während der Produktion der Kammermodule eingesetzt und daher schon hier für alle weiteren Messungen exemplarisch beschrieben.

Druckabfallmethode:

Die Druckabfallmethode ist eine integrale Meßmethode zur Bestimmung der Gasdichtigkeit, bei der der zeitliche Verlauf des Druckes im Innern der Straws gemessen wird. Für den durch Diffusion der Gase durch die Straw-Wände hervorgerufenen Druckabfall ergibt sich:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{a} \cdot p. \quad (4.6)$$

mit dem Druckverlust $\frac{dp}{dt}$, sowie dem absoluten Gasdruck p innerhalb der Straws (unter Vernachlässigung des Partialdruckes des Gases außerhalb der Straws gegenüber dem Innendruck p). Durch Integration erhält man für den Druck p :

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{t}{a}}. \quad (4.7)$$

mit der Zeitkonstanten des exponentiellen Druckabfalls a und dem Anfangsdruck p_0 . Da der Meßaufbau täglichen Temperaturschwankungen von durchschnittlich 1°C unterliegt, wird der Druck p mit Hilfe der gemessenen Temperatur T auf Standardtemperatur ($T_0 = 293.16 \text{ K}$) normiert:

$$p_{norm} = \frac{p \cdot T_0}{T} \quad (4.8)$$

Im Anschluß daran wird eine Exponentialfunktion zur Ermittlung der Zeitkonstanten an die normierten Druckwerte angepaßt. Bei einem konstanten Innenvolumen V der Röhren ergibt sich dann für die Leckrate:

$$q_0 = \left| \frac{\Delta(p_{norm} \cdot V)}{\Delta t} \right| = \left| V \cdot \frac{\Delta(p_{norm})}{\Delta t} \right| = \left| V \cdot \frac{dp_{norm}}{dt} \right| \quad (4.9)$$

Mit Gleichung 4.6 erhält man somit:

$$q_0 = V \cdot \frac{1}{a} \cdot p_{norm} \quad (4.10)$$

bzw. nach der Normierung der Leckrate q auf den voraussichtlichen Betriebsdruck im TRD von $p_{TRD} = 1013 \text{ mbar}$:

$$q = \frac{V \cdot p_{TRD}}{a}. \quad (4.11)$$

In Abbildung 4.10 a) ist die Druckabfallmessung mit Xe/CO_2 sowie der Temperaturverlauf in einem Zeitraum von 1400 h dargestellt. Die Druckkurve zeigt deutlich eine Abnahme der Steigung in den ersten 200 h, was auf eine Anreicherung des Gasgemisches in den Straw-Wänden zurückzuführen ist, und nicht etwa auf den Einfluß der Exponentialfunktion Gleichung 4.7, die nach dem oben beschriebenen Diffusionsvorgang den stationären Zustand beschreiben würde. Da sich der Gasdruck in den Straws in dem betrachteten Zeitraum um $\frac{\Delta p}{p} \approx 10 \%$ ändert, wird der stationäre Zustand auch nur näherungsweise erreicht.

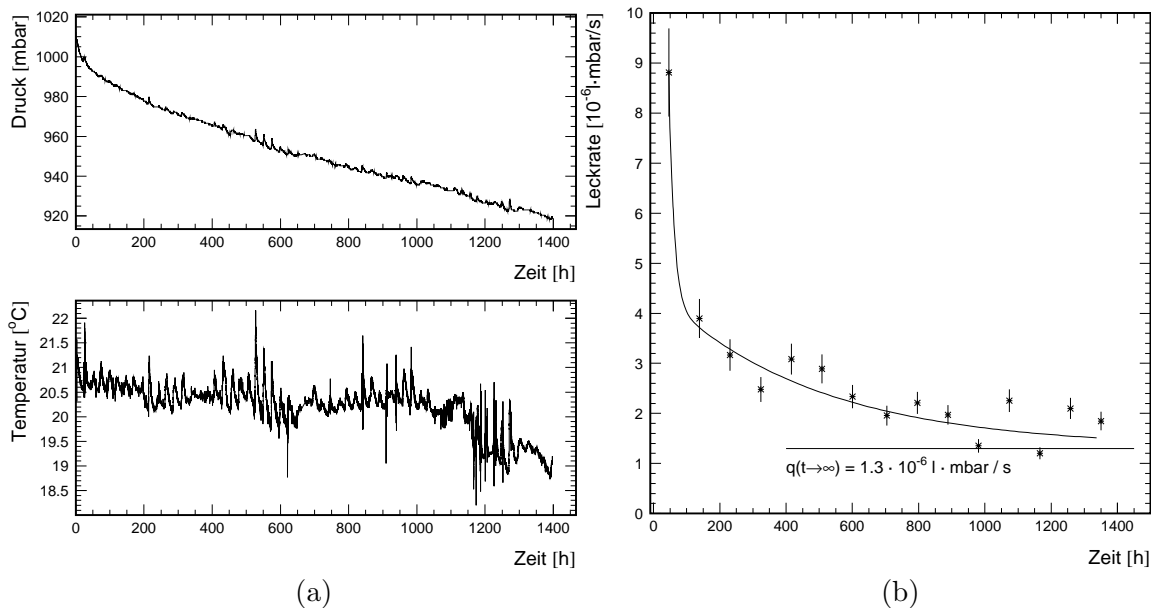


Abbildung 4.10: Druckabfallmessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von drei 1.3 m langen Straws mit $Xe/CO_2(80 : 20)$ a) Druck- und Temperaturverlauf; b) Zeitliche Änderung der Leckrate [101].

Nach einer Normierung des Druckes auf 20°C , um die täglichen Temperaturschwankungen zu eliminieren, wird der Gesamtzeitraum der Messung in 15 gleichlange Zeitintervalle aufgeteilt und für jedes dieser Intervalle eine Exponentialfunktion an den Druckverlauf angepaßt. Daraus läßt sich dann die in Abbildung 4.10 b) dargestellte, zeitliche Änderung der Leckrate bestimmen. Der Fehler der Leckrate konnte aus dem Vergleich mehrerer Messungen auf $\approx 10\%$ abgeschätzt werden.

Die Extrapolation für $t \rightarrow \infty$ erfolgt näherungsweise in Anlehnung an das im Anhang A.2.3 beschriebene Verhalten durch die Anpassung einer Summe von zwei Exponentialfunktionen

$$q(t) = k'_1 + k'_2 \cdot e^{-\frac{t}{k'_3}} + k'_4 \cdot e^{-\frac{t}{k'_5}} \quad (4.12)$$

mit den an die Meßpunkte angepaßten Parametern k'_1 bis k'_5 . Die integrale Leckrate für das Xe/CO_2 -Gasgemisch im stationären Zustand ergibt sich dann zu [101]

$$k'_1 = q_{S,Xe/CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (1.3 \pm 0.6) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.13)$$

An dieser Stelle sei schon darauf hingewiesen, daß eine derartige Gasdichtigkeitsbestimmung mit Xe/CO_2 für alle späteren Messungen während der Serienproduktion der Kammermodule ungeeignet ist, da sich die Leckrate erst nach $\sim 1000 h$ der Leckrate im stationären Zustand nähert. Da auch die Zeitkonstanten a im Bereich von mehreren $1000 h$ liegen, wird für alle weiteren Messungen nach der Druckabfallmethode folgende Näherung gemacht (siehe Gleichung 4.7):

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{t}{a}} \approx p_0 \left(1 - \frac{t}{a}\right) \quad \text{für } \frac{t}{a} \ll 1 \quad (4.14)$$

d.h. zur Bestimmung der Zeitkonstanten a wird eine lineare Regression der Meßdaten durchgeführt und aus der Steigung der Geraden die Leckrate berechnet.

Massenspektrometer-Methode:

Bei der Massenspektrometer-Methode wird die Gasdichtigkeit der Straws über den Partialdruck des diffundierenden Gases im Vakuumtank, also außerhalb der Straws, bestimmt. Für das Xe/CO_2 -Gasgemisch ermöglicht dieses Verfahren im Gegensatz zur Druckabfallmessung die separate Messung der Leckraten der Gaskomponenten. Diese Methode wird im übrigen auch bei den Langzeitmessungen an Kammerprototypen angewendet, die am Ende dieses Kapitels vorgestellt werden.

Bei dem Betrieb einer Turbomolekularpumpe am Vakuumtank stellt sich im Tank ein Druckgleichgewicht p ein, das wie folgt mit der zu bestimmenden Leckrate des Gases q_0 und dem Saugvermögen der Pumpe S_V ($[S_V] = \frac{l}{s}$) zusammenhängt [89]:

$$q_0 = S_V \cdot p \quad (4.15)$$

Der Druck p ist dabei nicht der Gesamtdruck im Tank, sondern der Partialdruck des jeweiligen Gases, das durch die Straw-Wände diffundiert. Dieser läßt sich aus den vom Massenspektrometer gelieferten Partialionenstrom I_P über den entsprechenden

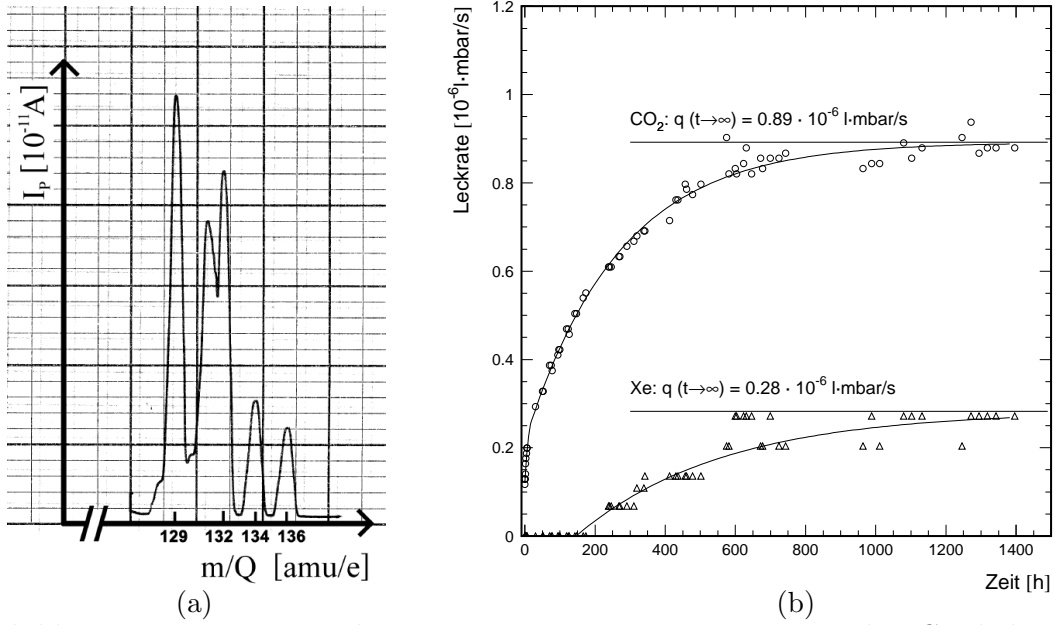


Abbildung 4.11: Massenspektrometermessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von drei 1.3 m langen Straws mit $Xe/CO_2(80 : 20)$ a) Isotopenspektrum des Xenons bei einem Partialdruck von $1.4 \cdot 10^{-5}$ mbar; b) Zeitliche Änderung der Leckrate von 1 atm Xe/CO_2 [101].

gasartspezifischen Kalibrationsfaktor berechnen. Im Gegensatz zu allen anderen hier verwendeten Gasen liefert das Massenspektrometer für Xenon ein Isotopenspektrum mit mehreren Linien ähnlicher Stärke, aber konstanter relativer Höhe, wie es in Abb. 4.11 a) zu sehen ist. Da die Linie bei der Massezahl 129 amu am deutlichsten zu identifizieren ist, werden alle weiteren Messungen auf diese Linie bezogen. Die Kalibration des Massenspektrometers erfolgt dann mit einem am Vakuumtank angebrachten Dosierventil, über das ein bekannter Xe -Gasstrom in den Tank eingestellt wird. Für den sich nach Gleichung 4.15 einstellenden Gleichgewichtsdruck p_p wird der Partialionenstrom I_P der Masselinie 129 amu gemessen. Durch Variation des Gasstromes läßt sich eine gasartspezifische Kalibration des Massenspektrometers vornehmen.

Nach einer Normierung des Partialdrucks im Vakuumtank auf Standardtemperatur und der Leckrate q auf Standarddruck im Innern der Straws erhält man in Abhängigkeit von der Zeit den in Abbildung 4.11 b) dargestellten Verlauf. Die Leckrate steigt nach dem Einfüllen des Gases in die Straws deutlich an und nähert sich zum Ende der Messung dem stationären Zustand. Die Extrapolation für $t \rightarrow \infty$ erfolgt, wie schon bei der Druckabfallmethode, durch die Anpassung einer Summe von zwei Exponentialfunktionen (siehe Anhang A.2.3, Abb. A.5 und A.6):

$$q(t) = k_1'' + k_2'' \cdot e^{-\frac{t}{k_3''}} + k_4'' \cdot e^{-\frac{t}{k_5''}} \quad (4.16)$$

Die Asymptoten für $t \rightarrow \infty$ der jeweiligen Gaskomponente sind in das Diagramm eingetragen (siehe auch Tabelle 4.1) [101]:

$$q_{S,80\%Xe(V)}(t \rightarrow \infty) = (0.28 \pm 0.04) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s} \quad (4.17)$$

$$q_{S,20\%CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (0.89 \pm 0.11) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.18)$$

Als Summe für das Xe/CO_2 -Gasgemisch erhält man in Übereinstimmung mit dem Wert aus der Druckabfallmessung (siehe Gl. 4.13) (siehe auch Tab. 4.1) [101]:

$$q_{S,Xe/CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (1.17 \pm 0.15) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.19)$$

Der Fehler der Messung ist dominiert durch die Summe der relativen Fehler von S_V (5 %) und der Kalibrationsfaktoren (~ 6 %). Die Fehler der Funktionsanpassung (Xe : 3.6 %, CO_2 : 1.0 %) sind dagegen vergleichsweise klein.

Anhand der Massenspektrometermessung wird deutlich, daß bei einem Gesamtvorrat von 8100 l Xe und 2000 l CO_2 und einer gesamten Straw-Länge von ~ 8000 m im AMS-02-TRD die für Xe ermittelte Leckrate pro Meter Straw-Länge m_S um einen Faktor $SF_{Xe}^* = 165 \pm 24$ und die für CO_2 ermittelte Leckrate um einen Faktor $SF_{CO_2}^* = 12.9 \pm 1.6$ geringer ist, als die maximal zulässigen Leckraten (Xe : $1.2 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m_S}$; CO_2 : $2.9 \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m_S}$). Das Diffusionsverhalten der CO_2 -Gaskomponente dominiert die integrale Leckrate, obwohl der Partialdruck von ca. 200 mbar im Vergleich zum Xe nur $\frac{1}{4}$ so hoch ist. Auf gleiche Partialdrücke von 1 atm umgerechnet, ergibt sich für CO_2 eine Leckrate von $4.5 \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$ und für Xe $0.35 \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$, also ein Leckratenverhältnis von CO_2 zu Xe von 13 : 1. Dieses Diffusionsverhalten erfordert die ständige Überwachung des Mischungsverhältnisses der Gase im TRD-Volumen, wie es in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurde.

Die Diffusionskonstanten D bzw. die Zeitverzögerungen L für Xe und CO_2 lassen sich durch Integration der Funktion 4.16 über t bestimmen. Die daraus resultierende, durch die Straw-Wände diffundierende Xe - bzw. CO_2 -Gasmenge ist aufgrund des konstanten Innenvolumens der Straws proportional zum Partialdruck p des jeweiligen Gases im Innern der Straws. Zusammen mit der Anfangsbedingung $\int q(t) = 0$ für $t = 0$ ergibt sich:

$$\int q(t) = k_1'' \cdot t + k_2'' \cdot k_3'' \cdot (e^{-\frac{t}{k_3''}} - 1) - k_4'' \cdot k_5'' \cdot (e^{-\frac{t}{k_5''}} + 1) \quad (4.20)$$

mit den Parametern k_1'' bis k_5'' aus Gleichung 4.16 (siehe Anhang A.2.3, Abb. A.5 und A.6).

Aus dem Schnittpunkt der errechneten Asymptoten mit der Zeitachse erhält man die in Abbildung 4.12 dargestellten Zeitverzögerungen für Xe von 592 h und für CO_2 von 203 h. Es erfordert demnach eine Meßzeit von einigen 100 h um eine endgültige Aussage über die Leckrate von Xe durch die Wände des Straw-Materials treffen zu können. Mit CO_2 läßt sich evtl. schon nach kürzeren Messungen durch Extrapolation der Meßdaten die Leckrate im stationären Zustand bestimmen. Für die Diffusionskonstanten D ergibt sich nach Gleichung 4.5 (CO_2 : siehe Anhang A.2.3):

$$\begin{aligned} Xe: \quad D &= 4.054 \cdot 10^{-16} \frac{m^2}{s} \\ CO_2: \quad D &= 1.182 \cdot 10^{-15} \frac{m^2}{s} \end{aligned}$$

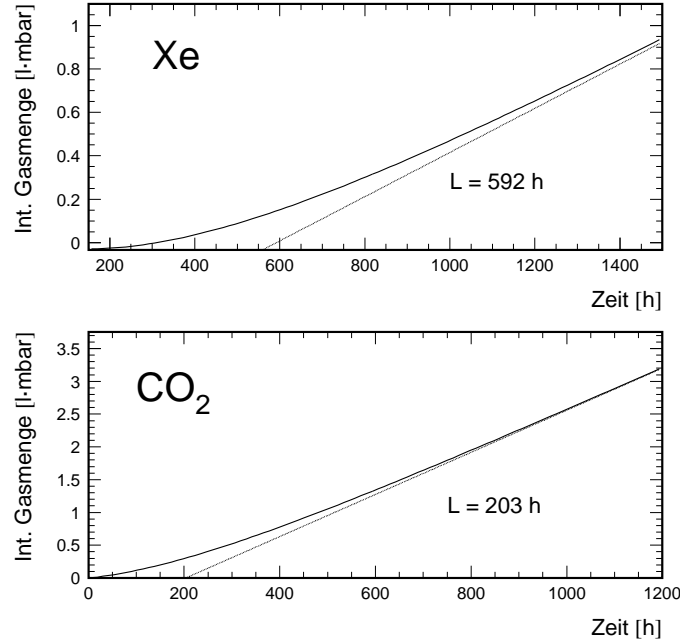


Abbildung 4.12: Bestimmung der Zeitverzögerungen für Xe und CO_2 [101].

Messungen mit Prüfgasen:

1. CO_2 :

Aufgrund des für den dreijährigen Betrieb des TRDs auf der ISS kritischen CO_2 -Diffusionsverhaltens wird es während der Serienproduktion der Straw-Module notwendig sein, die CO_2 -Leckrate der einzelnen Module im Vakuum mit einem entsprechenden Prüfgas zu bestimmen.

Bei der in Kapitel 5.4.1 dieser Arbeit beschriebenen Serienproduktion wird aus technischen Überlegungen die Druckabfallmethode zur Bestimmung der Leckrate von CO_2 bevorzugt. Da diese integrale Meßmethode bei den oben angeführten Messungen mit Xe/CO_2 und den drei 1.3 m langen Straws keine separaten Ergebnisse für die beiden Gaskomponenten liefert, wird die Messung mit 1 atm reinem CO_2 in den Straws über einen Zeitraum von 250 h wiederholt. Die zeitliche Änderung der Leckrate ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Durch Extrapolation ergibt sich für die Leckrate von 1 atm CO_2 im stationären Zustand [101]:

$$q_{S,CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (7.7 \pm 4.4) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.21)$$

Eine gleichzeitig durchgeführte Bestimmung der Leckrate nach der Massenspektrometernmethode liefert $q(t \rightarrow \infty) = (4.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$ im stationären Zustand. Der gewichtete Mittelwert der beiden Ergebnisse beträgt (siehe auch Tab. 4.1) [101]:

$$\overline{q_{S,CO_2(V)}}(t \rightarrow \infty) = (5.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s} \quad (4.22)$$

in guter Übereinstimmung mit der Xe/CO_2 -Massenspektrometernmessung (siehe Angabe 4.19: $5 \cdot q_{S,20\%CO_2(V)}$). Die ermittelte CO_2 -Leckrate liegt damit einen Faktor

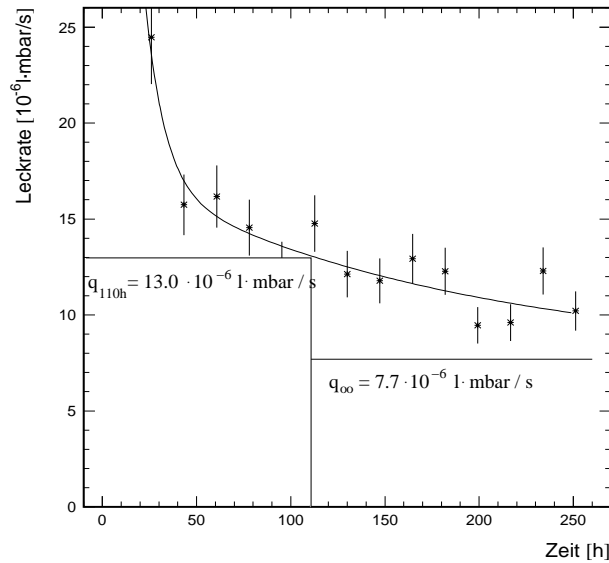


Abbildung 4.13: Druckabfallmessung mit 1 atm reinem CO_2 zur Bestimmung der Leckrate von drei 1.3 m langen Straws.

$SF_{\text{CO}_2}^* = 11.3 \pm 0.9$ unterhalb der maximal zulässigen Leckrate. Zur Reduzierung der Meßzeit werden die CO_2 -Messungen der zu Beginn der Serienproduktion gefertigten Straw-Module nach 110 h abgebrochen, d.h. in einem Zeitintervall um 110 h wird die Leckrate durch Anpassung einer Geraden an die Druckwerte nach dem in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Verfahren bestimmt. Aus dem Verlauf der Kurve wird sichtbar, daß alle gemessenen Leckraten mit einem Faktor $f_{\infty} = 1.69$ korrigiert werden müssen, um die Leckrate von CO_2 im stationären Zustand zu erhalten.

2. Helium:

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Messungen der Leckrate betreffen nur die Diffusion der TRD-Gaskomponenten durch die Straw-Wände, die sich durch große Zeitverzögerungen auszeichnen. Darüber hinaus können aber auch evtl. vorhandene makroskopische Punktlecks im Straw-Material bzw. in den Klebenähten der Modulendstücke zur Leckrate beitragen. Um die Gasdichtigkeit des Straw-Materials bzw. der Straw-Module während der Serienproduktion zu bestimmen, wird demnach ein weiteres Prüfgas benötigt, dessen Leckrate schon nach wenigen Stunden den stationären Zustand der Diffusion erreicht und dessen Diffusionsverhalten dem der TRD-Gaskomponenten ähnelt. Für diese Kurzzeitmessungen bietet sich Helium an, das aufgrund seines geringen Atomgewichtes eine hohe Diffusionsrate besitzt. Hier sei angemerkt, daß die oben beschriebenen, verkürzten Messungen mit CO_2 als Prüfgas und die Voruntersuchungen mit Helium später an jedem produzierten Modul durchzuführen sind (siehe Abschnitt 5.4.4).

In Abbildung 4.14 ist die zeitliche Änderung der Leckrate für ca. 1 atm He in den drei 1.3 m langen Straws gegen Vakuum, gemessen nach der Massenspektrometer-Methode, dargestellt. Dabei erreicht die Leckrate schon nach ca. 4 h den stationären Zustand der Diffusion. Da kein Gasgemisch vorliegt, wird zur Ermittlung des Zahlenwertes der Leckrate der Röhren, wie bei der späteren Serienproduktion der

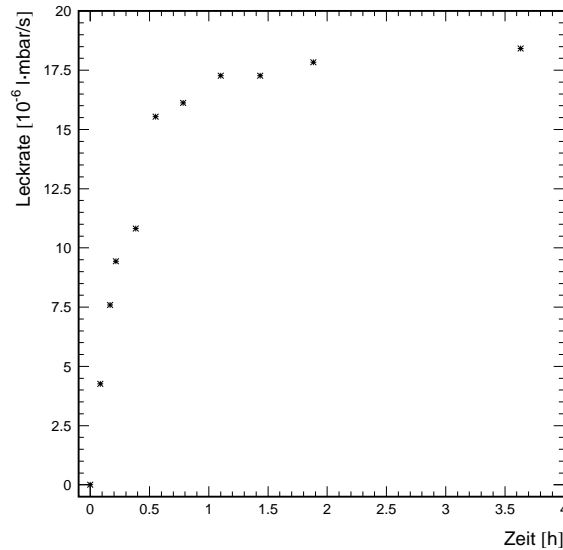


Abbildung 4.14: Zeitliche Änderung der Leckrate für 1 atm Helium in den drei 1.3 m langen Straws.

Module, nur die Druckabfallmessung herangezogen. Dazu wird eine Gerade an die temperaturkorrigierten Druckwerte angepaßt, aus deren Steigung dann die Leckrate berechnet werden kann. Eine Auftragung der zeitlichen Änderung der Leckrate ist hierbei nicht möglich, da der stationäre Zustand relativ schnell erreicht wird. Die so ermittelte Leckrate der drei Straws liegt bei (siehe auch Tabelle 4.1) [101]

$$q_{S,He(V)} = (20.0 \pm 2.0) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s} \quad (4.23)$$

und somit einen Faktor ~ 4 oberhalb der mit CO_2 in den Straws gegen Vakuum gemessenen Leckrate (siehe Angabe 4.22).

Neben der Bestimmung der Gasdichtigkeit der Straw-Module durch Messung der Leckrate von Helium gegen Vakuum wird in weiteren Voruntersuchungen die Leckrate von Helium mit Luft im Außenraum ermittelt. Die Gründe hierfür liegen in einem vereinfachten Aufbau der Versuchsanordnungen und der direkten Zugänglichkeit zu den Modulen auch während der Messung. Um das Diffusionsverhalten des Straw-Materials in einer Vakuumumgebung und unter Atmosphärendruck zu untersuchen, wurden Messungen zur Bestimmung der Leckrate nach der Druckabfallmethode mit den drei 1.3 m langen Straws bei verschiedenen Helium-Innendrüken durchgeführt. Das Ergebnis dieser Messungen, mit den nach dem 1. Fick'schen Gesetz an die Meßpunkte angepaßten Geraden, ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die ermittelten Leckraten wurden dabei nicht auf Standarddruck korrigiert. Der Fehler der Einzelmessung konnte zu $\pm 2 \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$ abgeschätzt werden. Zu erkennen ist das unterschiedliche Diffusionsverhalten bei den Messungen gegen Vakuum bzw. gegen Luft, das sich in den unterschiedlichen Steigungsfaktoren der Geraden ausdrückt (Vakuummessung: $(1.89 \pm 0.14) \cdot 10^{-8} \frac{l}{s}$, Messung gegen Luft: $(1.08 \pm 0.11) \cdot 10^{-8} \frac{l}{s}$).

Die kleineren Leckraten bei der Messung unter Atmosphärendruck lassen sich durch eine Rückdiffusion der Luftbestandteile, und hier vor allem O_2 , in das Innenvolumen der Straws erklären. Die Entstehung von zusätzlichen Poren in der Polyurethanschicht der Straw-Kompositmembran bei hohen Innendrüken von ~ 2.7 bar

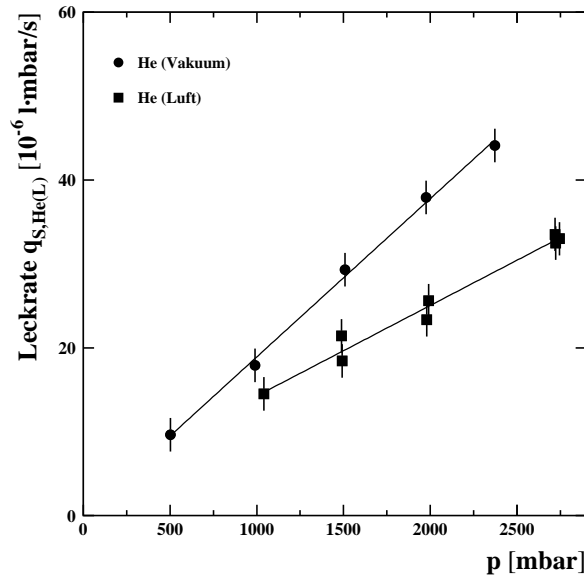


Abbildung 4.15: Druckabhängigkeit der Leckrate für Helium in den drei 1.3 m langen Straws, gemessen im Vakuum und unter Atmosphärendruck.

ist zudem nicht auszuschließen, da sich ungefähr die gleichen Leckraten bei Innendrücken von $p_{Luft} \approx 2750 \text{ mbar}$ bei der Messung gegen Luft und von $p_{Vakuum} \approx 1750 \text{ mbar}$ bei der Vakuummessung ergeben. Die gegen Luft gemessene Helium-Leckrate ist damit in dem Druckbereich entgegen der Erwartung proportional zur Absolutdruckdifferenz zwischen dem Innen- und Außenraum der Straws und nicht etwa zur Partialdruckdifferenz (Helium-Partialdruck in trockener Luft unter Normaldruck: $5.3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ [93]). Die Bildung von Poren in dem Kapton-Grundmaterial der Straws ist zu vernachlässigen, da es sich hierbei um ein glasförmiges Polymer handelt [94]. Da zum Zeitpunkt der Messungen keine verdichtete trockene Luft als Prüfgas zur Verfügung stand, konnten diese Punkte nicht näher untersucht werden. Für die vorliegende Fragestellung einer ausreichenden Gasdichtigkeit der TRD-Module bei einem Langzeiteinsatz im Weltraum, ist dies aber auch nicht unbedingt notwendig.

Die Innendrücke von $p_{Luft} \approx 2750 \text{ mbar}$ bei der Messung gegen Luft und von $p_{Vakuum} \approx 1750 \text{ mbar}$ bei der Vakuummessung legen zugleich die späteren Meßpunkte fest. Die Druckdifferenz von jeweils $\sim 1.7 \text{ bar}$ zum Außenraum ergab sich aus Sicherheitsüberlegungen unter Berücksichtigung eines späteren Betriebsdruckes von $\sim 1 \text{ atm}$ im TRD. Darüber hinaus erhält man aus den Regressionsgeraden, bei einer Normierung der Leckraten auf Standarddruck, für die gegen Vakuum gemessene Helium-Leckrate $q_{S,He(V)} = (19.2 \pm 2.3) \cdot 10^{-6} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s}}$, in Übereinstimmung mit obiger Messung und für die unter Atmosphärendruck gemessene Leckrate (siehe auch Tabelle 4.1)

$$q_{S,He(L)} = (14.4 \pm 2.2) \cdot 10^{-6} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s}}. \quad (4.24)$$

Hieraus ergibt sich ein Faktor ~ 1.3 zwischen den Leckraten. Insgesamt liegt damit die gegen Luft gemessene Helium-Leckrate einen Faktor ~ 3 oberhalb der mit CO_2 in den Straws gegen Vakuum gemessenen Leckrate. An dieser Stelle sei noch einmal betont, daß diese Faktoren zwischen den He - und CO_2 -Leckraten nur für einzelne

Straws gelten, die keine makroskopischen Löcher aufweisen.

4.2.4 Gasdichtigkeitsmessungen der Polycarbonat-Endstücke

Für einen Langzeiteinsatz der TRD-Module im Weltraum ist neben der oben beschriebenen Gasdichtigkeit des Straw-Materials, auch die Gasdichtigkeit der Polycarbonat-Endstücke von entscheidender Bedeutung. In diesem Abschnitt werden die entsprechenden Messungen an einzelnen Endstücken mit CO_2 und Helium als Prüfgase vorgestellt. Die Test-Endstücke wurden dazu an der Seite, wo die Straws eingesteckt werden, mit einer gasdichten Klebung verschlossen.

Unter der Annahme gleicher Diffusionsvorgänge wie durch eine einschichtige Membran, wird die Leckrate nach der Druckabfallmethode ermittelt. Die zunächst angeführten Messungen im Vakuum werden an der weiter hinten beschriebenen Serientest-Apparatur vorgenommen (siehe auch Abschnitt 5.4.5). An jedem der fünf Meßkanäle der Apparatur wird eines dieser Test-Endstücke angebracht und mit CO_2 bei einem Druck von $p \approx 2750 \text{ mbar}$ befüllt. Nach der Evakuierung des Vakuumentanks kann die auf Standardbedingungen normierte Leckrate für CO_2 mit Hilfe von Druck- (Auflösungsvermögen: 0.4 mbar) und Temperatursensoren (Auflösungsvermögen: $0.03^\circ C$) bestimmt werden.

Beispielhaft sind in Abb. 4.16 die Meßergebnisse eines einzelnen Endstückes dargestellt. Der stationäre Zustand der Diffusion ist hier nach einer Meßzeit von 140 h nur näherungsweise erreicht. In Anlehnung an das beschriebene Verhalten des Gasstromes an der Außenseite einer Membran wird die Summe zweier Exponentialfunktionen an die Meßwerte angepaßt. Die Asymptote für $t \rightarrow \infty$ ist in das Diagramm eingetragen und liegt bei $q_{E,CO_2(V)} = (13.7 \pm 2.8) \cdot 10^{-6} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$. Der Fehler in der Leckrate konnte aus dem Vergleich mehrerer Messungen abgeschätzt werden.

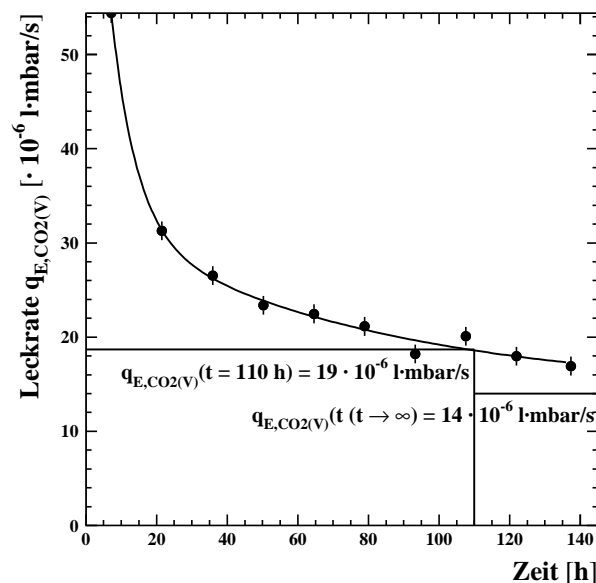


Abbildung 4.16: Bestimmung der Gasdichtigkeit eines einzelnen Endstückes im Vakuum nach der Druckabfallmethode mit CO_2 .

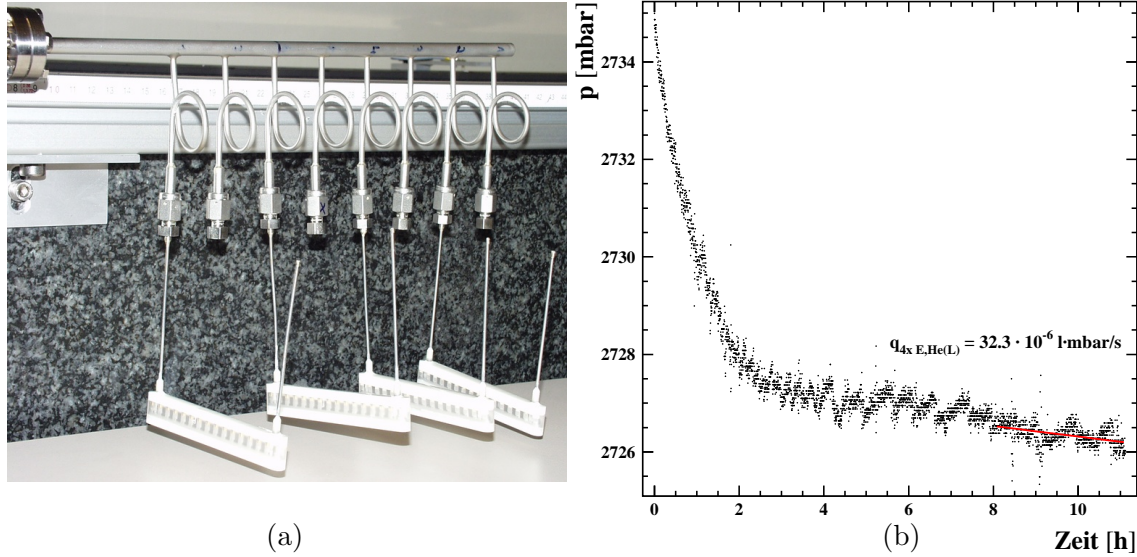


Abbildung 4.17: a) Anordnung zur Bestimmung der integralen Leckrate von 4 Endstücken mit Helium an Luft; b) Druckabfallmessung.

Berücksichtigt man die weiteren vier gemessenen Endstücke, so ergibt sich eine mittlere Leckrate bei einer Befüllung mit CO_2 von (siehe auch Tabelle 4.1)

$$q_{E, CO_2(V)} = (14.2 \pm 0.8) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.25)$$

Bei einem Abbruch der Messungen nach 110 h müssen die Leckraten mit einem Faktor $f_\infty = 1.4$ korrigiert werden, um die Leckrate von CO_2 im stationären Zustand zu erhalten. Dieser Faktor weicht von den bei den Messungen an dem Straw-Material ermittelten Faktor von 1.69 um $\sim 17\%$ ab. Dies deutet im Vergleich zu den Messungen an dem Straw-Material auf ein unterschiedliches Diffusionsverhalten von CO_2 durch das Polycarbonat-Material hin.

Mit der in Abbildung 4.17 a) aufgeführten Testanordnung konnte die integrale Leckrate von Helium in den vier dargestellten Endstücken gegenüber Luft ermittelt werden. Dazu wird das Testvolumen mit Helium befüllt und der Druck bzw. die Temperatur im Tank mit entsprechenden Sensoren aufgezeichnet. Die He -Leckrate des eigentlichen Testvolumens liegt unterhalb der Nachweisgrenze von $0.5 \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$ und ist damit zu vernachlässigen. In Abbildung 4.17 b) ist der auf Standardbedingungen korrigierte Druckverlauf bei einer Befüllung mit Heliumgas auf $p \approx 2750 \text{ mbar}$ zu erkennen. Durch Anpassung einer Geraden an die Meßpunkte und Kenntnis des Gesamtvolumens der Apparatur läßt sich die He -Leckrate der vier Endstücke zu $q_{4 \cdot E, He(L)} = (32.3 \pm 2.0) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}$ bestimmen. Daraus ergibt sich für die Leckrate eines Endstückes $q_{E, He(L)}$ (siehe auch Tabelle 4.1):

$$q_{E, He(L)} = (8.1 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.26)$$

Im Gegensatz zu den entsprechenden Messungen mit dem Straw-Material liegt die gegen Luft gemessene He -Leckrate eines Endstückes einen Faktor ~ 1.8 unter der

Prüfgas (gemessen gegen)	Methode M = Massen. D = Druckab.	Straw-Material Leckrate $q_{S,Gas}$ $\cdot 10^{-6} \left[\frac{l \cdot mbar}{s} \right]$	1x Endstück Leckrate $q_{E,Gas}$ $\cdot 10^{-6} \left[\frac{l \cdot mbar}{s} \right]$
$Xe/CO_2(80 : 20)$ (Vakuum)	M	1.17 ± 0.15	-
80 % Xe (Vakuum)	M	0.28 ± 0.04 $(SF_{Xe}^* = 165 \pm 24)$	-
20 % CO_2 (Vakuum)	M	0.89 ± 0.11 $(SF_{CO_2}^* = 12.9 \pm 1.6)$	-
100 % CO_2 (Vakuum)	D/M	5.0 ± 0.4 $(SF_{CO_2}^* = 11.3 \pm 0.9)$	14.2 ± 0.8
100 % He (Vakuum)	D	20.0 ± 2.0	-
100 % He (Luft)	D	14.4 ± 2.2	8.1 ± 0.5

Tabelle 4.1: Nach der Druckabfall-/Massenspektrometermethode mit verschiedenen Prüfgasen in den drei 1.3 m langen Straws bzw. Endstücken gegen Luft/Vakuum gemessene Leckraten.

mit CO_2 in den Endstücken gegenüber Vakuum gemessenen Leckrate. Zudem liegen die CO_2 -Leckraten der Endstücke in der gleichen Größenordnung wie die mit den 3 · 1.3 m langen Straws gemessenen Leckraten, weshalb sie bei den späteren Messungen mit Straw-Modulen, die im übrigen aus zwei Endstücken aufgebaut sind, nicht zu vernachlässigen sind.

In Tabelle 4.1 sind die mit den verschiedenen Prüfgasen in den Straws bzw. Endstücken gegen Luft bzw. Vakuum gemessenen Leckraten aufgeführt. Die He -Leckrate der Modulendstücke im Vakuum wurde hier nicht gemessen und wird später aus den Daten der Serienproduktion der Straw-Module bestimmt. Die Bestimmung der Leckrate von Xe/CO_2 durch die Endstücke erfolgt in Abschnitt 4.3.2 an einem Gaskreislauf.

Zulässige Grenzwerte

Die mit dem jeweiligen Prüfgas gemessene Leckrate $q_{M,Gas}$ eines Straw-Moduls der Länge L setzt sich somit aus der Leckrate der beiden Endstücke $q_{E,Gas}$ und der Leckrate des Straw-Materials $q_{S,Gas}$ (16 Straws der Länge 1 m) zusammen:

$$q_{M,Gas} = q_{S,Gas} + 2 \cdot q_{E,Gas} = q_{S_m,Gas} \cdot L + 2 \cdot q_{E,Gas} \quad (4.27)$$

mit der gasartabhängigen Proportionalitätskonstante $q_{S_m,Gas}$ ($\left[\frac{l \cdot mbar}{s \cdot m} \right]$). Aus dem CO_2 -Gasvorrat im TRD läßt sich bei einem Betriebsdruck von 1 atm eine maximal zulässige Leckrate $q_{CO_2(V),max}$ berechnen. Bei einer gesamten Modullänge im

TRD von ca. 500 m ergibt sich:

$$q_{CO_2(V),max} = \frac{2000 \text{ l} \cdot 1013 \text{ mbar}}{1000 \cdot 86400 \text{ s}} \cdot \frac{5}{500 \text{ m}} = 23.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s} \cdot \text{m}} \quad (4.28)$$

Der Faktor 5 berücksichtigt den 20 %igen CO_2 -Löschgasanteil im TRD-Gasgemisch. Daraus läßt sich wiederum ein Sicherheitsfaktor SF der Straw-Module unter Einbeziehung der an einzelnen Modulen gemessenen Leckraten $q_{CO_2(V)}$, der Modullänge L_{Modul} , und des Umrechnungsfaktors f_∞ zur Bestimmung der Leckrate im stationären Zustand, berechnen:

$$SF = \frac{q_{CO_2(V),max} \cdot L}{q_{M,CO_2(V)}} \cdot f_\infty \quad (4.29)$$

Mit den Ergebnissen der Gasdichtigkeitsmessungen aus den vorherigen Abschnitten ergibt sich für ein fertiges Straw-Modul mit einer mittleren Länge von $L = 1.52 \text{ m}$ ein CO_2 -Sicherheitsfaktor von $SF = 6.4 \pm 1.2$. Die Diffusion von He -Prüfgas durch 10 Doppel-O-Ring-Kupplungen wurde ebenfalls mit dem Testvolumen bestimmt. Da die Leckrate unterhalb der Nachweisgrenze der Apparatur von $0.5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s}}$ liegt und zudem die mit CO_2 -Prüfgas gegen Vakuum gemessenen Leckraten weit unterhalb der mit Helium gegen Luft gemessenen Leckraten liegen, wird sie bei der Bestimmung des Sicherheitsfaktors nicht berücksichtigt.

4.2.5 Kurzzeitmessungen der Gasdichtigkeit einzelner Straws mit Helium

Nach den Ausführungen im vorangegangenen Abschnitt ist es prinzipiell möglich, Straw-Module mit einem CO_2 -Sicherheitsfaktor > 4 zu bauen. Zu Beginn der Seri-

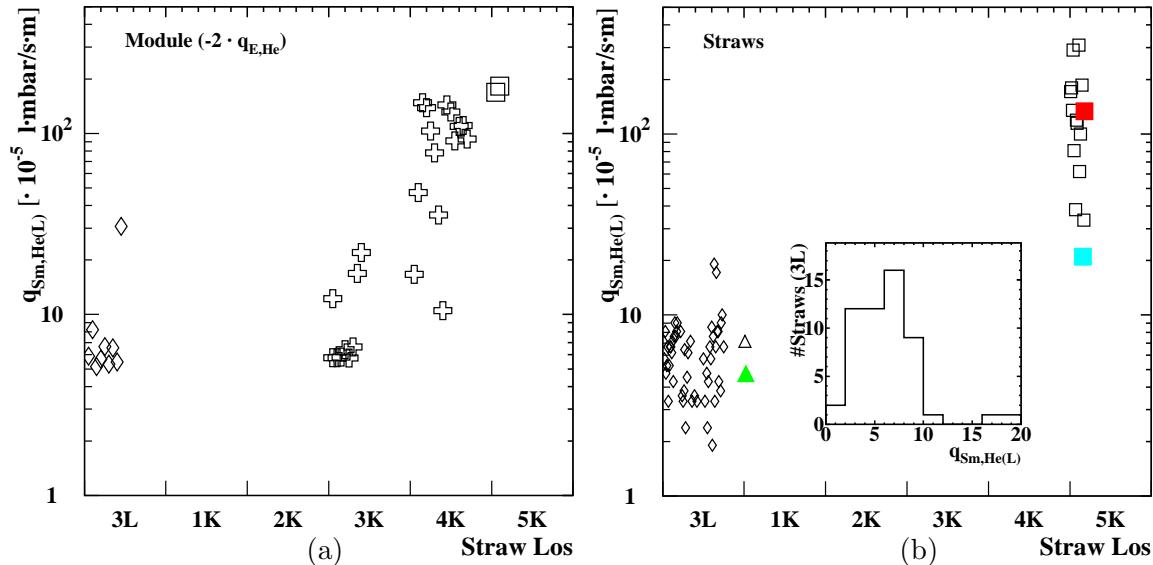


Abbildung 4.18: *Historie des Einzelröhrchentests: a) He-Leckrate des Straw-Materials der aus diesen Losen gebauten Module; b) Bestimmung der He-Leckrate einzelner Straws aus den Losen 3L und 5K.*

enproduktion der Straw-Module zeigte sich aber, daß die mit Helium im Innern der Module gegen Luft gemessene Leckrate (siehe auch Abschnitt 5.4.4) starken Schwankungen unterliegt (siehe Abbildung 4.18 a)). Die Straws wurden in zwei unterschiedlichen Ausführungen (siehe Abschnitt 4.1, Charge 1 und 2) geliefert, die sich aus verschiedenen Losen zusammensetzen. Bei einer Bestimmung der He -Leckrate einzelner Straws aus den Losen 3L und 5K der Charge 1 an Luft (siehe Abbildung 4.18 b)) wurde deutlich, daß eine direkte Korrelation zwischen dieser Leckrate und der Modulleckrate der aus diesen Straws gefertigten Proportionalkammern besteht. Diese Qualitätsunterschiede zwischen den einzelnen Losen drücken sich in der statistischen Verteilung der Leckraten aus und sind auf eine herstellungsbedingte fehlerhafte Polyurethan-Klebung zurückzuführen. Dadurch wurde es notwendig alle 5248 Straws in Einzelmessungen zu überprüfen.

