# Entwicklung und Aufbau eines Prototypmoduls für die Drahtelektrode des KATRIN Hauptspektrometers

Diplomarbeit von Alexander Gebel

Institut für Kernphysik Westfälische Wilhelms-Universität Münster

März 2007



"Ich habe etwas Schreckliches getan: Ich habe ein Teilchen vorausgesagt, das nicht nachgewiesen werden kann."

Wolfgang Pauli

# Inhaltsverzeichnis

1	$\mathbf{Ein}$	Einleitung				
	1.1	Motiv	ation	1		
	1.2	Neutr	inonachweis	3		
	1.3	Neutr	inooszillationen	4		
	1.4	Neutr	inoloser doppelter $\beta$ -Zerfall	7		
	1.5	Direkt	e Neutrinomassenmessung	9		
<b>2</b>	The	Theoretische Grundlagen				
	2.1	Energ	iespektrum des $\beta$ -Zerfalls	11		
	2.2	MAC-	E-Filter	13		
	2.3	Unter	grundreduktion durch Drahtelektrode	17		
3 Experimenteller Aufbau		oerime	nteller Aufbau	21		
	3.1	KATF	XIN	21		
	3.2	Draht	elektrode	25		
4	Des	ign un	d Tests des Drahtmodulprototyps	<b>27</b>		
	4.1	Design	n eines Drahtmoduls für den Zentralteil des Spektrometers $\ \ . \ . \ .$	27		
	4.2 Eigenschaften der Drähte		schaften der Drähte	29		
		4.2.1	Optische Untersuchung der Drahtoberfläche	29		
		4.2.2	Elastizität und ihre Grenzen	31		
		4.2.2 4.2.3	Elastizität und ihre Grenzen	$\frac{31}{33}$		

	4.3	Prototyp-Fertigung			
	4.4	Vermessung des Prototypen			
		4.4.1	Messmaschine	50	
		4.4.2	Drahtspannung	51	
		4.4.3	Modulgeometrie	54	
	4.5 Thermische Eigenschaften und Vakuumverhalten des Prototypen			55	
		4.5.1	Aufbau eines ausheizbaren UHV-Test stands	55	
		4.5.2	Thermisches Verhalten der Module	65	
		4.5.3	Bestimmung der Ausgasrate	69	
5	Zus	ammer	nfassung	73	
$\mathbf{A}$	Tec	chnische Zeichnungen der Bauelemente des Prototypmoduls 7			
в	Elas	astizitätsmessungen 8			
С	Dur	Ourchbiegung der Drähte			
D	Ene	ergiespektren 8			
$\mathbf{E}$	Que	ellcode für die Bestimmung des Raumwinkelanteils			
$\mathbf{F}$	Dra	rahtspannungen bei konstanter Drahtlänge			
	F.1	Drahts	spannung 1. Lage ( $\emptyset$ 0,3 mm) $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	94	
	F.2	Drahts	spannung 2. Lage ( $\emptyset$ 0,2 mm) $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$	95	
G	Kor	Forrekturen der Drahtlänge 9			
	G.1	Korrel	xtur der Drahtlänge 1. Lage ( $\emptyset$ 0,3 mm)	98	
	G.2	Korrel	stur der Drahtlänge 2. Lage ( $\emptyset$ 0,2 mm)	100	
н	Dra	htspan	nungen mit der korrigierten Drahtlänge	103	
	H.1	Drahts	spannung 1. Lage nach der Korrektur der Drahtlänge	104	
	H.2	Drahts	spannung 2. Lage nach der Korrektur der Drahtlänge	105	

### INHALTSVERZEICHNIS

I Technische Zeichnung des Ofens	107	
J Spannungs-Druck-Abhängigkeit	109	
K Technische Zeichnung eines Kamms des Testmoduls	111	
L Drahtspannungen und Modulgeometrie nach Ausheizen	113	
Abbildungsverzeichnis		
Tabellenverzeichnis		
Literaturverzeichnis		
Danksagung		
Eigenständigkeitserklärung		