Der erste Schritt in der Serienproduktion der Kammermodule ist demnach ein Einzelröhrchentest zur Bestimmung der Gasdichtigkeit der Straws mit Helium in Kurzzeitmessungen von wenigen Minuten. Anhand dieser gemessenen Leckrate $q_{S_m, He(L)}$ von Helium gegen Luft kann, nach den Ausführungen im vorangegangenen Kapitel, auf die zu erwartende Leckrate mit CO_2 in den Straws und Vakuum im Außenraum geschlossen werden und damit auch auf die Gasdichtigkeit der Straw-Module. Der Sicherheitsfaktor für die CO_2 -Gasdichtigkeit (siehe Gleichung 4.29) sollte dabei im Hinblick auf die Weltraumtauglichkeit mindestens einen Faktor 4 überschreiten, andernfalls können die Straws nicht zu Modulen verarbeitet werden. Die daraus resultierende Leckrate pro Meter Straw-Modullänge jedes einzelnen Straws für Helium kann direkt aus obigen Umrechnungsfaktoren bestimmt werden:

$$q_{S_M, CO_2(V), grenz} = \frac{q_{CO_2(V), max}}{SF} - 2 \cdot q_{E, CO_2(V)} = 3.04 \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m} \quad (4.30)$$

Mit dem Umrechnungsfaktor 3 zwischen der an den $3 \cdot 1.3 \text{ m}$ langen Straws gemessenen Leckraten von Helium gegen Luft bzw. CO_2 gegen Vakuum ergibt sich bei einem geforderten Sicherheitsfaktor > 4 eine He -Leckrate pro Meter Straw-Modullänge von $\sim 10 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$.

Die verschiedenen Straw-Chargen setzen sich wie folgt zusammen: Die erste Charge besteht aus insgesamt 28 Losen - 2 Lose mit jeweils 250 Straws der Länge 1660 mm (1KK - 2KK), 9 Lose mit jeweils ~ 235 Straws der Länge 1705 mm (1K - 9K), 16 Lose mit jeweils 230 Straws der Länge 2105 mm (3L - 18L) und 1 Los der gleichen Länge mit 160 Straws (19L). Die weiter unten betrachteten Resultate der zweiten Charge beziehen sich auf insgesamt 20 Lose - 4 Lose einer Vorserie mit jeweils 100 Straws der Länge 2100 mm (B1 - B4) und weiteren 16 Losen mit jeweils ~ 110 Straws der gleichen Länge (1 - 16). Die für den Bau der 328 Module noch fehlenden Straws befanden sich zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit noch in der Produktion. Aus den hier angeführten Straws der Chargen 1 und 2 wurde ein Großteil der Module der Lagen 1 - 16 und einige weitere der oberen Lagen produziert.

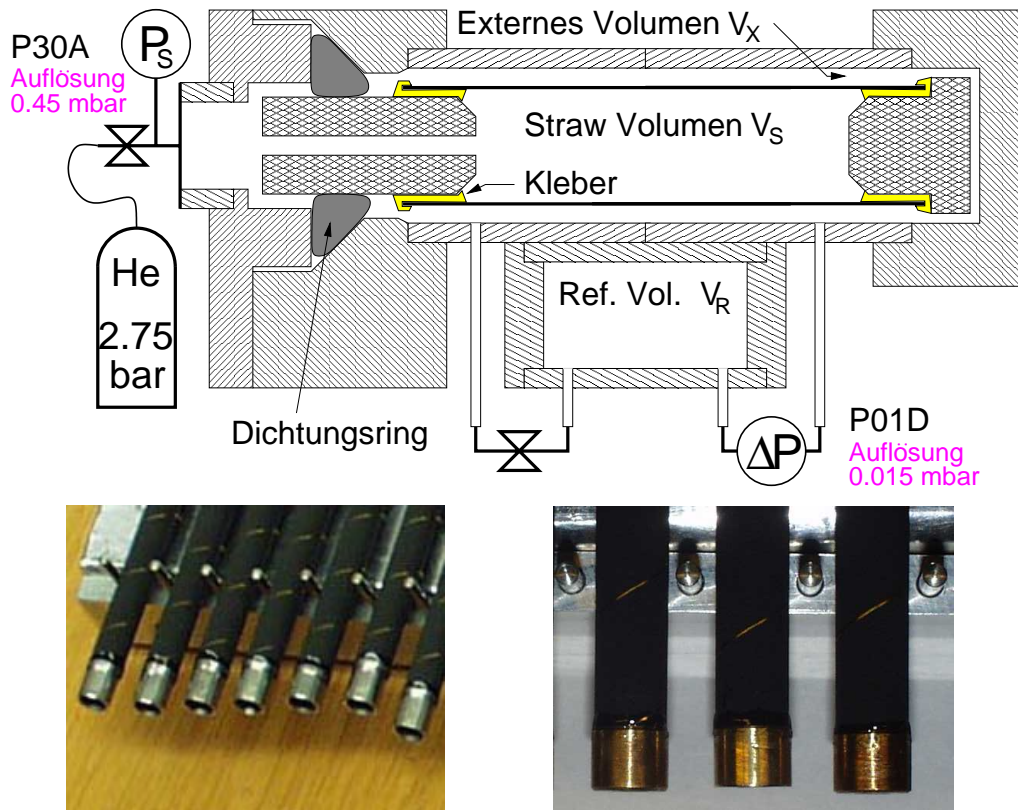


Abbildung 4.19: Oben: Prinzipskizze der Versuchsanordnung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einzelnen Straws mit He in Kurzzeitmessungen; unten: Bilder von den Klebehülsen an den Stirnseiten der Straws.

Aufbau der Meßapparatur und Voruntersuchungen:

Die Apparatur zur Bestimmung der Leckrate einzelner Straws mit Helium in Kurzzeitmessungen ist im obigen Teil der Abbildung 4.19 schematisch dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus einem Referenzvolumen und einem Meßvolumen, in das die Straws eingebracht werden können. Diese werden zuvor in einem ersten Arbeitsschritt an der einen Stirnseite mit einem Verschlussstopfen und an der anderen Stirnseite mit einem Einlassröhrchen aus Edelstahl verklebt (siehe auch die Bilder im unteren Teil der Abbildung 4.19). In dem Aufbau werden die so vorbereiteten Straws über die polierten Edelstahlflächen des Einlaßröhrchens mit einem Dichtungsring von einem externen Volumen $V_X \approx 40 \text{ ml}$ abgedichtet, das wiederum über ein Ventil mit dem Referenzvolumen V_R verbunden ist. Zudem kann die Druckdifferenz Δp zwischen V_X und V_R bei geschlossenem Ventil mit einem Differenzdrucksensor (Auflösungsvermögen: 0.015 mbar) bestimmt werden.

Zu Beginn der Messung wird das Ventil zwischen V_X und V_R geöffnet, um einen Druckausgleich herzustellen. Nach dem erneuten Verschließen des Ventils wird das Innenvolumen der Straws $V_S = 50$ bis 60 ml (je nach Straw-Länge) über ein Einlaßventil mit Helium bis zu einem Druck von $p_S \approx 2750 \text{ mbar}$ befüllt. Dazu befindet sich ein Absolutdrucksensor hinter dem Einlaßventil. Das durch die Straw-Wände und evtl. Punktlecks in den Polyurethan-Klebungen leckende He-Gas und damit

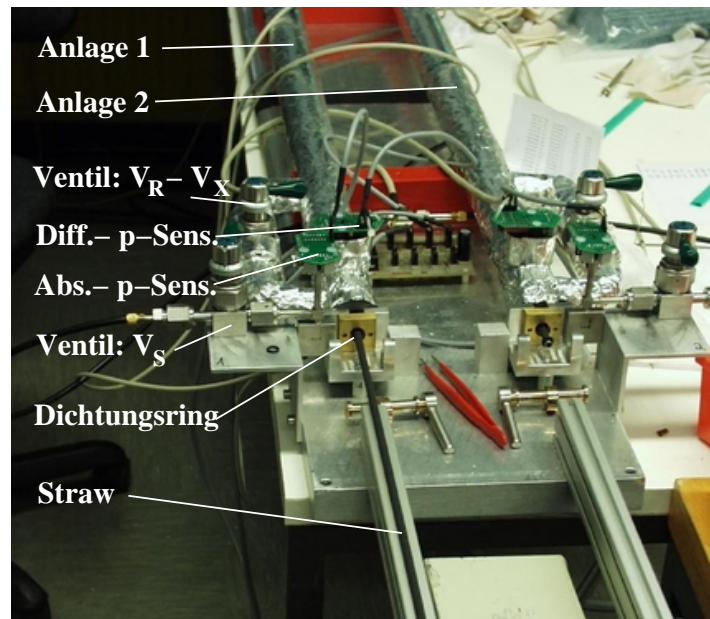


Abbildung 4.20: Foto der Anlage zur Durchführung von Einzelröhrchentests.

die Leckrate kann durch einen Druckanstieg im externen Volumen V_X gegenüber dem Referenzvolumen in 5 minütigen Messungen bestimmt werden. Während der Messung können sich Temperaturgradienten über die Meßvolumina ausbilden, weshalb der gesamte Aufbau nach außen thermisch isoliert ist und die Temperatur mit entsprechenden Sensoren kontrolliert wird. Für einen größeren Durchsatz an Straws ist die Apparatur doppelt ausgelegt (siehe Abbildung 4.20). Nach Abschluß der Messungen werden die stirnseitig in die Straws eingeklebten Bauteile wieder entfernt.

Die Meßdaten von drei verschiedenen Straws unterschiedlicher Qualität aus dem Diagramm 4.18b) sind in Abbildung 4.21a) dargestellt. Zu erkennen ist der Druck-

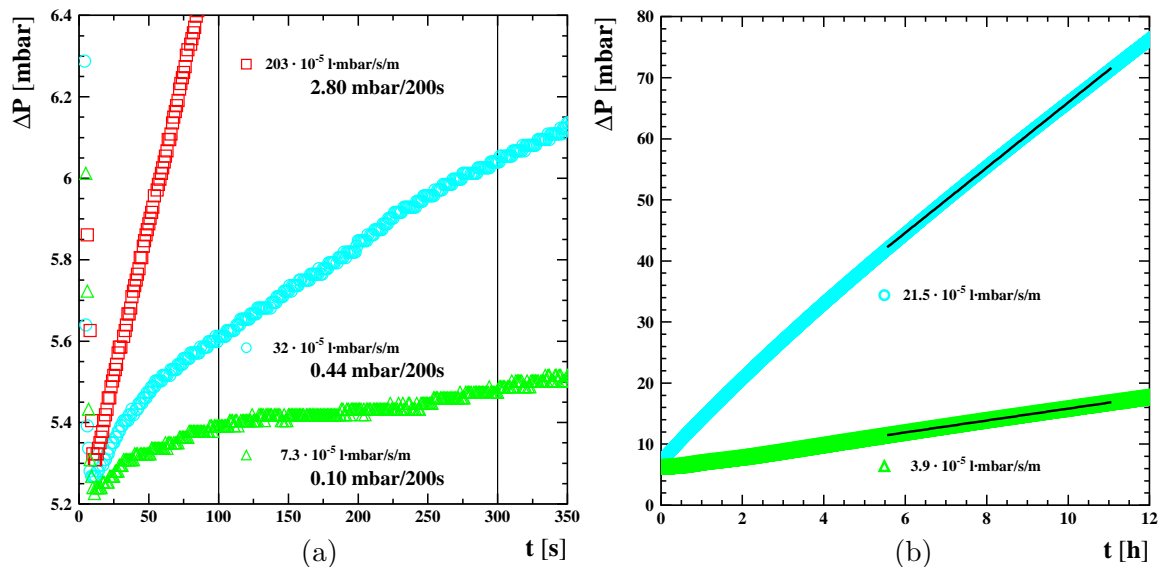


Abbildung 4.21: Einzelröhrchenmessung mit He a) Kurzzeitmessung an drei verschiedenen Straws; b) 12 h Referenzmessung über Nacht.

anstieg Δp zwischen dem externen Volumen und dem Referenzvolumen über einem Zeitraum von 350 s. Um anfängliche Temperatureffekte zu eliminieren, wird die Differenzdruckmessung nach $t = 100$ s nach dem Befüllen der Straws mit Helium, in einem Bereich wo die Kurve einen nahezu linearen Verlauf annimmt, gestartet. Aus der Steigung des Differenzdruckes über einen Zeitraum von 200 s und der Kenntnis des externen Volumens läßt sich die Leckrate des jeweiligen Straws ermitteln.

Zusätzlich werden über Nacht 12-stündige Referenzmessungen an ausgewählten Straws, deren Leckraten nah an der maximal zulässigen Leckrate liegen, vorgenommen und die in Kurzzeitmessungen ermittelten Leckraten entsprechend korrigiert. Abbildung 4.21b) zeigt die Referenzmessungen an zwei Straws aus der linken Abbildung (gleiche Einfärbung der Datensätze). Es zeigt sich, daß nur das Straw mit dem grün eingefärbten Datensatz unterhalb des gesetzten Limits von $10 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ liegt.

Helium-Leckraten von Straws aus Charge 1 und 2:

Das Ergebnis der Kurzzeitmessungen mit He für die oben angeführten Lose ist in den Abbildungen 4.22 und 4.23 dargestellt. Für Straws aus den Losen 1KK, 2K, 3K und 4K der Charge 1 konnten keine Meßwerte bestimmt werden, da diese zum Zeitpunkt der Einzelröhrchenmessungen schon zu Kammer-Modulen für Vorserien und erste Flugmodule verarbeitet wurden. Zudem sind in dem Diagramm die maximal zulässige Leckrate von $10 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ (grüne Linie), die einem CO_2 -Sicherheitsfaktor von 4 entspricht und die nach den Diffusionsmessungen mit He im vorangegangenen Abschnitt zu erwartende Leckrate bei einem mechanisch unbeschädigten Straw der

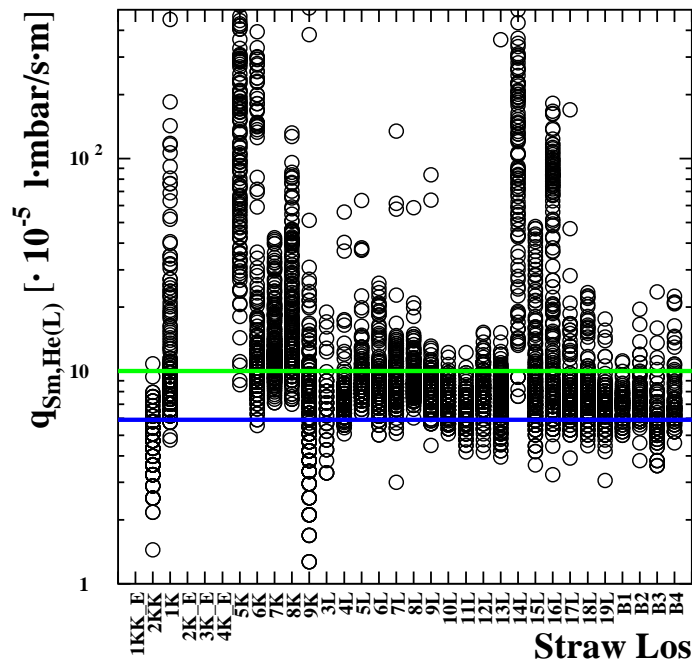


Abbildung 4.22: In Kurzzeitmessungen mit He ermittelte Leckraten einzelner Straws aus den Losen der Charge 1 und einer Vorserie der Charge 2 (B1 - B4).

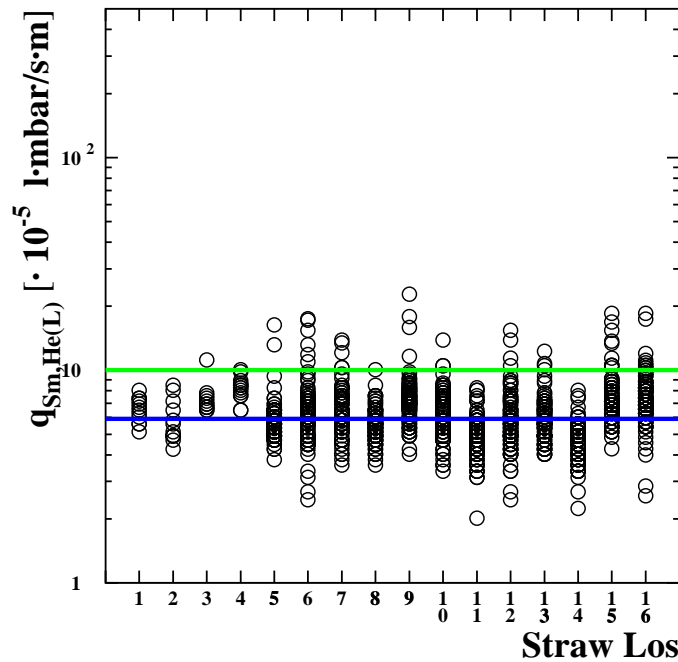


Abbildung 4.23: In Kurzzeitmessungen mit He ermittelte Leckraten einzelner Straws aus den 16 Losen der Charge 2.

Charge 1 (blaue Linie) eingezeichnet. Bei dem Röhrenmaterial der Charge 1 sind abhängig von der Losnummer deutlich stärkere Schwankungen in der He-Leckrate im Vergleich zum Material der Charge 2 zu erkennen, was auf die unterschiedliche Bauform dieser Charge mit einer schmaleren Überlappung des Grundmaterials zurückzuführen ist. Jedes Los enthält zudem Straws, die die maximal zulässige Leckrate überschreiten und damit aussortiert werden.

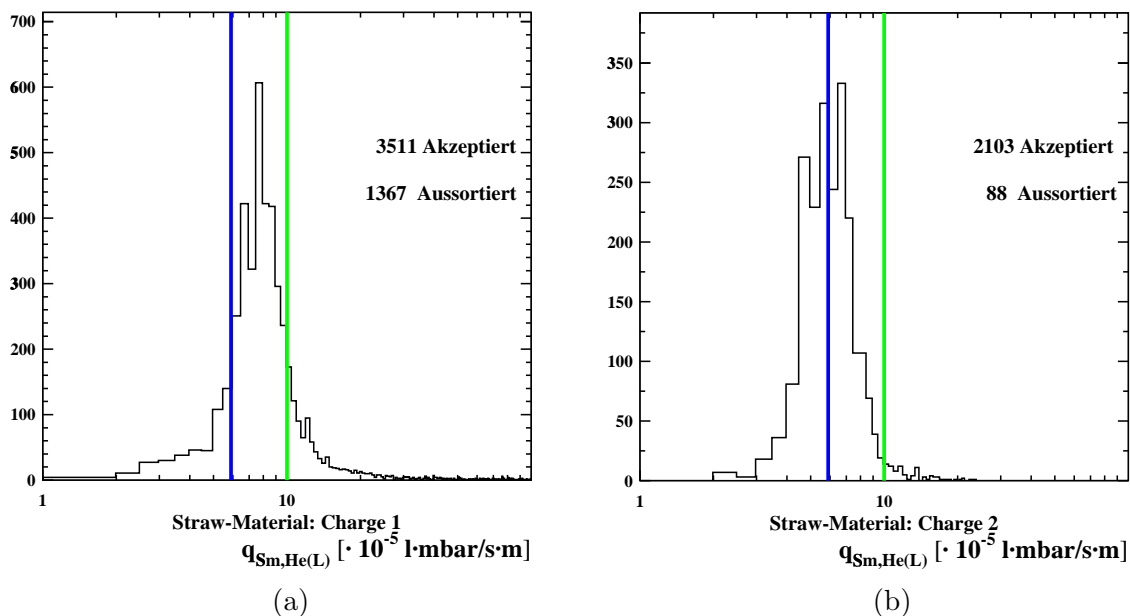


Abbildung 4.24: Verteilungen der He-Leckraten von Straws a) aus der ersten Charge und b) aus der modifizierten zweiten Charge.

In den Diagrammen 4.24 sind die Verteilungen der *He*-Leckraten für die 4878 Röhrrchen der ersten Charge a) und der 2191 Röhrrchen einer Teillieferung der zweiten Charge b) zu sehen. Insgesamt wurden aus der ersten Charge 1367 Straws aussortiert, was einer Quote von $\sim 28.0\%$ entspricht. Demgegenüber zeigt die Vorserie der zweiten Charge nur eine Ausschußquote von 88 Straws (Quote: $\sim 4.2\%$). Das Mean der Leckratenverteilung der akzeptierten Straws der ersten Charge konnte zu $7.4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ bei einem RMS von $1.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ und das der qualitativ besseren zweiten Charge zu $6.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ (RMS: $1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$) bestimmt werden. Die Statistik der mit den Straws der zweiten Charge gemessenen Leckraten wird mit den für den Bau aller TRD-Module noch fehlenden Straws gleicher Bauart verbessert werden.

4.3 Langzeitverhalten von zu einem Gaskreislauf angeordneten Straw-Modulen

In einem Langzeitteststand wird die Gasdichtigkeit von Straw-Modulen bei einer Befüllung mit *Xe/CO₂*-Gas (1 atm) nach der Druckabfall- und der Massenspektrometer-Methode bestimmt. Dabei wird die Übertragbarkeit der in Langzeitmessungen an einzelnen Straws, sowie Endstücken bestimmten Leckraten (siehe Abschnitte 4.2.3, 4.2.4) auf fertige Straw-Module überprüft. Die verwendeten Straws wurden zuvor einzeln mit obiger Apparatur auf ihre Gasdichtigkeit geprüft.

Zudem wird bei stehendem Gas das zeitliche Verhalten der Gasverstärkung ermittelt. Dabei soll die elektronische Funktionsfähigkeit der Straw-Module auch bei einer Änderung der *CO₂*-Konzentration im Gasgemisch, aufgrund des unterschiedlichen Diffusionsverhaltens von *Xe* und *CO₂*, und bei variierender Gasdichte gezeigt werden.

4.3.1 Aufbau eines Langzeitmeßstandes für einen Funktionstest von Straw-Modulen im Vakuum

In einem Vakuumtank aus Aluminium werden acht Straw-Module der mittleren Länge aller TRD-Module von $L = 1534,6 \text{ mm}$ parallel zueinander bei gleicher Ausrichtung der Stirnseiten der Module zu zwei nebeneinander liegenden Türmen von jeweils vier Modulen, d.h. ein TRD-Gaskreislauf angeordnet. Der geschlossenen Vakuumtank mit dem Massenspektrometer an der rechten Oberseite und der gegenüber liegenden Turbo-Molekularpumpe (TMP) mitsamt der Vorpumpe an der Unterseite des Tankes sind in Abbildung 4.25 a) zu erkennen. Zur Kalibration des Massenspektrometers befindet sich ein Nadelventil am Vakuumtank, über das definierte Leckraten der Meßgase eingestellt werden können. Von der rechten Bildseite aus erfolgt die Gasversorgung der im Vakuumtank positionierten Module, wohingegen die Ausleseelektronik am linken Bildrand zu erkennen ist.

Die Messung der Gasverstärkung in den obersten Modulen (Nr. VI und VIII) der beiden Türme erfolgt mittels Röntgenphotonen von vergleichbarer Energie wie

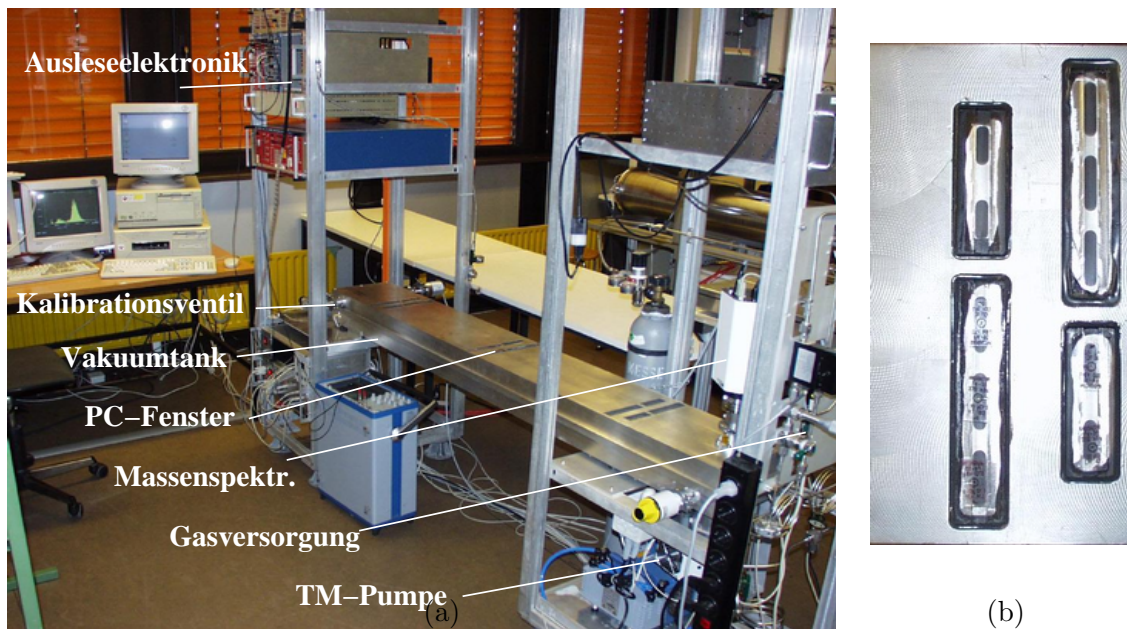


Abbildung 4.25: a) Langzeitteststand mit Turbo-Molekular-Pumpe (TMP); b) Vergrößerung der Polycarbonat(PC)-Fenster für die Gasverstärkungsmessungen.

die der Übergangsstrahlung. Als Quelle dieser Photonen werden radioaktive ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ -Präparate an der Außenseite des Tankes verwendet. ${}^{55}_{26}\text{Fe}$ ist ein Photonenstrahler mit einer Halbwertszeit von 2.73 Jahren. Es zerfällt über einen Elektronen-Einfang in ${}^{55}_{25}\text{Mn}$, wobei ein 5.9 keV Röntgenfluoreszenzquant emittiert wird.

Damit die γ -Strahlung den 1 cm dicken Tankdeckel aus Aluminium durchdringen kann, befinden sich Aussparungen an drei Positionen im Deckel. Die Aussparungen an einer Position mit zwei Reihen von jeweils fünf Langlöchern im Aluminiummaterial, die mit 300 μm dicken Polycarbonatschichten verschlossen wurden, sind in Abbildung 4.25 b) dargestellt. Bei einer Dichte des Polycarbonatmaterials von $\rho = 1.2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ und einem Massenschwächungskoeffizient für Photonen von $\frac{\mu(5.9 \text{ keV})}{\rho} \approx 15 \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$ [98]) gelangt somit ca. 50 % der Intensität des von dem über dem jeweiligen Langloch befindlichen Präparat ausgesandten, kollimierten γ -Strahls in den Tank. Mit der Anordnung und Geometrie der Langlöcher kann somit die Gasverstärkung in allen 32 Straws der obersten beiden Module im Tank gemessen werden. Diese beiden Module befinden sich an der ersten bzw. letzten Position im Gaskreislauf.

Den offenen Vakuumtank an der Gasversorgungsseite mit den zu einem Gaskreislauf seriell verbundenen Modulen zeigt Abbildung 4.26 a). Die Module werden im Vakuumtank wie auch im TRD-Oktagon an den Endstücken und an den Schottwand-Positionen unterstützt (mechanische Toleranz: 100 μm). Für die Ankopplung der Verrohrung an die Module werden Doppel-O-Ring-Kupplungen verwendet. Das weitere Gasversorgungssystem ist in Abbildung 4.26 b) zu erkennen. Über Absperr- und Nadelventile, einem Flussmesser sowie einen Blasenähler können die Module im Tank kontrolliert mit Gas gespült bzw. befüllt werden. Nach dem Schließen der Absperrventile kann mit einem am Gasversorgungssystem angebrachten Absolutdrucksensor (Auflösungsvermögen: 0.4 mbar - im Bild auf der Rückseite des Sy-

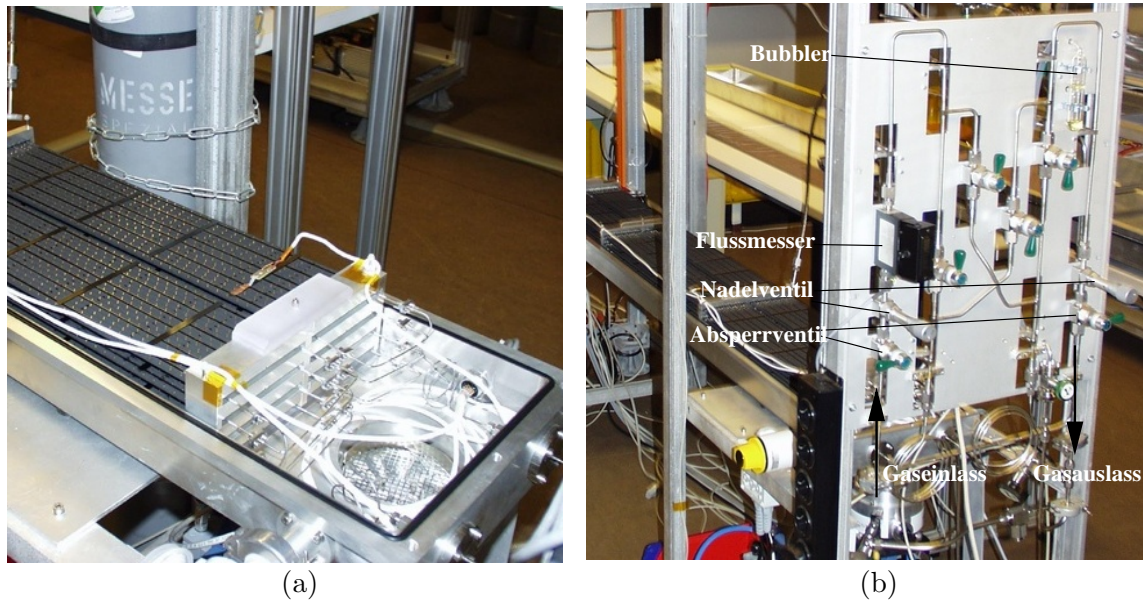


Abbildung 4.26: a) Offener Vakuumtank mit zwei Modul-Türmen: Gasversorgungsseite mit Turbo-Molekular-Pumpen-Ansaugöffnung; b) Gasversorgungssystem.

stems) der Druck im Innern des Gaskreislaufes sowie mit an den Modulen angebrachten Temperatursensoren (Auflösungsvermögen: 0.03°C) die Temperatur im Innern des Vakuumtanks aufgezeichnet werden.

In Abbildung 4.27 ist die Elektronikausleseseite der 8 Straw-Module mitsamt der HV-Versorgung dargestellt. Man erkennt die blauen Verbindungskabel zwischen den UTE-Platinen der Module VI und VIII und der Elektronik-Durchführung im Vakuumtank. Der ladungssensitive Vorverstärker (TMS-Chip) ist außerhalb des Tanks angebracht.

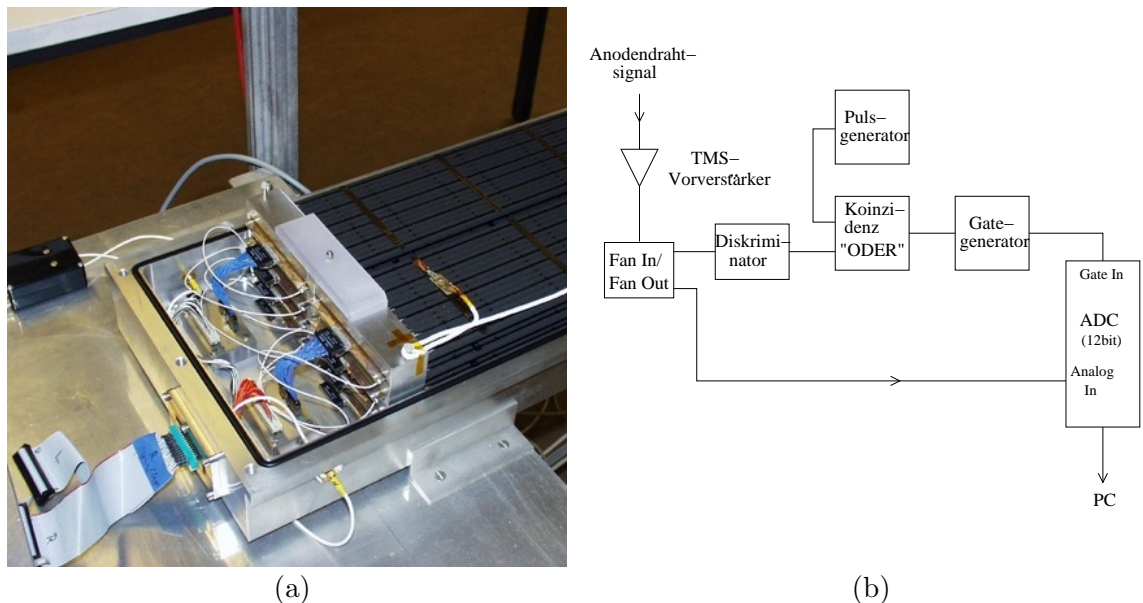


Abbildung 4.27: a) Offener Vakuumtank mit zwei Modul-Türmen: Elektronikseite; b) Blockschaltbild der selbsttriggernden Auslese.

In ihm wird das Signal integriert und zu einem semigaussischen Puls geformt, dessen Höhe in einem peaksensitiven 11 *bit* ADC digitalisiert und im nachgeschalteten PC verarbeitet wird.

Das Startsignal für die Auslese ("Trigger") des ADC wird vom Drahtsignal selber gegeben. Dazu wird der Puls des Vorverstärkers vor dem ADC-Eingang in einer analogen Fan In/Out-Einheit dupliziert. Der eine dieser Pulse wird zur Digitalisierung an den analogen Eingang des ADC und der andere über einen Diskriminator und einen Gate-Generator an den Triggereingang geschickt, wo er die Auslese startet. Das Blockschaltbild dieser selbsttriggernden Auslekette ist in Abbildung 4.27 b) dargestellt. Um neben dem Photonenspektrum der Präparate ein Rauschspektrum ("Pedestal") aufzunehmen, welches zugleich den Nullpunkt markiert, wird zwischen Diskriminator und Gate-Generator über eine Koinzidenzeinheit das periodische Signal eines Pulsgenerators eingekoppelt, das die Auslese zufällig startet. Die Breite dieses Pedestals ist ein Maß für das Hintergrundrauschen der Elektronik.

4.3.2 Gasdichtigkeitsmessungen mit Xe/CO_2

Abbildung 4.28 a) zeigt die Meßdaten der Druckabfallmessung mit Xe/CO_2 sowie den Temperaturverlauf in einem Zeitraum von ~ 1000 h. Nach einer Normierung des Druckes auf $20^\circ C$, läßt sich die Leckrate nach dem oben beschriebenen Verfahren für jedes der 15 gleichlangen Zeitintervalle durch Anpassung einer Geraden an die jeweiligen Meßpunkte und eine Normierung auf $p = 1013$ mbar bestimmen. Damit erhält man die in Abbildung 4.28 b) dargestellte, zeitliche Änderung der Leckrate.

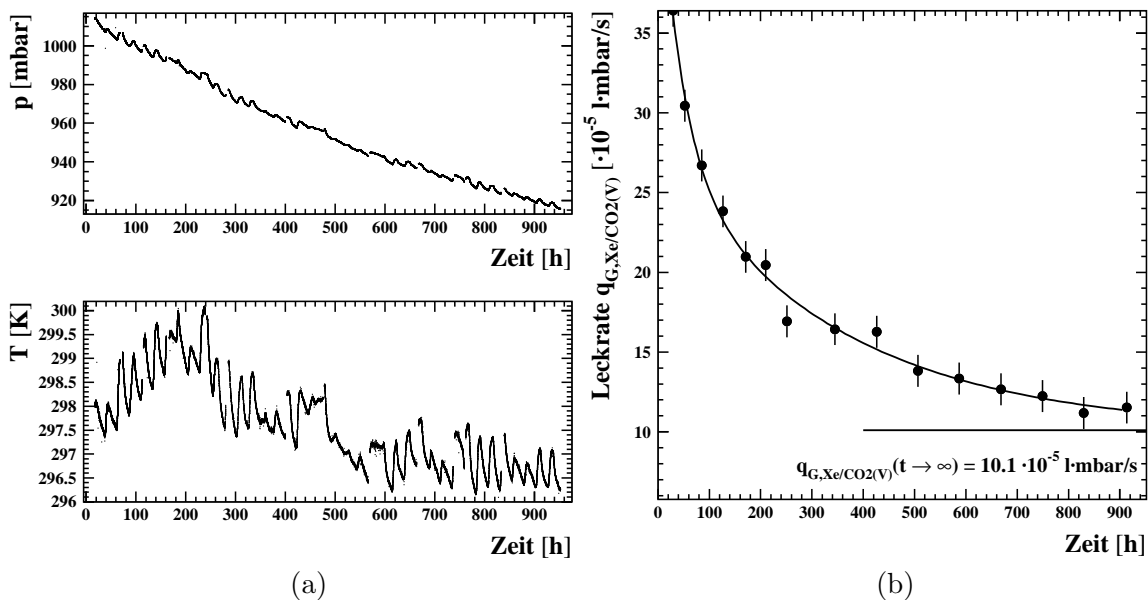


Abbildung 4.28: Druckabfallmessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einem Gaskreislauf mit $Xe/CO_2(80 : 20)$ a) Druck- und Temperaturverlauf (links: oben und unten), b) Zeitliche Änderung der Leckrate.

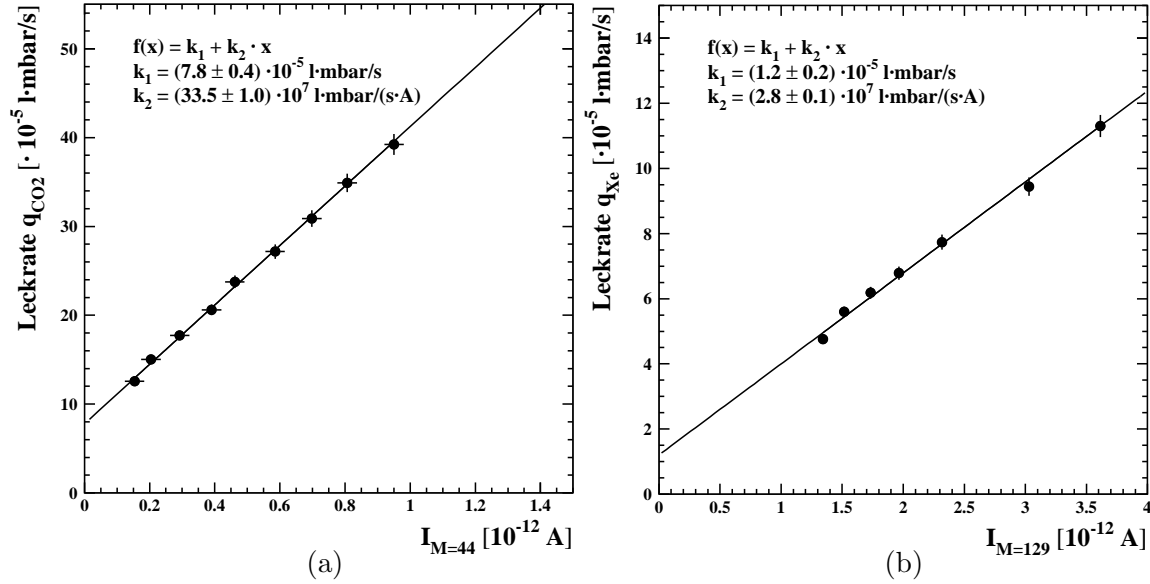


Abbildung 4.29: Kalibration des Massenspektrometers mit a) CO_2 ($M = 44$ amu); b) Xe ($M = 129$ amu).

Der Fehler der Leckrate konnte hier zu $\pm 1 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$ abgeschätzt werden. Durch Anpassung der Funktion 4.12 ergibt sich für die integrale Xe/CO_2 -Leckrate $q_{G,Xe/CO_2(V)}$ eines TRD-Gaskreislaufes im stationären Zustand nach der Druckabfallmethode:

$$q_{G,Xe/CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (10.1 \pm 1.8) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}. \quad (4.31)$$

Aus den separaten Langzeitmessungen nach der Druckabfallmethode an dem Straw-Material (Befüllung: $Xe/CO_2(80 : 20)$) sowie an einzelnen Endstücken (Befüllung: CO_2) (siehe Tabelle 4.1) ergibt sich unter Berücksichtigung der größeren Straw-Länge und der Anzahl von Endstücken im Gaskreislauf eine Leckrate für das Gasgemisch von $q_{G,Xe/CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (11.1 \pm 5.8) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$ in guter Übereinstimmung mit obigem Resultat. Hierbei wurde die Leckrate von Xe durch das Endstückmaterial nicht berücksichtigt. Da die aus den separaten Langzeitmessungen ermittelten Leckraten mit großen Fehlern behaftet sind, werden im folgenden die nach der Massenspektromettermethode bestimmten Leckraten zur Ermittlung der Leckrate von Xe durch die Modulendstücke herangezogen.

Bevor die Leckraten von Xe bzw. CO_2 des TRD-Gaskreislaufes separat nach der Massenspektromettermethode über die entsprechenden Partialionenströme I_{ION} der Gase bestimmt werden können, wird das Massenspektrometer über das am Vakuumtank angebrachte Nadelventil nacheinander mit reinem Xe und CO_2 kalibriert (siehe auch Abschnitt 4.2.3). Dabei wird mit dem Ventil eine definierte Leckrate eingestellt und die Ionenströme der Gase im noch unbestückten Vakuumtank gemessen. Bei der Kalibration mit Xe -Gas, welches ein Isotopenspektrum liefert, wird nur die Linie bei der Massenzahl $M = 129$ amu herangezogen, da diese wiederum am deutlichsten zu identifizieren ist. Bei CO_2 wird der Ionenstrom bei der Masse $M = 44$ amu bestimmt. Die Kalibrationskurven für Xe und CO_2 mit den entspre-

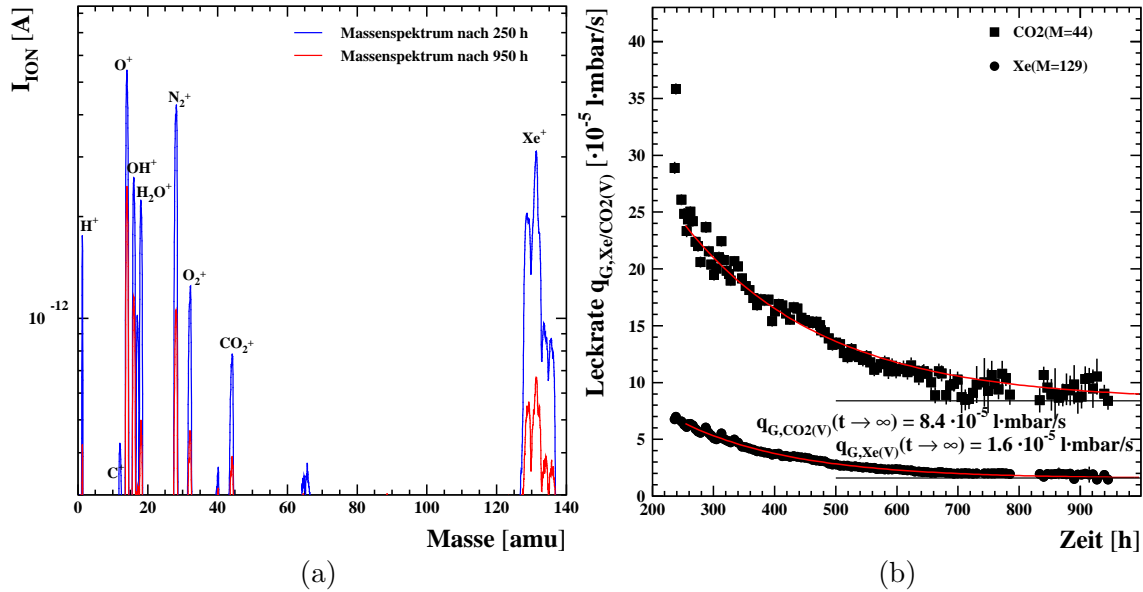


Abbildung 4.30: Massenspektromettermessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einem Gaskreislauf mit $\text{Xe}/\text{CO}_2(80 : 20)$ a) Ionenspektrum der im Vakuumtank vorhandenen Gase nach 250 h bzw. 950 h; b) Zeitliche Änderung der Leckrate von 1 atm Xe/CO_2 .

chenden Faktoren sind in Abbildung 4.29 zu finden. Alle weiteren Messungen werden dann auf diese Linien bezogen.

Zwei während der Gasdichtigkeitsmessung der 8 Module bei einer Befüllung mit $\text{Xe}/\text{CO}_2(80 : 20)$ nach einer Meßzeit von $t = 250 \text{ h}$ und $t = 950 \text{ h}$ aufgenommene Ionenspektren mit einer Zuordnung der Bruchstückionen sind in Abbildung 4.30 a) zu erkennen. Es zeigt sich, daß die Bruchstückionen der Luft und des Xe/CO_2 -Gases im Spektrum überwiegen. Zudem ist in dem betrachteten Zeitraum kein zusätzliches Ausgasen der in den Straw-Modulen verwendeten Materialien erkennbar. Nach einer Normierung der gemessenen Ionenströme auf Standardtemperatur und der sich daraus ergebenden Leckraten $q_{G,\text{Xe}(V)}$ bzw. $q_{G,\text{CO}_2(V)}$ auf Standarddruck im Innern der Straws erhält man den in Abbildung 4.30 b) dargestellten Verlauf in einem Zeitraum von 240 h bis 1000 h. Die Fehler ergeben sich aus der Kalibration sowie der Bestimmung der Ionenströme. Aufgrund technischer Probleme mit dem Massenspektrometer konnten im Zeitraum $< 240 \text{ h}$ keine Daten gemessen werden.

Der zeitliche Verlauf der in Abbildung 4.30 b) dargestellten Leckraten von Xe und von CO_2 an der Außenseite der Straw-Module läßt sich mit Hilfe der im Anhang A.2.2 beschriebenen Theorie erklären. Im Vergleich zu der in Abschnitt 4.2.3 gemessenen zeitlichen Änderung der Leckrate durch drei 1.3 m lange Straws ($c_{Wand} = 0$ für $t = 0$; siehe Abbildung 4.11 b)) ergibt sich dieser Verlauf unter der Anfangsbedingung, daß die Straw-Wände und die Endstücke nicht frei von den Gaskomponenten sind. Da der Gaskreislauf einige Wochen vor dem Start der Langzeitmessung zur Kalibration der Ausleselektronik mit Xe/CO_2 bei einem über dem Atmosphärendruck liegenden Druck befüllt war, sind die Gaskomponenten in die Modulwände diffundiert. Diese Gaskonzentration in den Wänden hat sich aufgrund

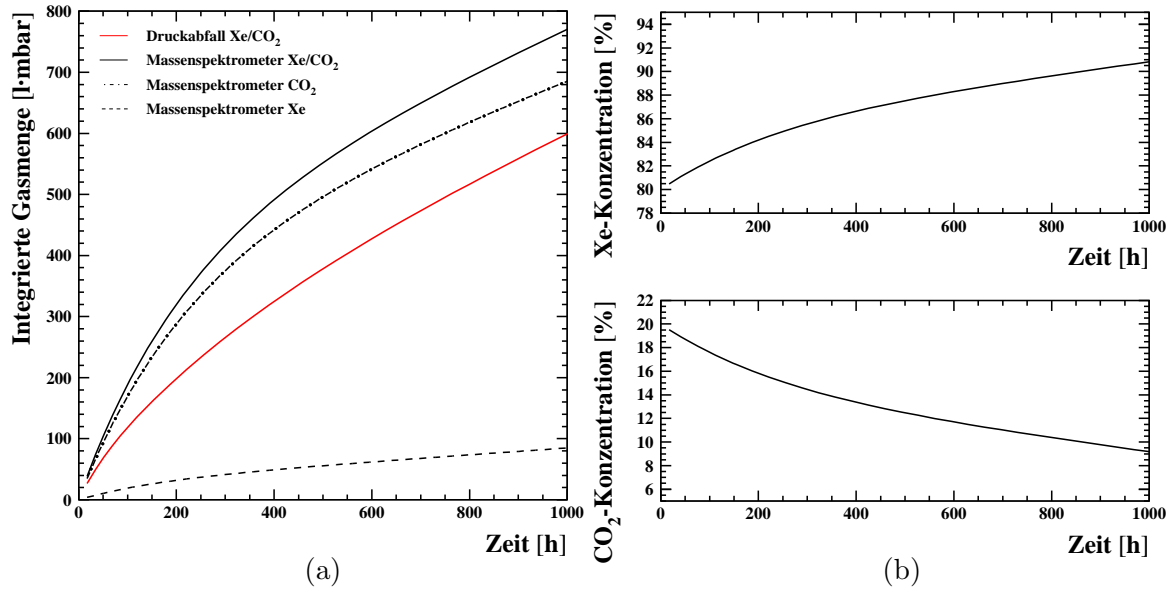


Abbildung 4.31: a) Integrierte Gasmengen für Xe/CO_2 aus der Druckabfall- und Massenspektrometermessung; b) Änderung der Xe - bzw. CO_2 -Konzentration in den Modulen.

der großen Zeitverzögerungen bei der Diffusion von Xe und CO_2 zu Beginn der Langzeitmessung nicht vollständig abgebaut. Damit läßt sich das nach der Massenspektrometermethode gemessene zeitliche Verhalten der Xe - und CO_2 -Leckraten qualitativ mit Hilfe von Gleichung A.18 (siehe Anhang A.2.3) bei einer Anfangskonzentration der Gaskomponenten in den Modulwänden ($c_{Wand} = c_W$) beschreiben.

Bei Erreichen des stationären Zustandes sind die Leckraten aber mit den von den einzelnen Bauteilen der Module ermittelten Leckraten vergleichbar. Durch Anpassung der Funktion 4.12 an die Daten ergibt sich für die Asymptoten ($t \rightarrow \infty$) der jeweiligen Gaskomponente:

$$q_{G,Xe(V)}(t \rightarrow \infty) = (1.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s} \quad (4.32)$$

$$q_{G,CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (8.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$$

Die Summe der Leckraten aus der Massenspektrometermessung stimmt mit der nach der Druckabfallmethode ermittelten integralen Leckrate des Xe/CO_2 -Gasgemisches in den Fehlergrenzen überein.

Aus den separaten Langzeitmessungen nach der Massenspektrometermethode an dem Straw-Material (CO_2 -Leckrate der Endstücke: Druckabfallmethode) (siehe Tabelle 4.1) lassen sich folgende Leckraten für den Gaskreislauf berechnen:

$$q_{G,Xe(V)}(t \rightarrow \infty) = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s} \quad (4.33)$$

$$q_{G,CO_2(V)}(t \rightarrow \infty) = (9.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$$

Auch hier berücksichtigt die Xe -Leckrate lediglich die Diffusion des Gases durch die Straw-Wände. Durch Vergleich der beiden Messungen zeigt sich, daß die Leckrate

von Xe durch die 16 Endstücke vernachlässigbar klein ist. Die mit den fertigen Modulen und den Einzelkomponenten für den 20 %igen CO_2 -Anteil bestimmten Leckraten zeigen eine gute Übereinstimmung. Die separat für das Straw-Material sowie für die einzelnen Endstücke bei einer Befüllung mit einem $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch bestimmten Leckraten haben sich demnach bei den Messungen an 8 Modulen eines TRD-Gaskreislaufes reproduziert. Der CO_2 -Sicherheitsfaktor des Gaskreislaufes liegt bei ~ 7 .

Aufgrund der verschiedenen Leckraten für Xe bzw. CO_2 ändert sich das Mischungsverhältnis der beiden Gase mit der Zeit, wenn Proportional- und Löschgas nicht in passendem Mischungsverhältnis aus getrennten Vorratsbehältern nachgefüllt werden. Diese Änderungen in der Xe - bzw. CO_2 -Konzentration lassen sich aus der Massenspektrometermessung über die integrierten Gasmengen berechnen (siehe auch Gleichung 4.20). Da die Konzentration der beiden Gaskomponenten in den Straw-Wänden und den Endstücken zu Beginn der Langzeitmessung mit den zu einem TRD-Gaskreislauf angeordneten Modulen nicht bekannt war, können die durch das Material diffundierten Gasmengen nur näherungsweise berechnet werden. In Abbildung 4.31 a) sind diese sich aus der Massenspektrometer- sowie aus der Druckabfallmessung ergebenden integrierten Gasmengen aufgeführt. Die Fläche zwischen der Kurve aus der Druckabfallmessung und der summierten Kurve aus der Massenspektrometermessung ist ein Maß für die Menge des Gases, das während des Ausgleichs der anfänglichen Gasübersättigung in den Außenraum diffundiert ist.

Die Änderungen der Xe - bzw. CO_2 -Konzentrationen sind in Abbildung 4.31 b) dargestellt. Das Mischungsverhältnis der Gase von 80 : 20 zu Beginn der Messung ändert sich in dem betrachteten Zeitraum von 1000 h in ein Xe/CO_2 -Gemisch von 91 : 9. Diese Konzentrationsänderungen haben unmittelbare Auswirkungen auf die während der Langzeitmessung durchgeführten Gasverstärkungsmessungen.

4.3.3 Langzeitverhalten der Gasverstärkung in Xe/CO_2

In diesem Abschnitt werden zunächst die Messungen der Gasverstärkung bei stehendem $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gas (Reinheit: Xe : 4.8, CO_2 : 4.5) in den beiden obersten Modulen VI und VIII im Vakuumtank bei variabler Dichte und Hochspannung vorgestellt. Dabei wird zugleich das Meßverfahren zur Bestimmung der lokalen Gasverstärkung in einem Straw erläutert. Im Anschluß daran erfolgt die Langzeitmessung der Gasverstärkung bei variabler CO_2 -Konzentration in diesen Modulen.

Wie oben schon angedeutet, werden die Gasverstärkungsmessungen mit radioaktiven $^{55}_{26}Fe$ -Präparaten durchgeführt, deren abgestrahlte 5.9 keV - γ -Quanten im Proportionalgas nach den in Abschnitt 3.2.1 beschriebenen Mechanismen die Primärladungen erzeugen. Die mittlere Energie zur Bildung eines Elektron-Ion-Paares in Xenon beträgt 22 eV. Bei einer Gesamtenergie von 5.9 keV erhält man damit Primärladungen von 268 e^- in Xenon. Mit der Ausselelektronik (siehe Abschnitt 4.3.1) wird die Anzahl der Sekundärelektronen bestimmt, um daraus den Gasverstärkungsfaktor zu ermitteln. Vor dem Beginn der Gasverstärkungsmessungen an den Straw-Modulen wird eine Kalibration des 11 *bit* ADCs durch Aufnahme

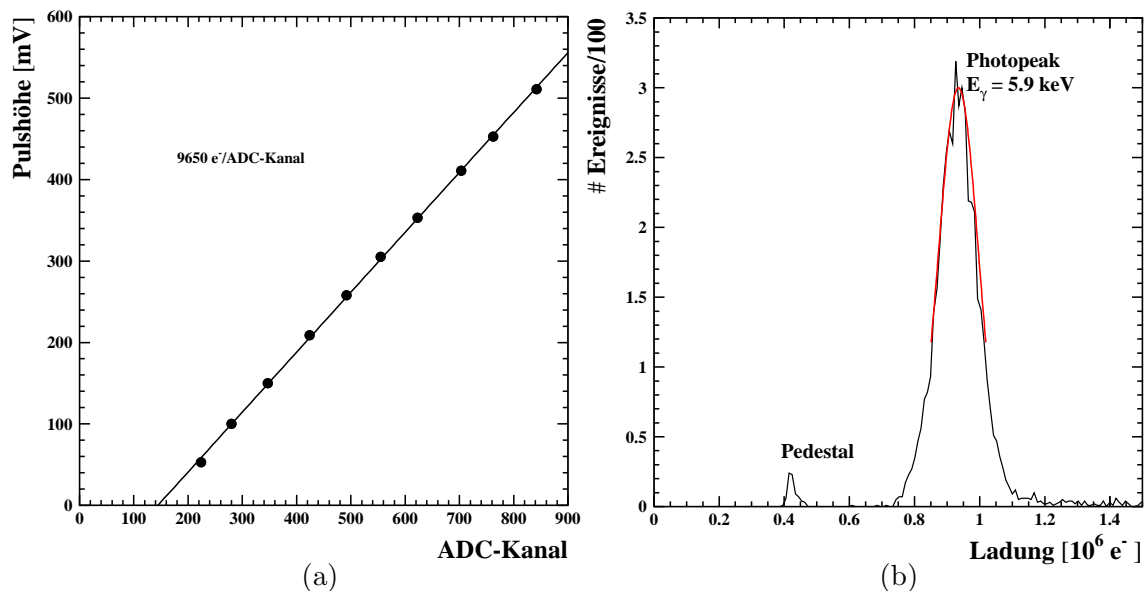


Abbildung 4.32: a) Kalibrierung des ADCs mit Testpulsen; b) Xe/CO₂(80 : 20)-Spektrum ($U = 1480$ V, $f = 0$ l/h, $T = 24.8^\circ\text{C}$, $p = 1003$ mbar).

eines Spektrums von Testpulsen bekannter Spannung durchgeführt, die statt des Anodendrahtsignals auf die Vorverstärker gegeben werden. Für die Peaks der Testpulse im ADC-Spektrum wird durch Bildung des gewichteten Mittelwerts jeweils der Schwerpunkt bestimmt. Durch Auftragung der entsprechenden Testspannungen über diese Schwerpunkte erhält man die in Diagramm 4.32 a) dargestellte Kalibrierungskurve. Durch Anpassung einer Geraden an die Meßpunkte und Umrechnung der Testspannungen in die entsprechende Anzahl an Elementarladungen¹⁷ über die Testkapazität des Vorverstärkers von $C = 2.1$ pF ergibt sich ein Kalibrierungsfaktor des ADC von $9650 e^-$ pro ADC-Kanal. Aufgrund einer Nichtlinearität des ADC in den untersten Kanälen wird für die Umrechnung der ADC-Kanäle der Spektren in die entsprechende Ladung der Nullpunkt aus der Funktionsanpassung bei ADC-Kanal 144 verwendet.

Das ladungskalibrierte Spektrum einer ^{55}Fe -Quelle, aufgenommen in einem Straw von Modul VIII (mittlere Position im Tankdeckel) bei einer Befüllung mit Xe/CO₂ (80 : 20) ist in Abbildung 5.19 b) dargestellt. In dem Spektrum ist der Photopeak neben dem Pedestal deutlich zu erkennen. Die Breite des Photopeaks ist dadurch bedingt, daß sowohl die Erzeugung der Primärladungen als auch die Bildung der Lawine statistische Prozesse sind. Die dadurch bedingte Form der Verteilung ist gaußisch. Durch Anpassung einer derartigen Kurve an den Photopeak läßt sich die Anzahl der Sekundärelektronen zu $(9.25 \pm 0.2) \cdot 10^5 e^-$ aus der Lage des Maximums bestimmen. Mit der Zahl für die Primärladungen von $268 e^-$ für Xe erhält man bei einer Hochspannung von $U = 1480$ V eine Gasverstärkung von $G_\rho = 3452 \pm 75$.

Anhand der Gleichung 4.34 (siehe auch Abschnitt 3.2.2) wird deutlich, daß die

¹⁷ $e = 1.6022 \cdot 10^{-19} C$

Gasverstärkung G_ρ von der Gasdichte ρ im Innern der Straw-Module abhängt:

$$G_\rho = \left(\frac{U}{\ln 200 \cdot 0.0015 \text{ cm} \cdot E_{\min}(\rho_0) \cdot \frac{\rho}{4.76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}} \right)^{\frac{\ln 2 \cdot U}{\ln 200 \cdot \Delta V}} \quad (4.34)$$

Da die Diethornparameter ΔV und $E_{\min}(\rho_0)$ für das $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch und der Proportionalkammer-Geometrie nicht bekannt sind, werden sie im folgenden in Gasverstärkungsmessungen durch Variation der Gasdichte ρ bei konstanter Hochspannung $U = 1480 \text{ V}$ ($\rightarrow \Delta V$) bzw. durch Variation der Hochspannung U bei konstanter, auf Standardbedingungen ($T = 20^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$) normierter Gasdichte $\rho_0 = 4.76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ($\rightarrow E_{\min}(\rho_0)$) bestimmt.

In Abbildung 4.33 a) ist die Abhängigkeit der Gasverstärkung G_ρ von der Dichte des Gasgemisches ρ dargestellt. Man erkennt eine Änderung der Gasverstärkung von $\frac{\Delta G_\rho}{G_\rho} \approx 6.5 \%$ bei $\Delta \rho \approx 0.05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ entsprechend einem $\Delta T \approx 3 \text{ K}$ bei konstantem Druck $p = 1013 \text{ mbar}$ bzw. einem $\Delta p \approx 10 \text{ mbar}$ bei konstanter Temperatur $T = 293.15 \text{ K}$ (siehe Tabelle 4.2). Nach der Diethorn-Gleichung 4.34 sollte die auf ρ_0 normierte Gasverstärkung

$$G = G_\rho \cdot \left(\frac{\rho}{4.76 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} \right)^{\frac{\ln 2 \cdot U}{\ln 200 \cdot \Delta V}} \quad (4.35)$$

für den richtigen Wert von ΔV eine Konstante ergeben. Dieser ergibt sich durch Variation von ΔV an der Stelle, wo das χ^2 der Anpassung eines Polynoms 0. Ordnung an die so korrigierten Gasverstärkungswerte ein Minimum erreicht.

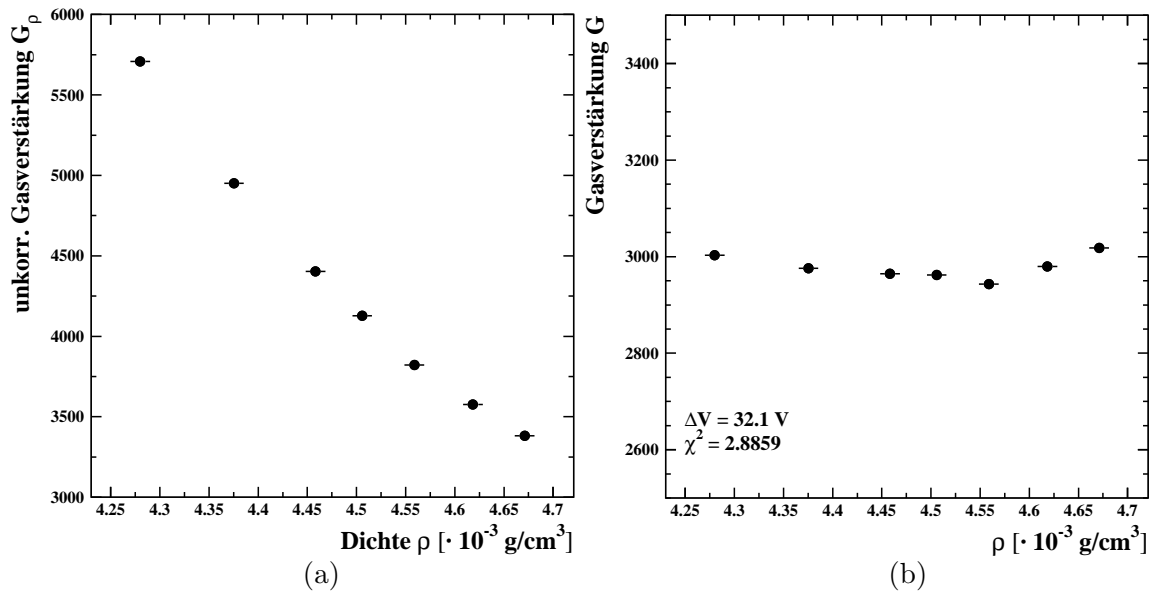


Abbildung 4.33: Dichtevariation (Xe/CO_2 , $U = 1480 \text{ V}$): a) Unkorrigierte Gasverstärkung G_ρ ; b) Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G .

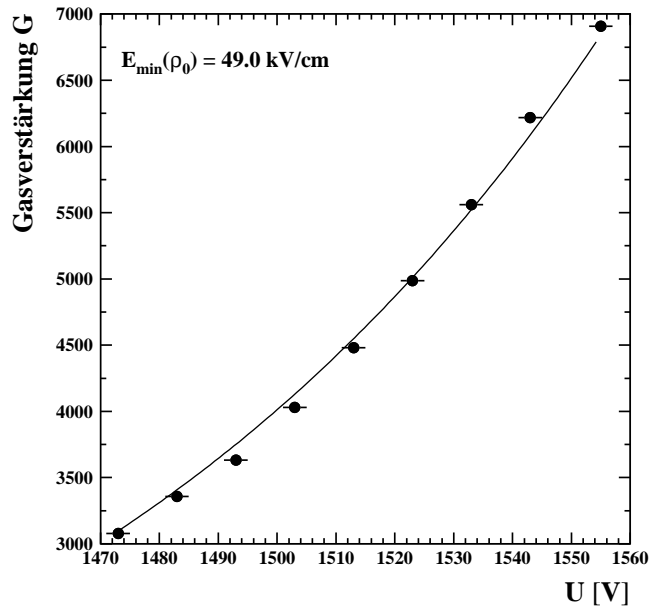


Abbildung 4.34: Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G in Abhängigkeit der Hochspannung U (Xe/CO_2).

Dabei erhält man (siehe Abbildung 4.33 b)):

$$\Delta V = 32.1 \text{ V} \quad (4.36)$$

bei einem χ^2 von 2.9 und einer Gasverstärkung von $G = 2982$ (siehe Tabelle 4.2). Die zu Beginn dieses Abschnitts bei $T = 24.8^\circ\text{C}$ und $p = 1003 \text{ mbar}$ in einem Straw ermittelte Gasverstärkung von $G_\rho = 3452 \pm 75$ läßt sich damit auf Standardbedingungen normieren. Es ergibt sich eine Gasverstärkung von $G = 2999 \pm 65$.

Die Abhängigkeit der mit obigem Diethornparameter ΔV auf Standardbedingungen korrigierten Gasverstärkung von der Hochspannung U ist in Abbildung 4.34 dargestellt. Dabei erhält man durch Anpassung der Funktion 4.34 an die Meßwerte (siehe Tabelle 4.2):

$$\Delta E_{min}(\rho_0) = 49.0 \text{ kV/cm}. \quad (4.37)$$

Demnach würde eine Änderung der an den Straw-Modulen anliegenden Hochspannung von $U_{TRD} = 1480 \text{ V}$ um $\Delta U = 10 \text{ V}$ zu eine Änderung der Gasverstärkung von $\frac{\Delta G}{G} \approx 10 \%$ führen (siehe Tabelle 4.2).

Für ein Kammermodul der Länge $L = 2 \text{ m}$ kann zusammen mit obigen Diethornparametern die relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der mechanischen Ablage Δx berechnet werden (siehe Abschnitt 3.2.2):

$$\frac{\Delta G}{G} = \left(\ln G + \frac{U \cdot \ln 2}{\Delta V \cdot \ln 200} \right) \cdot \left(\frac{\Delta x}{6905 \mu\text{m}} \right)^2 \quad (4.38)$$

In Abbildung 4.35 ist die rel. Änderung der Gasverstärkung in Xe/CO_2 bei einer Gasverstärkung von $G = 3000$ und einer am Anodendraht anliegenden Spannung von $U = 1480 \text{ V}$ dargestellt. Wie in Abschnitt 4.1 angedeutet, sollen die Straw-Module mit einer mechanischen Genauigkeit von $100 \mu\text{m}$ gefertigt werden. Aus den Diagrammen wird ersichtlich, daß die Homogenität der an einem Straw-Modul ge-

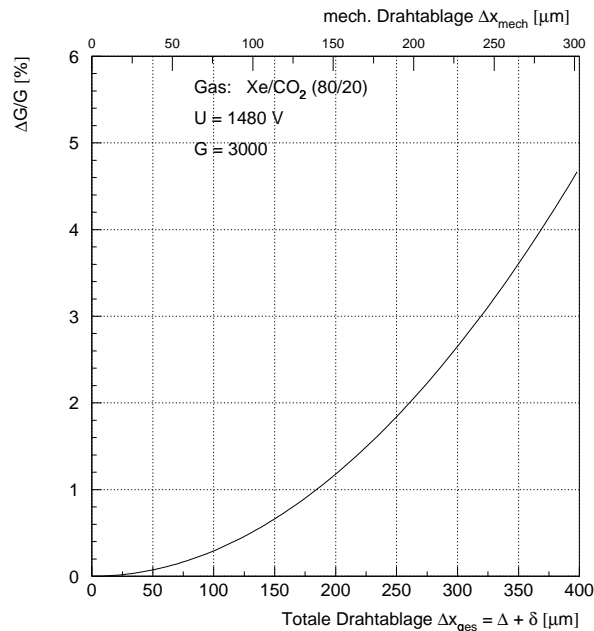


Abbildung 4.35: *Relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der totalen bzw. mechanischen Ablage eines Anodendrahtes aus der Mitte der Straws für ein Modul der Länge $L = 2$ m in Xe/CO₂(80 : 20).*

messenen Gasverstärkungen damit um $\frac{\Delta G}{G} \approx 0.5$ % variieren kann, falls die mechanische Genauigkeit des Moduls eine gleich große Drahtablage bewirkt (siehe Tabelle 4.2).

Die Langzeitmessungen der Gasverstärkung wurden ausschließlich an der mittleren Position im Tankdeckel vorgenommen. Durch Mittelung über die 16 Straws des jeweiligen Moduls ergibt sich für Modul VI eine Gasverstärkung von $G = 2912.4 \pm 70$ (2.42 % \equiv mech. Genauigkeit von ≈ 270 μm) und für Modul VIII $G = 2857.8 \pm 25$ (0.86 % \equiv mech. Genauigkeit von ≈ 160 μm) zu Beginn der Langzeitmessung. Die hohen mech. Toleranzen der Module sind durch die sich addierenden mechanischen Toleranzen des Vakuumentanks und der Module bedingt.

Wie schon in Abschnitt 3.2.2 angedeutet, hängen die Diethornparameter, aus denen sich die absolute Gasverstärkung nach Gleichung 4.34 berechnen läßt, vom Mischungsverhältnis der verwendeten Gase ab. Da die Abhängigkeit des bei dieser Langzeitmessung für die Dichtekorrektur der Gasverstärkung relevanten Diethornparameters ΔV von der CO_2 -Konzentration zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit nicht bekannt war, wurde die Dichtekorrektur näherungsweise mit obigem Diethornparameter für ein Xe/CO₂(80 : 20)-Gasgemisch durchgeführt. Die Messungen von ΔV bei variierender CO_2 -Konzentration werden später vorgenommen (siehe hierzu [90]).

Abbildung 4.36 zeigt den zeitlichen Verlauf der so korrigierten Gasverstärkungen, gemessen in den Straw-Modulen VI und VIII. Die Gasverstärkung steigt in dem betrachteten Zeitraum in beiden Modulen um ~ 30 % an. Damit ergibt sich näherungsweise ein Anstieg der Gasverstärkung von $\frac{\Delta G}{G} \approx 3$ % pro Verringerung des CO_2 -Gasanteils um 1 % (siehe Tabelle 4.2). Prinzipiell sind demnach die Straw-

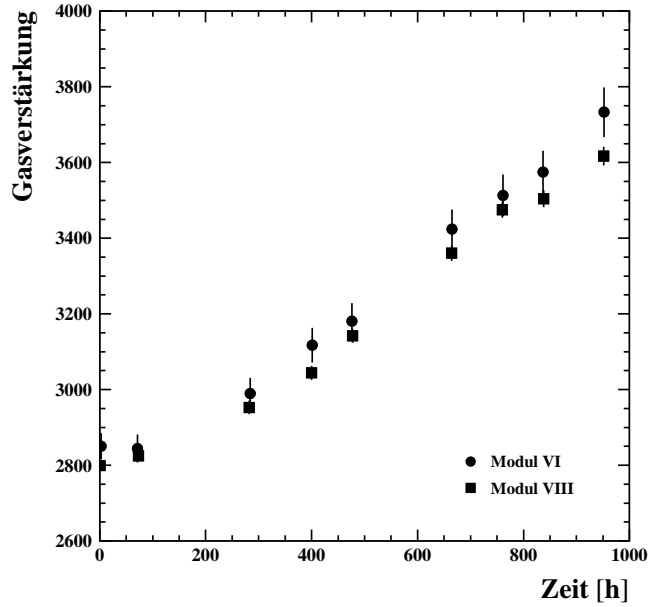


Abbildung 4.36: Zeitlicher Verlauf der Gasverstärkung in Xe/CO_2 ($U = 1480 V$, stehendes Gas, normiert auf Standardbedingungen).

Module auch bei einer Änderung des Xe/CO_2 -Mischungsverhältnisse auf 91 : 9 noch voll funktionsfähig.

Befüllung: $Xe/CO_2(80 : 20)$	
Dichte	$\rho_0 = 4.76 \cdot 10^{-3} \frac{g}{cm^3}$
Gasverstärkung bei $U_{TRD} = 1480 V$	$G \approx 3000$
Diethornparameter	$\Delta V = 32.1 V$ $\Delta E_{min}(\rho_0) = 49.0 kV/cm$
Rel. Änderung der Gasverstärkung bei ($U_{TRD} = 1480 V$)	
$\Delta \rho \approx 0.05 \cdot 10^{-3} \frac{g}{cm^3}$ ($\Delta T \approx 3 K$; $\Delta p \approx 10 mbar$)	$\frac{\Delta G_\rho}{G_\rho} \approx 6.5 \%$
$\Delta U = 10 V$	$\frac{\Delta G}{G} \approx 10 \%$
mech. Toleranz ($L = 2 m$): $100 \mu m$	$\frac{\Delta G}{G} \approx 0.5 \%$
ΔCO_2 – Konz. = 1 %	$\frac{\Delta G}{G} \approx 3 \%$

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Gasverstärkungsmessungen in $Xe/CO_2(80 : 20)$.

4.4 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen wurden vorgenommen, um zu überprüfen, ob die als Proportionalkammern für den AMS-02-TRD vorgesehenen Straw-Module genügend gasdicht sind, um mit dem begrenzten Gasvorrat an Xe -Proportional- und CO_2 -Löschgas (80 : 20) den Detektor mehr als drei Jahre lang auf der ISS zu betreiben. Da der aufwendige Herstellungsprozeß der Straw-Module dahingehend optimiert werden konnte, daß kein Gasverlust durch Punktlecks in Klebnähten auftritt, führt nur die Diffusion der Gaskomponenten durch das Straw-Material und die beiden Modulendstücke zu meßbaren Leckraten. Diese wurden mit verschiedenen am I. Physikalischen Institut der RWTH Aachen entwickelten Hochvakuum-Meßapparaturen separat für drei 1.3 m lange Straws und einzelne Endstücke mit samt den Doppel-O-Ring-Kupplungen, die als Schnittstelle zur weiteren Verrohrung des TRD-Gasversorgungssystems dienen, mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent bestimmt. Dazu wurden zwei voneinander unabhängige Methoden angewendet - die Druckabfall- und die Massenspektrometermethode -, die zwar unterschiedliche Ergebnisse für die zeitliche Entwicklung der Leckrate liefern, aber für $t \rightarrow \infty$, im stationären Zustand der Diffusion, in den Leckraten übereinstimmen. Bei einem Gesamtgasvorrat im TRD von 8100 l Xe und 2000 l CO_2 lassen sich daraus für ein Straw-Modul der mittleren Länge $L = 1.52$ m folgende Sicherheitsfaktoren berechnen:

$$Xe: \quad SF = 165 \pm 24$$

$$CO_2: \quad SF = 6.4 \pm 1.2$$

Limitiert durch den CO_2 -Gasverlust könnte der AMS-02-TRD ca. 20 Jahre im Welt-raum betrieben werden und damit deutlich länger als die vorgesehene Stationierung auf der ISS von 3 Jahren.

Nach dem Bau der ersten Straw-Module zeigte das in zwei verschiedenen Chargen unterschiedlicher Bauform gelieferte Straw-Material große qualitative Unterschiede in der Gasdichtigkeit. Dadurch wurde es notwendig die Leckrate für alle 5248 Straws in Einzelmessungen von wenigen Minuten zu bestimmen. Die dafür notwendige Meßapparatur konnte innerhalb weniger Wochen gebaut und kalibriert werden. Aufgrund der großen Zeitverzögerungen bei der Diffusion von Xe und CO_2 durch das Straw-Material wird für diese Messung He verwendet, bei dem sich schon nach kurzer Zeit der stationäre Zustand der Diffusion einstellt. Bei diesen Einzelmessungen wird ein CO_2 -Sicherheitsfaktor von mindestens 4 angestrebt, weshalb von den insgesamt getesteten 6845 Straws 1455 aussortiert werden mußten. Mit den verbliebenen Straws konnte dann die Serienproduktion der Flugmodule gestartet werden.

Gleichzeitig wurde ein Langzeitmeßstand am I. Physikalischen Institut der RWTH Aachen entwickelt, in dem acht, zu einem TRD-Gaskreislauf verbundene Straw-Module, bei einer Befüllung mit Xe/CO_2 in einer Langzeitmessung von 1000 h im Vakuum, auf ihre Funktionsfähigkeit hin geprüft werden konnten. Neben der

Bestätigung der an den Einzelkomponenten eines Straw-Moduls gemessenen Leckraten zeigte sich kein Alterungsverhalten, was die Gasdichtigkeit anbelangt. Da die stark unterschiedlichen Leckraten für Xe und CO_2 eine Änderung des Mischungsverhältnisses der beiden Gase bewirken, was im AMS-02-TRD eine ständige Überwachung ihrer relativen Anteile zur Folge hat, wurde zudem das Langzeitverhalten der in ausgewählten Modulen gemessenen Gasverstärkung ermittelt. Neben der Bestimmung der Diethorn-Parameter für das $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch konnte die volle Funktionsfähigkeit der Straw-Module auch bei einer Änderung des Mischungsverhältnisses auf $91 : 9$ nach $1000 h$ nachgewiesen werden.

In diesem Kapitel konnte somit gezeigt werden, daß es möglich ist, einen Übergangsstrahlungsdetektor für einen Zeitraum von mehr als drei Jahren im Weltraum bei einem beschränkten Xe/CO_2 -Gasvorrat und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Leckraten von Xe und CO_2 durch das Modulmaterial zu betreiben.

Kapitel 5

Prüfung der Weltraumtauglichkeit

In diesem Kapitel werden die in den Prüfverfahren zur Weltraumtauglichkeit gewonnenen Messergebnisse von den am I. Physikalischen Institut der RWTH Aachen entwickelten Substrukturen vorgestellt. Dabei werden die Vibrationstestdaten der geprüften TRD-Bauteile mit den Ergebnissen aus entsprechenden Finite-Elemente-Modellrechnungen (FEM) im Hinblick auf ihr Resonanzverhalten verglichen. Zu diesen sekundären Strukturen zählen die Oktagon-Tragestruktur, die Front-End-Elektronik, deren elektromagnetische Ein- und Abstrahlung zusätzlich in einem EMI-Test bestimmt wird, das Radiatormaterial, dessen Ausgasrate gemessen wird, sowie die TRD-Proportionalkammern. Die Weltraumtauglichkeitsuntersuchungen an allen übrigen Komponenten des TRDs, wie z.B. des Gasversorgungssystems sowie der höheren DAQ liegen nicht im Verantwortungsbereich des I. Physik. Institutes der RWTH Aachen. Nähere Informationen hierzu können in [74] nachgelesen werden.

5.1 Oktagon-Tragestruktur

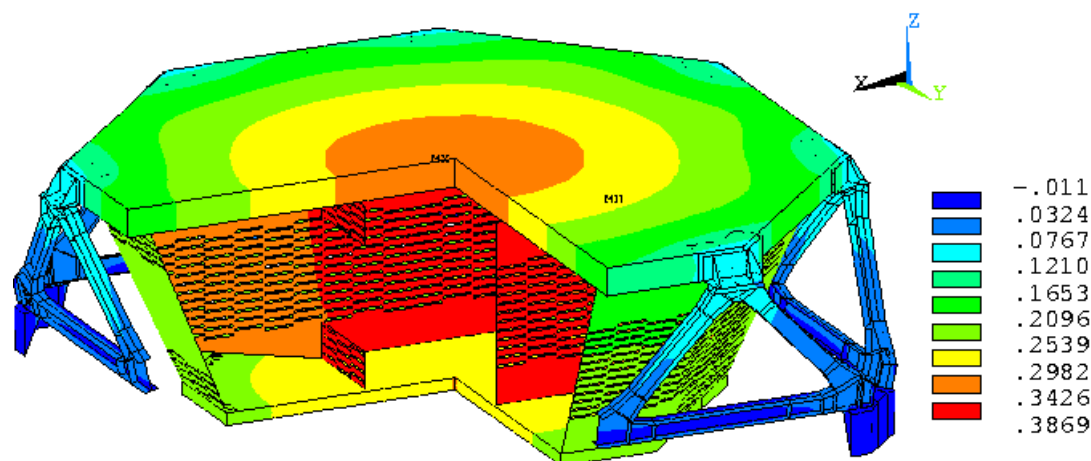


Abbildung 5.1: *FEM-Analyse: Durchbiegung der Oktagon-Tragestruktur mit M-Struktur bei einer Anregung in z-Richtung; berechnete Eigenfrequenz: $f_0 = 52.1$ Hz.*

In Abbildung 5.1 ist die mit Hilfe eines Finite-Elemente-Modells¹ der Oktagon-Tragestruktur zusammen mit der M-Struktur berechnete relative Durchbiegung, bei

¹Fa. I.S.A.tec Engineering, Aachen

einer Anregung der Komponenten in z-Richtung dargestellt. Die Farbkodierung zeigt die Stärke der Durchbiegung an. Aus den in dieses Modell eingehenden Verteilungen der Massen und Steifigkeiten der verwendeten Materialien läßt sich zusätzlich die erste Eigenfrequenz dieses Bauteils zu $f_0 = 52.1 \text{ Hz}$ bestimmen, das damit die NASA-Vorgabe von einer Eigenfrequenz $> 50 \text{ Hz}$ erfüllt.

5.2 Front-End-Ausleseelektronik

Die Weltraumtauglichkeitsprüfung der FE-Ausleseelektronik umfaßt neben der Vibrations- und Thermovakuumtestreihe, wobei auch die Funktionstüchtigkeit der Elektronik während der Tests gezeigt wurde, zusätzlich einen EMI-Test in dem sowohl die elektromagnetische Einstrahlung von anderen, den AMS-02-Detektor umgebenden Bauteilen der ISS simuliert, als auch die Abstrahlung der TRD-Elektronik gemessen werden kann. Die Elektronik ist dabei durch die Lage der Pedestal, der Höhe des elektronischen Rauschens und den Verstärkungsfaktoren der VA-Kanäle charakterisierbar.

Ein Vibrationstest mit den vier in der Bauform verschiedenen, mit VA-Chips bestückten UFE-Platinen (UFE 45/90 M und UFE 45/90 S - die Bezeichnung richtet sich nach der Plazierung an der Oktagontragestruktur) liefert eine erste Eigenfrequenz von $\sim 700 \text{ Hz}$ bei einer Anregung in z-Richtung und senkrechter Montage der Platinen an einer oktagonähnlichen Wand. Neben dem Vibrationstest bewirkt auch ein Thermovakuumtest keine Veränderungen im elektronischen und mechanischen Verhalten der UFE-Platinen. Das Ergebnis der Messungen nach den beiden Vibrations- und dem Thermovakuumtest ist im Anhang A.3 exemplarisch für eine UFE-Platine des Typs 90M dargestellt. Für einen EMI-Test nach NASA-Spezifikation² wird der in Abbildung 5.2 dargestellte oktagonähnliche Aufbau verwendet, wobei das elektronische Rauschen bei Einstrahlung von außen und die elek-

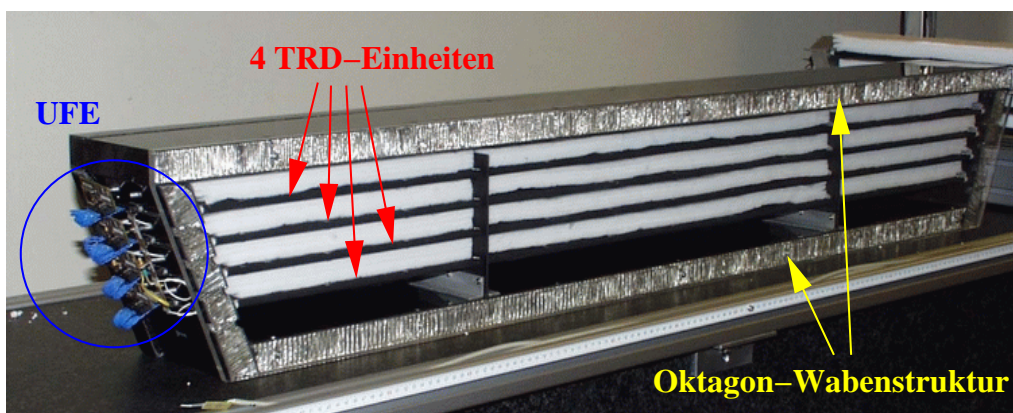


Abbildung 5.2: EMI-Testaufbau: Oktagonähnliche Tragestruktur mit vier TRD-Einheiten bestehend aus Radiator- und Straw-Modulen, sowie einer UFE-Platine.

²Space Station Electromagnetic Emission and Susceptibility Requirements for the Electromagnetic Compatibility: SSP30237 - RS02, RS03, RE02



Abbildung 5.3: EMI-Versuchsanordnung bei der Fa. Krauss-Maffei Wegmann AG [84].

tromagnetische Abstrahlung einer mit VA-Chips bestückten UFE-Platine zusammen mit vier angeschlossenen Straw-Modulen bestimmt wird. Dazu wird die Tragestruktur, bestehend aus dem gleichen Material wie die Oktagonwände, in eine MLI-Folie eingewickelt, um die Abschirmung, wie sie nachher im AMS-02-Detektor vorliegt, möglichst detailgetreu nachzubilden.

In Abbildung 5.3 ist diese Testapparatur in einem Labor, das vor elektromagnetischer Einstrahlung aus der Umwelt abgeschirmt ist, zusammen mit einem elektrischen Feldstärkesensor und einer Antenne zu erkennen. Mit dieser Antenne können für die Messung der Suszeptibilität, horizontal bzw. vertikal polarisierte elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich von 10 kHz bis $\sim 1\text{ GHz}$ bei einer elektrischen Feldstärke von 5 bis $\sim 100\text{ V/m}$ in den Raum abgestrahlt bzw. die Emission der TRD-Konstruktion ermittelt werden. Die weitere Ausleseelektronik für die UFE-Platine befindet sich außerhalb des Labors. Während der Suszeptibilitätsmessungen im oben genannten Amplituden- und Frequenzbereich konnte das elektronische Rauschen der FE-Elektronik zu ~ 1.80 ADC-Kanäle bestimmt werden. Dieser Wert

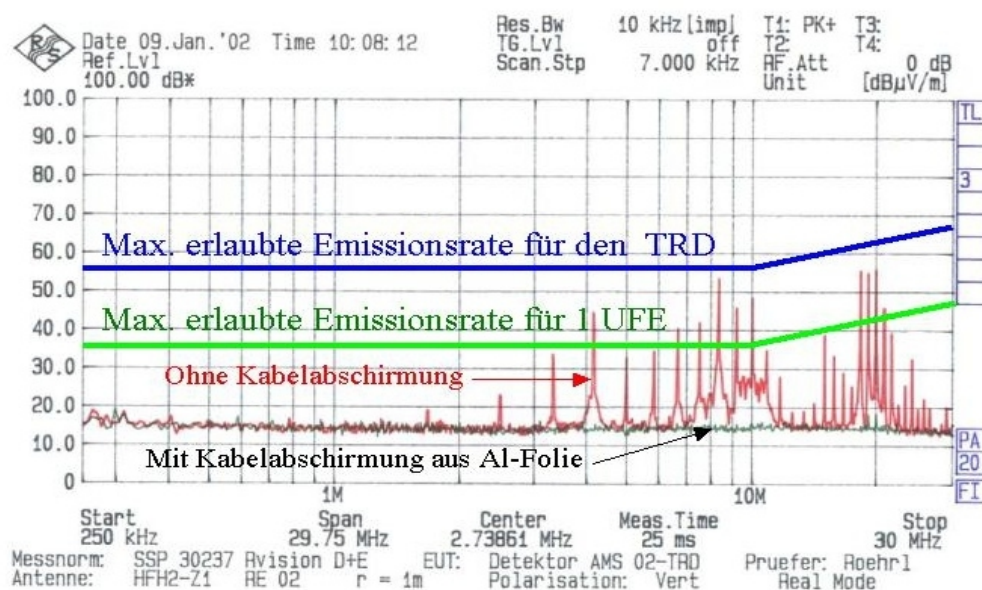


Abbildung 5.4: Emission durch die TRD-FE-Ausleseelektronik [84].

stimmt mit dem vor dem Test ermittelten Wert überein und zeigt somit die volle Funktionsfähigkeit der FE-Elektronik. Die elektromagnetische Abstrahlung der Testapparatur im Frequenzbereich von 250 kHz bis 30 MHz ist in Abbildung 5.4 zusammen mit der für eine UFE-Platine bzw. den gesamten TRD maximal erlaubten Emissionsrate nach NASA-Spezifikation dargestellt. Dieses maximale Limit konnte erst durch eine zusätzliche Metall-Abschirmung der Signalkabel zur UFE-Platine unterschritten werden. Im AMS-02-TRD wird diese Abschirmung aus einem Geflecht aus Kupfer und aluminisierter Kaptonfolie realisiert [84].

5.3 Radiatormaterial

Die Weltraumtauglichkeitsuntersuchungen mit dem AMS-02-TRD Radiatormaterial beschränken sich auf Messungen des Ausgasverhaltens dieses Fibernaterials mit der Bezeichnung LRP 375 BK in einem Thermovakuum-Test (siehe dazu auch Kapitel 3.1.2). Das von der NASA vorgegebene Limit für Niederschlagsraten auf der ISS von $10^{-14} \frac{\text{g}}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$ läßt sich unter Berücksichtigung des Raumwinkels in einen maximal erlaubten Massefluß durch die beiden Belüftungslöcher im TRD von je 2.54 cm Durchmesser von $1.4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{s}}$ umrechnen. Unter der Annahme eines vernachlässigbaren Ausgasverhaltens des Straw-Materials ergibt dieser Wert eine maximale Sublimationsrate für das Radiatormaterial von $\sim 1.2 \cdot 10^{-12} \frac{\text{g}}{\text{s}\cdot\text{m}^2}$ bei einer Radiatoroberfläche von 90 m^2 . Diese Sublimationsrate berücksichtigt sowohl das Ausgasen und die Verdampfung des Radiatormaterials,



Abbildung 5.5: Soxhlet-Apparatur zur Reinigung des Radiatormaterials [50].

als auch die Rekondensation des gasförmigen Materials im Radiator. Um dieses Ausgaslimit zu erfüllen, wird das Radiatormaterial 90 min lang in einem Soxhlet-Extraktionsverfahren mit Dichlormethan (CH_2Cl_2) gereinigt, um schwerlösliche Bestandteile wie z.B. Alkoholderivate aus dem Radiatormaterial zu entfernen. Ein Foto dieser Soxhlet-Apparaturen ist in Abb. 5.5 dargestellt. Man erkennt den Siedekolben mit dem Lösungsmittel und den darüber befindlichen Extraktionsaufsatz mit Hülse zur Aufnahme des Radiatormaterials und den Rückflußkühler³.

Das Ausgasverhalten des Radiatormaterials wird in zwei Stufen untersucht⁴. Zunächst wird ein Standardausgastest⁵ durch Messung des Masseverlustes durch

³Institut für Organische Chemie der RWTH Aachen

⁴Fa. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf Ges.m.b.H.

⁵nach ASTM E 595/ESA PSS 01-702

Wägen an Luft vor und nach einem 24 stündigen Thermalvakuum (Temperatur: 60°C , Druck: $10^{-5} - 10^{-6} \text{ mbar}$) durchgeführt. Der Masseverlust in Relation zur Ausgangsmasse (TML⁶) liegt bei 0.04 % bei einem Wasseranteil von 50 %. Rekondensation (CVCM⁷) ist nicht sichtbar womit die vorgegebenen Limits erfüllt werden ($\text{TML} \leq 1.0 \%$, $\text{CVCM} \leq 0.1 \%$). In einem zweiten Test wird die Sublimationsrate des Materials nach 144 h unter Thermalvakuum (Temperatur und Druck wie oben) bestimmt⁸. Dazu wird der Masseverlust als Funktion der Zeit ermittelt und daraus die Sublimationsrate berechnet. Nach 144 h Thermalvakuum erreicht die Sublimationsrate des Radiatormaterials einen Wert $\sim 1 \cdot 10^{-12} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ und erfüllt damit das für die Mission geforderte Limit. Die Herstellung aller 984 Radiatormodule (3 Radiatormodule pro Straw-Modul) in einer Serienproduktion wurde bereits abgeschlossen.