iii

INHALTSVERZEICHNIS

## Kapitel 1

# Einleitung

## 1.1 Motivation

"Was ist ein Neutrino? Welche Eigenschaften hat es?" - Mit diesen Fragen beschäftigen sich die Physiker seit über 70 Jahren. Das Neutrino<sup>1</sup> wurde 1930 von Wolfgang Pauli als ein leichtes neutrales Teilchen mit Spin  $\frac{1}{2}$  postuliert, um die Energie-, Impulsund Drehimpulserhaltung beim  $\beta$ -Zerfall zu retten. Da beim  $\beta$ -Zerfall eines bestimmten Isotops immer der gleiche Energiebetrag zur Verfügung steht, erwartete man ein diskretes Energiespektrum der  $\beta$ -Elektronen, wie es auch z.B. beim  $\alpha$ -Zerfall beobachtet wird. Gemessen wird dagegen ein kontinuierliches Spektrum. Die emittierten Elektronen besitzen unterschiedliche kinetische Energien von Null bis zu einem Maximalwert, wobei die häufigste Energie etwa bei  $\frac{1}{3}$  der Maximalenergie liegt. Also muss es ein Teilchen geben, das den Rest der Energie mit sich



Abbildung 1.1: Beiträge zur Energiedichte  $\Omega$  des Universums.

trägt. Somit wurde das Neutrino "geboren". Heute wissen wir aus der Zerfallsbreite des Z<sup>0</sup>-Bosons [ALE06], dass es sogar drei Neutrinosorten gibt: das Elektronneutrino  $\nu_e$ , das Myonneutrino  $\nu_{\mu}$  und das Tauneutrino  $\nu_{\tau}^2$ .

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>ital. "kleines Ungeladenes"

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Das Myonneutrino  $\nu_{\mu}$  wurde 1962 von Leon Max Lederman, Melvin Schwartz und Jack Steinberger (Nobelpreis 1988) und das Tauneutrino  $\nu_{\tau}$  erst 2000 von einem internationalen Forscherteam am Teilchenbeschleuniger des Fermilab bei Chicago entdeckt.

Nach dem Standardmodell der Elementarteilchen sind Neutrinos masselos und wie die übrigen Leptonen punktförmig. Heute weiß man, dass Neutrinos Masse besitzen. Die Dichte der Neutrinos im Universum beträgt ca. 330/cm<sup>3</sup>. Somit gibt es etwa 10<sup>9</sup> mal mehr Neutrinos als Baryonen. Trotzdem leisten sie aufgrund ihrer geringen Masse nicht den Hauptbeitrag zur Dunklen Materie (0,001 <  $\Omega_{\nu}$  <0,18), wie Abbildung 1.1 zeigt.

Wo entstehen Neutrinos? Eine wichtige Neutrinoquelle sind Sterne wie unsere Sonne. Der dominierende Vorgang, der in der Sonne abläuft, ist der pp-Zyklus. Aus 4 Protonen wird in mehrern Schritten ein  $\alpha$ -Teilchen erzeugt, wobei 2 Positronen und 2 Neutrinos emittiert werden:

$$4p \to {}^{4}\text{He} + 2e^{+} + 2\nu_{e}.$$
 (1.1)

In diesem Zyklus werden 26,73 MeV frei. Dabei werden maximal 0,84 MeV als Neutrinos emittiert. Auf der Erde durchdringen in jeder Sekunde ca. 65 Milliarden solare Neutrinos einen Quadratzentimeter. Neben stellaren Quellen sind große Mengen Neutrinos durch den Urknall gebildet worden. Es entstehen Neutrinos in Supernova-Explosionen sowie im  $\beta$ -Zerfall. In durch kosmische Strahlung ausgelösten Schauern in der Atmosphäre werden ebenfalls Neutrinos gebildet. Neben den natürlichen gibt es auch künstliche Neutrinoquellen wie Kernreaktoren oder Teilchenbeschleuniger.

In einigen Modellen wird noch eine weitere Neutrinosorte vorausgesagt, sogenannte "sterile" Neutrinos, die mit dem Urknall entstanden sein könnten. Bisher hat man sie jedoch nicht nachweisen können. Im Gegensatz zu den bekannten Neutrinos sind sie rechtshändig und nehmen an der schwachen Wechselwirkung nicht direkt teil, sondern nur über die Vermischung mit gewöhnlichen Neutrinos. Die Existenz von sterilen Neutrinos könnte einige Rätsel lösen, z.B. warum es mehr Antimaterie als Materie im Universum gibt oder warum Pulsare<sup>3</sup> sehr hohe Eigengeschwindigkeiten besitzen.