5.4 Weltraumtauglichkeit der Straw-Module

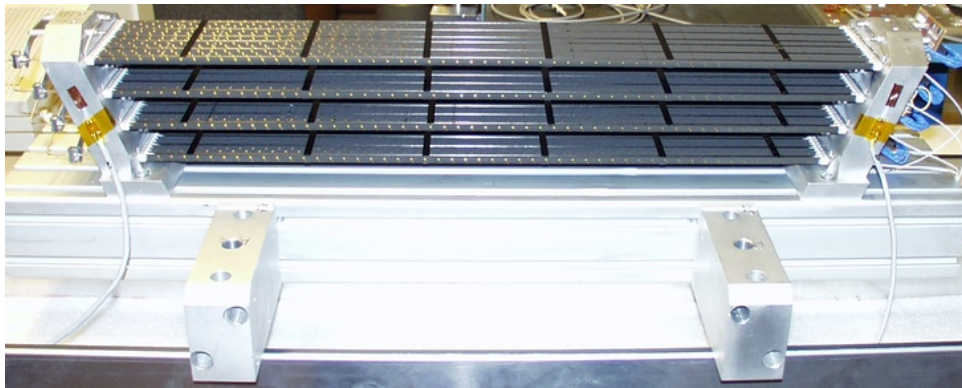


Abbildung 5.6: *Vibrations- und Thermovakuumtestreihe: Darstellung der Aluminium-Halterung mit vier Straw-Modulprototypen.*

Zur Prüfung von Straw-Modulprototypen wurde eine Halterung aus Aluminium entwickelt, in der nacheinander vier Module aus dem Straw-Material der ersten und der zweiten Charge eingebaut und ohne Umbaumaßnahmen jeweils in einem Vibrations- und Thermovakuumtest geprüft werden können. Die Konstruktion entspricht der eines Modul-Turmes einer 90° -Oktagonwand mit der Gasversorgung an der einen und der UFE-Ausleseplatine an der anderen Stirnseite. Die Länge der Module wurde so gewählt, daß das mit 658 mm längste Modul dem Abstand zwischen den beiden CFC-Platten der Schottwände entspricht. Eine Darstellung dieses Aufbaus auf einem Aluminiumsockel ist in Abbildung 5.6 zu erkennen.

Vor und nach der jeweiligen Testreihe wird die Gasdichtigkeit der seriell verbundenen Module mit Helium, sowie die Gasverstärkung jedes einzelnen Moduls in $\text{Ar}/\text{CO}_2(82 : 18)$, das in den Laboren zu Testzwecken eingesetzt wird, an drei Positionen bestimmt. Die Module gelten als weltraumtauglich, wenn sich keine Änderungen in der Gasdichtigkeit und Gasverstärkung, sowie in den Resonanzfrequenzen ergeben, die in einem Vibrationstest bestimmt werden. Die erste Eigenfrequenz muß

⁶engl. **T**otal **M**ass **L**oss

⁷engl. **C**ollected **V**olatile **C**ondensable **M**aterial

⁸nach ASTM E 1559/ESA PSS 01-702 [47]

weiterhin oberhalb von 50 Hz liegen. Die Testapparaturen zur Bestimmung der Gasdichtigkeit und Gasverstärkung dieser Qualifizierungsmodule werden auch während der Serienproduktion der Flug-Module eingesetzt, weshalb in den folgenden Abschnitten zunächst alle Teststände der Serienproduktion mit den Meßergebnissen der einzelnen Qualifizierungsmodule beschrieben und im Anschluß daran die Ergebnisse der Vibrations- und Thermovakuumtestreihen vorgestellt werden.

5.4.1 Untersuchungen während der Herstellung der Straw-Module

Abb. 5.7 zeigt das Verlaufsdiagramm der Serienproduktion von den beschriebenen Kurzzeitmessungen der Gasdichtigkeit an Einzel-Straws (siehe Kap. 4.2.5) bis zum fertigen, in das TRD-Oktagon einbaufähigen Modul. Die Meßapparaturen lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. Teststände wie der Drahtspannungs- (Kap. 5.4.2), Rausch- (Kap. 5.4.3) und Signal-Durchgangstest, die während der Herstellung der Module durchgeführt werden und der Produktionsüberwachung dienen. Zu diesem Zeitpunkt festgestellte Mängel an den Modulen können noch vor der finalen Verklebung der Endstücke behoben werden.

2. Apparaturen wie der Leck- (Kap. 5.4.4) und der Serientest (Kap. 5.4.5), sowie der Gasverstärkungsmeßstand (Kap. 5.4.6), die zur Qualitätskontrolle und -sicherung von den fertigen Straw-Modulen durchlaufen werden. Anhand der Ergebnisse dieser Messungen entscheidet sich, ob ein Straw-Modul in das Oktagon eingebaut werden kann oder verworfen werden muss.

Die Untersuchungen an den Modulprototypen zwischen den Vibrations- und Thermovakuumprüfungen werden mit dem Lecktest und dem Gasverstärkungsmeßstand durchgeführt.

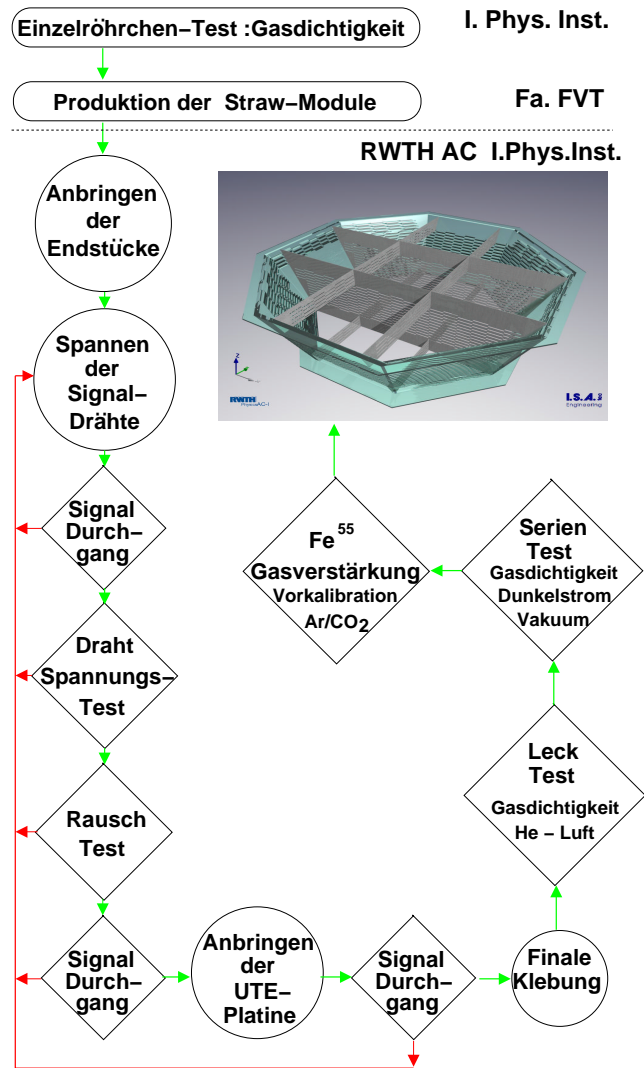


Abbildung 5.7: Verlaufsdiagramm zur Serienproduktion der Straw-Module.

5.4.2 Messung der Drahtspannung

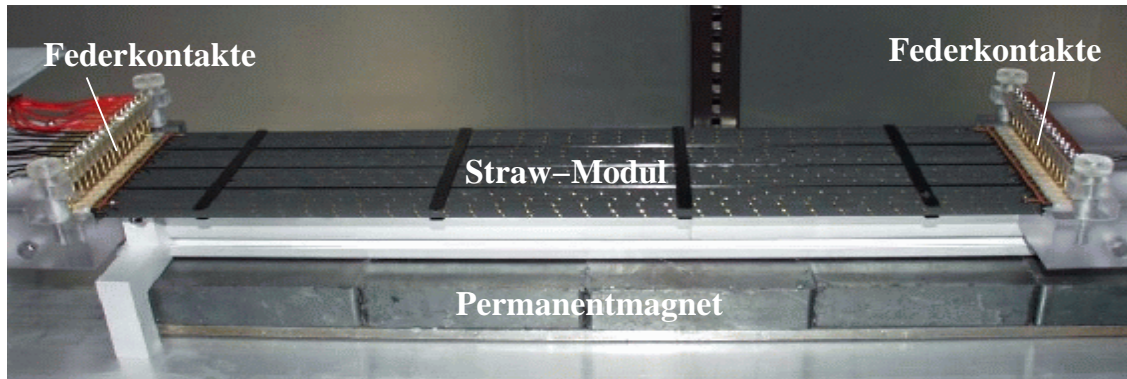


Abbildung 5.8: Apparatur zur Messung der Drahtspannung.

Das Instrument zur Messung der mechanischen Spannung der Drähte in einem Straw-Modul versetzt die einzelnen Drähte in Eigenschwingung und mißt deren Frequenz. Unter der Annahme eines homogenen Drahtes und eines im Vergleich zur Drahtlänge kleinen Drahtdurchmessers und kleiner Schwingungsamplitude läßt sich die Masse m_t , mit der ein Draht der Länge L gespannt wurde (siehe auch Abschnitt 4.1), aus der gemessenen Frequenz f wie folgt bestimmen [96]:

$$m_t = \frac{4 \cdot L^2 \cdot f^2 \cdot \rho_l}{g} \quad (5.1)$$

mit der Erdbeschleunigung g und $\rho_{l,Wolfram} = 13.45 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m}$. In Abbildung 5.8 ist ein Bild der Apparatur mit einem Straw-Modul zu erkennen. Das Gerät wird über Federkontakte an die Cu-Te-Stücke an beiden Endstücken des noch nicht gasdicht verklebten Straw-Moduls angeschlossen und leitet Strompulse durch die Drähte. Durch Wechselwirkung des Magnetfeldes eines unter dem Modul positionierten Permanentmagneten und der Magnetfelder der stromdurchflossenen Drähte, werden diese aus der Ruheposition ausgelenkt und in Schwingungen versetzt. Bei diesem Vorgang wird in dem jeweiligen Draht eine elektrische Spannung induziert, dessen Amplitude in der Eingangsstufe des Meßgerätes verstärkt, gefiltert und diskriminiert wird. Durch die Mittelung über 10 Schwingungsperioden läßt sich die Periodendauer und damit die Frequenz der Eigenschwingung bestimmen (näheres hierzu siehe auch [95]).

Abbildung 5.9 zeigt die an einem Modul der Länge $L = 658 \text{ mm}$ aus dem Straw-Material der ersten Charge gemessene Zugspannung m_t . In der Serienproduktion der Straw-Module wird jeder Anodendraht mit einer Masse von $m_t = 100 \text{ g}$ gespannt. Nach [96] liegt die mechanische Ablage eines Drahtes der Länge 2 m in der Mitte eines Moduls dann bei $\sim 65 \mu\text{m}$. Es ist zu erkennen, daß die gemessenen Zugspannungen alle innerhalb eines Toleranzbereiches von $(100 \pm 5) \text{ g}$ liegen ($m_t = (101.4 \pm 1.2) \text{ g}$). Dieser Toleranzbereich im Spanngewicht führt zu einer zusätzlichen Variation in der Drahtablage von $< 5 \mu\text{m}$ in der Mitte eines 2 m langen Moduls. Diese maximale Gesamtablage von $70 \mu\text{m}$ ruft aber nach den Ausführungen

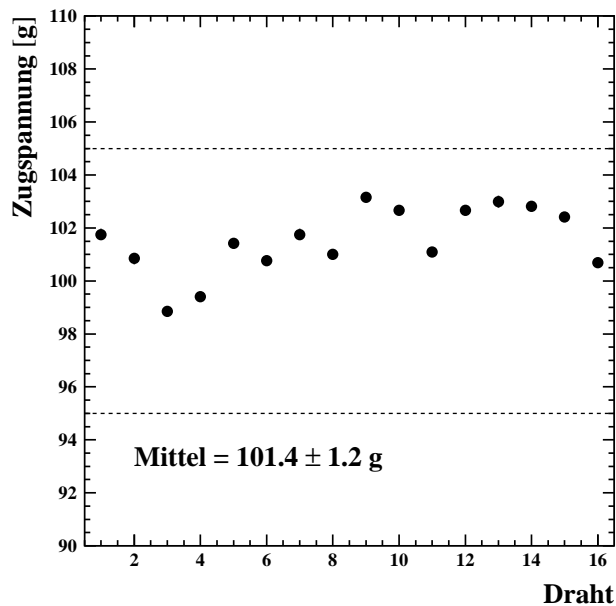


Abbildung 5.9: Messung der Drahtspannung an einem 658 mm langen Modul.

in Abschnitt 3.2.2 keine wesentlichen Änderungen in der Gasverstärkung hervor.

In der Serienproduktion der Straw-Module und Prototypen wird dieser Toleranzbereich eingehalten, d.h. Drähte die von diesen Werten abweichen, werden ersetzt. Somit liegen auch die Spannungsgewichte der Drähte der sieben weiteren Straw-Modulprototypen (Charge 1 + Charge 2) innerhalb dieses Toleranzbereiches.

5.4.3 Rausch-Test: Hochspannungsfestigkeit der Straw-Module

Ein weiterer Teststand, der der Produktionsüberwachung dient, ist ein Rausch-Test zur Bestimmung der HV-Festigkeit der Module. Die zu diesem Zeitpunkt der Produktion an den Endstücken noch unvergossenen Module werden dazu in einem Gas-tank positioniert, der mit einer $Ar/CO_2(82 : 18)$ -Gasmischung befüllt werden kann ($p \approx 1050 \text{ mbar}$).

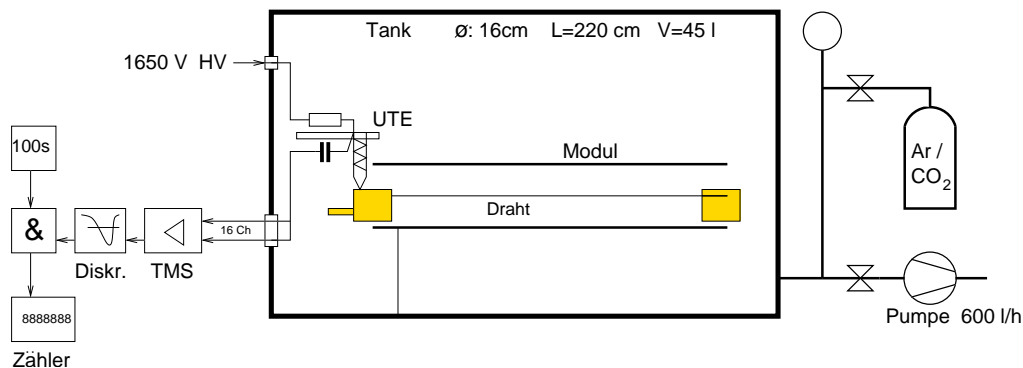


Abbildung 5.10: Schematischer Aufbau des Meßstandes zur Bestimmung der HV-Festigkeit der Straw-Module.

Durch Federkontakte wird eine elektrische Verbindung zwischen den Cu-Te-Stücken einer Stirnseite des Moduls und einer ebenfalls im Gastank angebrachten UTE-Platine hergestellt. Über diese Platine kann zum einen eine Hochspannung von $U = 1650 \text{ V}$ an das Modul angelegt werden, und zum anderen die durch elektronisches Rauschen in den Drähten erzeugten Signale ausgekoppelt und 16 TMS-Vorverstärkern zugeführt werden. Die Pulse der Vorverstärker werden über Diskriminatoren, deren Schwellen 2σ über dem Rauschen liegen, an Zähler geleitet. Bei angelegter Hochspannung wird für jeden Draht die Rate der elektrischen Pulse \dot{N} , die oberhalb der Diskriminatorschwelle liegen, in einem Zeitraum von 100 s bestimmt. Der schematische Aufbau dieses Teststandes mitsamt dem Blockschaltbild der Ausleseelektronik ist in Abbildung 5.10 zu finden.

Die Module werden so lange auf Hochspannung gelegt, bis die Rate der elektrischen Pulse an einem Draht bei $\dot{N} < 10 \frac{1}{s}$ liegt, was erfahrungsgemäß nach ca. 30 min erreicht wird. Diese Toleranzgrenze liegt einen Faktor 4 oberhalb der Rate, mit der Myonen der Höhenstrahlung auf ein Straw der maximalen Länge von 2 m einfallen. Diese durch Stoßprozesse der kosmischen Höhenstrahlung mit den Molekülen der Erdatmosphäre erzeugten sekundären Myonen haben auf Meereshöhe eine mittlere Energie von $\approx 4 \text{ GeV}$ [91] und eine Intensität von $I \approx 200 \frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ [92]. Bei den weiteren acht Modul-Prototypen ergeben sich Raten von 100 bis 150 Pulsen in einem Meßzeitraum von 100 s.

5.4.4 Lecktest: Überprüfung der Gasdichtigkeit mit Heliumgas gegenüber Luft

In einem Lecktest wird die Leckrate eines fertigen Straw-Moduls mit Helium im Innern der Röhrrchen gegenüber Luft im Außenraum nach der Druckabfallmethode bestimmt.

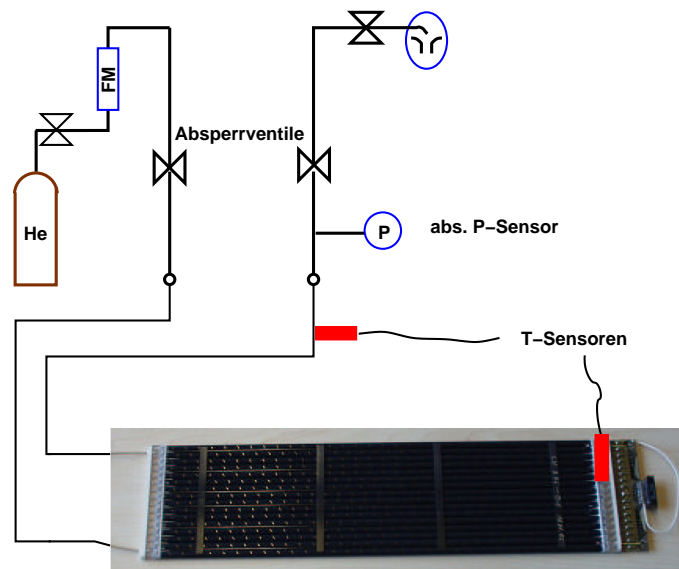


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung des Leck-Teststandes mit Absolutdruck-Sensor, Temperatursensoren auf dem Straw-Modul und Flußmesser (FM).

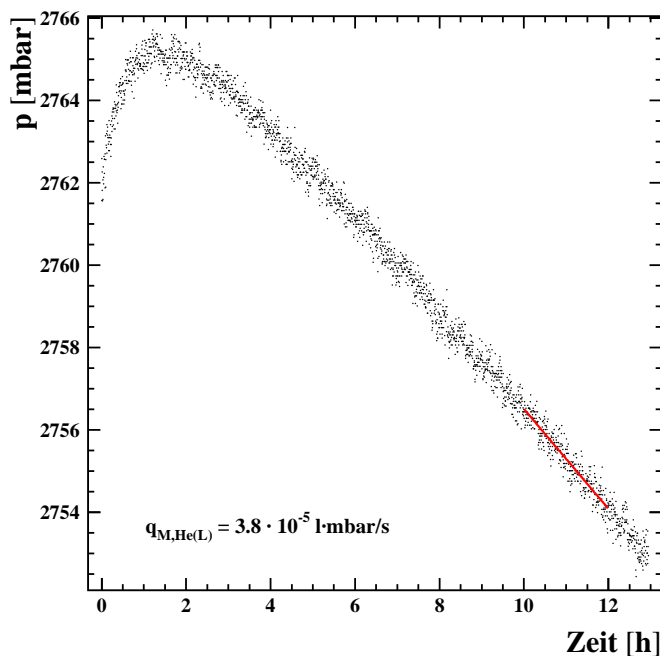


Abbildung 5.12: *He-Druckverlauf (Normierung auf $T = 20^{\circ}\text{C}$) in dem Modulprototypen der Länge $L = 658.9 \text{ mm}$ aus dem Straw-Material der ersten Charge.*

Eine Prinzipskizze des Meßstandes, der zur Qualitätskontrolle der Module dient, ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Das Heliumgas wird über ein Flussmesser mit Nadelventil kontrolliert in mehreren Spülschritten in das zu testende Modul eingelassen, bis sich letztendlich ein Innendruck von $p \approx 2750 \text{ mbar}$ eingestellt hat. Das Modul wird dabei über Doppel-O-Ring-Kupplungen an das Gasversorgungssystem angeschlossen. Durch Absperrventile läßt sich das Innenvolumen des Moduls vom restlichen Gasversorgungssystem abschotten (Blindmessung: $q < 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$).

Mit einem Absolutdrucksensor (Auflösungsvermögen: 0.4 mbar) wird der zeitliche Verlauf des Gasdruckes im Modul über einen Zeitraum von 12 Stunden ermittelt und mit Hilfe von auf dem Modul angebrachten Temperatursensoren (Auflösungsvermögen: 0.03°C) auf Standardbedingungen normiert. Für einen größeren Durchsatz an Straw-Modulen ist der Teststand für die gleichzeitige Messung von zwei Kammern, d.h. der Tagesproduktion an Modulen ausgelegt.

Den zeitlichen Verlauf des Gasdruckes, gemessen in einem Modulprototypen ($L = 658 \text{ mm}$) der

Länge [mm]	Module: Charge 1		Module: Charge 2	
	$q_{M,He(L)} \cdot 10^{-5}$ [$\frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$]	$q_{M,He(L)} \cdot 10^{-5}$ [$\frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$]	$q_{M,He(L)} \cdot 10^{-5}$ [$\frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$]	$q_{M,He(L)} \cdot 10^{-5}$ [$\frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$]
586.9	5.7	9.7	2.6	4.4
610.9	7.0	11.5	2.7	4.4
634.9	4.5	7.1	8.3	13.0
658.9	3.8	5.8	4.0	6.1
Σ	21.0	34.1	17.6	27.9

Abbildung 5.13: *Gasdichtigkeit der Straw-Modulprototypen, gemessen mit Helium im Innern der Module und Luft im Außenraum.*

ersten Charge, zeigt Abbildung 5.12. Der zu Beginn der Messung ansteigende Gasdruck ist auf Temperatureffekte zurückzuführen. Durch Anpassung einer Geraden in einem Zeitintervall von 10 h bis 12 h nach der Befüllung des Moduls mit Helium läßt sich die Leckrate des Moduls zu $q_{M,He(L)} = 3.8 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$ (bei Normierung auf Standarddruck) bestimmen. Die Leckrate unterschreitet dabei das gesetzte Limit von $\sim 11 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$, das einem CO_2 -Sicherheitsfaktor von ~ 4 entsprechen würde (siehe Abschnitt 4.2.5), deutlich. Der Fehler der Leckrate ist durch unregelmäßige Schwankungen des Druckes und der Temperatur bedingt, und kann durch den Vergleich mehrerer Messungen unter identischen Bedingungen auf ca. $0.5 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$ abgeschätzt werden.

Die mit den weiteren Modulprototypen aus dem Straw-Material der Charge 1 bzw. 2 während der Produktion gemessenen He -Leckraten sind in Tabelle 5.13 aufgeführt. Es ist zu erkennen, daß die Leckraten zweier Module der Charge 1 ($L = 586.9 \text{ mm}$, $L = 610.9 \text{ mm}$) und eines der Charge 2 ($L = 634.9 \text{ mm}$) leicht unter- bzw. oberhalb des Limits von $11 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$ liegen. Anhand dieser Prototypen soll geklärt werden, ob derartige Module mit leicht erhöhten Leckraten den Weltraumtauglichkeitsprüfungen standhalten und damit ebenfalls im TRD verwendet werden können. Es zeigt sich, daß die Summe der Leckraten der Module aus dem Straw-Material der Charge 2 um einen Faktor ~ 1.2 kleiner ist als die Summe der Module aus dem Material der ersten Charge. Dieser Wert ergibt sich auch aus der Lage der Maxima der an einzelnen Straws gemessenen Leckraten in Kurzzeitmessungen mit He gegen Luft (siehe Abbildung 4.24).

Mit Hilfe der Apparatur wird zudem nach der jeweiligen Vibrations- bzw. Thermovakuumtestreihe zur Weltraumtauglichkeitsprüfung die Gasdichtigkeit der vier zu einem Turm verbundenen Kammerprototypen bestimmt. Für die weiteren Messungen zur Weltraumtauglichkeit wird die Leckrate $q_{M,Gas}$ in der Einheit $[\frac{l \cdot mbar}{s}]$ angegeben, da es nur auf quantitative Änderungen der integralen Leckrate vor und nach der jeweiligen Prüfung ankommt.

5.4.5 Serientest: Gasdichtigkeits- und Dunkelstrommessungen im Vakuum

In einem Serientest wird gleichzeitig die Einzelleckrate von fünf Straw-Modulen bei einer Befüllung mit He - bzw. CO_2 -Prüfgas gegen Vakuum nach der Druckabfallmethode bestimmt. Zusätzlich werden separat für jedes Modul die über die Entkopplungskondensatoren auf den UTE-Ausleseplatinen, die über die Kammerkörper und die von den UTE-Platinen durch Koronaentladungen auf umliegende Modulhalterungen abfließenden Dunkelströme gemessen. Die Testapparatur ist Bestandteil der Qualitätskontrolle der TRD-Straw-Module und wird von den Modulprototypen sowie von jedem Modul der Serienproduktion durchlaufen.

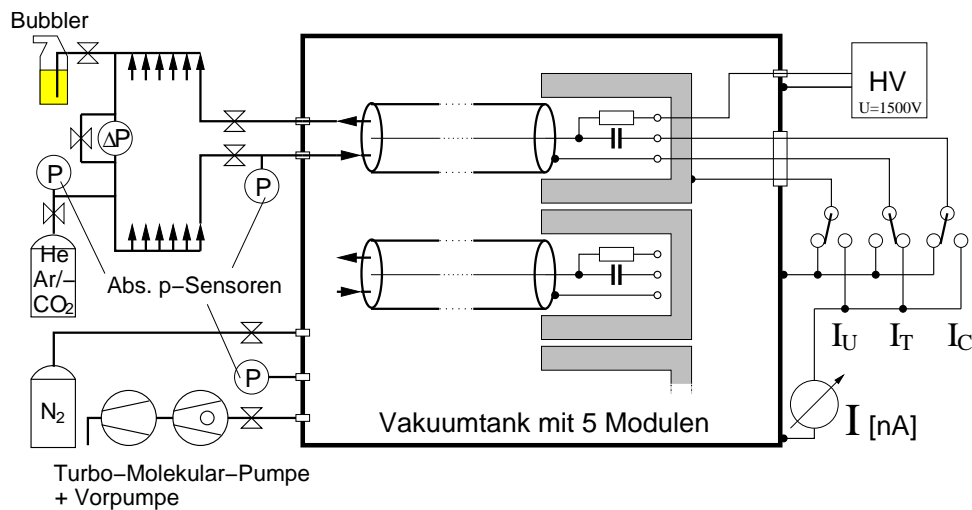


Abbildung 5.14: *Prinzipische Skizze des Serienteststandes.*

In Abb. 5.14 ist eine Prinzipskizze des Teststandes dargestellt. Zu erkennen ist der zylinderförmige Vakuumentank, der mit Hilfe einer Turbo-Molekular-Pumpe mit vorgeschalteter Membranpumpe auf ein Vakuum von $\sim 10^{-5}$ mbar evakuiert werden kann. Im Innern des Tankes können gleichzeitig fünf Straw-Module positioniert werden und einzeln über ein Gasversorgungssystem mit dem Prüfgas auf einen Enddruck von ~ 1750 mbar befüllt werden. Die Verbindung zwischen dem Gasversorgungssystem und den Modulen wird mit Doppel-O-Ring-Kupplungen hergestellt. Das Gasversorgungssystem für ein einzelnes Modul entspricht im wesentlichen dem des Lecktestes. Somit kann das Modulvolumen durch Absperrventile vom äußeren System getrennt werden und der Druck- bzw. der Temperaturverlauf in jedem Meßvolumen mit Hilfe von entsprechenden Sensoren bestimmt werden. Blindmessungen haben ergeben, daß die Leckrate des Gasversorgungssystems in allen fünf Kanälen $< 0.1 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s}}$ ist. Mit einer am Gasversorgungssystem angeschlossenen Membranpumpe kann das gesamte Innenvolumen für einen schnelleren Gasaustausch abgepumpt werden. Ein Foto der Apparatur mit dem Gasversorgungssystem, dem Vakuumentank, sowie den Gasversorgungs- bzw. Elektronikdurchführungen im Deckelflansch ist in Abb. 5.15 zu erkennen.



Abbildung 5.15: *Serientest: Gasversorgungssystem und Vakuumentank.*

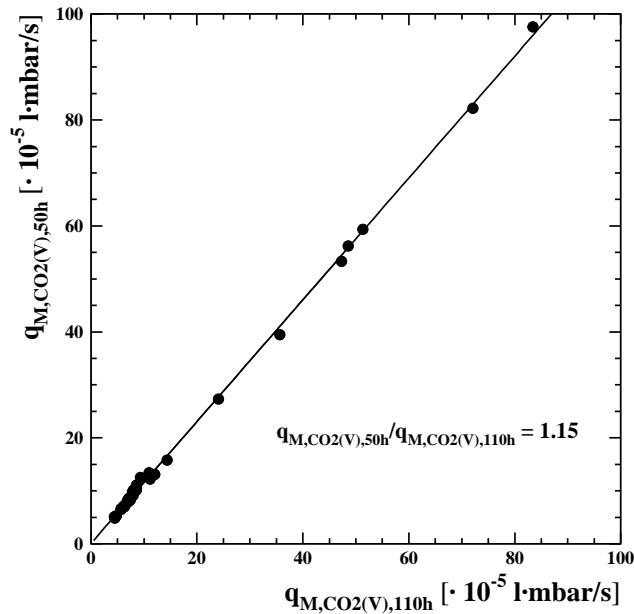


Abbildung 5.16: Korrelation zwischen den in einem Zeitintervall um 50 h und 110 h nach dem Befüllen der Module mit CO_2 ermittelten Leckraten.

Zunächst wird eine 12-stündige Messung mit Helium in den Straw-Modulen vorgenommen, um mit dem entsprechenden Umrechnungsfaktor von ~ 1.3 die gegen Luft gemessene He-Leckrate zu verifizieren. Über die Anpassung einer Geraden in einem Zeitintervall $> 8 h$ an den temperaturkorrigierten Druckverlauf und der Kenntnis des Meßvolumens kann diese Leckrate bestimmt werden.

Beispielhaft ist in Abbildung 5.17 a) der auf Standardbedingungen normierte Druckverlauf bei einer Befüllung des Moduls aus dem Straw-Material der Charge 1 und der Länge $L = 658.9 mm$ mit Helium dargestellt. Der zu Beginn der Messung ansteigende Druck ist auf Temperatureffekte im Außenraum zurückzuführen. Durch Anpassung einer Geraden an die Druckkurve im Zeitintervall zwischen $t = 10 h$ bis $12 h$ ergibt sich eine Leckrate von $q_{M,He(V)} = 5.4 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$, die einen Faktor ~ 1.4 über der gegen Luft gemessenen Leckrate liegt.

Im Anschluß daran erfolgt eine 120- bzw. 60-stündige Messung mit CO_2 als Füllgas. Die Bestimmung der Leckrate und daraus dann des Sicherheitsfaktors (siehe Gleichung 4.29) erfolgt, ähnlich wie bei der Messung mit He , durch Anpassung einer Geraden an die Druckkurve in einem Zeitintervall von $\pm 2 h$ um $110 h$ bzw. $50 h$. In diesem Zeitintervall wird die Leckrate als konstant angenommen und es kann die Leckrate im stationären Zustand mit dem Umrechnungsfaktor $f_{\infty,110h} = 1.69$ (siehe auch Abschnitt 4.2.3: Messung mit CO_2 -Prüfgas) ermittelt werden. Nachdem die Messungen an den ersten Straw-Modulen der Serienproduktion noch $120 h$ dauerten, konnte die Meßzeit für weitere Module auf $60 h$ reduziert werden, da eine direkte Korrelation zwischen der in einem Zeitintervall um $110 h$ ($q_{M,CO_2(V),110h}$) und der in einem Intervall um $50 h$ ($q_{M,CO_2(V),50h}$) bestimmten Leckrate besteht ($q_{M,CO_2(V),50h}/q_{M,CO_2(V),110h} = 1.15$). Damit ergibt sich ein Umrechnungsfaktor für die Leckrate im stationären Zustand von $f_{\infty,50h} = 1.94$. Der sich daraus ergebende Sicherheitsfaktor sollte einen Wert von 4 übersteigen (siehe auch Abschnitt 4.2.5).

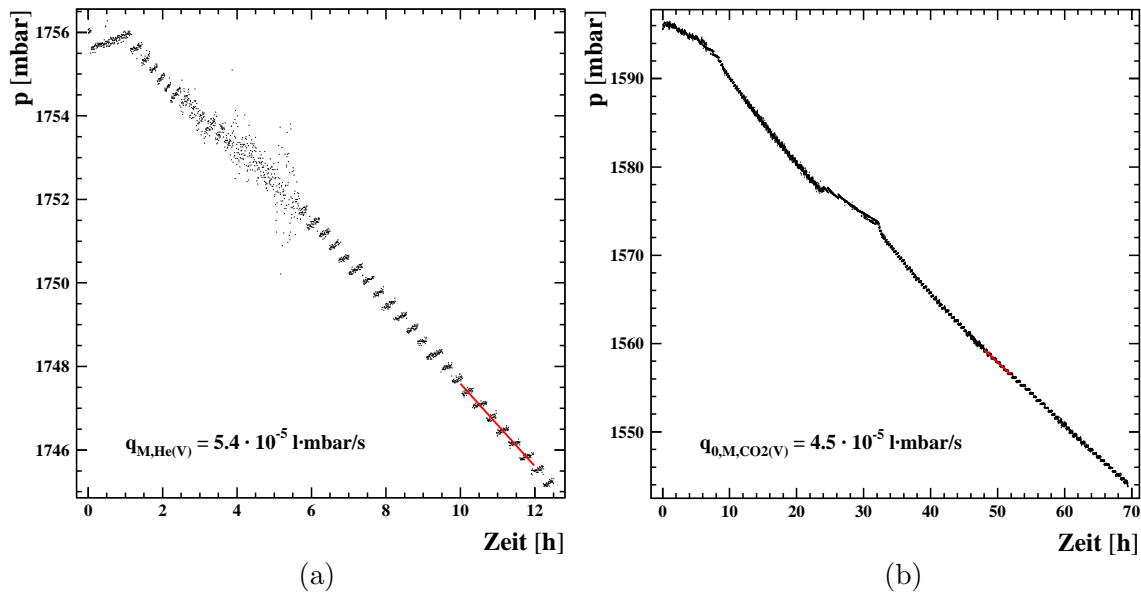


Abbildung 5.17: Normierte Druckverläufe ($T = 20^\circ\text{C}$) in dem Modulprototypen der Länge $L = 658.9 \text{ mm}$ aus dem Straw-Material der ersten Charge bei Befüllung a) mit Helium und b) mit CO_2 .

Der auf Standardbedingungen normierte Druckverlauf bei einer Befüllung des obigen Modulprototypen mit CO_2 ist in Abbildung 5.17 b) zu erkennen. Durch Anpassung einer Geraden im Meßintervall $48 \text{ h} < t < 52 \text{ h}$ läßt sich die Leckrate zu $q_{0,M,\text{CO}_2(V)} = 4.5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$ berechnen. Mit dem Korrekturfaktor $f_{\infty,50\text{h}} = 1.94$ ergibt sich $q_{M,\text{CO}_2(V)} = 2.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$ für die Leckrate im stationären Zustand und daraus wiederum ein Sicherheitsfaktor von 6.7, der weit oberhalb des geforderten Faktors von 4 liegt. Da die Messungen im Vakuum durchgeführt werden, sind Temperatur- und damit auch Druckschwankungen nicht so stark ausgeprägt wie im Lecktest, weshalb der Fehler der ermittelten Leckraten bei ca. $0.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$ liegt.

Für die Dunkelstrommessungen werden die Straw-Module mit einem $\text{Ar}/\text{CO}_2(82 : 18)$ -Gasgemisch bei einem Druck von $p \approx 1100 \text{ mbar}$ befüllt. Dieser Druck entspricht dem maximal vorgesehenen Betriebsdruck im AMS02-TRD. Über vakuumfeste Durchführungen im Deckelflansch des Tankes kann an jedes einzelne Modul eine Hochspannung von $U = 1500 \text{ V}$ angelegt werden und die Dunkelströme über die drei verschiedenen Kanäle (Entkopplungskondensator I_C , Kammerkörper I_T und Kammerhalterung I_U) mit Hilfe eines Piko-Amperemeters außerhalb des Tankes einzeln gemessen werden. Das elektrische Schaltbild ist im rechten Teil der Abbildung 5.14 zu erkennen.

In Tabelle 5.1 sind die mit den weiteren Modulprototypen gemessenen Leckraten sowie die Summen der Dunkelströme aufgelistet. Die Leckratenbestimmungen mit den Modulen aus dem Straw-Material der zweiten Charge bei einer Befüllung mit Helium konnten aus terminlichen Gründen nicht durchgeführt werden. Grundsätzlich zeigen sich deutliche Korrelationen zwischen den ermittelten Leckraten. So sind die mit Helium gegen Vakuum gemessenen Leckraten einen Faktor ~ 1.3 größer als die gegen Luft gemessenen Leckraten. Zudem liegen die Sicherheitsfaktoren der

Modul Charge	Länge [mm]	Leckrate	Verhältnis	Leckrate	SF	Dunkelstrom
		$q_{M,He(V)}$ $\cdot 10^{-5} \left[\frac{l \cdot mbar}{s} \right]$	$\frac{q_{M,He(V)}}{q_{M,He(L)}}$	$q_{M,CO_2(V)}$ $\cdot 10^{-5} \left[\frac{l \cdot mbar}{s} \right]$		ΣI [nA]
1	586.9	7.1	1.3	3.4	4.1	0.5
	610.9	8.7	1.2	3.5	4.2	0.3
	634.9	5.9	1.3	2.3	6.5	0.4
	658.9	5.4	1.4	2.3	6.7	0.3
2	586.9	-	-	2.7	5.1	0.3
	610.9	-	-	2.5	5.7	0.3
	634.9	-	-	4.2	3.6	0.3
	658.9	-	-	3.1	5.0	0.3

Tabelle 5.1: Helium/ CO_2 -Leckraten der Straw-Modulprototypen, gemessen gegen Vakuum; Sicherheitsfaktor (SF); Summe der Dunkelströme.

schon im Lecktest kritischen Module (Charge 1: $L = 586.9 \text{ mm}$ und 610.9 mm , Charge 2: $L = 634.9 \text{ mm}$) im Bereich des Grenzwertes von 4.

5.4.6 Automatisierte Messung der Gasverstärkung in Ar/CO_2

In Anlehnung an die Ausführungen zur Bestimmung der mechanischen Toleranzen der Module durch Gasverstärkungsmessungen in Abschnitt 3.2.2 soll hier der entsprechende automatisierte Teststand beschrieben werden. Mit der Apparatur kann lokal an beliebigen Punkten eines Straw-Moduls beliebiger Länge die Gasverstärkung in fließendem $Ar/CO_2(82 : 18)$ -Gas (Reinheit: $Ar: 5.0$, $CO_2: 4.5$), das in den Laboren zu Testzwecken verwendet wird, unter Verwendung von ^{55}Fe -Präparaten gemessen werden. Zusätzlich werden die Messungen der Gasverstärkung bei variabler Dichte und Hochspannung vorgestellt, woraus sich wiederum die Diethornparameter des Gasgemisches bestimmen lassen (siehe auch Abschnitt 4.3.3: Xe/CO_2).

In Abbildung 5.18 ist eine Aufnahme des Teststandes, der zur Qualitätskontrolle der Serienproduktion dient, dargestellt. Man erkennt zwei Straw-Module, die parallel zueinander, bei gleicher Ausrichtung der Stirnseiten der Module, auf einem Granitblock mit einer Oberflächengenauigkeit von $< 3.7 \mu m$ [97] positioniert sind. Zur Simulation der späteren Verhältnisse im TRD-Oktagon werden die Straw-Module an den Endstücken und den Schottwand-Positionen mit 7 mm starken Aluminiumbolzen mit einer mechanischen Toleranz von $< 5 \mu m$ unterlegt und zusätzlich an den Endstücken mit Aluminiumblechen wie an den Oktagonwänden fixiert. Von der linken Bildseite aus erfolgt die Gasversorgung der Module über ein System, das prin-

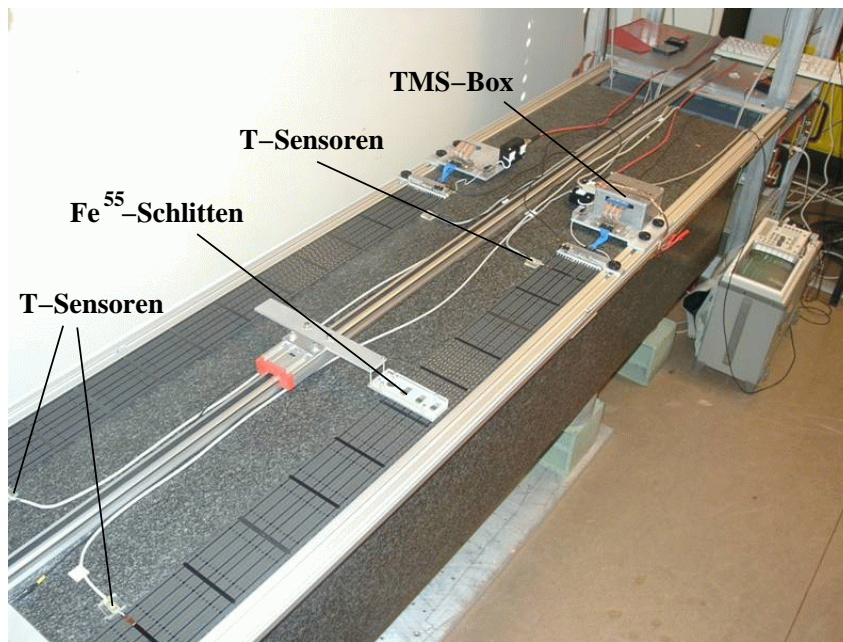


Abbildung 5.18: Automatisierter Gasverstärkungsmeßstand mit zwei Straw-Modulen auf einem Granitblock.

ziptuell dem der Lecktestapparatur entspricht (hier nicht zu erkennen). Über Nadelventile am Gaseinlaß und Gasauslaß werden der Gasfluß auf $f \approx 1 \text{ l/h}$ und der Innendruck auf $p_{abs} \approx 1013 \text{ mbar}$ bei einem Differenzdruck zwischen Gaseinlaß und Auslaß von $p_{diff} \approx 5 \text{ mbar}$ eingestellt und mit Hilfe von entsprechenden Sensoren im Gasversorgungssystem überwacht. Die Kontrolle der Temperatur erfolgt über vier auf der Oberfläche des Granitblockes angebrachte Sensoren. Da das Spülen der Module mit dem Ar/CO_2 -Gas sehr zeitaufwendig ist, werden die Module seriell von dem Gas durchflossen. In späteren Gasverstärkungsmessungen hat sich gezeigt, daß es ca. 8 h dauert, bis die Module bei obigem Gasfluß nahezu vollständig mit dem Gasgemisch befüllt sind.

Von der Elektronikausleseseite der Module aus erfolgt die HV-Versorgung sowie die elektrische Verbindung zu einem Vorverstärker, der hier in einer Box untergebracht ist. Für die automatisierte Messung lassen sich die einzelnen Kanäle der Straw-Module über einen Computer ansteuern. Die weitere Ausleseelektronik mit einem peaksensitiven 10 bit ADC entspricht der des Langzeitteststandes (siehe Abbildung 4.27 b)).

Eine Vorkalibration des ADC in Anlehnung an das in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Verfahren durch Aufnahme eines Spektrums von Testpulsen bekannter Spannung zeigt das Diagramm 5.19 a). Bei einer Testkapazität des Vorverstärkers von 2.1 pF und der Anpassung einer Geraden an die Meßpunkte ergibt sich ein Kalibrierungsfaktor des ADC von 19645 e^- pro ADC-Kanal (Nullpunkt der Funktionsanpassung: ADC-Kanal 205).

Für die automatisierte Messung der Gasverstärkung an verschiedenen Positionen über den Straw-Modulen befindet sich in der Mitte zwischen den beiden Modulen

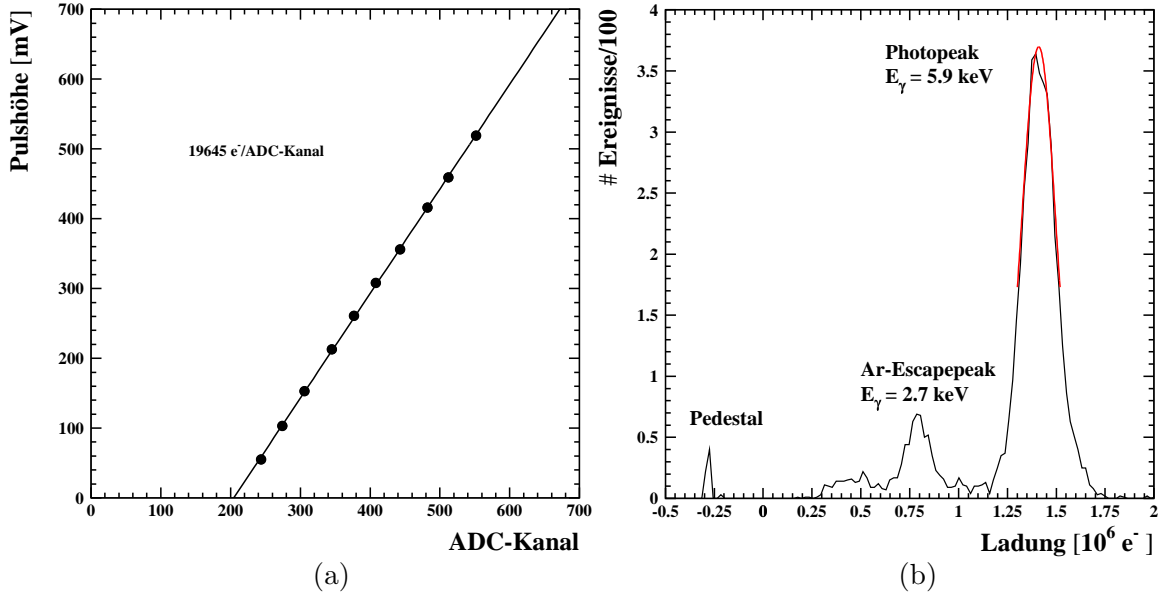


Abbildung 5.19: a) Kalibration des ADCs mit Testpulsen; b) Ar/CO₂-Spektrum ($U = 1350 \text{ V}$, $f \approx 1 \text{ l/h}$, $T = 21.6^\circ\text{C}$, $p = 1012 \text{ mbar}$).

eine Schiene mit einem Schlitten mit Schrittmotorsteuerung, der auf einem Ausleger mehrere $^{55}_{26}\text{Fe}$ -Präparate trägt. Die Präparate werden so auf dem Ausleger positioniert, daß alle 16 Straws eines Moduls bestrahlt werden können. Die mittlere Energie zur Bildung eines Elektron-Ion-Paares in Argon beträgt 26 eV, womit man bei einer Gesamtenergie von 5.9 keV Primärladungen von $227 e^-$ erhält. Mit der Ausleselektronik wird dann wiederum die Anzahl der Sekundärelektronen bestimmt, um daraus den Gasverstärkungsfaktor zu ermitteln. Das ladungskalibrierte Spektrum eines $^{55}_{26}\text{Fe}$ -Präparates, aufgenommen in einem Straw eines Modulprototypen bei einer Befüllung mit Ar/CO₂(82 : 18) und einer Hochspannung von $U = 1350 \text{ V}$ ist in Abbildung 5.19 b) zu erkennen. Neben Pedestal und Photopeak tritt in den Spektrum der Escapepeak deutlich hervor. Diese Ereignisse entstehen, wenn ein Fluoreszenzquant den Detektor verläßt und damit eine um 3.2 keV verringerte Energie im Straw deponiert wird. Durch Anpassung einer Gausskurve an den Photopeak läßt sich die Gasverstärkung aus der Lage des Maximums zu $G_\rho = 6210 \pm 115$ bestimmen. Diese um einen Faktor 2 höhere Gasverstärkung wie im späteren TRD (Xe/CO₂-Gas) hat meßtechnische Gründe.

Im folgenden werden die Diethornparameter ΔV und $E_{\min}(\rho_0)$ für das Ar/CO₂ (82 : 18)-Gasgemisch und die Proportionalkammer-Geometrie in Gasverstärkungsmessungen an Straw 12 eines 1400 mm langen Moduls durch Variation der Gasdichte ρ bei konstanter Hochspannung $U = 1350 \text{ V}$ ($\rightarrow \Delta V$) bzw. durch Variation der Hochspannung U bei konstanter, auf Standardbedingungen normierter Gasdichte $\rho_0 = 1.70 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ($\rightarrow E_{\min}(\rho_0)$) bestimmt:

$$G_\rho = \left(\frac{U}{\ln 200 \cdot 0.0015 \text{ cm} \cdot E_{\min}(\rho_0) \cdot \frac{\rho}{1.70 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}} \right)^{\frac{\ln 2 \cdot U}{\ln 200 \cdot \Delta V}} \quad (5.2)$$

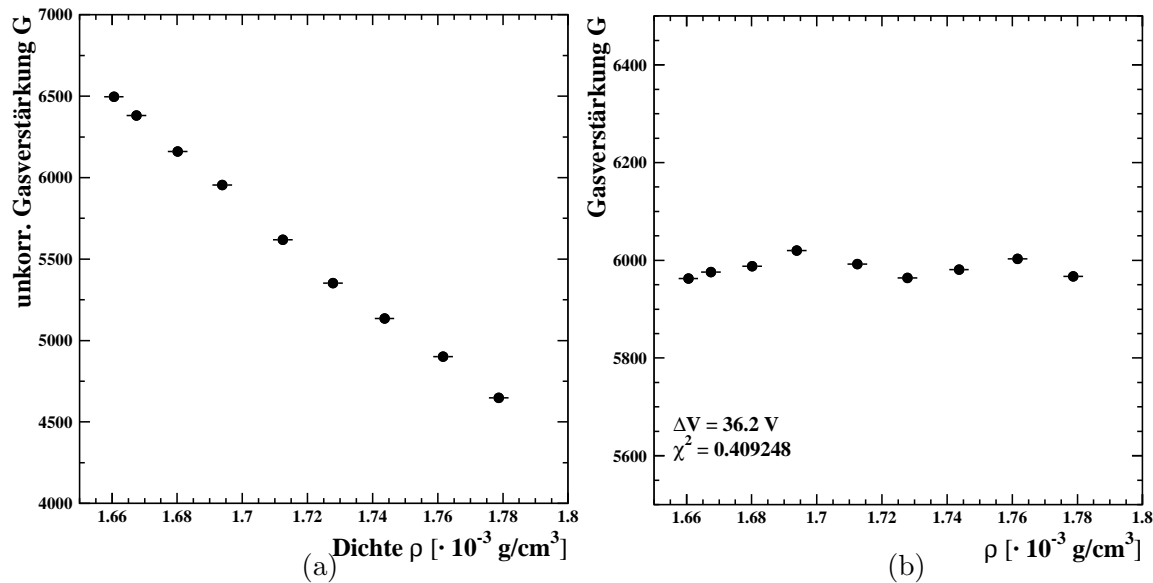


Abbildung 5.20: Dichtevariation (Ar/CO_2 , $U = 1350 \text{ V}$): a) Unkorrigierte Gasverstärkung G_ρ ; b) Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G ($\Delta V = 36.2 \text{ V}$).

Abbildung 5.20 a) zeigt die Abhängigkeit der Gasverstärkung G_ρ von der Dichte ρ des Gasgemisches. Dabei ergibt sich eine Änderung der Gasverstärkung von $\frac{\Delta G_\rho}{G_\rho} \approx 15 \%$ bei $\Delta \rho \approx 0.05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ entsprechend einem $\Delta T \approx 3 \text{ K}$ bei konstantem Druck $p = 1013 \text{ mbar}$ bzw. einem $\Delta p \approx 10 \text{ mbar}$ bei konstanter Temperatur $T = 293.15 \text{ K}$ (siehe Tabelle 5.2). Nach dem in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung von ΔV erhält man (siehe auch Abbildung 5.20 b)):

$$\Delta V = 36.2 \text{ V} \quad (5.3)$$

bei einem χ^2 von 0.4 und einer Gasverstärkung von $G = 5984$ (siehe Tabelle 5.2). Für die zu Beginn dieses Abschnitts bei $T = 21.6^\circ \text{C}$ und $p = 1012 \text{ mbar}$ in einem Straw gemessene Gasverstärkung ergibt sich nach einer Normierung auf Standardbedingungen: $G = 5875 \pm 110$.

In Abb. 5.21 ist die mit obigem Diethornparameter ΔV auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung gegenüber der Hochspannung U aufgetragen. Dabei erhält man durch Anpassung der Funktion 5.2 an die Meßpunkte (siehe Tabelle 5.2):

$$\Delta E_{min}(\rho_0) = 28.8 \text{ kV/cm}. \quad (5.4)$$

Eine Variation der an den Straw-Modulen anliegenden Hochspannung ($U_{Labor} = 1350 \text{ V}$) von $\Delta U = 10 \text{ V}$ führt zu einer Änderung der Gasverstärkung von $\frac{\Delta G}{G} \approx 10 \%$ (siehe Tabelle 5.2).

Für ein Modul der Länge $L = 2 \text{ m}$ kann zusammen mit den Diethornparametern für $Ar/CO_2(82 : 18)$ die relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der mechanischen bzw. totalen Drahtablage Δx berechnet werden (siehe Abschnitt 3.2.2). Abbildung 5.22 zeigt die Abhängigkeit bei $G = 6000$ und $U = 1350 \text{ V}$. Bei

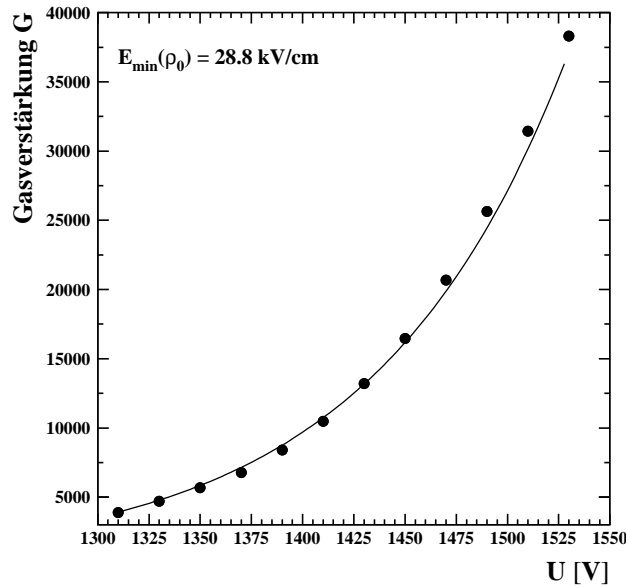


Abbildung 5.21: Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G in Abhängigkeit der Hochspannung U in $Ar/CO_2(82 : 18)$.

einer mech. Genauigkeit der Straw-Module von $100 \mu m$ variieren die an einem Straw-Modul gemessenen Gasverstärkungen um $\frac{\Delta G}{G} \approx 0.5 \%$ (siehe Tabelle 5.2).

Für die Qualitätssicherung der Module wird die Gasverstärkungsmessung an mehreren Positionen der Präparate über dem Modul durchgeführt, woraus dann eine mittlere Gasverstärkung mit RMS⁹) berechnet wird. Daraus läßt sich dann mit

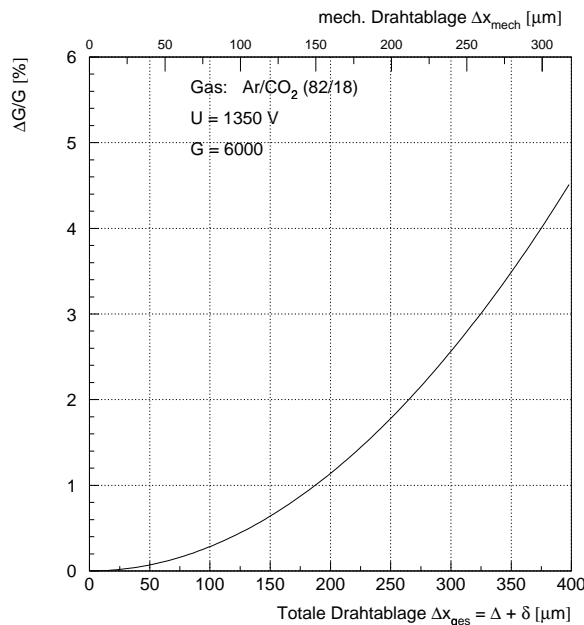


Abbildung 5.22: Relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der totalen bzw. mechanischen Ablage eines Anodendrahtes aus der Mitte eines Straws für ein Modul der Länge $L = 2 m$ in $Ar/CO_2(82 : 18)$.

⁹engl. **R**oot **M**ean **S**quare

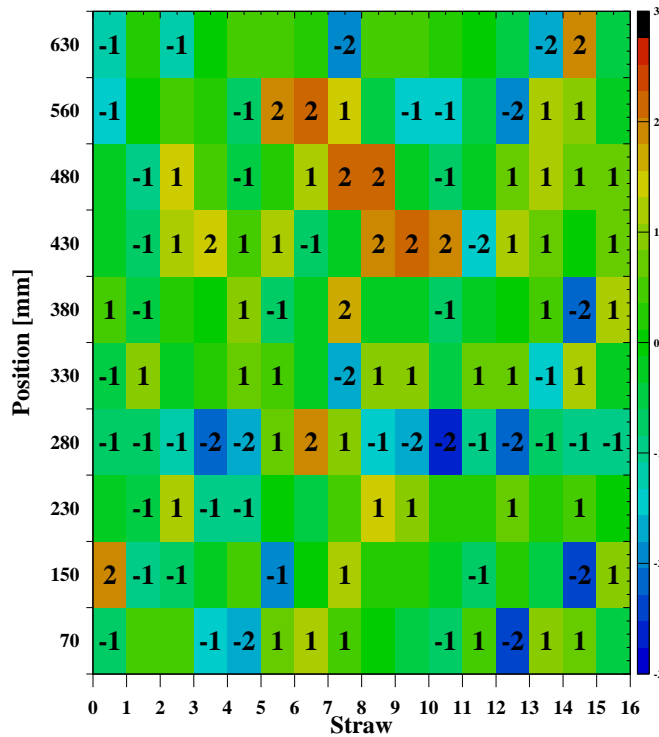


Abbildung 5.23: Charge 1-Modul ($L = 658.9 \text{ mm}$) ($U = 1350 \text{ V}$, $f \approx 1 \text{ l/h}$, norm. auf Standardbedingungen): Variation der Gasverstärkung ([%]) um den Mittelwert $G = 6051.5 \pm 84.1$.

Hilfe der in Diagramm 5.22 dargestellten Abhängigkeit die mechanische Toleranz des jeweiligen Moduls bestimmen, falls die mechanische Toleranz eine gleich große Drahtablage bewirkt. In Abbildung 5.23 ist die Variation der Gasverstärkung über

Befüllung: Ar/CO ₂ (82 : 18)	
Dichte	$\rho_0 = 1.70 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Gasverstärkung bei $U_{TRD} = 1350 \text{ V}$	$G \approx 6000$
Diethornparameter	$\Delta V = 36.2 \text{ V}$ $\Delta E_{min}(\rho_0) = 28.8 \text{ kV/cm}$
Rel. Änderung der Gasverstärkung bei ($U_{Labor} = 1350 \text{ V}$)	
$\Delta \rho \approx 0.05 \cdot 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ($\Delta T \approx 3 \text{ K}$; $\Delta p \approx 10 \text{ mbar}$)	$\frac{\Delta G_\rho}{G_\rho} \approx 15 \%$
$\Delta U = 10 \text{ V}$	$\frac{\Delta G}{G} \approx 10 \%$
mech. Toleranz ($L = 2 \text{ m}$): $100 \mu\text{m}$	$\frac{\Delta G}{G} \approx 0.5 \%$

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Gasverstärkungsmessungen in Ar/CO₂(82 : 18).

einem Straw-Modul der Charge 1 ($L = 658.9 \text{ mm}$) bei einer Messung an 10 Positionen in einer farblichen Kodierung dargestellt. Die Nullposition ist mit dem Endstück an der Gasein- und Auslaßseite des Moduls identisch; die Position $L = 659 \text{ mm}$ mit der Ausleseseite. Für jede Messung sind zudem die gerundeten relativen Gasverstärkungsänderungen mit angegeben. Falls an einer Position keine Zahl erscheint, ist der gerundete Wert mit null identisch. Anhand der Farbkodierung wird deutlich, daß das Modul nur in einigen begrenzten Bereichen leicht verbogen ist. Die mittlere Gasverstärkung läßt sich zu $G = 6051.5 \pm 84.1$ ($1.39 \% \equiv$ mechanische Genauigkeit von $\approx 220 \mu\text{m}$ (siehe auch Abschnitt 6.5)) bestimmen. Da die Module für die Weltraumtauglichkeitsuntersuchungen in einer speziellen Halterung (siehe Abbildung 5.6) zu jeweils einem Turm angeordnet werden und damit mit einer von der mechanischen Toleranz der Halterung abhängigen Verbiegung zu liegen kommen, werden in Tabelle 5.24 die Ergebnisse der an den Modultürmen ermittelten Gasverstärkungen mitsamt der sich daraus ergebenden mechanischen Toleranzen angegeben. Es ist zu erkennen, daß alle errechneten Toleranzen der Straw-Modulprototypen oberhalb der mechanischen Toleranz eines Kammerkörpers von $100 \mu\text{m}$ liegen.

Modul Charge	Länge [mm]	G	RMS [%]	mech. Toleranz [μm]
1	586.9	6216	1.11	194
	610.9	6207	1.17	198
	634.9	6000	1.38	216
	658.9	6107	1.13	195
2	586.9	6203	1.20	201
	610.9	6218	1.68	238
	634.9	6076	1.90	253
	658.9	6022	1.61	233

Abbildung 5.24: *Gemessene Gasverstärkungen in den Straw-Modulprototypen (Ar/CO₂, U = 1350 V, f \approx 1 l/h, normiert auf Standardbedingungen) mit berechneten mechanischen Toleranzen.*

5.4.7 Resultate der Weltraumtauglichkeitsprüfung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Weltraumtauglichkeitsprüfungen an den Modulprototypen der Charge 1 und 2 in Anlehnung an das in Abschnitt 2.4 beschriebene Testverfahren eines kombinierten Vibrations- und Thermovakuumtests vorgestellt. Die Qualität der Module im Hinblick auf ihre mechanische Stabilität und ihres elektronischen Verhaltens wird mit Hilfe von Messungen an der He-Lecktestapparatur und am Gasverstärkungsmeßstand geprüft. Die Vibrationstests wurden am I. Physikalischen Institut der RWTH Aachen durchgeführt, wohingegen die Thermovakuummessungen am MPE¹⁰ in Garching vorgenommen wurden.

¹⁰Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik

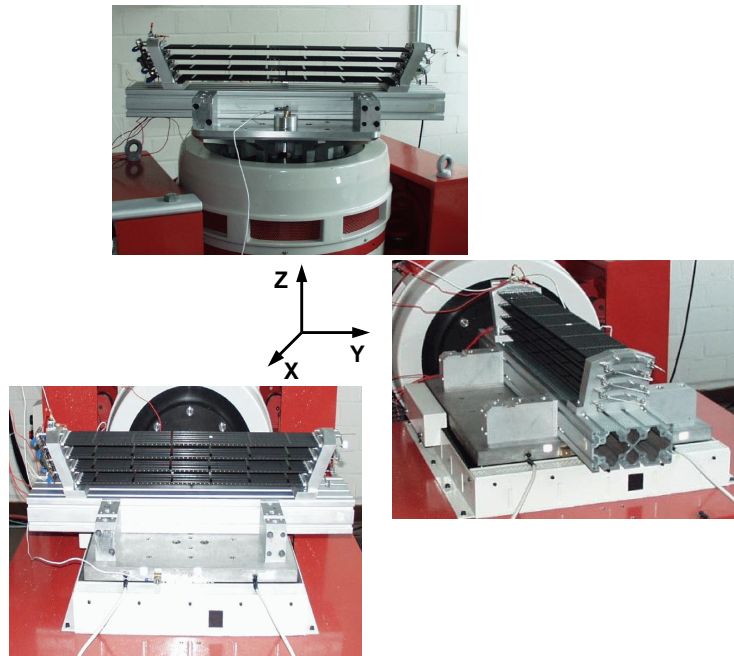


Abbildung 5.25: *Elektrodynamische Schwinngerregeranlage mit den Straw-Modulprototypen bei Belastungen in allen drei Raumrichtungen.*

Vibrationstest mit den Straw-Modulprototypen

Zunächst soll hier ein Vibrationstest mit den zu Türmen angeordneten Modul-Prototypen beschrieben werden. In Abbildung 5.25 ist die elektrodynamische Schwinngerregeranlage zusammen mit der Aluminium-Halterung und den Straw-Modulprototypen einer Charge zu erkennen. Durch Umbauen der Apparatur konnte der jeweilige Prüfling nacheinander in allen drei Raumrichtungen belastet werden.

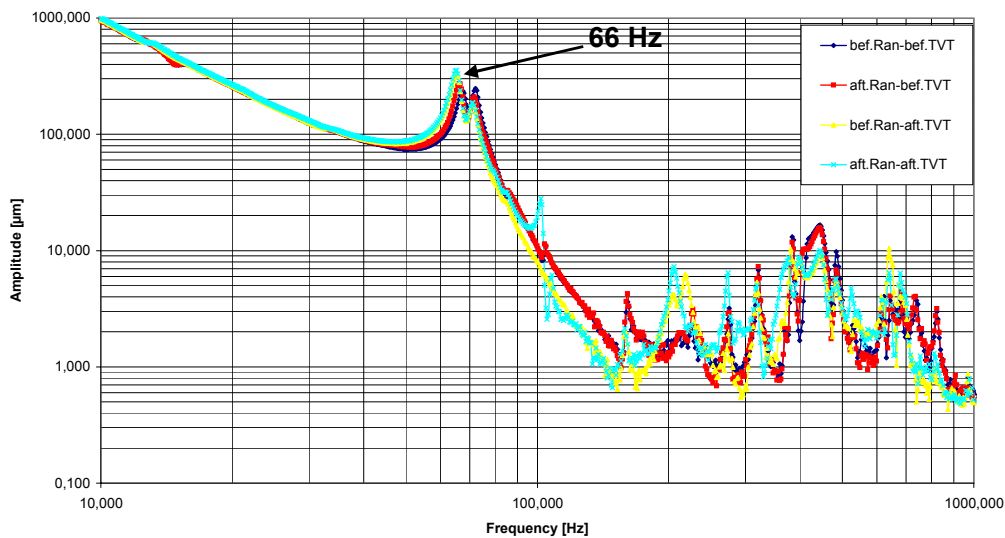


Abbildung 5.26: *Modul der Charge 1 ($L = 658.9$ mm): Frequenzabhängigkeit der Schwingungsamplitude in der Mitte des Moduls vor und nach einem TVT bei einer Belastung in z-Richtung.*

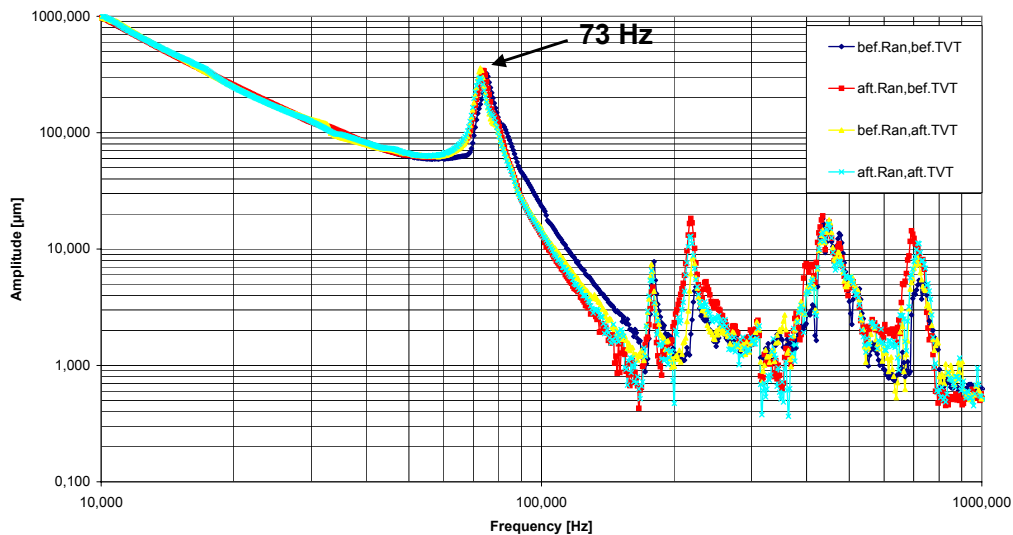


Abbildung 5.27: Modul der Charge 2 ($L = 658.9 \text{ mm}$): Frequenzabhängigkeit der Schwingungsamplitude in der Mitte des Moduls vor und nach einem TVT bei einer Belastung in z -Richtung.

Das Ergebnis dieser Prüfung für das oberste Modul der Charge 1 in der Halterung ($L = 658.9 \text{ mm}$) ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Man erkennt die mit einem Laser-Interferometer in einem Resonanzsuchlauf ermittelte Schwingungsamplitude jeweils vor und nach einem Belastungstest in den drei Raumrichtungen, der wiederum vor und nach einem Thermovakuumtest durchgeführt wurde. Das Amplitudenprofil ändert sich dabei nur unwesentlich. Die Eigenfrequenz liegt bei $f_0 = 66 \text{ Hz}$ und übersteigt damit das aus Sicherheitsüberlegungen geforderte Limit von 50 Hz .

In Abbildung 5.27 sind die entsprechenden Schwingungsamplituden für das längste Modul der Charge 2 dargestellt. Auch hier kommt es zu keinen nennenswerten Änderungen im Amplitudenprofil, sowie in der Lage der ersten Eigenfrequenz. Diese liegt bei $f_0 = 73 \text{ Hz}$ und übertrifft das Ergebnis der Module der ersten Straw-Char-

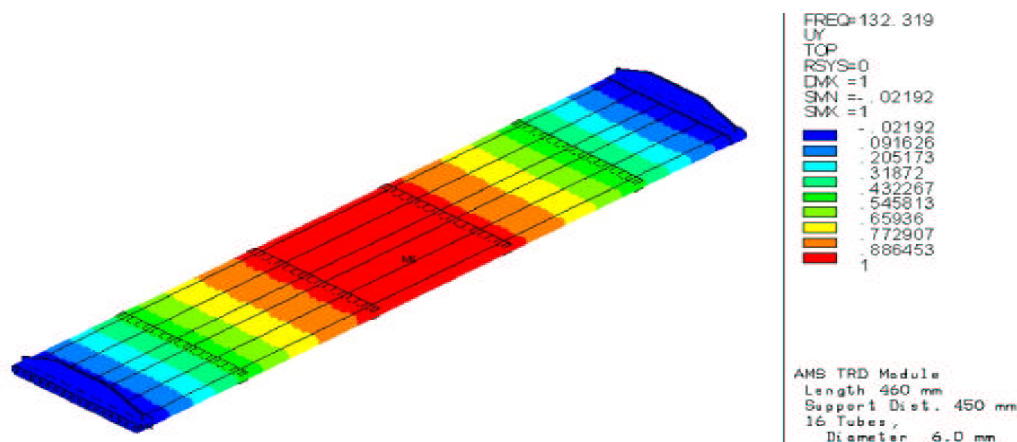


Abbildung 5.28: FEM-Analyse eines Moduls der Länge $L = 460 \text{ mm}$ bei einer Anregung in z -Richtung; berechnete Eigenfrequenz: $f_0 = 132 \text{ Hz}$.

ge, was auf die vom Straw-Material der Charge 1 abweichende Straw-Struktur mit breiteren Folienstreifen und damit größeren Klebeflächen zurückzuführen ist. Damit halten die Modulprototypen und deren Fixierungen den mechanischen Belastungen eines Transportes mit einem Space Shuttle stand, was die gesamte mechanische Struktur der Module anbelangt.

Die mit Hilfe eines Finite-Elemente-Modells eines Straw-Moduls der Länge $L = 460 \text{ mm}$ berechnete relative Durchbiegung in z -Richtung ist farblich kodiert in Abbildung 5.28 zu erkennen. Die erste Eigenfrequenz läßt sich zu $f_0 = 132 \text{ Hz}$ bestimmen und konnte in einem Vibrationstest verifiziert werden. Da die Eigenfrequenzen der Straw-Module proportional zum Quadrat der Modullängen sind ($f_0 \sim L^2$), läßt sich aus dieser FEM-Analyse die Eigenfrequenz eines $L = 658.9 \text{ mm}$ langen Moduls zu $f_0 = 64 \text{ Hz}$ berechnen. Diese Eigenfrequenz stimmt in guter Näherung mit den an den Modulprototypen gemessenen Werten überein.

Thermovakuumtest mit den Straw-Modulprototypen

Im weiteren Verlauf der Weltraumtauglichkeitsprüfungen wird mit den Prototypen der Charge 1 und 2 nacheinander ein Thermovakuumtest durchgeführt. Die Aluminiumhalterung mit den Modulprototypen in dem offenen Thermovakuumtank zeigt Abbildung 5.29. Über eine Grundplatte aus Kupferblech wird eine thermische Verbindung zwischen der Modul-Halterung und dem Tank hergestellt. Dieser ist über Heiz- bzw. Kühlschlangen aus Kupfer, deren vorderste Windungen an der Tankwand zu erkennen sind, temperierbar. Die Temperaturkontrolle erfolgt über Temperatursensoren auf der Grundplatte. Weitere Temperatursensoren sind auf den Prüflingen zur Bestimmung von evtl. Temperaturgradienten angebracht. Mit Hilfe einer Turbo-Molekular-Pumpe mit Vorpumpe kann in dem Tank ein Vakuum $< 10^{-5} \text{ mbar}$ erzeugt werden.

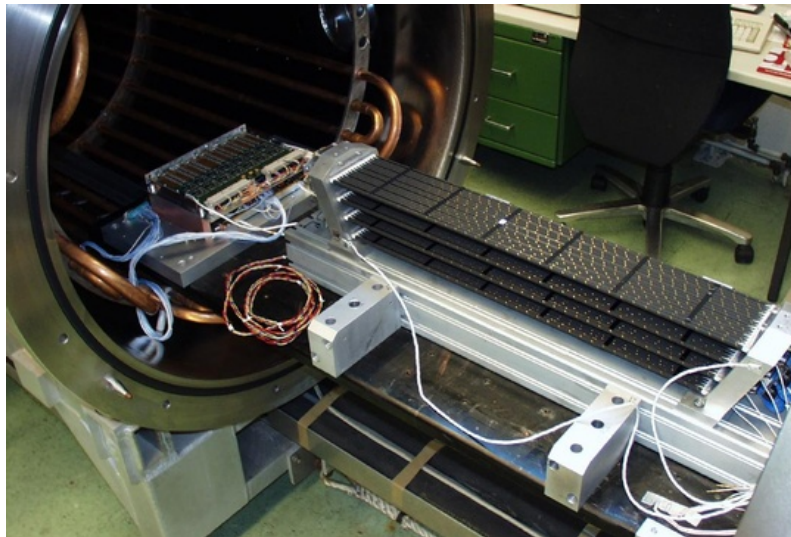


Abbildung 5.29: Offener Vakuumentank der Thermovakuumtestapparatur mit den Straw-Modulprototypen.

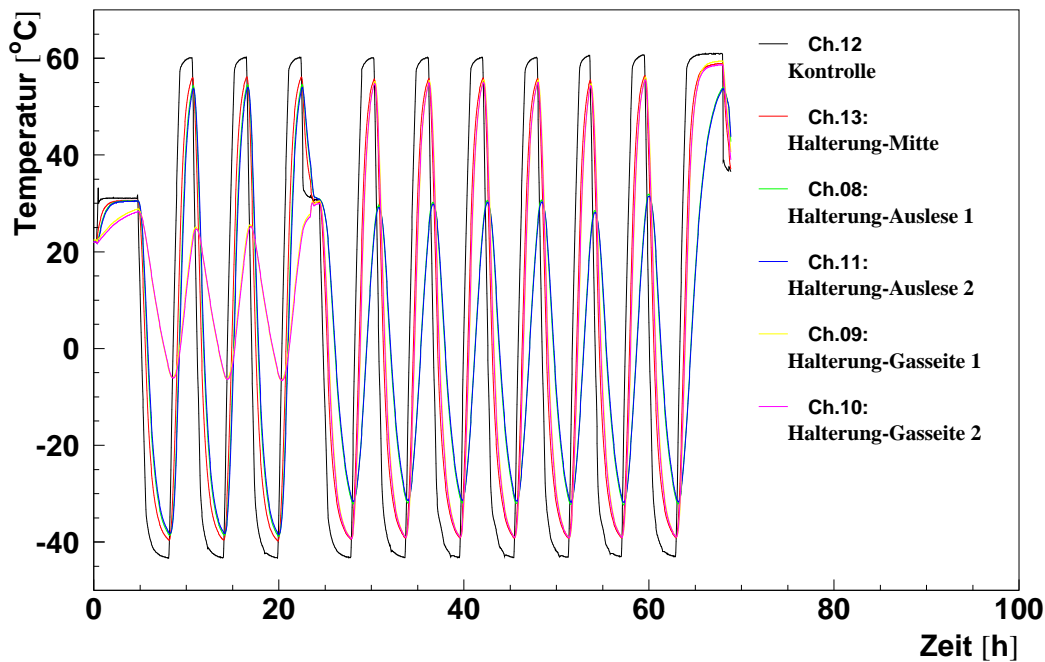


Abbildung 5.30: TVT der Charge 1-Prototypen: Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen im Vakuumtank.

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Aluminium-Halterung und der Straw-Module wurden die Schraubverbindung zwischen den seitlichen Modulaufgaben, welche die Oktagonwände simulieren, und dem Grundsockel nacheinander einseitig gelöst. Dazu mußte die jeweilige Messung unterbrochen und der Vakuumtank belüftet werden. Die Unterbrechungen der Messungen mit den

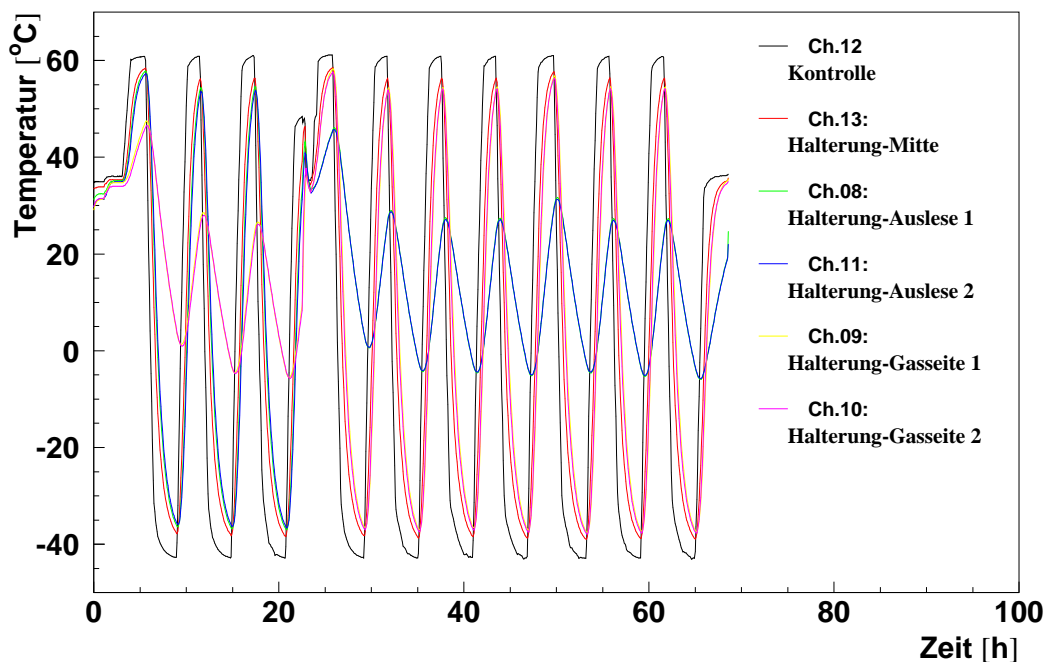


Abbildung 5.31: TVT der Charge 2-Prototypen: Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen im Vakuumtank.

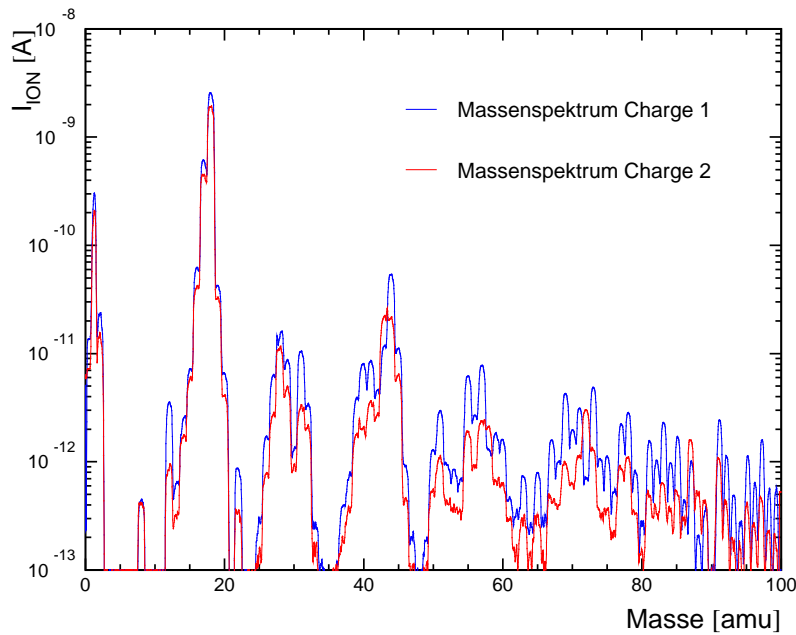


Abbildung 5.32: Vergleich des Ausgasverhaltens der Prototypen aus Charge 1 bzw. Charge 2, nach 48 h im Thermovakuumtest.

Prototypen der jeweiligen Charge sind in den Abbildungen 5.30 und 5.31, welche die Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen im Vakuumtank zeigen, nach ~ 24 h deutlich zu erkennen, da der Teststand dazu auf Raumtemperatur gebracht werden mußte. Bis zur Unterbrechung wurden jeweils drei Zyklen nach dem in Abbildung 2.28 dargestellten, aus Sicherheitsüberlegungen geforderten Temperaturzyklus zwischen der Minimaltemperatur von -45°C und der Maximaltemperatur von $+60^{\circ}\text{C}$ durchlaufen (siehe auch den Kontrollkanal in den Abbildungen). Die Temperaturen auf der Modulhalterung erreichen dabei nur Werte zwischen $\sim -40^{\circ}\text{C}$ und $\sim +55^{\circ}\text{C}$. Zudem ist deutlich zu erkennen, daß diese Werte an den Modulaufgaben, deren Schraubverbindung zum Grundsockel gelöst wurde, noch weiter überschritten werden. So wurde an beiden Meßaufbauten zunächst die Auflage an der Gasversorgungsseite gelöst. Nach dem Umbau der Halterung wurden zur Sicherheit weitere 7 Temperaturzyklen gefahren.

Abbildung 5.32 zeigt die während der Thermovakuumtests mit den Prototypen der ersten und zweiten Charge nach einer Meßzeit von jeweils ~ 48 h mit einem Massenspektrometer erstellten Isotopenspektren der Gaszusammensetzung. Da für dieses Massenspektrometer keine gasartspezifische Kalibration vorliegt, können die Spektren nur qualitativ beschrieben werden. Es ist eine deutliche Übereinstimmung in der Lage einzelner Massepeaks zu erkennen, was auf ein ähnliches Ausgasverhalten der Prototypen hindeutet. Die Lage der Maxima im Massebereich von $16 - 18$ amu im Isotopenspektrum können als die Ionenbruchstücke von Wasser identifiziert werden. Die weiteren Ionenbruchstücke bei höheren Massezahlen sind auf Verunreinigungen der Aluminium-Halterung zurückzuführen.

Die Resultate der zwischen den Vibrations- und Thermovakuumtestreihen durchgeführten Gasdichtigkeits- und Gasverstärkungsmessungen an den Prototypen werden im folgenden Abschnitt präsentiert.

Messungen an den Straw-Modulprototypen zwischen den Testreihen

In Tabelle 5.3 sind die vor und nach dem kombinierten Vibrations- und Thermovakuumtest an den einzelnen Modulprototypen mit dem *He*-Lecktest gemessenen Leckraten, sowie die Leckrate mit diesen in der Aluminium-Halterung zu einem Turm verbundenen Prototypen der Charge 1 bzw. 2 dargestellt. Diese Messungen wurden jeweils vor und nach der jeweiligen Vibrations- bzw. Thermovakuumtestreihe durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Fehler bei der Bestimmung der *He*-Leckraten von $0.5 \cdot 10^{-5} \frac{L \cdot mbar}{s}$ (siehe Abschnitt 5.4.4) bei Messungen an einzelnen Modulen und von $\sim 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{L \cdot mbar}{s}$ bei Messungen an den Modul-Türmen, stimmen die vor und nach den Testreihen zur Weltraumtauglichkeit an einzelnen Prototypen gemessenen Leckraten, sowie die nach jeder Testreihe an den Modul-Türmen bestimmten Leckraten in ihren Fehlergrenzen überein. Dieser relativ große Fehler bei den Messungen an den Modul-Türmen kommt dadurch zustande, daß die Temperatursensoren aus Platzgründen nicht an den Modulen positioniert werden konnten und damit die sich in den Straw-Modulen ausbildenden Temperaturgradienten nicht korrekt erfasst werden konnten.

Damit hat sich gezeigt, daß die mit Vibrations- und Thermovakuumtestreihen simulierten mechanischen Belastungen der Module, sowie der Doppel-O-Ring-Kupp-

Modul Charge	Länge [mm]	Leckrate $q_{M,He(L)}$ nach $\cdot 10^{-5} \left[\frac{L \cdot mbar}{s} \right]$			
		Einbau	Vibration I	Thermovak.	Vibration II
1	586.9	5.7	-	-	5.2
	610.9	7.0	-	-	6.1
	634.9	4.5	-	-	3.7
	658.9	3.8	-	-	3.5
Turm 1	2491.6	21.5	19.9	22.4	19.4
2	586.9	2.6	-	-	3.1
	610.9	2.7	-	-	3.2
	634.9	8.3	-	-	7.7
	658.9	4.0	-	-	3.4
Turm 2	2491.6	13.5	12.7	-	14.0

Tabelle 5.3: *He*-Lecktest: Mit den einzelnen Prototypen und den beiden Türmen vor, nach und zwischen den Testreihen gemessene Leckraten.

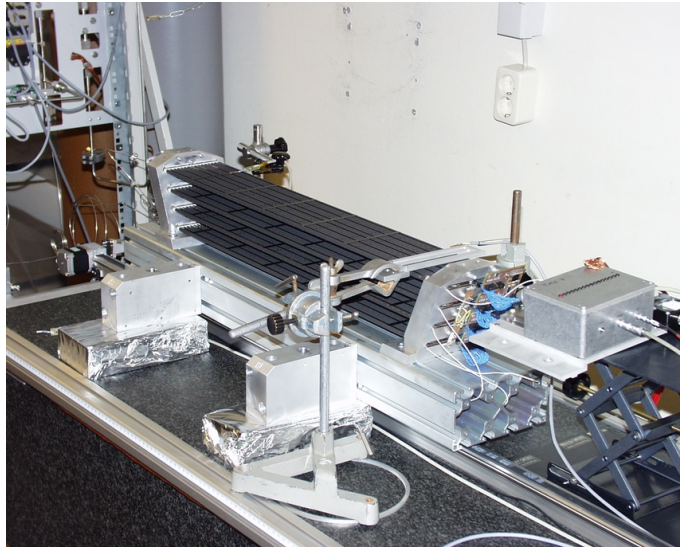


Abbildung 5.33: Umbauten am Gasverstärkungsmeßstand zur Vermessung der Prototypen mit Halterung.

lungen, die die Rohrverbindung zwischen den Modulen herstellen, bei einem Transport mit einem Space Shuttle bzw. einem Betrieb im Weltraum keine Auswirkungen auf deren He -Gasdichtigkeit haben. Nach den Ausführungen in den vorherigen Kapiteln gilt dieses dann auch für die Gasdichtigkeit bei einer Befüllung mit Xe/CO_2 -Gas. Auch Module mit CO_2 -Sicherheitsfaktoren in der Nähe von $SF = 4$ (siehe auch Tabelle 5.1) halten den Weltraumtauglichkeitsprüfungen stand und könnten demnach im TRD verwendet werden.

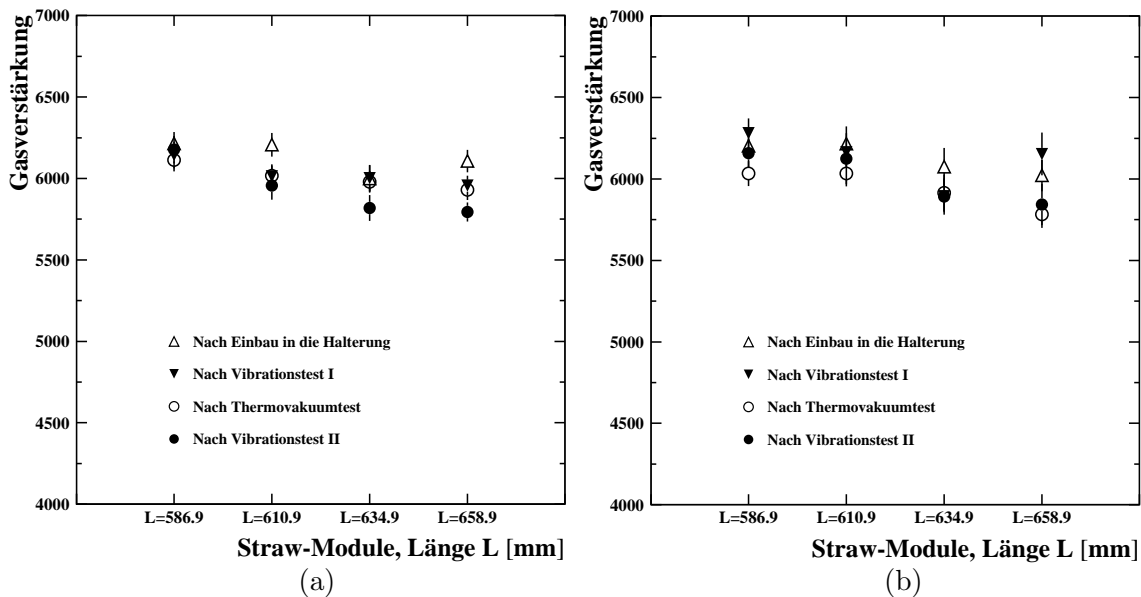


Abbildung 5.34: Gasverstärkungsmeßstand: Vor, nach und zwischen den Testreihen gemessene Gasverstärkungen in Ar/CO_2 mit den einzelnen Prototypen der a) Charge 1 und b) Charge 2 ($U = 1350$ V; normiert auf Standardbedingungen).

Die Resultate der, mit dem entsprechend der Darstellung 5.33 veränderten Teststand, an den einzelnen Modulprototypen durchgeführten Gasverstärkungsmessungen in Ar/CO_2 sind in Abbildung 5.34 a) für die Charge 1-Module und b) für die Charge 2-Module zu erkennen. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus den an drei Positionen eines Moduls in den 16 Straws gemessenen lokalen Gasverstärkungen. Die Messungen erfolgten jeweils nach dem Einbau der Module in die Halterung, dem Thermovakuumtest und dem ersten und zweiten Vibrationstest. Die Meßwerte stimmen in ihren Fehlergrenzen überein und zeigen damit keine meßbaren Änderungen im elektronischen Verhalten der Module. Alle 128 Drähte der 8 Prototypen haben den mechanischen und thermischen Belastungen standgehalten und auch die Positionen der Module in den Halterungen haben sich nicht geändert.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel konnte die Weltraumtauglichkeit der Straw-Module aus beiden Materialchargen, der Modulfixierungen und der modulseitigen Verrohrung mit den Doppel-O-Ring-Kupplungen im Hinblick auf erwartete mechanische und thermische Belastungen bei einem Space Shuttle Transport sowie auf der ISS, und auf das Ausgasverhalten der verwendeten Materialien gezeigt werden.

Dazu wurden von jeder Charge jeweils vier Qualifizierungsmodule gebaut und in verschiedenen, am I. Physikalischen Institut entwickelten Testapparaturen auf ihre Gasdichtigkeit und ihre elektrische Funktionsfähigkeit hin geprüft. Dieses Meßprogramm, welches auch von allen 328 Flugmodulen während der Serienproduktion durchlaufen wird, wurde dahingehend optimiert, daß zum einen die Tagesproduktion von zwei Modulen aufgenommen werden kann und zum anderen nach einer Meßzeit von 5 Tagen Aussagen über die He -Leckraten ("He-Lecktest") und CO_2 -Sicherheitsfaktoren ("Serientest") und mit Hilfe von Gasverstärkungsmessungen in Ar/CO_2 ("Automatisierte Gasverstärkungsmessung") über die mechanischen Toleranzen der Straw-Module getroffen werden können. Die Resultate der an den einzelnen Testständen durchgeführten Messungen mit den aus dem Straw-Material der Charge 1 und 2 produzierten Qualifizierungsmodulen wurden präsentiert.