Abbildung 1.2: Das solare Neutrinospektrum. [MPI]

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Pulsare sind mit sehr hoher Eigengeschwindigkeit rotierende Neutronensterne, die nach Supernova-Explosionen entstehen können.

#### 1.2. NEUTRINONACHWEIS

### 1.2 Neutrinonachweis

Im Gegensatz zu Prozessen der starken Wechselwirkung, die sehr schnell ablaufen, ist die Lebensdauer beim  $\beta$ -Zerfall viel länger. Die dabei emittierten Neutrinos unterliegen weder starken noch elektromagnetischen, sondern nehmen nur an der schwachen Wechselwirkung teil, die 1934 vom italienischen Physiker Enrico Fermi vorgeschlagen wurde [Fer34].

Gerade weil Neutrinos nur schwach wechselwirken, sind sie besonders schwer im Experiment nachzuweisen. Der Wirkungsquerschnitt für die in Gleichung (1.2) gezeigte Reaktion liegt für Neutrinos mit einer Energie von ca. 3 MeV bei etwa  $4 \cdot 10^{-43}$  cm<sup>2</sup>. Deswegen schien der Nachweis von Neutrinos in den 30er Jahren mit den damals zur Verfügung stehenden Detektoren unmöglich. Später, als einerseits die Kernspaltung entdeckt wurde, die die Erzeugung hoher Neutrinoflüsse möglich machte und andererseits größere Flüssig-Szintillationszähler verfügbar waren, war man in der Lage einige Neutrino-Ereignisse pro Tag zu registrieren. So haben Frederick Reines und Clyde Lorrain Cowan 1956 (Nobelpreis für Reines 1995) den inversen  $\beta$ -Zerfall beobachtet und somit als erste Neutrinos experimentell nachgewiesen [Rei57]:

$$\overline{\nu}_e + p \to e^+ + n. \tag{1.2}$$

In Abbildung 1.3 ist der experimentelle Aufbau schematisch dargestellt. Als Detektor wurde Wasser benutzt, in dem Kadmium-Chlorid (CdCl<sub>2</sub>) gelöst wurde. Der Wassertank befindet sich zwischen zwei Szintillatoren. Der ganze experimentelle Aufbau wurde gegen äußere Strahlung abgeschirmt. Wird ein Elektronantineutrino von einem Proton des Wassers eingefangen, so entstehen über die schwache Wechselwirkung (Charged Current Reaktion) ein Positron und ein Neutron. Das Positron wird bis zum Stillstand abgebremst und bildet mit einem Elektron ein Positronium, das wiederum in 2  $\gamma$ -Quan-

ten mit je 511 keV zerfällt, welche dann in den Szintillationszählern registriert werden. Das Neutron wird



Abbildung 1.3: Der Experimentelle Aufbau zum Nachweis des Antineutrinos [Sut94].

nach mehreren Stößen mit Wassermolekülen ebenfalls abgebremst und nach einer Laufzeit von gemittelt 5  $\mu$ s von einem Kadmiumkern eingefangen.

$$n + {}^{108} \text{Cd} \rightarrow {}^{109} \text{Cd}^* \rightarrow {}^{109} \text{Cd} + \gamma$$

$$(1.3)$$

Der Kadmiumkern, der wegen seines großen Einfangswirkungsquerschnitts für Neutronen eingesetzt wird, emittiert nach dem Einfang des Neutrons Photonen mit einer Energie von insgesamt 9,1 MeV. Diese in Koinzidenz mit beiden 511 keV  $\gamma$ -Quanten sind die Signatur für eine durch ein Neutrino ausgelöste Reaktion.

### 1.3 Neutrinooszillationen

Detektoren für solare Neutrinos wie z. B. das Homestake Experiment<sup>4</sup>, das seit den 1960er Jahren Daten liefert, konnten nur etwa 1/3 der erwarteten Anzahl von Elektronneutrinos nachweisen. Als Erklärung wurde die Umwandlung einer Neutrinosorte in eine andere vorgeschlagen. Dabei verändert ein Neutrino während seiner Bewegung durch den Raum kontinuierlich seinen Charakter, z. B. wandelt sich ein Elektronneutrino in ein Myonneutrino um. Dies bezeichnet man als Neutrinooszillation. Dabei ist jeder Flavour-Eigenzustand  $\nu_e, \nu_{\mu}, \nu_{\tau}$  eine Mischung von Neutrinomasseneigenzuständen  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}.$$
 (1.4)