Für die Weltraumtauglichkeitsprüfungen wurden jeweils vier Qualifizierungsmodule entsprechend einem Modul-Turm seriell verrohrt und in einer Aluminiumhalterung angeordnet. Diese Modul-Türme wurden zunächst einem Vibrationstest unterzogen, der einen Resonanzsuchlauf (Frequenzbereich: 10 bis 2000 Hz ; Beschleunigungsamplitude: 0.5 g) zum Vermessen der Resonanzfrequenzen der Straw-Module vor und nach einem Belastungstest der Straw-Module (Effektive Beschleunigung: $a_{RMS} = 6.8 g$) umfaßt. Dabei ergaben sich Eigenfrequenzen für die Module der Länge $L = 658.9 mm$ der Charge 1 und 2 von 66 Hz bzw. 73 Hz , die das aus Sicherheitsüberlegungen geforderte Limit von 50 Hz deutlich übersteigen. Im Anschluß daran wurde mit der jeweiligen Modul-Charge ein Thermovakuumtest durchgeführt. Während dieser Meßreihe in einem Hochvakuum konnten jeweils 10 Temperaturzyklen zwischen $\sim -40^\circ C$ und $\sim +55^\circ C$ durchlaufen werden. Ein erneuter Vibrationstest führte zu keinen Änderungen in den Eigenfrequenzen der Straw-Module.

Vor und nach jeder Testreihe wurde die Gasdichtigkeit der seriell verbundenen Module im Lecktest mit He , sowie die Gasverstärkung jedes einzelnen Moduls mit dem Gasverstärkungsmeßstand bestimmt. Die dabei erzielten Meßwerte stimmen in ihren Fehlergrenzen überein und zeigen damit keine meßbaren Änderungen in der mechanischen Struktur der Module sowie im elektronischen Verhalten.

Zusammen mit den Ausführungen zur Gasdichtigkeit der Straw-Module in Kapitel 4 sind die einzelnen Komponenten des AMS-02-TRD für einen Flug mit dem Space-Shuttle und einem darauf folgenden dreijährigen Einsatz im Weltraum unter Berücksichtigung der angeführten Sicherheitsaspekte geeignet.

Kapitel 6

Serienproduktion der Straw-Flugmodule

In diesem Kapitel werden die finalen Resultate aus der Serienproduktion der Flugmodule in der Reihenfolge des Verlaufsdiagramms zur Serienproduktion (siehe auch Abbildung 5.7) präsentiert. In Abbildung 6.1 ist der Stand der Serienproduktion am 01.02.2004 in der in die zweidimensionale Ebene abgewickelten Oktagontragestruktur zu erkennen. In einer farblichen Kodierung der Positionsschlitze sind die fertigen Kammerkörper, sowie alle 280 fertigen und einbaufähigen Flugmodule dargestellt.

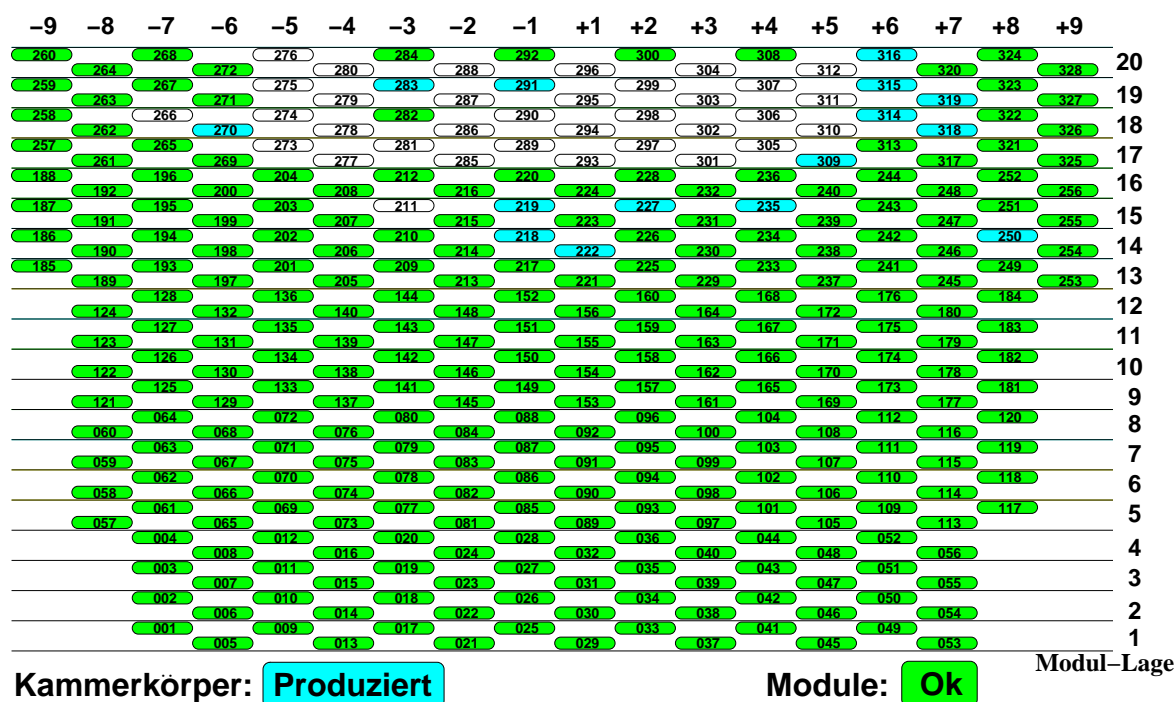


Abbildung 6.1: Produktion der Flugmodule (Stand 01.02.2004).

6.1 Drahtspannungsmessung

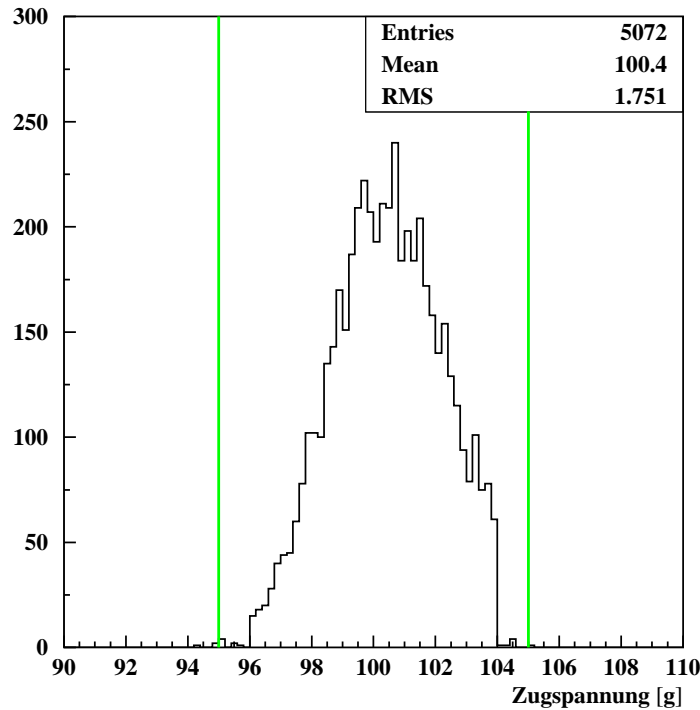


Abbildung 6.2: Verteilung der Draht-Zugspannung mit Toleranzgrenzen (Stand 01.02.2004) (siehe auch Tabelle 6.1).

Der erste Schritt in der Herstellung der Straw-Module ist die Messung der Zugspannung der Anodendrähte. Die Verteilung der bisher an den Straw-Modulen (ohne Modulprototypen) gemessenen Zugspannungen m_t , nachdem die Drähte, die außerhalb des Toleranzbereiches von $(100 \pm 5) g$ liegen, ersetzt wurden, ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Das Mean der Verteilung liegt bei $m_t = 100.4 g$ (RMS: $1.8 g$) und damit bei der nominellen, herstellungsbedingten Zugspannung von $100 g$. Lediglich vier Drähte von 5072 gespannten Drähten liegen außerhalb des Toleranzbereiches, was einer Fehlidentifikation von $< 1\%$ entspricht.

6.2 CO_2 -Sicherheitsfaktor der Straw-Module

Die in den folgenden drei Abschnitten gezeigten Diagramme fassen die Messungen mit den fertigen 280 Flugmodulen im Leck- und im Serientest zusammen (siehe auch Tabelle 6.1). Die Korrelation zwischen der im Lecktest ermittelten, auf $1 m$ Modullänge normierten He -Leckrate mit Luft im Außenraum $q_{M,m,He(L)}$ und dem CO_2 -Sicherheitsfaktor (siehe auch Abschnitt 4.2.4):

$$SF = \frac{q_{CO_2(V),max} \cdot L}{q_{M,CO_2(V)}} \quad (6.1)$$

($q_{CO_2(V),max} = 23.5 \cdot 10^{-5} \frac{L \cdot mbar}{s \cdot m}$) der Module im Vakuum ist Darstellung 6.3 zu entnehmen. Zusätzlich sind die Toleranzgrenzen mit eingezeichnet, welche bei einem

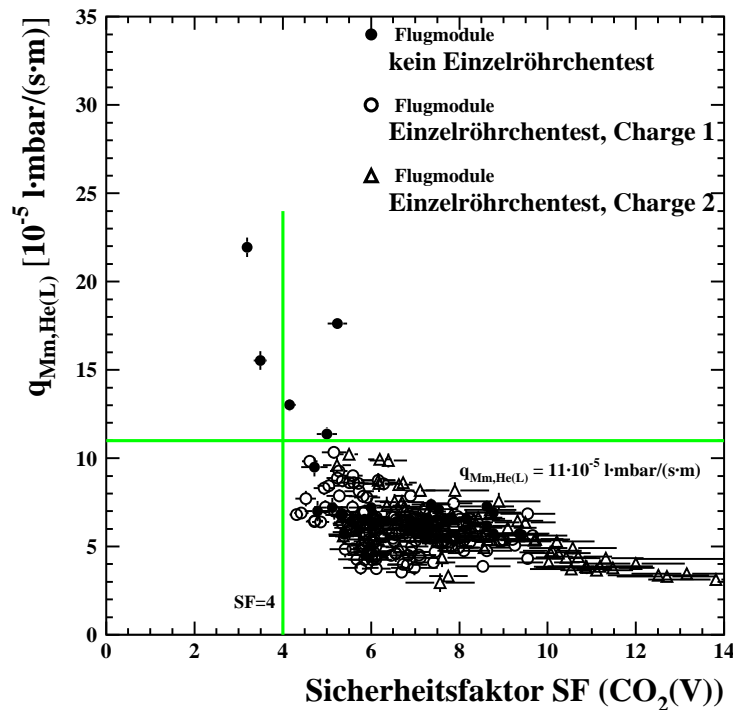


Abbildung 6.3: Korrelation zwischen den gegen Luft gemessenen He-Leckraten und den CO₂-Sicherheitsfaktoren SF aller produzierten Flugmodule.

Sicherheitsfaktor $SF = 4$ bzw. einer He-Leckrate von $\sim 11 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$ liegen. Die Flugmodule lassen sich in Module einteilen, deren Straws der ersten Charge den Einzelröhrchentest mit He nicht durchlaufen haben (29 Module) und Module aus der Charge 1 (175 Module) bzw. 2 (76 Module), deren Straws diesen Test erfolgreich absolviert haben. Dabei sind deutliche qualitative Unterschiede in der Gasdichtigkeit der Module zu erkennen, wobei zwei der Module aus den ungetesteten Straws im CO₂-Sicherheitsfaktor unterhalb der Toleranzgrenze liegen. Da diese Module aber immer noch einem CO₂-Sicherheitsfaktor von > 3 genügen, werden sie ohne Berücksichtigung der Toleranzgrenzen in das Oktagon eingebaut. Dieses läßt sich auch unter dem Standpunkt vertreten, daß die Summe der CO₂-Leckraten aller bisher produzierten Module weiterhin oberhalb von $SF = 4$ liegt. Die Weltraumtauglichkeit solcher Module konnte im vorherigen Kapitel gezeigt werden. Die weiteren 3 Module, die das Limit in der He-Leckrate überschreiten, finden keine Beanstandung, da die Messungen mit He in den Modulen und Vakuum im Außenraum keine Auffälligkeiten zeigten.

Die entsprechende Verteilung der CO₂-Sicherheitsfaktoren mit Toleranzgrenze ist der Abbildung 6.4 zu entnehmen. Daraus läßt sich ein mittlerer Sicherheitsfaktor von $SF = 7.1$ bei einem RMS von 1.7 berechnen. Der AMS-02-TRD könnte somit mehr als 20 Jahre lang auf der ISS betrieben werden, falls es zu keinen weiteren Einbußen im Gasvorrat, z.B. in Form von Punktlecks im Gasversorgungssystem kommt. Betrachtet man nur die CO₂-Sicherheitsfaktoren der Module, deren Straws den Einzelröhrchentest passiert haben, so ergeben sich die in Abbildung 6.5 gezeigten Verteilungen für das Straw-Material der Charge 1 und 2 mit mittleren Sicherheitsfaktoren von $SF = 6.6$ (RMS: 1.1) und $SF = 8.5$ (RMS: 2.0). Es zeigt sich, daß

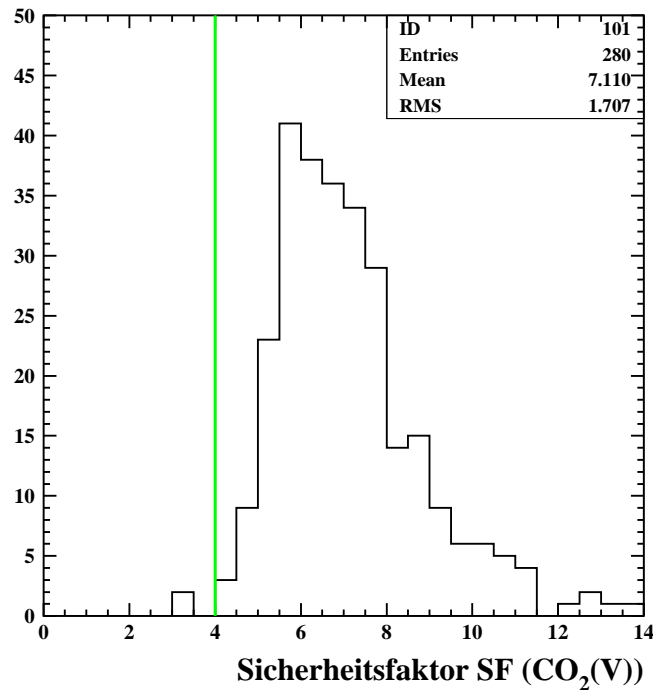


Abbildung 6.4: Verteilung der CO_2 -Sicherheitsfaktoren SF aller produzierten Flugmodule (siehe auch Tabelle 6.1).

die Module aus dem Material der zweiten Charge im Mittel einen höheren CO_2 -Sicherheitsfaktor aufweisen, als die Module aus dem Material der ersten Charge. Dieses ist dadurch bedingt, daß im Mittel längere Module aus dem Straw-Material der zweiten Charge gebaut wurden und damit die CO_2 -Leckrate durch die Modulendstücke bei der Berechnung des Sicherheitsfaktors weniger zum tragen kommt.

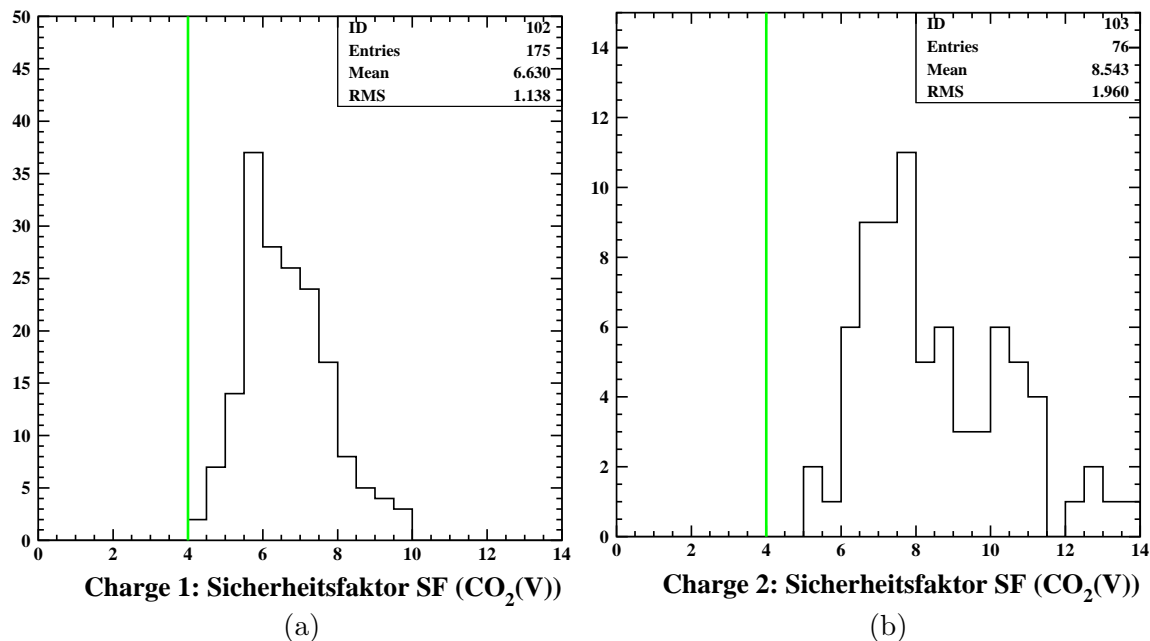


Abbildung 6.5: CO_2 -Sicherheitsfaktoren SF der einzelröhrchengetesteten Module aus dem Straw-Material a) der Charge 1 und b) der Charge 2 (siehe Tab. 6.1).

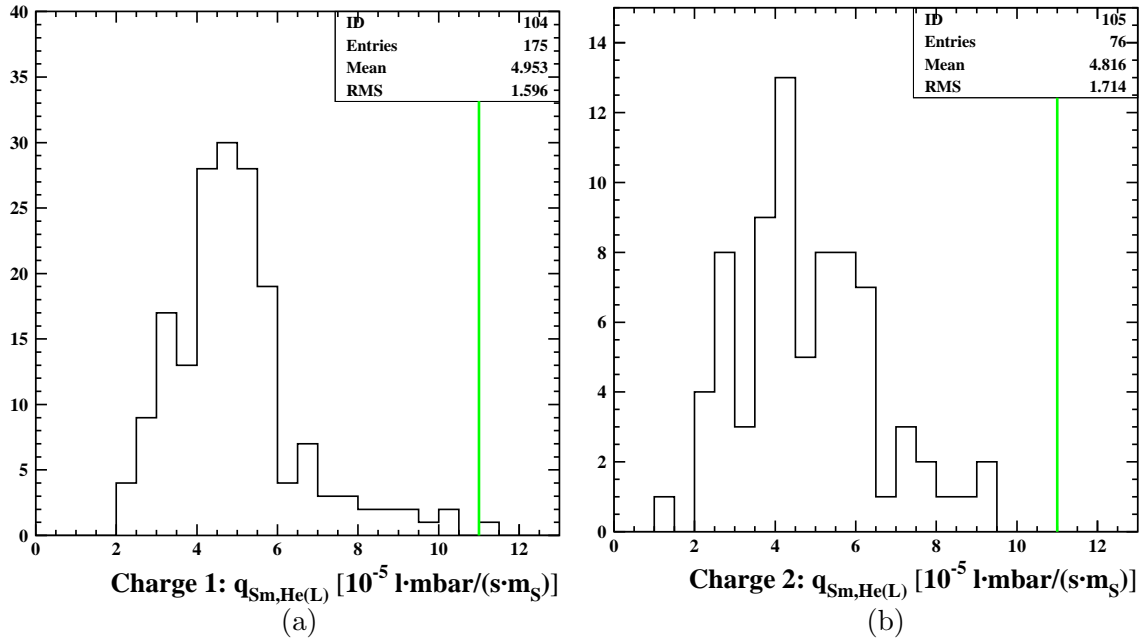


Abbildung 6.6: Verteilungen der gegen Luft gemessenen He -Leckraten (ohne Leckrate durch die Endstücke und längennormiert) von Modulen aus a) der ersten Straw-Charge und b) der zweiten Straw-Charge (siehe auch Tabelle 6.1).

Für einen direkten Vergleich zwischen den im Lecktest bestimmten He -Leckraten einzelner Module der Materialcharge 1 mit denen der Charge 2, sowie mit den Ergebnissen des Einzelröhrchentests sind in Abbildung 6.6 die um die He -Leckrate durch die Modulendstücke reduzierten Modulleckraten pro Meter Straw-Länge für beide Materialchargen dargestellt.

Das Mean der He -Leckraten durch das Material der ersten Charge liegt bei $q_{S_m, He(L)} = 5.0 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$ (RMS: $1.6 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$) und stimmt mit der mittleren He -Leckrate durch das Material der zweiten Charge von $q_{S_m, He(L)} = 4.8 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$ (RMS: $1.7 \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$), sowie mit den entsprechenden in dem Einzelröhrchentest bestimmten mittleren He -Leckraten der akzeptierten Straws (siehe Abschnitt 4.2.5) in den Fehlergrenzen überein. Die mit den Modulen ermittelten Leckraten der beiden Straw-Chargen liegen aber unterhalb der in dem Einzelröhrchentest bestimmten Leckraten, was womöglich auf die Abdeckung eines Teils der Straw-Oberfläche bei der Verarbeitung zu einem Modul zurückzuführen ist. So stoßen die einzelnen Straws aneinander und werden durch die in Längs- und Querrichtung verlaufenden CFC-Streifen, sowie von Klebpunkten bedeckt.

6.3 Gasdichtigkeit der Flugmodul-Endstücke

Zur Bestimmung der Leckrate von He bzw. CO_2 -Gas durch die Endstücke der Flugmodule bei Luft bzw. Vakuum im Außenraum sind die mit den einzelnen Modulen im Leck- und Serientest gemessenen Modulleckraten gegenüber der Modullänge in den Abbildungen 6.7 a) und b) bzw. 6.8 a) dargestellt. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen der mit dem jeweiligen Prüfgas gemessenen Leckrate $q_{M, Gas}$

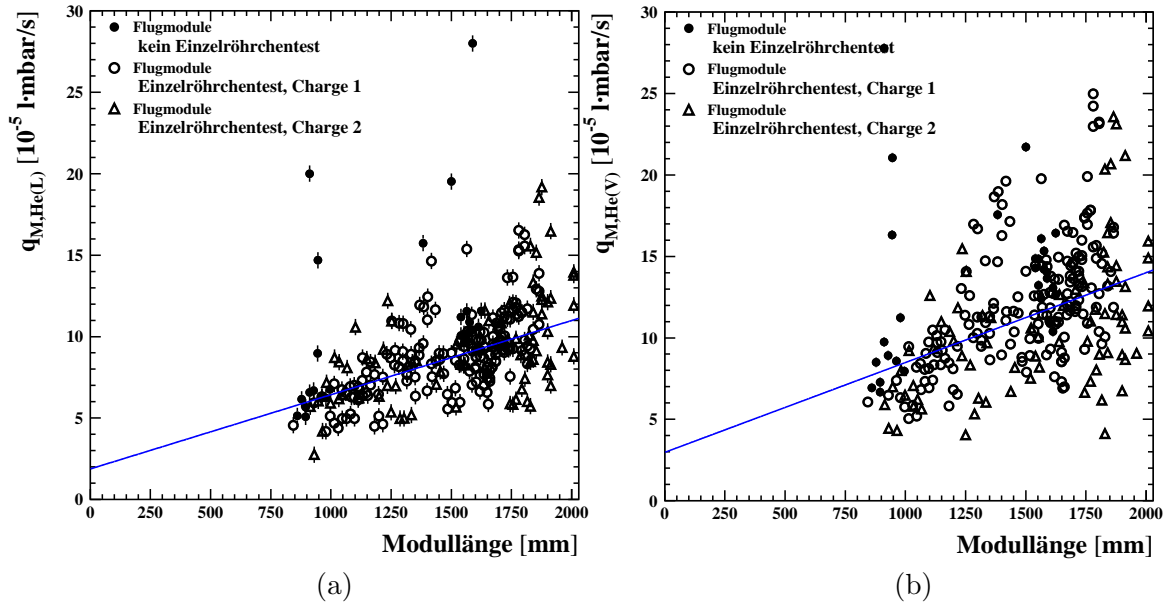


Abbildung 6.7: Längenabhängigkeit der He -Leckrate von Flugmodulen, gemessen a) gegen Luft und b) gegen Vakuum.

eines Moduls und seiner Länge L ($[m]$):

$$q_{M,Gas} = q_{S_m,Gas} \cdot L + 2 \cdot q_{E,Gas} \quad (6.2)$$

mit dem gasartabhängigen Proportionalitätsfaktor $q_{S_m,Gas}$. Aus dem Schnittpunkt der an die Meßdaten angepaßten Geraden mit der y-Achse ergibt sich demnach die Leckrate durch die beiden Endstücke $2 \cdot q_{E,Gas}$. Somit besteht die Möglichkeit, die aus den Daten der Serienproduktion ermittelten Leckraten durch die Modulendstücke (siehe auch Tabelle 6.1) mit den an einzelnen, separaten Endstücken gemessenen Leckraten zu vergleichen (siehe auch Abschnitt 4.2.4).

Bei der Messung mit He gegenüber Luft ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von $q_{S_m,He(L)} = (4.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$ und eine Leckrate durch ein Endstück von $q_{E,He(L)} = (1.0 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$, die in den Fehlergrenzen mit der Messung an einzelnen Endstücken übereinstimmt. Die Leckrate von einzelnen Endstücken im Vakuum bei einer Befüllung mit He wurde zuvor nicht bestimmt. Aus den Daten der Serienproduktion erhält man einen Faktor $q_{S_m,He(V)} = (5.5 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$, sowie eine Leckrate des He -Gases durch eines der Endstücke von $q_{E,He(V)} = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$. Demnach stimmen diese Leckraten von He durch ein Modulendstück bei Vakuum bzw. Luft im Außenraum und den gewählten Innendrücken in ihren Fehlergrenzen überein. Letztendlich ergibt sich aus den Messungen mit CO_2 in den Modulen ein Faktor $q_{S_m,CO_2(V)} = (1.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$ und eine Leckrate durch ein Endstück von $q_{E,CO_2(V)} = (1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}$. Auch dieser Wert stimmt mit der an einzelnen Endstücken gemessenen Leckrate überein.

In Abbildung 6.8 b) ist die Längenabhängigkeit des CO_2 -Sicherheitsfaktors SF aufgetragen. Zudem zeigt das Diagramm, den sich aus den Gleichungen 6.1 und 6.2 ergebenden, theoretischen Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsfaktor SF und

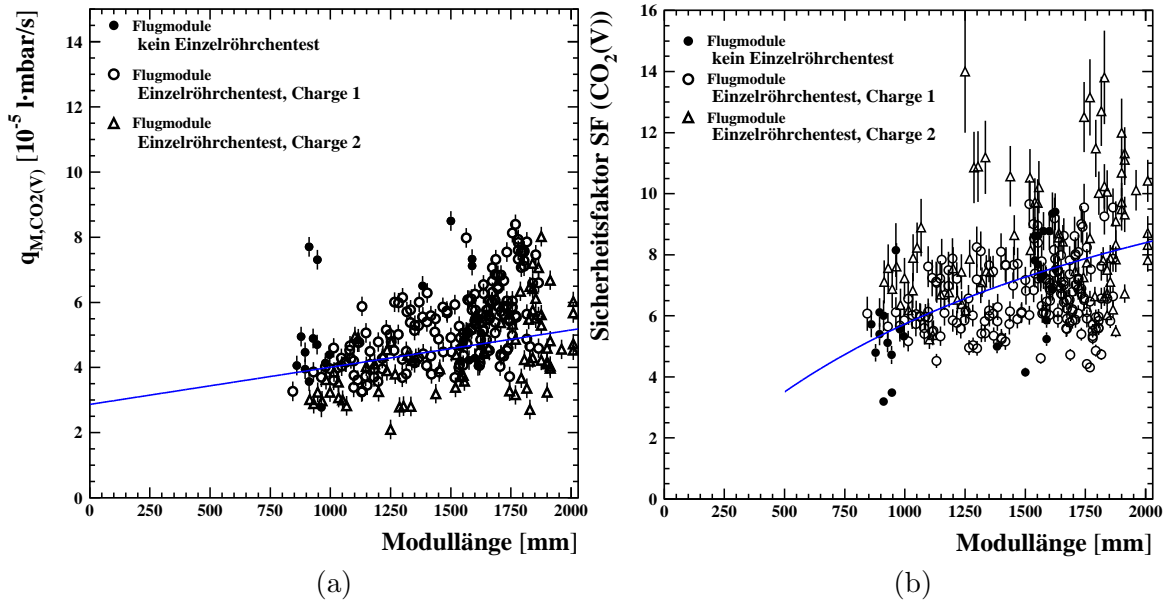


Abbildung 6.8: Längenabhängigkeit a) der CO_2 -Leckrate und b) des Sicherheitsfaktors.

der Modullänge L :

$$SF = \frac{q_{CO_2(V),max} \cdot L}{q_{S_m,CO_2(V)} \cdot L + 2 \cdot q_{E,CO_2(V)}} \quad (6.3)$$

mit dem oben ermittelten Proportionalitätsfaktor $q_{S_m,CO_2(V)}$ und der Leckrate durch ein Endstück $q_{E,CO_2(V)}$. Es zeigt sich, daß die Meßdaten mit obiger Gleichung beschrieben werden können. Aufgrund obiger Definition hängt der CO_2 -Sicherheitsfaktor SF über die Modulängen-unabhängige Leckrate der Prüfgase durch die Modulendstücke von L ab.

6.4 Gasdichtigkeit des Straw-Materials

Nachdem die Leckraten verschiedener Testgase durch die Modulendstücke aus den Messungen der Serienproduktion bestimmt wurden, können in den folgenden beiden Abschnitten die entsprechenden Leckraten durch das Straw-Material betrachtet werden (siehe auch Tabelle 6.1). Zudem läßt sich unter der Annahme einer konstanten CO_2 -Leckrate durch die Endstücke aller 328 Flugmodule bei gleichzeitigen Qualitätsunterschieden im Straw-Material, ein Modulängen-unabhängiger CO_2 -Sicherheitsfaktor nur für das Straw-Material definieren.

6.4.1 Korrelationen zwischen den Leckraten verschiedener Testgase

Die in den Abbildungen 6.9 a) und b) sowie 6.10 a) angeführten Diagramme zeigen die Korrelationen zwischen den Flugmodul-Leckraten durch das Straw-Material pro Meter Modullänge $q_{S_m,Gas}$ für verschiedene Testgase und Medien im Außenraum.

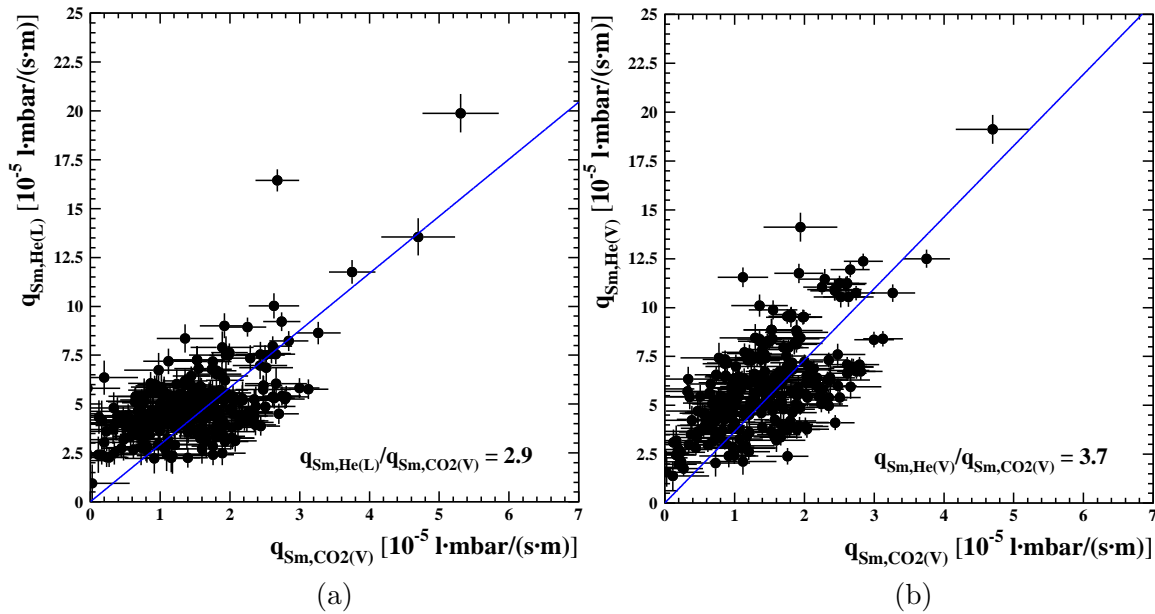


Abbildung 6.9: *Straw-Material: Korrelation zwischen den Leckraten von a) He gegen Luft und CO₂ gegen Vakuum und von b) He und CO₂, beide gegen Vakuum gemessen.*

Durch Anpassung einer Ursprungsgeraden

$$q_{S_m, Gas1} = A_{Gas1, Gas2} \cdot q_{S_m, Gas2} \quad (6.4)$$

an die Meßpunkte ergeben sich folgende Proportionalitätsfaktoren (in Klammern: entsprechende Meßergebnisse mit den 3·1.3 m langen Straws; siehe Abschnitt 4.2.3):

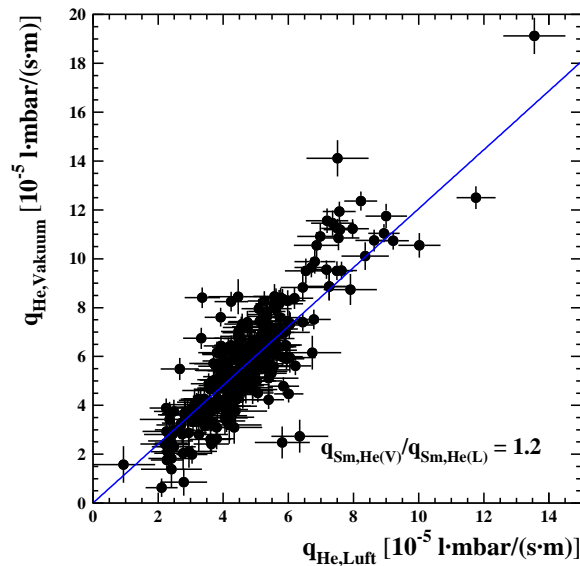


Abbildung 6.10: *Straw-Material: Korrelation zwischen den Leckraten von He gegen Luft und gegen Vakuum.*

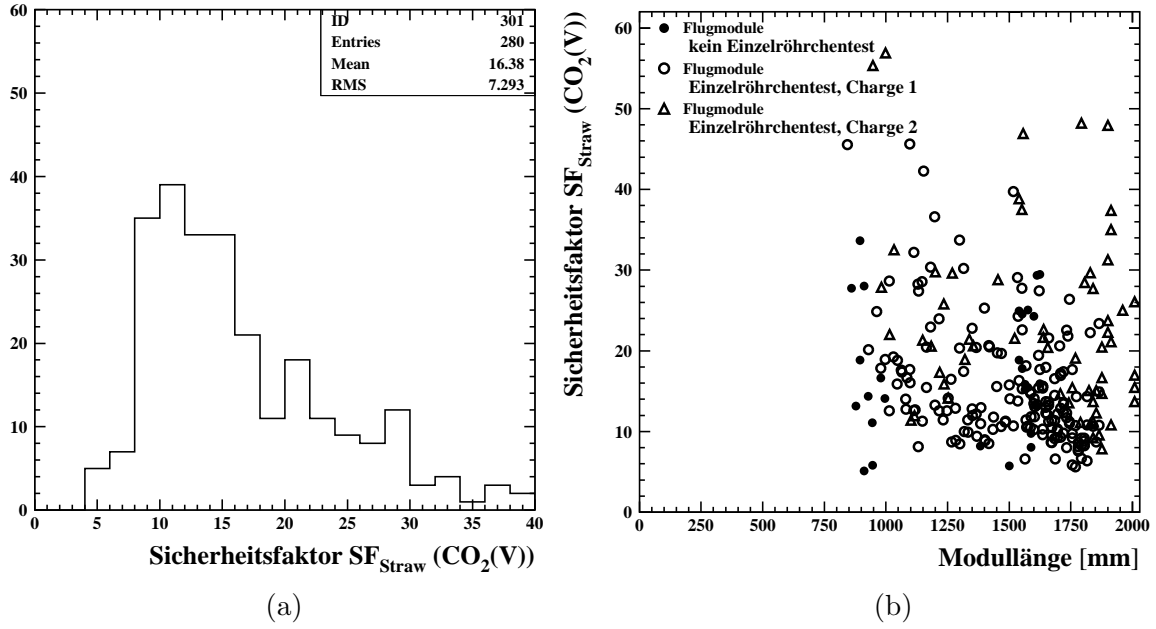


Abbildung 6.11: CO_2 -SF des Straw-Materials: a) Verteilung und b) Längenabhängigkeit.

$$A_{He(L),CO_2(V)} = 2.9 \pm 0.1 \quad (3.0)$$

$$A_{He(V),CO_2(V)} = 3.7 \pm 0.1 \quad (4.0) \quad (6.5)$$

$$A_{He(V),He(L)} = 1.2 \pm 0.1 \quad (1.3)$$

Damit stimmen die Faktoren $A_{He(L),CO_2(V)}$ und $A_{He(V),He(L)}$ zwischen den Leckraten aus der Serienproduktion der Flugmodule mit den an den drei 1.3 m langen Straws gemessenen Faktoren in den Fehlergrenzen überein. Der Faktor $A_{He(V),CO_2(V)}$ weicht nur unwesentlich von dem entsprechenden Faktor aus den Voruntersuchungen ab. Damit konnten alle Meßergebnisse mit den drei 1.3 m langen Straws bei einer Befüllung mit den Prüfgasen CO_2 und He reproduziert werden.

6.4.2 CO_2 -Sicherheitsfaktor des Straw-Materials

Unter der Annahme einer bei allen 328 Flugmodulen konstanten CO_2 -Leckrate durch das Material der Endstücke kann der folgende Modulängen-unabhängige Sicherheitsfaktor des Straw-Materials SF_{Straw} definiert werden:

$$SF_{Straw} = \frac{q_{S_{max},CO_2(V)} \cdot L}{q_{M,CO_2(V)} - 2 \cdot q_{E,CO_2(V)}} \quad (6.6)$$

mit einer maximal zulässigen Leckrate $q_{S_{max},CO_2(V)}$ durch das Straw-Material von

$$q_{S_{max},CO_2(V)} = \left(\frac{2000 \text{ l} \cdot 1013 \text{ mbar}}{1000 \cdot 86400 \text{ s}} - \frac{656}{5} \cdot q_{E,CO_2(V)} \right) \cdot \frac{5}{500 \text{ m}} = 21.6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s} \cdot \text{m}} \quad (6.7)$$

Die Faktoren 5 bzw. $\frac{1}{5}$ berücksichtigen wiederum den 20 %igen CO_2 -Anteil im TRD-Gasgemisch. Die Unterschiede in den Leckraten der Straw-Module sind dann

ausschließlich auf qualitative Unterschiede im verwendeten Straw-Material zurückzuführen.

In den Abbildungen 6.11 a) und b) ist die Verteilung des Sicherheitsfaktors SF_{Straw} für alle bisher gebauten Flugmodule sowie dessen Abhängigkeit von der Modullänge dargestellt. Das Mean der Verteilung liegt bei $SF_{Straw} = 16.4$ (RMS: 7.3) im Vergleich zu $SF = 7.1$ nach der bisherigen Definition des Sicherheitsfaktors. Die Auftragung von SF_{Straw} gegenüber der Modullänge zeigt zudem keine Längenabhängigkeit des Sicherheitsfaktors.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß diese Definition des Sicherheitsfaktors nur für das Straw-Material zu größeren, stärker schwankenden Sicherheitsfaktoren führt. Falls die Leckrate von CO_2 durch die Modulendstücke durch eine adäquate Beschichtung an der Außenseite der Endstücke verringert werden könnte, besteht die Möglichkeit den Gasvorrat zu verkleinern, was zu Gewichtseinsparungen führt.

6.5 Elektronisches Verhalten der Flugmodule

In diesem Kapitel werden die Resultate der mit dem Serienteststand an den Flugmodulen gemessenen Dunkelströme sowie die Gasverstärkungsmessungen vorgestellt.

In Abbildung 6.12 ist die Verteilung der mit einem Pikoamperemeter gemessenen Summe der über den Entkopplungskondensator, den Kammerkörper und der Kammerhalterung abfließenden Dunkelströme zu erkennen. Das Mean der Verteilung liegt bei $\Sigma I = 0.47 \text{ nA}$ mit einem RMS von 0.24 nA . Es ergaben sich keine

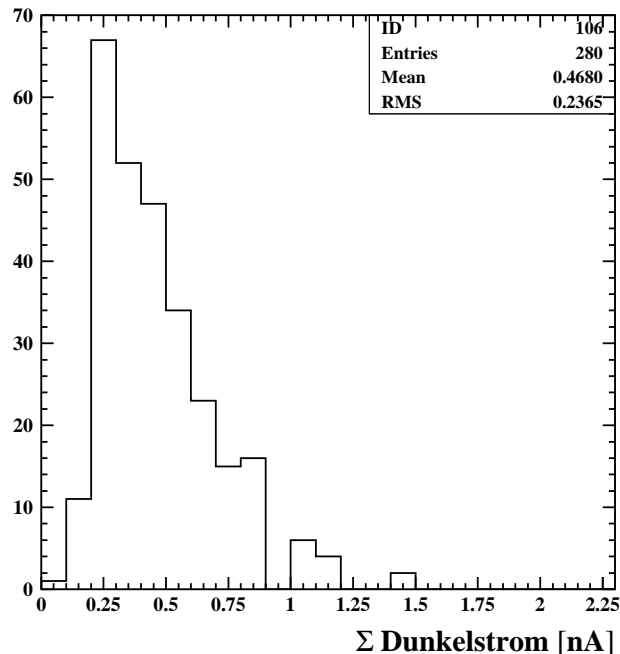


Abbildung 6.12: Serienteststand: Verteilung der an den Flugmodulen gemessenen Summe der Dunkelströme.

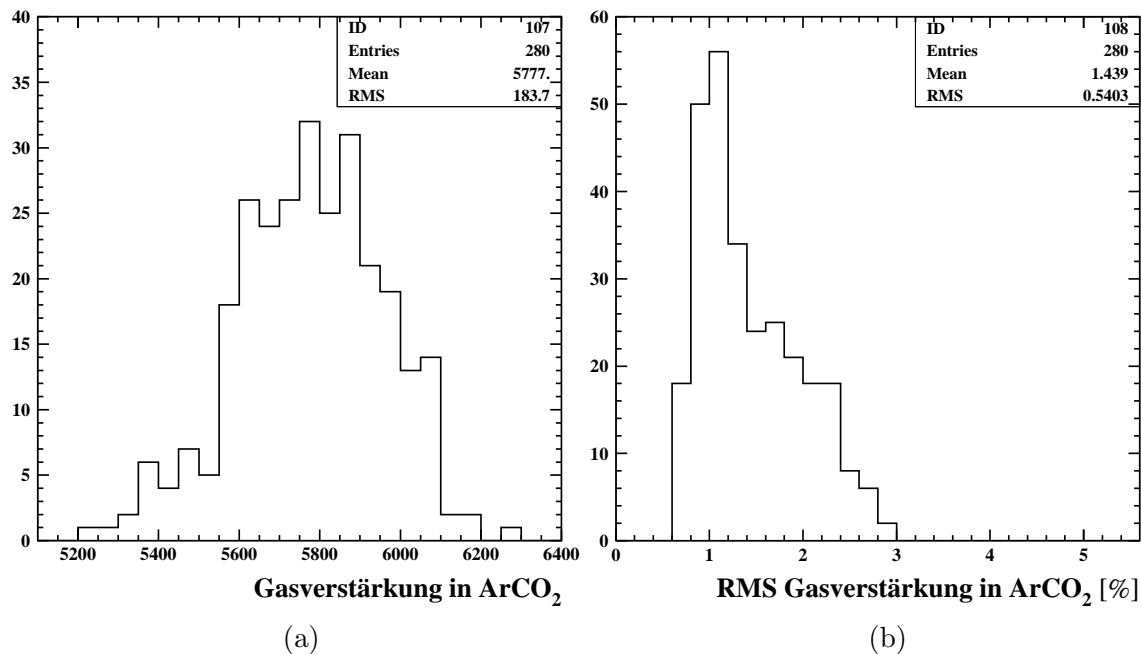


Abbildung 6.13: *Flugmodule: a) Gasverstärkungsmessung in Ar/CO₂ ($U = 1350\text{ V}$, $f \approx 1\text{ l/h}$, norm. auf Standardbedingungen) und b) Standardabweichung.*

Straw-Module mit einer Summe der Dunkelströme im Mikroampere-Bereich, die zur Zerstörung einzelner Bauteile auf der UTE-Platine führen könnte (Belastungsgrenze: $\sim 200\ \mu\text{A}$ [99]).

Die Resultate des Gasverstärkungsmeßstandes sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Im Diagramm 6.13 a) erkennt man die in $\text{Ar}/\text{CO}_2(82 : 18)$ bei einem Gasfluß von $f \approx 1\text{ l/h}$ und einer Hochspannung von $U = 1350\text{ V}$ gemessenen, auf Standardbedingungen normierten, mittleren Gasverstärkungen der produzierten Flugmodule. Aus der Verteilung läßt sich eine mittlere Gasverstärkung von $G \approx 5780$ bei einem RMS von ≈ 180 bestimmen. Diese mittlere Gasverstärkung weicht in ihren Fehlergrenzen nur leicht von der bei der Bestimmung des Diethornparameters ΔV an einem einzelnen Straw gemessenen Gasverstärkung von $G = 5984$ ab (siehe Abschnitt 5.4.6)

Die zur Prüfung der mechanischen Toleranzen der Module relevante Verteilung der Standardabweichungen von den mittleren Gasverstärkungswerten ist dem Diagramm 6.13 b) zu entnehmen. Das Mean liegt bei 1.4 % bei einem RMS von 0.5 %. Nach den Ausführungen in Abschnitt 5.4.6 entspricht die Lage des Means der Standardabweichung einer mechanischen Toleranz der Flugmodule von $\sim 200\ \mu\text{m}$. Diese Abweichung von der Sollvorgabe von $100\ \mu\text{m}$ führte zu einer Überprüfung der Anlage mit der die Modulkörper hergestellt wurden (siehe Abschnitt 3.2.2). Dabei wurde eine mechanische Toleranz der Klebevorrichtung von der gleichen Größenordnung [100] festgestellt. Zusammen mit den zusätzlichen mechanischen Toleranzen der Module beim Anbringen der Endstücke erklärt diese die Lage des Means der Standardabweichungen von den mittleren Gasverstärkungswerten sowie die Ausläufer zu noch höheren Gasverstärkungsvariationen. Man hat sich dazu entschieden, alle bisher produzierten Flugmodule in das TRD-Oktagon einzubauen.

Anhand der hier präsentierten Resultate konnte gezeigt werden, daß mit dem entwickelten Herstellungs- und Testverfahren Straw-Module in einer großen Stückzahl nach den Spezifikationen für einen Einsatz im Weltraum und einem Transport mit einem Space Shuttle produziert werden können.

6.6 Zusammenfassung

Hier werden die mit den Testapparaturen aus der Serienproduktion, an 280 gebauten Straw-Modulen gemessenen Resultate, in tabellarischer Form zusammengefaßt.

Messung	Meßwert	Streuung
Zugspannung	$m_t = 100.4 \text{ g}$	1.8 g
<i>CO₂-Sicherheitsfaktor</i>		
Alle Module	$SF = 7.1$	1.7
Charge 1	$SF = 6.6$	1.1
Charge 2	$SF = 8.5$	2.0
<i>He-Leckrate des Straw-Materials</i>		
Charge 1	$q_{S_m, He(L)} = 5.0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$	$1.6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$
Charge 2	$q_{S_m, He(L)} = 4.8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$	$1.7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}\cdot\text{m}}$
<i>Leckrate von Testgasen durch ein Modulendstück (Medium im Außenraum)</i>		
<i>He</i> (Luft)	$q_{E, He(L)} = 1.0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$	$0.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$
<i>He</i> (Vakuum)	$q_{E, He(V)} = 1.4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$	$0.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$
<i>CO₂</i> (Vakuum)	$q_{E, CO_2(V)} = 1.4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$	$0.2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{l}\cdot\text{mbar}}{\text{s}}$
<i>Korrelationen zwischen den Leckraten verschiedener Testgase</i>		
<i>He</i> (Luft) - <i>CO₂</i> (Vakuum)	$A_{He(L), CO_2(V)} = 2.9$	0.1
<i>He</i> (Vakuum) - <i>CO₂</i> (Vakuum)	$A_{He(V), CO_2(V)} = 3.7$	0.1
<i>He</i> (Vakuum) - <i>He</i> (Luft)	$A_{He(V), He(L)} = 1.2$	0.1
<i>Elektronisches Verhalten</i>		
Dunkelstrom	$\Sigma I = 0.47 \text{ nA}$	0.24 nA
Gasverstärkung in <i>Ar/CO₂</i>	$G \approx 5780$	≈ 180
RMS (Gasverstärkung)	1.4 %	0.5 %

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Messungen zur Qualitätssicherung und -kontrolle der Flugmodule (Stand 01.02.2004).

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das AMS-Experiment ist ein hochauflösender Teilchendetektor, der zur Vermessung der Zusammensetzung der kosmischen Höhenstrahlung voraussichtlich im Sommer 2007 für einen dreijährigen Zeitraum auf der Internationalen Raumstation ISS stationiert werden wird. Dabei soll ein besonderes Augenmerk auf die Suche nach kosmischer Antimaterie und Dunkler Materie gelegt werden. Seit dem erfolgreichen Test einer AMS-01 genannten, technischen Machbarkeitsstudie des Experimentes an Bord des Space Shuttles Discovery im Jahre 1998 werden Erweiterungen für die folgende AMS-02-Ausbaustufe entwickelt und gebaut, welche dann auf der Raumstation Daten nehmen wird. Einer dieser weiteren Subdetektoren ist ein Übergangsstrahlungsdetektor (TRD), mit dem leichte und schwere Teilchen gleicher Ladung (p , e^+ ; \bar{p} , e^-) im Energiebereich von 5 - 300 GeV unterschieden werden können. Angestrebt wird ein Protonenunterdrückungsfaktor $> 10^2$ bei einer Positronen-Effizienz von 90 %.

Durch den Bau und Test eines TRD-Prototypen mit hochenergetischen Teilchen in einer SPS-Strahllinie des CERN konnte gezeigt werden, daß die Anforderungen an die Teilchenidentifikation mit einer Konfiguration aus 20 Lagen von teilweise orthogonal zueinander ausgerichteten Proportionalkammern, vor denen jeweils eine 20 mm dicke Radiatorschicht aus einem Polypropylen-Fasermaterial plaziert ist, erreicht werden können. Die modular angeordneten Proportionalkammern bestehen aus 16 Röhren - auch Straws genannt - aus einer mehrschichtigen, auf einer Kaptonfolie basierenden Kompositmembran mit einem Innendurchmesser von 6 mm und einer Wandstärke von 72 μm . CFC-Streifen in Längs- und Querrichtung der Straws sowie Endstücke aus Polycarbonat dienen zur mechanischen Verstärkung. Die Endstücke stellen zudem die Schnittstelle zur weiteren Elektronik-Ausleseketten und zum Gasversorgungssystem her. Die insgesamt 328, bis zu 2.1 m langen Module werden im späteren AMS-02-TRD in einer konischen, achteckigen Tragestruktur (Oktagon) aus einer Aluminiumwabenstruktur mit beidseitig aufgeklebten CFC-Häuten gehalten und über ein Gasversorgungssystem mit einem Xenon Proportionalgas (80 %) unter Beimischung eines 20 %igen CO_2 -Löschgasanteils befüllt.

Bei der Konstruktion und dem Bau des TRD-Subdetektors mußte auf spezielle weltraumtechnische Gegebenheiten Rücksicht genommen werden, wie z.B. der Gewichtslimitierung von 494 kg, den mechanischen Belastungen von bis zur 6.5-

fachen Erdbeschleunigung bei einem Transport mit dem Space Shuttle in z-Richtung des Detektors, den Temperaturschwankungen im Weltraum auf der Außenseite des AMS-02-Detektors von -180°C bis $+50^{\circ}\text{C}$, der limitierten Gesamtstromleistung von 2 kW , der elektromagnetischen Ausstrahlung der TRD-Elektronikbauteile (EMI-Test), der redundanten Auslegung einzelner Systemkomponenten sowie der begrenzten Ausgasraten der verwendeten Materialien in einer Hochvakuumumgebung. Bei einem limitierten Gasvorrat auf der ISS ist zudem die Gasdichtigkeit der Proportionalkammern gegenüber Vakuum im Außenraum zu bestimmen. Die hier angeführten Punkte erfordern die Durchführung umfangreicher Weltraumtauglichkeitsprüfungen und Simulationen mit den verschiedenen TRD-Bauteilen im Vorfeld der AMS-02-Mission. Daher erfolgt die Konstruktion des TRDs in drei Phasen: zunächst werden technische Module jeder TRD-Komponente, wie z.B. der 20 lagige Prototyp gebaut und die technische Realisierbarkeit im Hinblick auf die Weltraumtauglichkeit geprüft und evtl. Optimierungen an der Bauform vorgenommen. In einer zweiten Entwicklungsphase werden dann exemplarisch einzelne Qualifizierungsmodule der finalen Bauform auf ihre Weltraumtauglichkeit getestet, bevor schließlich die Flugmodule hergestellt werden. Das Testprogramm in der Qualifizierungsphase erstreckt sich über einen Vibrations- und einen Thermovakuumtest mit denen die Umgebungsbedingungen bei einem Weltraumflug simuliert werden. Die Testobjekte müssen diese Prüfungen unbeschadet überstehen und zudem ein Frequenzspektrum mit Eigenfrequenzen, die oberhalb von 50 Hz liegen, aufweisen.

Die Weltraumtauglichkeit der Oktagon-Tragestruktur, der Ausleseelektronik, des Gasversorgungssystems sowie des Radiatormaterials konnte im Vorfeld dieser Arbeit gezeigt werden, sodaß der größte Teil dieser Komponenten sich bereits in der Serienproduktion befindet bzw. produziert wurde und damit für die Integration in den AMS-02-Detektor bereit steht.

Die Untersuchungen an den technischen Proportionalkammer-Modulen umfassen sowohl elektronische Tests als auch Messungen zur Gasdichtigkeit der Module. Aufgrund der geringen Dicke der Wände der für die Kammerkörper verwendeten Straws und der Endstücke, und des Druckunterschiedes von ca. 1 atm gegenüber dem Vakuum des Weltraumes ist eine Diffusion des Gasgemisches durch die Modulwände nicht vermeidbar, auch wenn diese mechanisch unbeschädigt sind. Die Leckrate $q_{M,Gas}$ durch ein Modul der Länge L setzt sich wie folgt aus den separat gemessenen Leckraten durch das Straw-Materials $q_{S,Gas}$ und den beiden Endstücke $2 \cdot q_{E,Gas}$ zusammen:

$$q_{M,Gas} = q_{S,Gas} + 2 \cdot q_{E,Gas} = q_{S_m,Gas} \cdot L + 2 \cdot q_{E,Gas}$$

Die Leckrate von $Xe/CO_2(80 : 20)$ durch die Straw-Wände wurde sowohl nach der Druckabfallmethode mit der eine integrale Leckrate gemessen werden kann, als auch nach der Massenspektrometernmethode ermittelt, welche eine getrennte Bestimmung der Leckraten der Einzelkomponenten des Gasgemisches erlaubt. Dabei ergeben sich folgende Leckraten pro Meter Modullänge des Straw-Materials:

1. Druckabfall:

$$q_{S_m,Xe/CO_2(V)} = (0.48 \pm 0.06) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}.$$

2. Massenspektrometer:

$$q_{S_m,80\%Xe(V)} = (0.12 \pm 0.02) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}$$

$$q_{S_m,20\%CO_2(V)} = (0.37 \pm 0.04) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s \cdot m}.$$

Die Diffusion von Xe durch die Modulendstücke ist vernachlässigbar klein. Daher wurde nur die Leckrate von reinem CO_2 durch das Endstückmaterial nach der Druckabfallmethode bestimmt:

$$q_{E,100\%CO_2(V)} = (1.4 \pm 0.1) \cdot 10^{-5} \frac{l \cdot mbar}{s}.$$

Bei einem Gesamtvorrat von 8100 l Xe und 2000 l CO_2 lassen sich aus diesen Leckraten für ein Modul der mittleren Länge $L = 1.52$ m die folgenden Sicherheitsfaktoren berechnen:

$$Xe: \quad SF = 165 \pm 24$$

$$CO_2: \quad SF = 6.4 \pm 1.2$$

Damit könnte der AMS-02-TRD ca. 20 Jahre im Weltraum betrieben werden. Aufgrund der für CO_2 deutlich höheren Diffusionsrate ändert sich das Mischungsverhältnis der Gase, so daß eine permanente Kontrolle und Regulation dieses Verhältnisses erforderlich wird. Da das CO_2 für einen Langzeiteinsatz des TRDs im Weltraum die kritische Gaskomponente ist, wird die Leckrate von reinem CO_2 durch jedes produzierte Modul bestimmt, woraus sich dann der obige Sicherheitsfaktor SF bei Berücksichtigung des 20 %igen CO_2 -Gasanteils berechnen läßt. Die großen Zeitverzögerungen bei der Diffusion von Xe - und CO_2 -Gas durch die Straw-Wände von einigen 100 h machen den Einsatz von Helium als weiteres Prüfgas neben CO_2 notwendig, da sich bei He schon nach wenigen Stunden der stationäre Zustand der Diffusion einstellt.

Voruntersuchungen haben ergeben, daß das in zwei verschiedenen Chargen unterschiedlicher Bauform gelieferte Straw-Material qualitative Unterschiede in der Gasdichtigkeit aufweist. Zur Auffindung von Punktlecks im Material werden die Straws vor der Verarbeitung zu Modulen in einem Einzelröhrchentest mit He geprüft. Durch Umrechnung der entsprechenden CO_2 - in eine He -Leckrate sollte sich ein CO_2 -Sicherheitsfaktor $SF > 4$ für die zu produzierenden Module ergeben, andernfalls sind die Straws unbrauchbar. Aus den sortierten Straws der Charge 1 wurden 204 Flugmodule gebaut. Von dem Material der Charge 2 standen zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit ~ 2200 Straws zur Verfügung aus denen 68 weitere Flugmodule produziert wurden.

Das an diesen Test anschließende Herstellungsverfahren der Straw-Module wurde dahingehend optimiert, daß bei sorgfältiger Fertigung der Module der Gasverlust durch Punktlecks in den Klebnähten gegenüber der Diffusion vernachlässigbar

ist. Acht der so hergestellten Module, entsprechend einem seriell verbundenen TRD-Gaskreislauf, wurden in einer Langzeitmessung von 1000 h mit Xe/CO_2 im Innern und Vakuum im Außenraum auf ihre Funktionsfähigkeit hin geprüft. Dabei konnten die nach der Massenspektrometer- und Druckabfallmethode an den einzelnen Komponenten eines Moduls gemessenen Leckraten reproduziert werden. Zudem zeigte sich kein Alterungsverhalten der Module, was die Gasdichtigkeit angeht. Des Weiteren haben Gasverstärkungsmessungen an einzelnen Straw-Modulen des Gaskreislaufes neben der Bestimmung der Diethornparameter für ein $Xe/CO_2(80 : 20)$ -Gasgemisch ergeben, daß diese auch bei einer Änderung des Xe/CO_2 -Mischungsverhältnisse auf 91 : 9 nach 1000 h noch voll funktionsfähig sind.

In der Phase der Weltraumtauglichkeitsprüfungen konnten jeweils vier Qualifizierungsmodule aus dem Straw-Material der ersten bzw. zweiten Charge mit einem Meßprogramm zur Qualitätssicherung und -kontrolle der mechanischen und elektronischen Eigenschaften eines Moduls, welches auch während der Serienproduktion eingesetzt wird, überwacht werden. Dieses Programm umfaßt sowohl Messungen während der Herstellung der Module, wie z.B. die Bestimmung der Drahtspannung und des Rauschverhaltens eines Moduls, als auch Gasdichtigkeitsmessungen der fertigen Straw-Module mit He - bzw. CO_2 -Prüfgas an Luft und in einer Vakuumumgebung. Zudem kann mit Hilfe einer automatisierten Gasverstärkungsmessung mit radioaktiven $^{55}_{26}Fe$ -Präparaten in Ar/CO_2 , neben den Diethornparametern für dieses Gasgemisch, die Funktionsfähigkeit aller 8 Prototypen, sowie mögliche mechanische Verbiegungen der Module durch Variationen der an verschiedenen Punkten über einem Modul lokal gemessenen Gasverstärkungen bestimmt werden.

Die mechanische Unversehrtheit sowie die elektronische Funktionsfähigkeit während der kombinierten Vibrations- (Resonanzsuchlauf im Frequenzbereich von 10 – 2000 Hz und Belastungstest bei einer effektiven Beschleunigung von $a_{RMS} = 6.8 g$) und Thermovakuumtestreihe (10 Temperaturzyklen von $\sim -40^\circ C$ und $\sim +55^\circ C$ in einer Vakuumumgebung) wird in Gasdichtigkeitsmessungen mit He gegenüber Luft im Außenraum sowie in Gasverstärkungsmessungen überprüft. Dabei zeigten sich keine Änderungen im Diffusionsverhalten und im elektrischen Verhalten der Modulprototypen. Die ersten Eigenfrequenzen der Module der Länge $L = 658 mm$ aus der ersten und zweiten Materialcharge übersteigen darüber hinaus das aus Sicherheitsüberlegungen geforderte Limit von 50 Hz. Da auch das Ausgasverhalten der verschiedenen Modulprototypen ähnlich ist, konnte die Weltraumtauglichkeit der Straw-Module aus beiden Materialchargen gezeigt werden.

Anhand der präsentierten Resultate konnte gezeigt werden, daß mit dem entwickelten Herstellungs- und Testverfahren Straw-Module in einer großen Stückzahl nach den speziellen Spezifikationen für einen Einsatz im Weltraum produziert werden können. Die Gasdichtigkeitsmessungen mit CO_2 als Prüfgas gegen Vakuum führten zu einem mittleren CO_2 -Sicherheitsfaktor aller bisher produzierten und getesteten 280 Flugmodule von $SF = 7.1$, der einen mehr als 20-jährigen Betrieb des AMS-02-TRDs auf der ISS ermöglicht, falls es zu keinen unvorhergesehenen Leckagen im Gasversorgungssystem oder einzelnen Gaskreisläufen bzw. beim Einbau der Module in das Oktagon kommt. Zudem konnten die Leckraten der Prüfgase durch

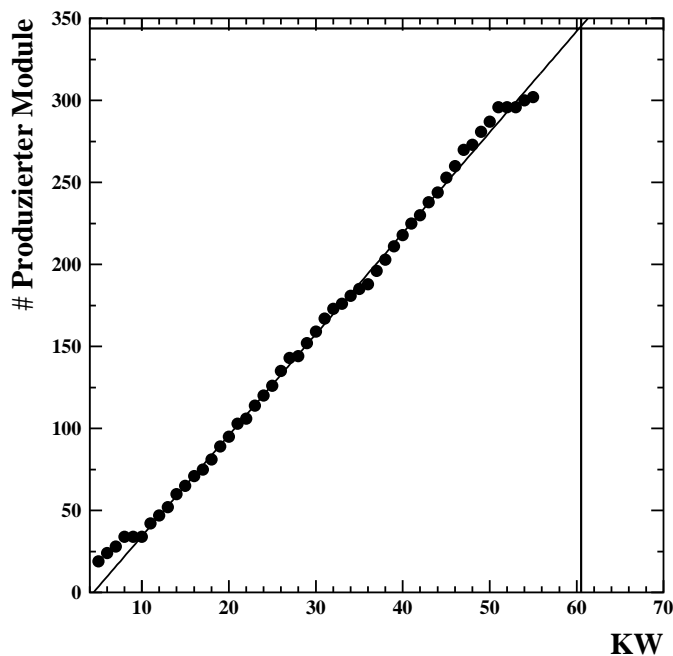


Abbildung 7.1: *Serienproduktion der Flugmodule: Integrale Anzahl produzierter Module pro Kalenderwoche (KW) (Stand 01.02.2004).*

das Straw-Material und die Modulendstücke mit einer größeren Statistik bestimmt werden. Die Resultate der oben beschriebenen Einzelkomponentenmessungen haben sich dabei reproduziert. Bei Kenntnis der integralen Leckrate des gesamten AMS-02-TRD besteht weiterhin die Möglichkeit den Gasvorrat für Gewichtseinsparungen zu reduzieren. Die elektronischen Funktionstests in Form von Gasverstärkungsmessungen in Ar/CO_2 zeigten darüber hinaus, daß die Straw-Module mit einer mittleren mechanischen Toleranz von $\sim 200 \mu m$ gebaut werden.

In Abbildung 7.1 ist der Verlauf der Serienproduktion der Flugmodule dargestellt. Mit dem Start Ende 2002 wird die Serienproduktion der 328 Module voraussichtlich im März/April 2004 abgeschlossen sein. Gleichzeitig wird die Oktagon-Tragestruktur, die Ausleseelektronik sowie das Gasversorgungssystem soweit vorbereitet, daß im Februar 2004 mit der Integration der ersten Flugmodule samt Radiator in das Oktagon begonnen werden kann. Während der Integration und später am fertigen AMS-02-TRD werden weitere Funktions- und Gasdichtigkeitsmessungen vorgenommen. Die dazu benötigten Teststände werden mit den Erfahrungen der hier beschriebenen Untersuchungen entworfen. Mit dem Zusammenbau des AMS-02-Detektors kann dann Ende 2004 begonnen werden, bevor das Experiment im Sommer 2007 mit einem Space Shuttle zur Internationalen Raumstation gebracht wird und die dreijährigen Datennahme gestartet werden kann.

Anhang A

Anhänge

A.1 Strahltest: Analyse der Daten von einem 20-lagigen TRD-Prototypen

Die Myon-Ereignisse werden dazu verwendet, die Signalhöhe von Ereignissen aus den einzelnen Röhrcchen der Proportionalkammern untereinander zu kalibrieren. Dieses hängt mit den durch mechanische Toleranzen der Module und unterschiedliche Verstärkungsfaktoren der Ausleseelektronik hervorgerufenen Schwankungen in den Signalhöhen der verschiedenen Auslesekanäle zusammen. Wie aus Abbildung A.1 zu entnehmen ist, liegen die Fehler der Interkalibrationsfaktoren im 1 %-Bereich. Die größeren Schwankungen in den Faktoren der horizontal verlaufenden Lagen hängt mit der kleineren Statistik von Ereignissen in diesen Lagen zusammen. Auf der ISS wird diese Kalibration des TRDs mit Teilchen der kosmischen Höhenstrahlung vorgenommen.

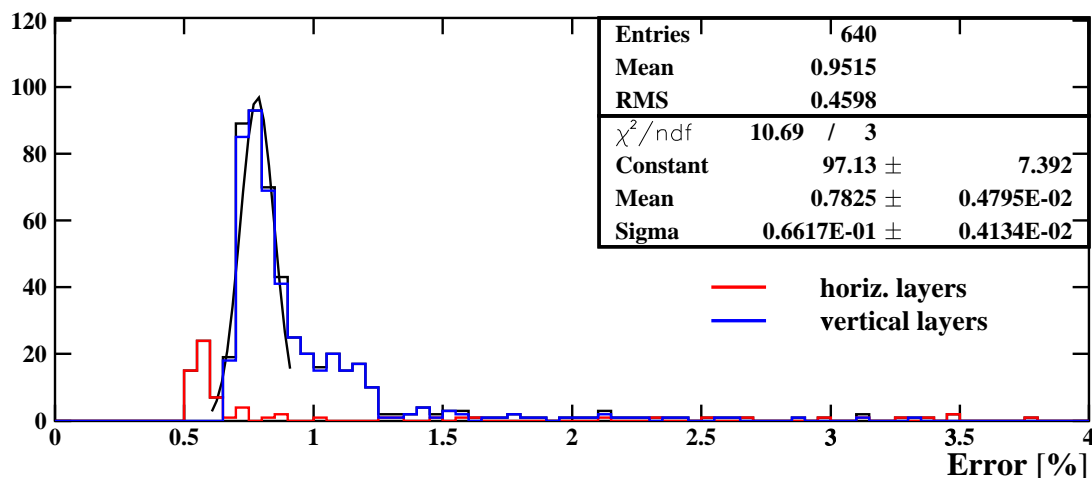


Abbildung A.1: Fehler der Interkalibrationsfaktoren [58].

Des weiteren müssen die über einen längeren Zeitraum aufgenommenen Daten aufgrund von durch Temperatur- und Druckschwankungen entstandenen Variationen in der Signalhöhe korrigiert werden. Dazu ist in Abbildung A.2 die aus den Myon-Ereignissen gewonnene relative Änderung der Gasverstärkung - das Verhältnis aus der Anzahl der mit der Ausleselektronik detektierten Ladungen zur Anzahl der primären im Detektorgas erzeugten Ladungen - in Abhängigkeit der relativen Dichteschwankungen aufgetragen. Aus der Regressionsgeraden ergibt sich bei einem Anstieg der Dichte um 1 %, eine um 5.24 % verringerte Gasverstärkung bzw. Signalhöhe. Die Gaussverteilung der Residuen des Fits hat eine rel. Breite von 1.5 %. Zusammen mit den Fehlern der Interkalibrationsfaktoren zeigt sich demnach, daß die genaue Signalhöhe von Ereignissen bei diesem Prototypen nur auf $\sim 2\%$ genau bestimmt werden kann. Für die absolute Energie-Kalibration werden $^{55}_{26}\text{Fe}$ -Präparate verwendet, die Photonen der Energie 5.9 keV emittieren. Näheres zu den Gasverstärkungsmessungen ist auch in Kapitel 3.2.2 zu finden.

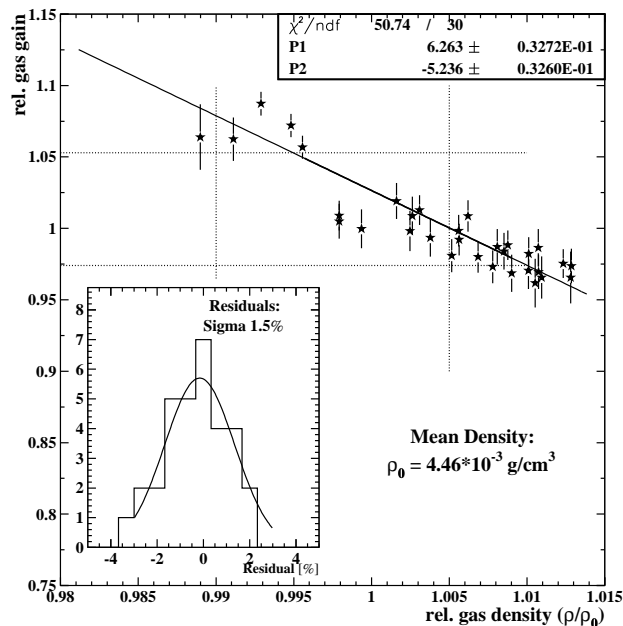


Abbildung A.2: Änderung der Gasverstärkung bei Dichteschwankungen [58].

Die Datenanalyse zur Bestimmung der Nachweiseffizienz für Elektronen und des Unterdrückungsfaktors für Protonen (Verhältnis aus der Anzahl der einfallenden zur Anzahl der selektierten Protonen) läuft in zwei Schritten ab. Zunächst werden aus

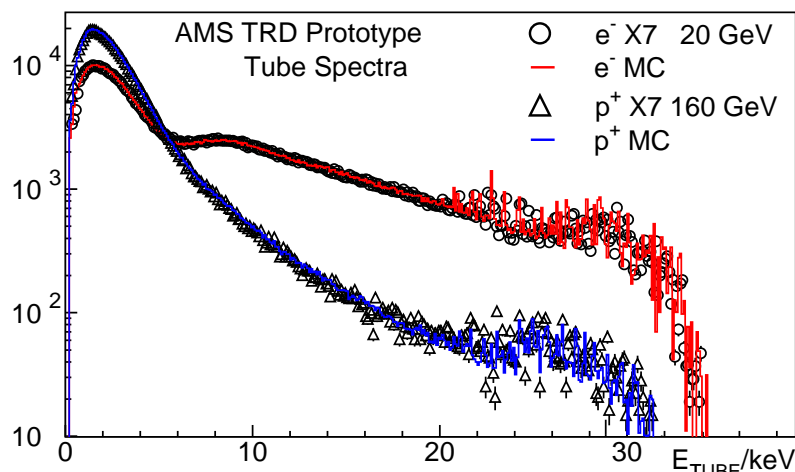


Abbildung A.3: Daten-MC-Vergleich der Einzelröhrchenspektren von $20\text{ GeV } e^-$ und $160\text{ GeV } p^+$ der X7-Strahllinie am CERN [58].

den Daten die Ereignisse ausgewählt, die in den TRD-Proportionalkammern eine einzelne, gerade Spur hinterlassen (sog. "single track events"). In Abbildung A.3 sind diese mit obigen Faktoren korrigierten Energiespektren einzelner Röhrcen von $20\text{ GeV } e^-$ und $160\text{ GeV } p^+$ der X7-Strahllinie sowie die mit dem erweiterten GEANT-Softwarepaket simulierten Spektren dargestellt. Im Elektronspektrum ist eine deutliche Erhöhung bei Energien $> 5\text{ keV}$ im Vergleich zum Protonenspektrum zu erkennen, was auf die Detektion von Übergangsstrahlung in den Proportionalkammern hindeutet.

In einem zweiten Schritt werden die Teilchen mit einer Likelihood-Methode identifiziert. Dazu werden die Integrale über die für p^+ und e^- in Abb. A.3 dargestellten Energiespektren auf 1 normiert und als Wahrscheinlichkeitsverteilungen $P_{e,p}^i$ für einen Treffer auf einer Spur verwendet. Für Elektronen und Protonen werden dann getrennt voneinander, die Wahrscheinlichkeiten für Treffer auf einer Spur multipliziert ($n = \text{Anzahl der Treffer}$):

$$P_{e,p}^{mean} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n P_{e,p}^k(E_{dep})} \quad (\text{A.1})$$

und das Likelihood-Verhältnis für Elektron-ähnliche Ereignisse berechnet:

$$L_e = \frac{P_e^{mean}}{P_e^{mean} + P_p^{mean}} \quad (\text{A.2})$$

In Abbildung A.4 sind die Likelihood-Verteilungen von $-\ln L_e$ für 20 GeV Elektronen und 160 GeV Protonen in zwei Diagrammen dargestellt. Der Likelihood-Schnitt (LH-Cut) für Elektron-ähnliche Ereignisse wird so angesetzt, daß man eine Elektroneffizienz von 90% erhält. Mit dem gleichen Schnitt in der Proton-Verteilung ergibt sich damit die Anzahl der Protonereignisse, die als Elektronen fehlinterpretiert werden, und somit nach obiger Definition der Protonenunterdrückungsfaktor. Dieser liegt bei 435 ± 57 für 160 GeV Protonen.

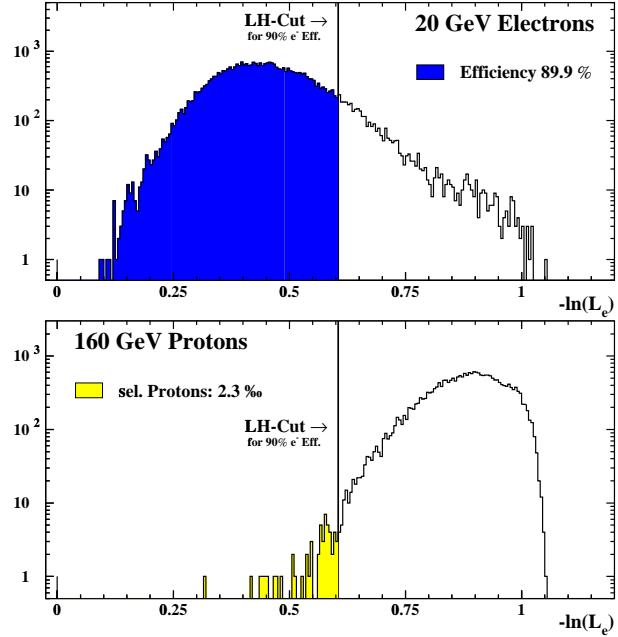


Abbildung A.4: Likelihood-Verteilungen für die $20\text{ GeV } e^-$ - und die $160\text{ GeV } p^+$ -Daten - das Likelihood für Elektron-ähnliche Ereignisse ist eingezeichnet [58].

A.2 Diffusion: Gasdurchgang durch Membranen

A.2.1 Lösung der Diffusionsgleichung

Im folgenden wird das System von einer zur x -Achse senkrecht stehenden homogenen Membran der Dicke d , die durch zwei senkrechte Ebenen bei $x = 0$ und $x = d$ begrenzt wird, betrachtet. An der Oberfläche bei $x = 0$ ist die Membran mit einem Vakuum ($c = 0$ - Labormessungen: Vakuum im Außenraum der Straw-Module) und bei $x = d$ mit einem Gasvolumen mit der Konzentration c_I (Labor: Innenraum der Straw-Module) verbunden (siehe auch Abbildung 4.8). Es soll die Diffusionsgleichung (siehe auch Gleichung 4.3)

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \cdot \frac{\delta^2 c}{\delta x^2}, \quad (\text{A.3})$$

für konstantes D und mit den Anfangs- und Randbedingungen

$$c = \varphi(x) \quad \text{für} \quad 0 < x < d \quad \text{und} \quad t = 0$$

$$c = 0 \quad \text{für} \quad x = 0 \quad \text{und} \quad c = c_I \quad \text{für} \quad x = d \quad \text{und} \quad t > 0,$$

und einer anfänglichen Konzentrationsverteilung $\varphi(x)$ in der Membran (allgemeiner Fall) gelöst werden.

Dazu wird folgender Ansatz gewählt:

$$c(x, t) = \psi_1(x, t) + \psi_2(x, t) \quad (\text{A.4})$$

mit einem ψ_1 und ψ_2 , das die obigen Bedingungen erfüllt:

$$\psi_1 = \varphi(x) \quad \text{für} \quad 0 < x < d \quad \text{und} \quad t = 0,$$

$$\psi_1 = 0 \quad \text{für} \quad x = 0 \quad \text{und} \quad x = d \quad \text{für} \quad t > 0,$$

und

$$\psi_2 = 0 \quad \text{für} \quad 0 < x < d \quad \text{und} \quad t = 0,$$

$$\psi_2 = 0 \quad \text{für} \quad x = 0, \quad \psi_2 = c_I \quad \text{für} \quad x = d \quad \text{und} \quad t > 0.$$

Die Lösung für ψ_1 läßt sich nach der Methode der Separation der Variablen mit dem Ansatz

$$\psi_1(x, t) = X(x) \cdot T(t) \quad (\text{A.5})$$

finden. Durch Einsetzen in obige Diffusionsgleichung A.3 ergibt sich

$$\frac{\dot{T}}{T} = D \cdot \frac{\ddot{X}}{X} \quad (\text{A.6})$$

mit der Lösung

$$\psi_1(x, t) = [A \cdot \cos(\lambda \cdot x) + B \cdot \sin(\lambda \cdot x)] \cdot \exp(-\lambda^2 \cdot D \cdot t) \quad (\text{A.7})$$

mit von x und t unabhängigen Konstanten λ . Aus obigen Randbedingungen für ψ_1 erhält man:

$$B = 0 \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{n\pi}{d}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (\text{A.8})$$

Damit läßt sich für die allgemeine Lösung schreiben:

$$\psi_1(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \cdot \sin \left(\frac{n\pi \cdot x}{d} \right) \quad (\text{A.9})$$

mit den Konstanten A_n , welche ebenfalls so bestimmt werden müssen, daß sie obige Anfangsbedingungen erfüllen:

$$A_n = \frac{2}{d} \int_0^d \varphi(\xi) \cdot \sin \left(\frac{n\pi \cdot \xi}{d} \right) d\xi. \quad (\text{A.10})$$

Aus der allgemeinen Gleichung A.9 ergibt sich für $\psi_2(x, t)$ unter Berücksichtigung der entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen:

$$\psi_2(x, t) = \frac{c_I \cdot x}{d} + \frac{2c_I}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \cdot \sin \left(\frac{n\pi \cdot x}{d} \right) \quad (\text{A.11})$$

und schließlich $c(x, t)$.

Für den Fall einer zu Beginn des Diffusionsvorganges homogenen Konzentration $\varphi(x) = c_W = \text{const.}$ in der Membran, wie er später auch näherungsweise bei der Langzeitmessung an einem Gaskreislauf vorliegt (siehe Abschnitt 4.3.2), erhält man:

$$\begin{aligned} c(x, t) &= \psi_1(x, t) + \psi_2(x, t) \\ &= \frac{4c_W}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \cdot \sin \left(\frac{(2n+1)\pi \cdot x}{d} \right) + \\ &\quad + \frac{c_I \cdot x}{d} + \frac{2c_I}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \cdot \sin \left(\frac{n\pi \cdot x}{d} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

A.2.2 Bestimmung der Leckrate

Im folgenden wird zunächst der Fall der Leckratenbestimmung in einem Vakuumtank nach der Massenspektrometernmethode betrachtet, da dieser im Vergleich zur Druckabfallmethode eine separate Messung der Leckraten der Gaskomponenten ermöglicht: Die Änderung der Gaskonzentration in einem Volumen der Größe $V = 1 \text{ m}^3$, mit dem die Membran an der Oberfläche A bei $x = 0$ verbunden ist, läßt sich unter der Annahme, daß diese Änderung hinreichend klein ist und die Gleichgewichtskonzentration an der Grenzfläche der Membran nicht merklich beeinflußt, wie folgt bestimmen:

$$\begin{aligned} \frac{dc_g}{dt} &= \frac{D \cdot A}{V} \cdot \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right)_{x=0} \\ &= \frac{D \cdot A \cdot c_I}{V \cdot d} + \frac{2D \cdot A \cdot c_I}{V \cdot d} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] + \\ &\quad + \frac{4D \cdot A \cdot c_W}{V \cdot d} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

Für den Fall einer zunächst gasfreien Membran ($c_W = 0$ für $0 < x < d$) ergibt sich dann die in Abschnitt 4.2.1 angeführte Gleichung (4.4):

$$\frac{dc_g}{dt} = k_1 + k_2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot e^{-\left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 \cdot D \cdot t} \quad (\text{A.14})$$

mit

$$k_1 = \frac{D \cdot A \cdot c_I}{V \cdot d} \quad \text{und} \quad k_2 = 2 \cdot k_1 \quad (\text{A.15})$$

Mit der Definition einer Konzentration

$$c = \frac{\text{Teilchen}}{\text{Volumen}} = \frac{N}{V} \quad (\text{A.16})$$

und der Idealgasgleichung

$$p \cdot V = N \cdot k \cdot T \quad (\text{A.17})$$

mit dem Druck p im Volumen V außerhalb der Membran, der Raumtemperatur $T = 293.15 \text{ K}$ und der Boltzmann-Konstanten $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ ergibt sich für das zeitliche Verhalten der Leckrate $q(t)$ ($[\frac{\text{l} \cdot \text{mbar}}{\text{s}}]$):

$$\begin{aligned} q(t) &= \left| \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t} \right| = V \cdot \frac{dp}{dt} = V \cdot 10k \cdot T \cdot \frac{dc_g}{dt} \\ &= 10k \cdot T \cdot \left[\frac{D \cdot A \cdot c_I}{d} + \frac{2D \cdot A \cdot c_I}{d} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4D \cdot A \cdot c_W}{d} \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)\pi}{d} \right) \cdot D \cdot t \right] \right] \quad (\text{A.18}) \end{aligned}$$

bzw. für $c_W = 0$ für $0 < x < d$ und $t = 0$:

$$q(t) = 10k \cdot T \cdot \left[\frac{D \cdot A \cdot c_I}{d} + \frac{2D \cdot A \cdot c_I}{d} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{d} \right)^2 \cdot D \cdot t \right] \right] \quad (\text{A.19})$$

A.2.3 Langzeitmessung an drei 1.3 m langen Straws

Der letztere Fall (Gleichung A.19) liegt bei der in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Langzeitmessung in einer Vakuumumgebung mit drei 1.3 m langen Straws bei einer Befüllung mit $Xe/CO_2(80 : 20)$ vor.

Massenspektrometermethode: Xe-Messung

Die Diffusionskonstante für Xe wurde nach der in dem Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Time-Lag-Methode bestimmt (Abbildung 4.12). In Abbildung A.5 wird zum einen deutlich, daß das nach der Massenspektrometermethode gemessene zeitliche Verhalten der Leckrate von Xe mit Gleichung A.19 ($n = 20$) beschrieben werden kann. Es handelt sich demnach bei Xe um einen Diffusionsvorgang, bei dem die Löslichkeit von Xe -Atomen in dem Straw-Material vernachlässigt werden kann.

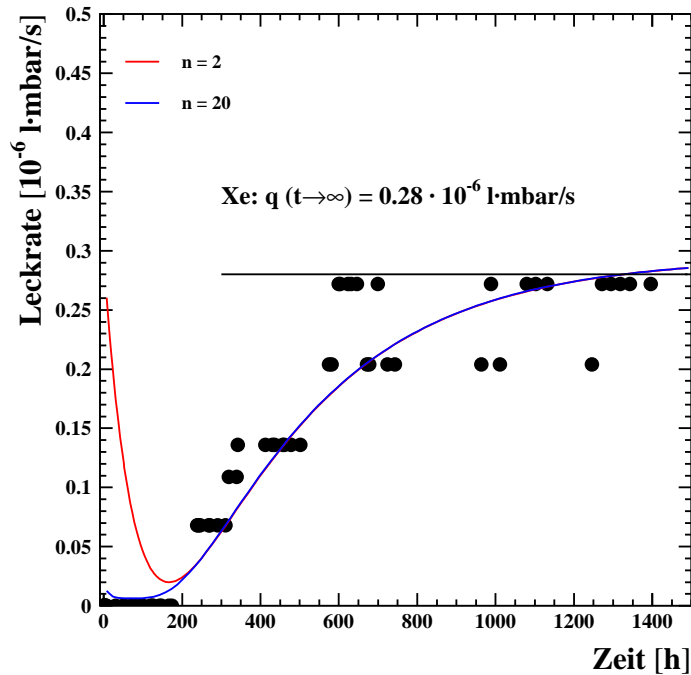


Abbildung A.5: Gemessene und berechnete ($n = 2$, $n = 20$) Zeitabhängigkeit der Leckrate von Xe durch die Straw-Wände.

Zum anderen werden die gemessenen Leckraten für Zeiten $t > 200 \text{ h}$ durch eine Summe von zwei Exponentialfunktionen ($n = 2$) hinreichend genau beschrieben. Damit läßt sich dann die Leckrate von Xe und auch von CO_2 für $t \rightarrow \infty$ näherungsweise durch die Anpassung einer Summe von zwei Exponentialfunktionen (vgl. auch Gleichung 4.16):

$$q(t) = k_1'' - k_2'' \cdot e^{-\frac{t}{k_3''}} + k_4'' \cdot e^{-\frac{t}{k_5''}} \quad (\text{A.20})$$

mit den an die Meßpunkte angepaßten Parametern k_1'' bis k_5'' extrapolieren.

Massenspektrometermethode: CO_2 -Messung

Ähnlich wie bei der Xe -Gaskomponente läßt sich das zeitliche Verhalten der Leckrate von CO_2 durch das Straw-Material für Zeiten $t > 200 \text{ h}$ prinzipiell mit Gleichung A.19 ($n = 20$) beschreiben (siehe Abbildung A.6), wobei die Diffusionskonstante nach der Time-Lag-Methode bestimmt wurde (Abschnitt 4.2.2, Abbildung 4.12). Bei diesem Vorgang ist aber die Löslichkeit von CO_2 -Molekülen in den Straw-Wänden nicht zu vernachlässigen. Diese CO_2 -Anlagerung ruft eine zusätzliche Permeation des CO_2 -Gases durch die Straw-Wände hervor, die mit Hilfe von Gleichung A.19 durch eine an die Leckrate im stationären Zustand angepaßten Anfangskonzentration von $c_I = 1.85 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}$ (anstelle einer Konzentration von $c = 0.5 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{m}^3}$ bei einem 20 %-igen CO_2 -Gasanteil und $T = 293.15 \text{ K}$, sowie $p = 1013 \text{ mbar}$) beschrieben werden kann.

Die Anlagerung von CO_2 -Molekülen in Polymermembranen, wie der Kaptonschicht in den Straw-Wänden, ist bekannt [102]. Im Speziellen kann sich CO_2 in solchen Membranen mit einer höheren Konzentration als im angrenzenden Gasvolumen anlagern [94].

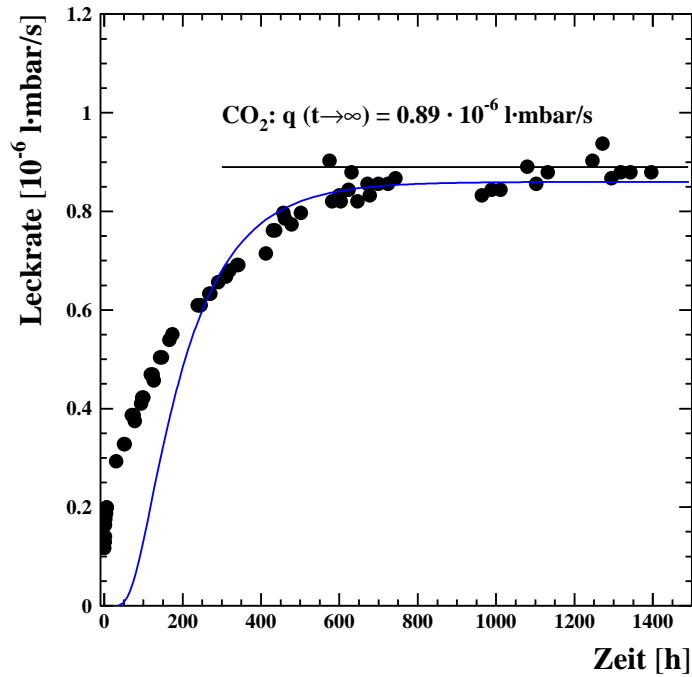


Abbildung A.6: Gemessene und berechnete Zeitabhängigkeit der Leckrate von CO_2 durch die Straw-Wände.

Druckabfallmethode:

Anhand von obigen Überlegungen läßt sich das zeitliche Verhalten der integralen Leckrate von Xe/CO_2 an den Straw-Innenwänden, also bei $x = d$, wie es nach der Druckabfallmethode gemessen wird, in ähnlicher Weise berechnen:

$$q(t) = 10k \cdot T \cdot D \cdot A \cdot \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right)_{x=d} \quad (\text{A.21})$$

Die integrale Leckrate von Xe und CO_2 im stationären Zustand ($t \rightarrow \infty$) läßt sich dann wieder durch die Anpassung einer Summe von zwei Exponentialfunktionen

$$q(t) = k'_1 + k'_2 \cdot e^{-\frac{t}{k'_3}} + k'_4 \cdot e^{-\frac{t}{k'_5}}, \quad (\text{A.22})$$

mit den an die Meßpunkte angepaßten Parametern k'_1 bis k'_5 , an dem Parameter k'_1 ablesen.

A.3 Resultate der Weltraumtauglichkeitsprüfungen mit der FE-Elektronik

Das folgende Diagramm A.7 zeigt die Ergebnisse der Weltraumtauglichkeitsuntersuchungen an einer UFE-Platine des Bautyps 90M. Dabei wurde jeweils nach dem ersten Vibrationstest, dem Thermovakuumtest und dem erneuten Vibrationstest eine Charakterisierung der einzelnen Auslesekanäle auf der UFE-Platine durch Messung der Lage der Pedestals, des elektronischen Rauschens und des Verstärkungsfaktors vorgenommen.

Die Höhe des elektronischen Rauschens schwankt um bis zu 10 %, die Verstärkungsfaktoren um bis zu 2 %, was auf eine einwandfreie Funktionsweise der FE-Elektronik des TRDs hindeutet. Im Gegensatz dazu variiert die Lage des Pedestals von Messung zu Messung um bis zu 14 %. Dieses hat aber keine negativen Auswirkungen auf den Betrieb des TRDs, da bei jeder Messung auch die Lage des Pedestals mit aufgezeichnet wird.