Die Masse des Elektronneutrinos ergibt sich als gewichtete Summe der beteiligten Masseneigenzustände:

$$m(\nu_e)^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m(\nu_i)^2.$$
(1.5)

Betrachtet man nur zwei Neutrino-Flavours, so ist die Übergangswahrscheinlichkeit von einem Flavour  $\alpha$  in Flavour  $\beta$  gegeben durch:

$$P_{\alpha \to \beta} = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2(1, 27 \cdot \frac{\bigtriangleup m^2 [\text{eV}^2] \cdot L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]}), \qquad (1.6)$$

wobei  $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$  die Differenz der Massenquadrate der Masseneigenzustände ist. Das Neutrino schwingt vom Ausgangszustand in das fremde Flavour und zurück. Allerdings kann es nach Gleichung (1.6) nur dann zur Neutrinooszillation kommen, wenn der Mischungswinkel  $\theta$  und die Massendifferenz  $\Delta m^2$  ungleich null sind. Das Vorhandensein von Neutrinooszillationen bedeutet also, dass Neutrinos Masse besitzen. Die experimentellen Ergebnisse von Super-Kamiokande<sup>5</sup> und anderen Experimenten sind Evidenz dafür, dass es Neutrinooszillationen gibt. Dies ist von großer Bedeutung sowohl für die Teilchenphysik als auch für die Kosmologie, da kurz nach dem Urknall eine ungeheure Anzahl an Neutrinos in das Universum geschleudert wurden.

 $<sup>^4{\</sup>rm Für}$  das Homestake Experiment, das schon seit Ende 1960er Jahren in der Homestake-Goldmine läuft, erhielt Raymond Davis 2002 den Nobelpreis der Physik.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Super-Kamiokande, der Nachfolger von Kamiokande (<u>Kamioka N</u>ucleon <u>D</u>ecay <u>E</u>xperiment), läuft seit April 1996 in Japan in der Kamioka-Mine.

#### 1.3. NEUTRINOOSZILLATIONEN

#### Super-Kamiokande

Der Super-Kamiokande-Detektor misst Ereignisse, die von atmosphärischen Neutrinos stammen. Diese entstehen, wenn hochenergetische kosmische Strahlung, die hauptsächlich aus Protonen besteht, auf die Erdatmosphäre trifft. Beim Eintreten in die Erdatmosphäre werden große Mengen von Pionen erzeugt, welche dann schnell weiter zerfallen:

$$\begin{aligned} \pi^0 &\to \gamma + \gamma \\ \pi^+ &\to \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\to \mu^- + \overline{\nu}_\mu \end{aligned}$$

Die dabei entstehenden Myonen können ihrerseits weiter zerfallen:

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu$$
$$\mu^- \to e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu$$

Somit enthält ein atmosphärischer Schauer neben Elektronen, Myonen, Photonen und Hadronen auch eine große Zahl von Neutrinos. Um beim Neutrinonachweis störende Strahlung geladener Teilchen abzuschirmen, wurde das ganze Experiment 1 km unter der Erdoberfläche in der Kamioka-Mine gebaut. Damit wurde die Anzahl der Myonen um einen Faktor  $10^5$  reduziert. Die Myonenrate im Detektor beträgt lediglich 1,88 Hz [SK99]. Der Detektor selbst besteht aus einem 41,4 Meter hohen und 39,3 Meter durchmessenden Zylinder, der in zwei Teile geteilt wurde. Der innere Teil beinhaltete 32 Tonnen und der äußere 18 Tonnen reinen Wassers. Der äußere Teil schützt den inneren Teil vor der Strahlung aus dem umgebenden Gestein und wird als Veto für von außen kommende Myonen eingesetzt. Der innere Detektor ist mit 11200 Photomultipliern ausgekleidet. Die Aufgabe der Photomultiplier ist es Cherenkovstrahlung nachzuweisen, die durch folgende Reaktionen hervorgerufen wird:

$$\nu_e + A \rightarrow B + e^- \quad (CC, charged current),$$
  
 $\nu_\mu + A \rightarrow B + \mu^- \quad (CC, charged current).$ 

Das sich kegelförmig ausbreitende Cherenkovlicht hinterlässt ein bestimmtes Muster, welches auf die Spur eines Myons oder Elektrons, das wegen seiner viel kleineren Masse stärker streut, schließen lässt. Damit wird die Sorte des einfallenden Neutrinos festgelegt. Es ist ebenfalls möglich die Richtung des Neutrinos zu bestimmen. In Abb. 1.4 ist die Anzahl der nachgewiesenen Neutrinos gegen den Zenitwinkel  $\theta$  aufgetragen. Dabei entspricht  $\cos \theta = 1$  atmosphärischen Neutrinos, die von "oben" kommen und somit eine Wegstrecke von ca. 15 km zurücklegen, während  $\cos \theta = -1$  die von "unten" durch die ganze



Abbildung 1.4: Die Anzahl der gemessenen Neutrinos gegen den Zenitwinkel.

Erde kommenden Neutrinos beschreibt, die somit eine Weglänge von ca. 13000 km zurücklegen. Die rote Linie resultiert aus einer Monte-Carlo Simulation ohne und die grüne Linie mit Neutrinooszillationen. Man erkennt, dass die gemessenen Werte für Myonneutrinos nur durch die Monte-Carlo Simulation mit Neutrinooszillationen gut wiedergegeben wird. Es besteht ein Mangel an Myonneutrinos, die von "unten" kommen. Das bedeutet, dass atmosphärische Myonneutrinos sich auf dem Weg in eine andere Neutrinosorte umwandeln, und zwar in Tauneutrinos, da man keine Zunahme der Anzahl von Elektronneutrinos misst, sondern über alle Winkel die erwartete Menge detektiert. Da man aus der Analyse der Daten die Energien der Neutrinos kennt und auch den Weg, den sie für eine Oszillation brauchen, kann man nun in gewissen Grenzen die Differenz der Massenquadrate und den Mischungswinkel berechnen. Super-Kamiokande liefert folgende Ergebnisse [Ash04]:

$1,9 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 < \bigtriangleup m_{\text{atm}}^2 < 3,0 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$	90% C.L.
$\sin^2(2 heta_{ m atm}) > 0,9$	90% C.L.

#### **Das SNO-Experiment**

Das Sudbury Neutrino Observatory (SNO) befindet sich in Kanada in der Nähe von Sudbury in Ontario. Der kugelförmige Detektor liegt ca. 2300 m unterhalb der Erdoberfläche und ist gefüllt mit 1000 t schweren Wassers  $D_2O$ . Die Kugel selbst ist zur besseren Abschirmung in 7000 t Wasser eingebettet. Der Innenteil der Kugel ist mit 9600 Photomultipliern ausgekleidet, die wie beim Super-Kamiokande-Experiment Cherenkov-Strahlung detektieren. Da man schweres Wasser als Nachweismedium benutzt, gibt es hier drei verschiedene Nachweisreaktionen:

$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$	(CC, charged current)	$\Rightarrow \Phi_{CC} = \Phi(\nu_e),$
$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$	(NC, neutral current)	$\Rightarrow \Phi_{NC} = \Phi(\nu_e) + \Phi(\nu_\mu) + \Phi(\nu_\tau),$
$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$	(ES, elastic scattering)	$\Rightarrow \Phi_{ES} = \Phi(\nu_e) + \frac{1}{6.48} [\Phi(\nu_\mu) + \Phi(\nu_\tau)].$

Während die CC-Reaktion nur durch Elektronneutrinos hervorgerufen werden kann, sind die anderen Reaktionen mit allen drei Neutrinosorten möglich. Bei der NC-Reaktion wird das Deuterium in Proton und Neutron zerlegt. Hier wird im Vergleich zu CC- und ES-Reaktionen keine Cherenkovstrahlung ausgesandt. Um diese Reaktion nachweisen zu können, wurde dem schweren Wasser Salz (NaCl) zugefügt. Die bei der Reaktion entstandenen Neutronen werden von Chlor eingefangen, welches anschließend Photonen emittiert.

Die Ergebnisse der Messung der solaren<sup>6</sup> Neutrinos ist in Abbildung 1.5 dargestellt, wo die veschiedenen Geraden den Fluss der Myon- und Tauneutrinos in Abhängigkeit vom Fluss der Elektronneutrinos zeigen. Aus den Ergebnissen schließt man, dass etwa ein Drittel aller Neutrinos als Elektronneutrinos ankommen. Die übrigen beiden Drittel müssen sich dann in Myon- und Tauneutrinos umgewandelt haben.