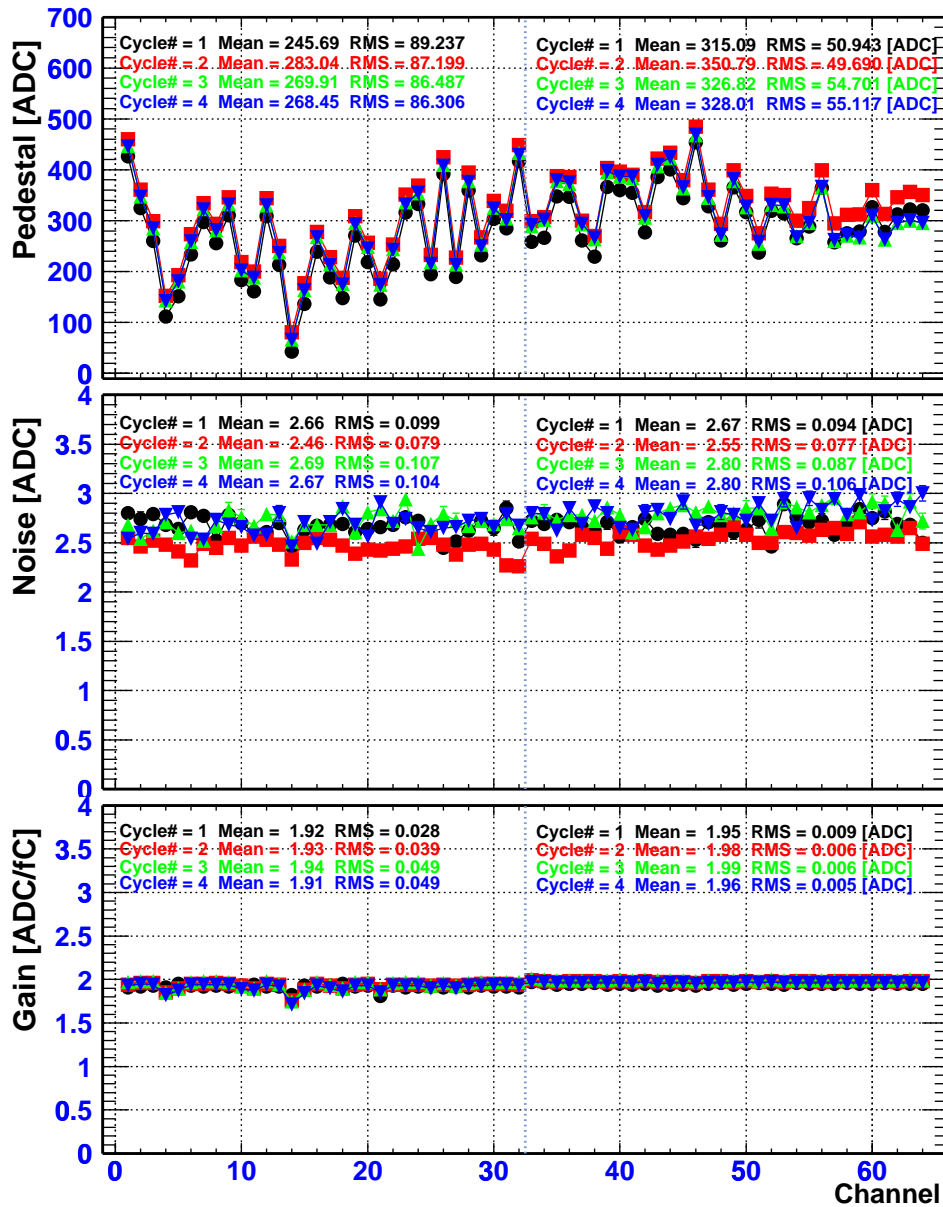


Abbildung A.7: Lage der Pedestal, elektronisches Rauschen (in ADC-Kanälen) und Verstärkungsfaktoren (in ADC-Kanälen pro Ladung) für die 64 Auslesekanäle einer UFE-Platine der Bauform 90M, gemessen nach dem Aufbringen der VA-Chips (schwarze Punkte), nach einem ersten Vibrationstest in x , y und z -Koordinate (rote Rechtecke), nach einem Thermovakuumtest (grüne Dreiecke) und nach einem zweiten Vibrationstest (blaue Dreiecke) [80].

Abbildungsverzeichnis

2.1	<i>Der AMS-02-Detektor auf der ISS [2].</i>	9
2.2	<i>Die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute [7].</i>	11
2.3	<i>Fluktuationen in der 2.7 K Hintergrundstrahlung beobachtet mit WMAP [9].</i>	12
2.4	<i>Das mit AMS-01 und HEAT gemessene Spektrum der kosmischen Strahlung [10].</i>	13
2.5	<i>Energiespektren der Protonen, welche den AMS-01-Detektor von unten bzw. oben durchqueren [11], [12].</i>	14
2.6	<i>Energiespektrum der mit AMS-01 gemessenen Antiprotonen im Vergleich zu den BESS-Daten [13].</i>	14
2.7	<i>Erwartetes a) B/C-Verhältnis nach 6-monatiger Datennahme und b) $^3\text{He}/^4\text{He}$-Verhältnis nach 1-tägiger Datennahme mit AMS-02 im Vergleich zu bisherigen Messungen [24].</i>	15
2.8	<i>Erwartetes $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$-Verhältnis nach 1-jähriger Datennahme mit AMS-02 im Vergleich zu bisherigen Messungen [24].</i>	15
2.9	<i>AMS-02-Erwartungen gegenüber AMS-01 und anderen Experimenten: a) Energiespektrum der He/$\bar{\text{H}}\text{e}$-Kerne; b) Grenzen zur Suche nach kosmischer Antimaterie [15].</i>	17
2.10	<i>a) Kosmisches Trugbild des Galaxienhaufens CL0024+1654 (Galaxien: rot, Dunkle Materie: blau), erstellt mit dem Hubble Teleskop [19]; b) Rotationsgeschwindigkeit der Galaxie M33 [20].</i>	18
2.11	<i>a) Das mit bisherigen Detektoren gemessene und für AMS-02 erwartete Antiprotonen-Spektrum [25]; b) mit AMS-02 erwarteter e^+-Anteil im Falle von in $\chi\bar{\chi}$-Annihilationen entstehende primäre e^+ [27].</i>	20
2.12	<i>Aufbau des AMS-02-Detektors [30].</i>	21
2.13	<i>Skizze des supraleitenden Magneten (Innendurchmesser: 1.1 m; Außendurchmesser: 2.7 m; Höhe: 1.55 m) [30].</i>	22
2.14	<i>a) Skizze des AMS-02-Trackers; b) Foto einer Ebene des Si-Spurdetektors mit 5 montierten Leitern [30].</i>	22
2.15	<i>Impulsauflösung des Silizium Spurdetektors von AMS-02 [32].</i>	23
2.16	<i>Anti-Koinzidenz Zähler (ACC) [30].</i>	24
2.17	<i>Time of Flight System (ToF) [30].</i>	24
2.18	<i>Anodensignal eines Photomultipliers bei einem Strahltest [35].</i>	25
2.19	<i>Auflösungsvermögen des getesteten ToF-Systems in Abhängigkeit der Teilchenladung [35].</i>	25
2.20	<i>Ring Imaging Čerenkov Counter (RICH) [30].</i>	26

2.21	<i>Für AMS-02 erwartete Rate der sechs leichtesten Isotope während der dreijährigen Stationierung auf der ISS [36].</i>	26
2.22	<i>a) Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL); b) Skizze zweier "Superlagen" [30].</i>	27
2.23	<i>Der AMS-02-Übergangsstrahlungsdetektor (TRD) in der am oberen Magnetflansch befestigten M-Struktur [30].</i>	28
2.24	<i>a) Foto des 20-Lagigen TRD-Prototypen; b) Darstellung des mech. Aufbaus des Prototypen.</i>	30
2.25	<i>Gemessener und MC-Simulierter Protonenunterdrückungsfaktor in Abhängigkeit der Strahlenergie [58].</i>	30
2.26	<i>Simulation des AMS-02-Detektors an der Tragestruktur der ISS [59].</i>	32
2.27	<i>Rauschprüfung: Verlauf der Spektralen Leistungsdichte.</i>	33
2.28	<i>Verlauf zweier Temperaturzyklen im Thermovakuumtest.</i>	35
3.1	<i>Schematische Darstellung zur Entstehung von Übergangsstrahlung an einer Grenzfläche.</i>	38
3.2	<i>Prinzip der Entstehung von Übergangsstrahlung an N Folien der Dicke l_1 im Vakuum.</i>	40
3.3	<i>Übergangsstrahlung aus einem regulären Radiator</i>	41
3.4	<i>Einzelröhrchen-Spektren von Übergangsstrahlung aus verschiedenen faserigen Radiatoren gleicher Dicke und primärem Elektron; erzeugt von 20 GeV Elektronen der X7-Strahllinie des CERN [58].</i>	42
3.5	<i>Prinzipskizze einer Lage des AMS-02-TRDs bestehend aus Radiator und Proportionalkammer.</i>	43
3.6	<i>Daten-MC-Vergleich der Spektren von 20 GeV e^- ($\gamma \approx 40000$) und 160 GeV p^+ ($\gamma \approx 170$) (gemessen mit dem 20-Lagigen Prototypen) [58].</i>	43
3.7	<i>Schematische Darstellung des Photoeffektes.</i>	45
3.8	<i>Photoabsorption von TR-Photonen und Energieverlust geladener Teilchen in Xe/CO₂(80 : 20).</i>	46
3.9	<i>GEANT-Simulation des 20-lagigen TRD-Prototypen: Spektren von im Radiator erzeugten und in Proportionalkammern absorbierten Übergangsstrahlungsphotonen [54].</i>	47
3.10	<i>GEANT-Simulation des 20-lagigen TRD-Prototypen: Anteil der in der n-ten Detektorlage absorbierten TR-Photonen [54].</i>	47
3.11	<i>Prinzipskizze eines Proportionalkammerröhrchens.</i>	48
3.12	<i>Bild von einem 57 cm langen Straw-Modul.</i>	48
3.13	<i>Skizze: Mechanische Ablage eines Anodendrahtes aus der Röhrchenmitte.</i>	50
3.14	<i>Explosionszeichnung des AMS-02-TRD [60].</i>	52
3.15	<i>Achteckige Tragestruktur des TRDs (Oktagon) mit Durchführungen für die Module [73].</i>	53
3.16	<i>Foto von der Okatagon-Tragestruktur mit Schottwänden (Stand: Januar 2004).</i>	53

3.17	<i>Darstellung der Gasversorgungs- und Front-End Elektronikgruppierung an einer Oktagonwand (90°-Wand) [60].</i>	54
3.18	<i>a) Außenansicht der Gasversorgungsseite eines Turmes an einer 90°-Oktagonwand [60]; b) Skizze einer Doppel-O-Ring-Kupplung.</i>	55
3.19	<i>Prinzip-Skizze des AMS-02-TRD Gasversorgungssystems [74].</i>	56
3.20	<i>3D-Zeichnung des AMS-02-TRD Gasversorgungssystems [75].</i>	57
3.21	<i>a) Außenansicht der Ausleseseite eines Turmes an einer 90°-Oktagonwand [60]; b) Foto von einer UFE-Platine.</i>	58
3.22	<i>Schema der Front-End-Ausleseelektronik der Straw-Module [66].</i>	59
3.23	<i>AMS-02-TRD Elektronik-Design (ohne Gasversorgungssystem) [67].</i>	59
3.24	<i>Thermisches Abschirmungsmodell für den AMS-02-TRD [82].</i>	60
3.25	<i>Thermische Analyse: Höchste Temperaturen an verschiedenen Punkten auf der oberen (oberes Diagramm) und unteren (unteres Diagramm) CFC-Platte ($\beta = +75^\circ$, $YPR = -15 + 15 + 15$) [83].</i>	61
3.26	<i>Thermische Analyse: Niedrigste Temperaturen an verschiedenen Punkten auf der oberen (oberes Diagramm) und unteren (unteres Diagramm) CFC-Platte ($\beta = +75^\circ$, $YPR = -15 - 20 - 15$) [83].</i>	62
4.1	<i>Schematischer Aufbau der Röhrenwände.</i>	66
4.2	<i>Schematischer Aufbau der Straws.</i>	66
4.3	<i>Schnitt durch ein TRD-Modul.</i>	67
4.4	<i>Modul-Klebevorrichtung.</i>	67
4.5	<i>Schnitt durch ein Modulendstück der Elektronikausleseseite.</i>	68
4.6	<i>Schematische Aufsicht auf ein gasseitiges Modulendstück.</i>	69
4.7	<i>a) Auf- und Seitenansicht eines vorbereiteten Modul-Endstückes; b) Verklebung der Endstücke mit einem Straw-Modul.</i>	70
4.8	<i>Gaskonzentration a) zu Beginn des Diffusionsvorganges, b) im stationären Zustand.</i>	71
4.9	<i>Schematische Darstellung des Langzeitmeßstandes.</i>	73
4.10	<i>Druckabfallmessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von drei 1.3 m langen Straws mit Xe/CO₂(80 : 20) a) Druck- und Temperaturverlauf; b) Zeitliche Änderung der Leckrate [101].</i>	75
4.11	<i>Massenspektrometermessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von drei 1.3 m langen Straws mit Xe/CO₂(80 : 20) a) Isotopenspektrum des Xenons bei einem Partialdruck von $1.4 \cdot 10^{-5}$ mbar; b) Zeitliche Änderung der Leckrate von 1 atm Xe/CO₂ [101].</i>	77
4.12	<i>Bestimmung der Zeitverzögerungen für Xe und CO₂ [101].</i>	79
4.13	<i>Druckabfallmessung mit 1 atm reinem CO₂ zur Bestimmung der Leckrate von drei 1.3 m langen Straws.</i>	80
4.14	<i>Zeitliche Änderung der Leckrate für 1 atm Helium in den drei 1.3 m langen Straws.</i>	81
4.15	<i>Druckabhängigkeit der Leckrate für Helium in den drei 1.3 m langen Straws, gemessen im Vakuum und unter Atmosphärendruck.</i>	82
4.16	<i>Bestimmung der Gasdichtigkeit eines einzelnen Endstückes im Vakuum nach der Druckabfallmethode mit CO₂.</i>	83

4.17	a) Anordnung zur Bestimmung der integralen Leckrate von 4 Endstücken mit Helium an Luft; b) Druckabfallmessung.	84
4.18	Historie des Einzelröhrchentests: a) He-Leckrate des Straw-Materials der aus diesen Losen gebauten Module; b) Bestimmung der He-Leckrate einzelner Straws aus den Losen 3L und 5K.	86
4.19	Oben: Prinzipskizze der Versuchsapparatur zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einzelnen Straws mit He in Kurzzeitmessungen; unten: Bilder von den Klebehülsen an den Stirnseiten der Straws.	88
4.20	Foto der Anlage zur Durchführung von Einzelröhrchentests.	89
4.21	Einzelröhrchenmessung mit He a) Kurzzeitmessung an drei verschiedenen Straws; b) 12 h Referenzmessung über Nacht.	89
4.22	In Kurzzeitmessungen mit He ermittelte Leckraten einzelner Straws aus den Losen der Charge 1 und einer Vorserie der Charge 2 (B1 - B4).	90
4.23	In Kurzzeitmessungen mit He ermittelte Leckraten einzelner Straws aus den 16 Losen der Charge 2.	91
4.24	Verteilungen der He-Leckraten von Straws a) aus der ersten Charge und b) aus der modifizierten zweiten Charge.	91
4.25	a) Langzeitteststand mit Turbo-Molekular-Pumpe (TMP); b) Vergrößerung der Polycarbonat(PC)-Fenster für die Gasverstärkungsmessungen.	93
4.26	a) Offener Vakuumtank mit zwei Modul-Türmen: Gasversorgungsseite mit Turbo-Molekular-Pumpen-Ansaugöffnung; b) Gasversorgungssystem.	94
4.27	a) Offener Vakuumtank mit zwei Modul-Türmen: Elektronikseite; b) Blockschaltbild der selbsttriggernden Auslese.	94
4.28	Druckabfallmessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einem Gaskreislauf mit Xe/CO ₂ (80 : 20) a) Druck- und Temperaturverlauf (links: oben und unten), b) Zeitliche Änderung der Leckrate.	95
4.29	Kalibration des Massenspektrometers mit a) CO ₂ (M = 44 amu); b) Xe (M = 129 amu).	96
4.30	Massenspektromettermessung zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von einem Gaskreislauf mit Xe/CO ₂ (80 : 20) a) Ionenspektrum der im Vakuumtank vorhandenen Gase nach 250 h bzw. 950 h; b) Zeitliche Änderung der Leckrate von 1 atm Xe/CO ₂	97
4.31	a) Integrierte Gasmengen für Xe/CO ₂ aus der Druckabfall- und Massenspektromettermessung; b) Änderung der Xe- bzw. CO ₂ -Konzentration in den Modulen.	98
4.32	a) Kalibration des ADCs mit Testpulsen; b) Xe/CO ₂ (80 : 20)-Spektrum (U = 1480 V, f = 0 l/h, T = 24.8°C, p = 1003 mbar).	100
4.33	Dichtevariation (Xe/CO ₂ , U = 1480 V): a) Unkorrigierte Gasverstärkung G _ρ ; b) Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G.	101
4.34	Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G in Abhängigkeit der Hochspannung U (Xe/CO ₂).	102

4.35	<i>Relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der totalen bzw. mechanischen Ablage eines Anodendrahtes aus der Mitte der Straws für ein Modul der Länge $L = 2$ m in $Xe/CO_2(80 : 20)$.</i>	103
4.36	<i>Zeitlicher Verlauf der Gasverstärkung in Xe/CO_2 ($U = 1480$ V, stehendes Gas, normiert auf Standardbedingungen).</i>	104
5.1	<i>FEM-Analyse: Durchbiegung der Oktagon-Tragestruktur mit M-Struktur bei einer Anregung in z-Richtung; berechnete Eigenfrequenz: $f_0 = 52.1$ Hz.</i>	107
5.2	<i>EMI-Testaufbau: Oktagonähnliche Tragestruktur mit vier TRD-Einheiten bestehend aus Radiator- und Straw-Modulen, sowie einer UFE-Platine.</i>	108
5.3	<i>EMI-Versuchsanordnung bei der Fa. Krauss-Maffei Wegmann AG [84].</i>	109
5.4	<i>Emission durch die TRD-FE-Ausleseelektronik [84].</i>	109
5.5	<i>Soxhlet-Apparatur zur Reinigung des Radiatormaterials [50].</i>	110
5.6	<i>Vibrations- und Thermovakuumtestreihe: Darstellung der Aluminium-Halterung mit vier Straw-Modulprototypen.</i>	111
5.7	<i>Verlaufdiagramm zur Serienproduktion der Straw-Module.</i>	112
5.8	<i>Apparatur zur Messung der Drahtspannung.</i>	113
5.9	<i>Messung der Drahtspannung an einem 658 mm langen Modul.</i>	114
5.10	<i>Schematischer Aufbau des Meßstandes zur Bestimmung der HV-Festigkeit der Straw-Module.</i>	114
5.11	<i>Schematische Darstellung des Leck-Teststandes mit Absolutdruck-Sensor, Temperatursensoren auf dem Straw-Modul und Flußmesser (FM).</i>	115
5.12	<i>He-Druckverlauf (Normierung auf $T = 20^\circ C$) in dem Modulprototypen der Länge $L = 658.9$ mm aus dem Straw-Material der ersten Charge.</i>	116
5.13	<i>Gasdichtigkeit der Straw-Modulprototypen, gemessen mit Helium im Innern der Module und Luft im Außenraum.</i>	116
5.14	<i>Prinzipskizze des Serienteststandes.</i>	118
5.15	<i>Serientest: Gasversorgungssystem und Vakuumtank.</i>	118
5.16	<i>Korrelation zwischen den in einem Zeitintervall um 50 h und 110 h nach dem Befüllen der Module mit CO_2 ermittelten Leckraten.</i>	119
5.17	<i>Normierte Druckverläufe ($T = 20^\circ C$) in dem Modulprototypen der Länge $L = 658.9$ mm aus dem Straw-Material der ersten Charge bei Befüllung a) mit Helium und b) mit CO_2.</i>	120
5.18	<i>Automatisierter Gasverstärkungsmeßstand mit zwei Straw-Modulen auf einem Granitblock.</i>	122
5.19	<i>a) Kalibration des ADCs mit Testpulsen; b) Ar/CO_2-Spektrum ($U = 1350$ V, $f \approx 1$ l/h, $T = 21.6^\circ C$, $p = 1012$ mbar).</i>	123
5.20	<i>Dichtevariation (Ar/CO_2, $U = 1350$ V): a) Unkorrigierte Gasverstärkung G_p; b) Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G ($\Delta V = 36.2$ V).</i>	124
5.21	<i>Auf Standardbedingungen korrigierte Gasverstärkung G in Abhängigkeit der Hochspannung U in $Ar/CO_2(82 : 18)$.</i>	125

5.22	<i>Relative Änderung der Gasverstärkung in Abhängigkeit der totalen bzw. mechanischen Ablage eines Anodendrahtes aus der Mitte eines Straws für ein Modul der Länge $L = 2$ m in Ar/CO₂(82 : 18).</i>	125
5.23	<i>Charge 1-Modul ($L = 658.9$ mm)($U = 1350$ V, $f \approx 1$ l/h, norm. auf Standardbedingungen): Variation der Gasverstärkung ([%]) um den Mittelwert $G = 6051.5 \pm 84.1$.</i>	126
5.24	<i>Gemessene Gasverstärkungen in den Straw-Modulprototypen (Ar/CO₂, $U = 1350$ V, $f \approx 1$ l/h, normiert auf Standardbedingungen) mit berechneten mechanischen Toleranzen.</i>	127
5.25	<i>Elektrodynamische Schwingerregeranlage mit den Straw-Modulprototypen bei Belastungen in allen drei Raumrichtungen.</i>	128
5.26	<i>Modul der Charge 1 ($L = 658.9$ mm): Frequenzabhängigkeit der Schwingungsamplitude in der Mitte des Moduls vor und nach einem TVT bei einer Belastung in z-Richtung.</i>	128
5.27	<i>Modul der Charge 2 ($L = 658.9$ mm): Frequenzabhängigkeit der Schwingungsamplitude in der Mitte des Moduls vor und nach einem TVT bei einer Belastung in z-Richtung.</i>	129
5.28	<i>FEM-Analyse eines Moduls der Länge $L = 460$ mm bei einer Anregung in z-Richtung; berechnete Eigenfrequenz: $f_0 = 132$ Hz.</i>	129
5.29	<i>Offener Vakuumtank der Thermovakuumtestapparatur mit den Straw-Modulprototypen.</i>	130
5.30	<i>TVT der Charge 1-Prototypen: Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen im Vakuumtank.</i>	131
5.31	<i>TVT der Charge 2-Prototypen: Temperaturverläufe an verschiedenen Positionen im Vakuumtank.</i>	131
5.32	<i>Vergleich des Ausgasverhaltens der Prototypen aus Charge 1 bzw. Charge 2, nach 48 h im Thermovakuumtest.</i>	132
5.33	<i>Umbauten am Gasverstärkungsmeßstand zur Vermessung der Prototypen mit Halterung.</i>	134
5.34	<i>Gasverstärkungsmeßstand: Vor, nach und zwischen den Testreihen gemessene Gasverstärkungen in Ar/CO₂ mit den einzelnen Prototypen der a) Charge 1 und b) Charge 2 ($U = 1350$ V; normiert auf Standardbedingungen).</i>	134
6.1	<i>Produktion der Flugmodule (Stand 01.02.2004).</i>	137
6.2	<i>Verteilung der Draht-Zugspannung mit Toleranzgrenzen (Stand 01.02.2004) (siehe auch Tabelle 6.1).</i>	138
6.3	<i>Korrelation zwischen den gegen Luft gemessenen He-Leckraten und den CO₂-Sicherheitsfaktoren SF aller produzierten Flugmodule.</i>	139
6.4	<i>Verteilung der CO₂-Sicherheitsfaktoren SF aller produzierten Flugmodule (siehe auch Tabelle 6.1).</i>	140
6.5	<i>CO₂-Sicherheitsfaktoren SF der einzelröhrchengetesteten Module aus dem Straw-Material a) der Charge 1 und b) der Charge 2 (siehe Tab. 6.1)</i>	140

6.6	<i>Verteilungen der gegen Luft gemessenen He-Leckraten (ohne Leckrate durch die Endstücke und längennormiert) von Modulen aus a) der ersten Straw-Charge und b) der zweiten Straw-Charge (siehe auch Tabelle 6.1).</i>	141
6.7	<i>Längenabhängigkeit der He-Leckrate von Flugmodulen, gemessen a) gegen Luft und b) gegen Vakuum.</i>	142
6.8	<i>Längenabhängigkeit a) der CO₂-Leckrate und b) des Sicherheitsfaktors.</i>	143
6.9	<i>Straw-Material: Korrelation zwischen den Leckraten von a) He gegen Luft und CO₂ gegen Vakuum und von b) He und CO₂, beide gegen Vakuum gemessen.</i>	144
6.10	<i>Straw-Material: Korrelation zwischen den Leckraten von He gegen Luft und gegen Vakuum.</i>	144
6.11	<i>CO₂-SF des Straw-Materials: a) Verteilung und b) Längenabhängigkeit.</i>	145
6.12	<i>Serienteststand: Verteilung der an den Flugmodulen gemessenen Summe der Dunkelströme.</i>	146
6.13	<i>Flugmodule: a) Gasverstärkungsmessung in Ar/CO₂ ($U = 1350$ V, $f \approx 1$ l/h, norm. auf Standardbedingungen) und b) Standardabweichung.</i>	147
7.1	<i>Serienproduktion der Flugmodule: Integrale Anzahl produzierter Module pro Kalenderwoche (KW) (Stand 01.02.2004).</i>	153
A.1	<i>Fehler der Interkalibrationsfaktoren [58].</i>	155
A.2	<i>Änderung der Gasverstärkung bei Dichteschwankungen [58].</i>	156
A.3	<i>Daten-MC-Vergleich der Einzelröhrchenspektren von 20 GeV e⁻ und 160 GeV p⁺ der X7-Strahllinie am CERN [58].</i>	156
A.4	<i>Likelihood-Verteilungen für die 20 GeV e⁻- und die 160 GeV p⁺-Daten - das Likelihood für Elektron-ähnliche Ereignisse ist eingezeichnet [58].</i>	157
A.5	<i>Gemessene und berechnete ($n = 2, n = 20$) Zeitabhängigkeit der Leckrate von Xe durch die Straw-Wände.</i>	161
A.6	<i>Gemessene und berechnete Zeitabhängigkeit der Leckrate von CO₂ durch die Straw-Wände.</i>	162
A.7	<i>Resultate der Weltraumtauglichkeitsprüfungen mit der FE-Elektronik</i>	164

Tabellenverzeichnis

3.1	<i>Energien der K-, L- und M-Schale für Xenon [53].</i>	45
3.2	<i>Gasverstärkungsmessungen in dieser Arbeit.</i>	51
3.3	<i>Gewicht der TRD-Einzelkomponenten.</i>	54
4.1	<i>Nach der Druckabfall-/Massenspektrometermethode mit verschiedenen Prüfgasen in den drei 1.3 m langen Straws bzw. Endstücken gegen Luft/Vakuum gemessene Leckraten.</i>	85
4.2	<i>Zusammenfassung der Gasverstärkungsmessungen in Xe/CO₂(80 : 20).104</i>	
5.1	<i>Helium/CO₂-Leckraten der Straw-Modulprototypen, gemessen gegen Vakuum; Sicherheitsfaktor (SF); Summe der Dunkelströme.</i>	121
5.2	<i>Zusammenfassung der Gasverstärkungsmessungen in Ar/CO₂(82 : 18).126</i>	
5.3	<i>He-Lecktest: Mit den einzelnen Prototypen und den beiden Türmen vor, nach und zwischen den Testreihen gemessene Leckraten.</i>	133
6.1	<i>Zusammenfassung der Messungen zur Qualitätssicherung und -kontrolle der Flugmodule (Stand 01.02.2004).</i>	148

Literaturverzeichnis

- [1] H. Franke, Hrsg. Lexikon der Physik.
Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart.
- [2] NASA Human Spaceflight.
Internet: <http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/station/index.html>.
- [3] G. L. Kane. et al. Supersymmetry and the positron excess in cosmic rays.
Physical Review D 65 (2002) 577.
- [4] A. Yamamoto et al. BESS-Polar Long Duration Flights in Antarctica.
Proceedings of the 27th ICRC (Hamburg). S. 2135. 2001.
- [5] S. Straulino et al. The PAMELA Experiment on Satellite and its Capability
in Cosmic Rays Measurements.
Nucl. Inst. and Meth. A478 (2002) 114.
- [6] L. Bergström, A. Goobar. Cosmology and Particle Astrophysics.
Wiley-Praxis Series in Astronomy and Astrophysics. 1999.
- [7] C. Lefevre, J. Gillies. Back to Creation - the story of the Big Bang.
Internet: <http://outreach.web.cern.ch/outreach/public/cern/PicturePacks/BigBang.html>.
- [8] B. Carroll, D. Ostlie. Modern Astrophysics.
Addison-Wesley Pub. Comp.. 1996. S. 1236 ff.
- [9] C.L. Bennett et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
(WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results.
Astrophysical Journal Suppl. 148 (2003) 1.
- [10] S. Schael. Review on Particle Astrophysics - Search for Dark Matter.
Talk. International Europhysics Conference On High-Energy Physics (HEP
2003), Aachen, Germany, 17-23 July 2003.
Internet: <http://eps2003.physik.rwth-aachen.de/schedule/plenarysessions/index.php>
- [11] AMS-Kollaboration. Proton in Near Earth Orbit.
Phys. Lett. B472 (2000) 10 - 22.
- [12] AMS-Kollaboration. Cosmic Protons.
Phys. Lett. B490 (2000) 27 - 35.

- [13] AMS-Kollaboration. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station - results from the test flight on the space shuttle. Physics Reports 366 (2002). S. 331 - 405.
- [14] F.C. Adams et al. Constraints On The Intergalactic Transport Of Cosmic Rays. The Astrophys. Journal, 491:6-12, Dec. 1997.
- [15] A. Malinin on behalf of AMS Collaboration. Astroparticle Physics with AMS-02. IV INTERNATIONAL CONFERENCE on NON-ACCELERATOR NEW PHYSICS. Dubna, Russia. June 23-28, 2003.
- [16] P. A. M. Dirac. Proc. Roy. Soc. (London) A117, 610 (1928).
- [17] W. Wallraff. Cosmic Antimatter Search with the Alpha Magnetic Spectrometer. I. Physikalisches Institut der RWTH Aachen. 1998.
- [18] J. Silk. A Short History of the Universe. Scientific American Library. New York. 1994.
- [19] J.P. Kneib et al. A Wide Field Hubble Space Telescope Study Of The Cluster CL0024+1654 At $Z = 0.4$ II: The Cluster Mass Distribution. Internet: <http://www.astro.caltech.edu/~kneib/0024web/caltech0024.html>
- [20] E. Corbelli, P. Salucci. The Extended Rotation Curve and the Dark Matter Halo of M33. Internet: <http://arxiv.org/ps/astro-ph/9909252>.
- [21] W. de Boer. Ist die Dunkle Materie Supersymmetrisch? Seminarvortrag. RWTH Aachen. Juli 2003. Internet: <http://home.cern.ch/~deboerw/talks.html>
- [22] J.E. Hill et al. Recent Results from Experiments Using the Super-Kamiokande Detector. Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Dark Matter in Astro and Particle Physics.
- [23] J. Borger et al. The Sudbury Neutrino Observatory. Nucl. Inst. and Meth. A 449 (2000). S. 172-207.
- [24] J. Casaus. Cosmic-Ray Astrophysics with AMS-02. Proceedings. The 28th Int. Cosmic Ray Conf. Japan. 2003.
- [25] G. Lamanna. Astroparticle Physics with AMS-02. Proceedings. The 28th Int. Cosmic Ray Conf. Japan. 2003.

- [26] W. de Boer, M. Herold, C. Sander, V. Zhukov.
A Global Fit of Supersymmetric Dark Matter to the Fluxes of Galactic Positrons, Antiprotons and Gamma Rays.
EPS-Conference, Aachen 2003.
- [27] W. de Boer. Is Dark Matter Supersymmetric?
Talk. Particles and Cosmology: the Interface, Cargese. August 2003.
Internet: <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/Talks/talks.html>
- [28] S. Fopp. Untersuchungen zur Entwicklung eines Übergangsstrahlungsdetektors für das AMS-Experiment.
Diplomarbeit am I. Physik. Institut der RWTH Aachen. PITHA 99/3. 1999.
- [29] B. Blau et al. The Superconducting Magnet System of the Alpha Magnetic Spectrometer AMS-02.
Talk. 9th Pisa Meeting On Advanced Detectors: Frontier Detectors For Frontier Physics. May 2003.
- [30] R. Becker. AMS II Mechanical Integration Homepage.
Internet: <http://home.cern.ch/~becker/AMSII.html>. 2002.
- [31] W. Wallraff. The Si Tracker for the AMS-02 experiment on the Space Station.
Nucl. Inst. and Methods in Physics Research A 511 (2003) 76-81.
- [32] R. Battiston. The AMS Silicon Tracker.
Talk. AMS Internal TIM-Meeting. Houston. Oktober 2002.
- [33] J. Vandenhirtz. Ein Infrarot Laser Positions-Kontroll-System für das AMS Experiment.
Dissertation am I. Physik. Inst. der RWTH Aachen. PITHA 01/09. Oktober 2001.
- [34] S. Fopp et al. The Anti Coincidence Counter System of the AMS02 Experiment.
Statusreport. I. Physik. Inst. der RWTH Aachen. April 2001.
- [35] D. Casadei. The AMS-02 Time of Flight System. Final Design.
Proceedings. The 28th Int. Cosmic Ray Conf. Japan. 2003.
- [36] M. Buenerd. The AMS-02 RICH Imager Prototype In-Beam Tests with 20 GeV/c per Nucleon Ions.
Proceedings. The 28th Int. Cosmic Ray Conf. Japan. 2003.
- [37] C. Leluc. AMS a Particle Spectrometer in Space.
Talk. LEAP 03, International Conference on Low Energy Antiproton Physics 3-7 March, Yokohama, Japan.
- [38] M. Kossakowski. Electromagnetic Calorimeter for the AMS-02 Experiment.
Talk. CALOR 2002 - Pasadena, CA, USA - March 25-29, 2002.

- [39] The ATLAS Inner Detector Technical Design Report.
Volume 2, CERN/LHC/97-17.
- [40] P. Spinelli et al. The PAMELA TRD.
Talk. TRDs for the 3rd Millennium, Workshop on Advanced Transition Radiation Detectors For Accelerators And Space Applications, S. 177. 2002.
- [41] L.M. Frank, I.M. Ginzburg.
Sov. Phys. JETP, Volume 16, S. 15. 1946.
- [42] G.M. Garibian.
Sov. Phys. JETP, Volume 37, S. 527. 1959.
- [43] J. D. Jackson. Klassische Elektrodynamik.
Walther de Gruyter, 1982, 2. Auflage.
- [44] W. Struczinski. Identifizierung Hochenergetischer Teilchen durch Übergangsstrahlung.
III. Physikalisches Institut der RWTH Aachen, 1986. Habilitationsschrift.
- [45] B. Dolgoshein. Transition radiator Detectors and particle identification.
Nucl. Inst. and Meth. A252 (1986), S. 137-144.
- [46] B. Dolgoshein. Transition radiation detectors.
Nucl. Inst. and Meth. A326 (1993), S. 434.
- [47] American Society For Testing And Materials. Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of Spacecraft Materials.
ASTM E1559 93.
- [48] Review of Particle Properties.
Phys. Letters B. 239. 1990
- [49] W.R. Leo. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments.
Springer Verlag. 1987
- [50] T. Kirn. The AMS-02 TRD - A detector designed for space.
Frascati Physics Series Vol. XXV (2001), pp. 161-172 TRDs for The 3rd Millennium.
- [51] National Institut of Standards and Technology (NIST). Stopping Power Calculations for Protons (PSTAR) and Electrons (ESTAR) in various Materials.
Internet: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/programs.html>.
- [52] K. Siegbahn. Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy.
1. North-Holland Publishing Company Amsterdam. 1965.
- [53] J.H. Hubell, S.M. Seltzer. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients.
Physics Reference Data. U.S. Department of Commerce. NISTIR 5632. 1996.

- [54] T. Siedenburg. The AMS 02 TRD: A detector designed for space. Talk. CERN Detector Seminar. Juni 2001.
- [55] R. Brun et al. GEANT. CERN DD/EE/84-1 (Revised). 1987.
- [56] V. Saveliev. Particle Identification via Transition Radiation and Detectors. Nucl. Inst. and Meth. A345 (1994). S. 256-261.
- [57] ATLAS Collaboration. ATLAS Inner Detector, Technical Design Report (TDR). CERN/LHC/97-17, April 1997, Vol. II.
- [58] J. Orboeck. The final 20-Layer-Prototype for the AMS Transition Radiation Detector: Beamtests, Data-Analysis, MC-Studies. Dissertation am I. Physikalischen Institut B der RWTH Aachen. 2003.
- [59] T. Kirn. Präzisionsmessungen der kosmischen Höhenstrahlung im Weltraum - das AMS Experiment auf der Internationalen Raumstation ISS. Vortrag. DPG-Frühjahrstagung in Leipzig. März 2002.
- [60] M. Wloch. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen. Private Mitteilung.
- [61] T-E-Klebetchnik. Stycast 1266. Sicherheitsdatenblatt.
- [62] Plasmamodifizierung von Polyethylen. <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/01/01H046/t1.pdf>
- [63] Prof. Dilger. Lehr- und Forschungsgebiet Klebtechnik der RWTH Aachen. Private Mitteilung.
- [64] TePla. Microwave Plasma System 400 and 660 Series. Datenblatt.
- [65] Ciba-Geigy. Konstruktionsklebstoffe. Araldit AW 134, Härter HY 991. Sicherheitsdatenblatt.
- [66] S. Schael. TRD Production Status. Unveröffentlicher Vortrag. AMS TIM-Meeting. April 2003.
- [67] G. Schwering. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen. Private Mitteilung.
- [68] R. Bock et al. Wire Fixation for Proportional and Drift Chambers Using a Cu-Te Alloy. Nucl. Inst. and Meth. A 336 (1993) 128.
- [69] Fa. Dallas Semiconductor Inc. Internet: <http://www.maxim-ic.com>

- [70] J. Orboeck. Untersuchungen an einem ortsauflösenden Prototypen für den Übergangsstrahlungsdetektor des AMS Experimentes.
Unveröffentlichte Diplomarbeit. I. Physikalisches Institut der RWTH Aachen. 1999.
- [71] W. Blum und L. Rolandi. Particle Detection with Drift Chambers.
Springer-Verlag. 1993.
- [72] U. Becker ed F. Sauli. Instrumentation in High Energy Physics.
World Scientific Publishing Ltd, Vol 9, of Advanced Series II. Large Area and Muon Detectors. S. 556. 1992
- [73] T. Siedenburg et al. A Transition Radiation Detector for AMS.
Nucl. Physics B 113 (2002). S. 154-158.
- [74] R. Henning. TRD Gas System CDR Report.
AMS TIM Presentation. CERN. Apr. 2003.
- [75] R. Becker. AMS Integration.
Internet: <http://rbecker.home.cern.ch/rbecker/TDgas/PresentationDrawings>.
- [76] U. Becker et al. TRD Gas System Summary.
Unveröff. Technischer Report. MIT Laboratory for Nuclear Science.
Internet: <http://ams.cern.ch/AMS/TRDGas/>.
- [77] A. Bartolini. Gas System Slow Control.
AMS TIM Presentation. CERN. April 2003.
- [78] T. Siedenburg. I. Physikalisches Institut B der RWTH Aachen.
Private Mitteilung.
- [79] F. Dömmecke. Test des AMS-02 Übergangsstrahlungsdetektors mit Myonen aus der Höhenstrahlung.
Unveröff. Diplomarbeit am I. Physik. Inst. der RWTH Aachen. 2002.
- [80] C. H. Chung. Frontend Electronics of TRD for use in space.
Hausseminarvortrag am I. Physik. Inst. der RWTH Aachen. 2003.
- [81] G. Forconi. Preparation of Tests for Space Qualification During Mass Production in CSIST Version 4.
Internet: <http://ams.cern.ch/AMS/Reports/AMSnotes2002.html>. 2002.
- [82] S. Fopp et al. Status report of the AMS-02 Transition Radiation Detector (TRD).
Nicht veröffentl. Technischer Report. I. Physikalisches Inst. der RWTH Aachen. 2001.
- [83] Fa. OHB-System AG. Thermische Analyse.

- [84] A. Groß, T. Kirn, W. Karpinski. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen.
Private Mitteilung.
- [85] W. Jost. Diffusion in solids, liquids, gasses.
Academic Press, Inc. 1960.
- [86] J. Crank, G.S. Park. Diffusion in polymers.
Academic Press, Inc. 1968.
- [87] Leybold-Haeraeus GmbH. Theoretische Grundlagen der Quadrupol-
Massenspektrometrie.
- [88] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher. Theorie und Praxis der Vakuumtechnik.
Friedrich Vieweg u. Sohn Verlagsgesellschaft mbH. 4. Auflage. 1988.
- [89] W. Demtröder. Experimentalphysik I, Mechanik und Wärme.
Springer Verlag, 2. Auflage. 1998.
- [90] J. Hattenbach.
Diplomarbeit in Vorbereitung. RWTH Aachen.
- [91] Particle Data Group.
Review of Particle Physics, Phys. Rev. D (2001).
- [92] T. Siedenburg. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen.
Private Mitteilung.
- [93] H. Franke. Lecksuchtechnik, Einführung in die Gasgesetze.
[http://www.lecksuchtechnik.de/Seite 1/seite 1.htm](http://www.lecksuchtechnik.de/Seite%201/seite%201.htm).
- [94] K. Toi et al. Sorption and Diffusion of Gases in a Polyimide.
Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics. Vol. 30, 549 - 556 (1992).
- [95] G. Braun et. al. A Computer Controlled Device for Measuring the Wire Ten-
sion in Drift and Proportional Chambers.
Dokumentation. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen.
- [96] R. Bock et. al. A Wiring System for Mass Production of Drift and Proportional
Chambers.
I. Physik. Institut der RWTH Aachen. PITHA 94/10. 1994.
- [97] Planolith GmbH Aschaffenburg.
Granitblock. Genauigkeitsgrad DIN 876. 1992.
- [98] J.H. Hubbell, S.M. Seltzer. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients
and Mass Energy-Absorption Coefficients.
Internet: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/>
- [99] W. Karpinski. I. Physik. Institut B der RWTH Aachen.
Private Mitteilung.

- [100] M. König. Fa. FVT Faserverbundtechnik GmbH.
Private Mitteilung.

- [101] R.C. Edenhofer. Untersuchungen an einem Prototypen des Übergangsstrahlungsdetektors für das AMS Projekt.
Unveröffentlichte Diplomarbeit. I. Physikalisches Institut der RWTH Aachen.
2000.

- [102] S.A. Stern, Y. Liu, W.A. Feld. Structure/Permeability Relationships of Polyimides with Branched or Extended Diamine Moieties.
Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 31, 939 951 (1993).

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit, welche im Rahmen einer großen internationalen Kollaboration entstanden ist, beigetragen haben.

Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. K. Lübelsmeyer für die interessante Themenstellung und die jederzeit verfügbare, tatkräftige Unterstützung bedanken. Er stand mir jederzeit mit Ratschlägen und Anregungen aus seinem umfangreichen Erfahrungsschatz zur Seite. Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. Dr. S. Schael, der durch die Weiterführung des AMS-02-Projektes nach dem Ausscheiden von Prof. Dr. K. Lübelsmeyer als Institutsdirektor diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht hat.

Mein weiterer besonderer Dank gilt den Herren Dr. Thomas Kirn und Dr. Thorsten Siedenburg die für eine freundschaftliche Arbeitsatmosphäre in unserem Büro gesorgt haben und mir während der gesamten Zeit meiner Promotion stets hilfreich mit Rat und Tat zur Seite standen. Ich danke Herrn Dr. Thomas Kirn darüber hinaus für die kritische Durchsicht des Manuskripts zu dieser Arbeit.

Einen weiteren Dank richte ich an die Mitglieder der AMS-02-Arbeitsgruppe des I. Physikalischen Institutes - den Herren Chan Hoon Chung, Frank Dömmecke, Ralph Edenhofer, Dr. Marcos Fernandez-Garcia, Jan Hattenbach, Dr. Andre Ostapchouk, Dr. Georg Schwering, Dr. A. Schultz v. Dratzig, Volker Vetterle und Prof. Dr. W. Wallraff - für eine angenehme Arbeitsatmosphäre sowie unzählige interessante Diskussionen in den Mittagspausen.

Den Mitarbeitern der elektronischen und mechanischen Werkstätten, besonders den Herren Waclaw Karpinski, Rolf Siedling, Michael Wlochall und Gert Kirchhoff, danke ich für die prompte Bearbeitung aller Aufträge und Sonderwünsche, sowie für die unzähligen Beratungen in technischen Fragen, die den zügigen Aufbau der Meßapparaturen erst ermöglicht haben. Im speziellen Danke ich Herrn Gert Kirchhoff für die vielen guten Ratschläge und fruchtbaren Diskussionen und für die Freundschaft. Den Damen T. Boeven, A. Fischer, und Dr. K. Klein und den Herren R. Adolphi, L. Ahrensmeier, R. Brauer, A. Burdziak, A. Heister, Dr. St. König, Dr. W. Krenz, J. Olzem, Dr. D. Pandoulas, E. Schneevoigt und M. Thomas danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Als letztes möchte ich mich noch bei allen Leuten bedanken, die mich außerhalb des Instituts unterstützt haben. An erster Stelle sind hier meine Eltern zu nennen, die mir stets alle Hilfe gegeben haben, die ihnen möglich war. Des weiteren möchte

ich mich ganz herzlich bei Frau Judith van den Broek bedanken, die mir während der Anfertigung dieser Arbeit eine große Stütze war.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Stefan Fopp
 Geburtsdatum/-ort: 31. Dezember 1973 in Ibbenbüren
 Staatsangehörigkeit: Deutsch
 Familienstand: Ledig
 Wohnort: Am Sundern 1, 49492 Westerkappeln

Schulbildung

08.80 - 08.84 Grundschule Westerkappeln
 08.84 - 06.93 Kardinal-von-Galen Gymnasium Mettingen
 Abschluß: Abitur/Allgemeine Hochschulreife

Studium

10.93 Beginn des Studiums der Physik an der RWTH-Aachen,
 10.95 Vordiplom
 01.98 - 01.99 Diplomarbeit: „Untersuchungen zur Entwicklung eines
 Übergangsstrahlungsdetektors für das AMS Experiment.“
 am I. Physikalischen Institut der RWTH-Aachen
 02.99 Abschluß: Diplom-Physiker
 03.99 - Promotion an der RWTH-Aachen
 Promotionsthema: „Entwicklung und Bau eines auf Proportionalkammern basierenden Übergangsstrahlungsdetektors
 für das AMS-02-Weltraumexperiment“ am I. Physikalischen
 Institut der RWTH-Aachen

Studienbegleitende Tätigkeiten

11.96 - 03.99 Studentische Hilfskraft am I. Physik. Institut der RWTH-Aachen
 03.99 - 05.00 Wiss. Hilfskraft am I. Physik. Institut der RWTH-Aachen
 06.00 - 05.04 Wiss. Angestellter am I. Physik. Institut der RWTH-Aachen