 $<sup>^{6}</sup>$ In der Sonne werden nur Elektronneutrinos produziert, die auf ihrem Weg zu der Erde in andere Neutrinosorten oszillieren.



Abbildung 1.5: Die Ergebnisse des SNO-Experiments [Ahm02].

### **1.4** Neutrinoloser doppelter $\beta$ -Zerfall

Der Nachweis von Neutrinooszillationen belegt, dass Neutrinos eine von Null verschiedene Masse besitzen. Es können aus Oszillationsexperimenten jedoch keine absoluten Werte für die Neutrinomassen gewonnen werden, sondern nur Differenzen von Massenquadraten  $\triangle m_{ij}^2$ . Für den Fall, dass das Neutrino identisch mit seinem Antiteilchen ist, es also ein Majorana-Charakter besitzt, würde die Suche nach neutrinolosen Doppel- $\beta$ -Zerfällen erlauben, eine Aussage über die  $\nu_e$ -Masse zu machen. Ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen, so sollte der neutrinolose doppelte  $\beta$ -Zerfall möglich sein. Man spricht von doppeltem  $\beta$ -Zerfall, wenn in einem Kern mit A Nukleonen und Z Protonen praktisch gleichzeitig zwei Neutronen zerfallen, wobei zwei Elektronen und zwei Neutrinos emittiert werden.

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+2}Y + 2 e^{-} + 2 \overline{\nu}_{e}$$

Allerdings kommt dieser Zerfall selten vor und kann nur in den Kernen stattfinden, die eine gerade An-



Abbildung 1.6: Die Massenparabeln, die sich nach der Bethe-Weizsäcker-Formel ergeben.

zahl sowohl von Protonen als auch von Neutronen besitzen (gg-Kerne).

Schaut man sich die Massenparabeln an (Abb. 1.6), die sich nach dem Tröpfchenmodel aus der Bethe-Weizsäcker-Formel ergeben, so erkennt man, dass es gg-Kerne gibt, die nicht im energetisch günstigsten Zustand auf der Isobaren liegen, aber trotzdem nicht über einen normalen  $\beta$ -Zerfall zerfallen können, da der entstehende Kern schwerer als der Ausgangskern wäre. Somit ist dieser Zerfall energetisch nicht möglich. Findet aber ein doppelter  $\beta$ -Zerfall statt, kann ein energetisch günstigerer Zustand erreicht werden. Das Energiespektrum für den doppelten  $\beta$ -Zerfall sieht rein kontinuierlich aus, wenn man annimmt, dass das Neutrino ein Dirac-Teilchen ist. In diesem Fall handelt es sich um den neutrinobehafteten doppelten  $\beta$ -Zerfall ( $2\nu\beta\beta$ ), Abb. 1.7(a). Ist aber das Neutrino ein Majorana-Teilchen, dann können die beiden emittierten Neutrinos annihilieren, so dass beim Zerfall insgesamt nur zwei Elektronen emittiert werden, Abb. 1.7(b).



Abbildung 1.7: Die Abbildung (a) zeigt den neutrinobehafteten und (b) den neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall [Alt03].

In diesem Fall spricht man vom neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall ( $0\nu\beta\beta$ ), der ein diskretes Spektrum aufweist (Abb. 1.8) und die Leptonenzahl verletzt. Voraussetzung für den  $0\nu\beta\beta$  Zerfall ist neben dem Majorana-Charakter der Neutrinos auch eine von Null verschiedene Masse. Neutrinos werden als linkshändige Teilchen emittiert, müssen für den  $0\nu\beta\beta$  Zerfall aber als rechtshändige Antineutrinos wieder absorbiert werden. Letzteres ist nur möglich, wenn Neutrinos eine Masse besitzen und sich somit ein Bezugsystem finden lässt, in dem das Neutrino überholt werden kann und somit mit einer anderen Helizität "gesehen" wird. Es existiert dann eine Mischung von rechtshändigen und linkshändi-

 ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+2}Y + 2 e^{-}$ 



Abbildung 1.8: Das Energiespektrum der Elektronen beim  $2\nu\beta\beta$ -Zerfall weist eine kontinuierliche Verteilung auf, während der  $0\nu\beta\beta$ -Zerfall zu einer diskreten Linie führt.

gen Neutrinos, die den neutrinolosen doppelten  $\beta$ -Zerfall möglich machen.

#### 1.5. DIREKTE NEUTRINOMASSENMESSUNG

Heutzutage wird in diesem Gebiet intensiv geforscht. Insbesondere in Europa werden mehrere Experimente aufgebaut wie z. B. GERDA, COBRA, CUORE und andere, die das Endpunktsspektrum einiger Kandidaten für den doppelten  $\beta$ -Zerfall untersuchen. Aus der Kenntnis der Halbwertszeit des  $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls, die umgekehrt proportional zur Neutrinomasse ist, kann man Rückschlüsse auf die Neutrinomasse ziehen. Aus dem Heidelberg-Moskau Experiment ergibt sich mit der Definition

$$|m_{ee}| = |\sum_i e^{i\alpha_i} |U_{ei}^2| \cdot m(\nu_i)|$$

für die Masse des Elektronneutrinos [HME04]:

$$|m_{ee}| = 0,44^{+0.05}_{-0.06} \,\mathrm{eV},$$

wobei  $\alpha_i$  die Majorana-Phasen sind.

Dieses Ergebnis ist allerdings in der wissenschaftlichen Gemeinschaft umstritten, da die gemessene  $0\nu\beta\beta$ -Linie nicht zweifelfrei vom Untergrund getrennt werden konnte. Um das Ergebnis zu überprüfen sind daher zusätzliche experimentelle Daten nötig.

## 1.5 Direkte Neutrinomassenmessung

Eine direkte, modellunabhängige Methode die Elektronneutrinomasse zu bestimmen, ist die Untersuchung des Energiespektrums beim  $\beta$ -Zerfall. Aus dem Verlauf des Energiespektrums der Elektronen und der Endpunktsposition kann die Neutrinomasse bestimmt werden. Dafür ist Tritium wegen seiner kleinen Übergangsenergie von 18,6 keV und der relativ kurzen Halbwertszeit von 12,3 Jahren der ideale Kandidat als  $\beta$ -Strahler.

Seit den 1980er Jahren wurde unabhängig voneinander in Mainz und Troitsk das von P. Kruit und F.H. Read eingeführte Solenoid-Retardierungsspektrometer (SRS) [Bea80] [Kru83] weiterentwickelt und in Experimenten eingesetzt. Heute wird das SRS als MAC-E-Filter bezeichnet. Seine Funktionsweise wird im Kapitel 2.2 genauer erklärt. Mit diesem wurde das Energiespektrum der beim Tritium-Zerfall entstandenen Elektronen gemessen. Das SRS besitzt ein inhomogenes magnetisches Führungsfeld und ein elektrostatisches Gegenfeld, das die geladene Teilchen bis zur Spektrometermitte abbremst und dann wieder beschleunigt, fals die kinetische Energie ausreichend groß ist um die Gegenspannung zu überwinden. Die Experimente in Mainz und Troitsk sind ähnlich aufgebaut, unterscheiden sich aber in in den verwandten Tritium-Quellen.

Das Troitsk Experiment hat eine **gasförmige** Tritiumquelle benutzt. Hier wird Tritiumgas in ein drei Meter langes Rohr mit einem Durchmesser von 5 cm eingespeist. Die Säulendichte beträgt  $\rho d \approx 10^{17} \frac{\text{Moleküle}}{\text{cm}^2}$ . Das Energiespektrum der Elektronen wird mit einem Retardierungsspektrometer mit Durchmesser von 1,5 m und Länge von 7 m aufgenommen. Als Detektor wird ein Si(Li)-Detektor mit dem Durchmesser von 20 mm benutzt.

Seit 1994 wurde beim Troitsk Experiment eine monoenergetische Linie im Energiespektrum knapp unterhalb des Endpunkts beobachtet (Troitsk-Anomalie). In nachfolgenden Jahren wurde festgestellt, dass die Position und die Amplitude der Linie variiert. Nachdem zwischen der Tritiumquelle und dem Spektrometer Vakuumpumpen eingebaut wurden, konnte man keine eindeutige Anomalie mehr erkennen. Es handelt sich vermutlich um ein experimentelles Artefakt, was noch nicht richtig verstanden ist. Bei der Analyse wurde die Anomalie als zusätzliche Linie über dem kontinuierlichen  $\beta$ -Spektrum berücksichtigt. Nach Korrektur ergibt sich [Lob03]:

$$m(\nu_e)^2 = -2, 3 \pm 2, 5 \pm 2, 0 \,\mathrm{eV}^2 \implies m(\nu_e) < 2,05 \,\mathrm{eV} \ (95\% \,\mathrm{C.L.}).$$

Im Gegensatz zum Troitsk Experiment benutzt das Mainzer Experiment eine **feste** Tritiumquelle. Dazu wurde ein dünner Tritiumfilm auf einem Graphitsubstrat (HOPG) aufgefroren. Ein Nachteil der festen Quelle gegenüber der gasförmigen sind Verluste durch inelastische Streuung der Elektronen innerhalb der Quelle. Die beim Tritium-Zerfall emittierten Elektronen werden entlang der magnetischen Feldlinien zum Retardierungsspektrometer geleitet, das beim Mainzer Experiment einen Durchmesser von einem Meter und eine Länge von vier Metern hat. Seine Energieauflösung beträgt 4,8 eV. Die Elektronen, welche die Potentialbarriere überwindenden konnten, wurden mit einem Siliziumdetektor (d=25 mm) gemessen. Aus den Messungen von 1998 bis 2001 ergibt sich [Kra05]:

$$m(\nu_e)^2 = -0.6 \pm 2.2 \pm 2.1 \text{ eV}^2 \implies m(\nu_e) < 2.3 \text{ eV} (95\% \text{ C.L.}).$$

## Kapitel 2

# Theoretische Grundlagen

Um die Neutrinoeigenschaften besser kennenzulernen, beschäftigt man sich mit den Prozessen der schwachen Wechselwirkung, da Neutrinos nur schwach wechselwirken. Ein Beispiel für die schwache Wechselwirkung ist der  $\beta$ -Zerfall, der in diesem Kapitel theoretisch beschrieben wird. Dies ist auch eine Voraussetzung für das Verständnis des KATRIN Experiments.

## 2.1 Energiespektrum des $\beta$ -Zerfalls

Als  $\beta^-$ -Zerfall bezeichnet man eine Reaktion, bei der ein Neutron in ein Proton umgewandelt wird, wobei ein Elektron und ein Elektronantineutrino emittiert werden:

$$n \to p + e^- + \overline{\nu}_e. \tag{2.1}$$

Da die Masse des Neutrons größer ist als die Summe der Massen von Proton, Elektron und Neutrino, kann der  $\beta^-$ -Zerfall beim freien Neutron stattfinden, während  $\beta^+$ -Zerfälle  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  aufgrund der Energieerhaltung nur in Kernen stattfinden können. Beim  $\beta^-$ -Zerfall im Kern verwandelt sich ein Element X mit Z Protonen in ein Element Y mit Z+1 Protonen, wobei die Massenzahl A unverändert bleibt.

$${}^{A}_{Z}X \to {}^{A}_{Z+1}Y + e^{-} + \overline{\nu}_{e} \tag{2.2}$$

Hierbei handelt es sich um einen Dreikörperzerfall. Aufgrund seiner großen Masse ist die Rückstoßenergie des Kerns im allgemeinen vernachlässigbar. Die Energie, die für Elektron und Antineutrino zur Verfügung steht, ergibt sich aus der Massendifferenz bzw. aus der Differenz der Bindungsenergien der Kerne. Damit der Zerfall stattfinden kann, muss diese mindestens gleich der Summe der Ruhemassen von  $e^-$  und  $\overline{\nu}_e$  sein.

$$\Delta E = [M(^{A}_{Z}X) - M(^{A}_{Z+1}Y)] \cdot c^{2} \ge (m_{e} + m_{\bar{\nu}}) \cdot c^{2}$$
(2.3)

Nach Fermis Goldener Regel lautet die Übergangsrate (die Anzahl der Kerne, die pro Energieintervall und Zeiteinheit zerfallen)

$$\frac{d^2N}{dE\,dt} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M(E)|^2 \cdot \rho(E),\tag{2.4}$$

wobei M(E) das Übergangsmatrixelement und  $\rho(E)$  die Endzustandsdichte sind. Für den Tritiumzerfall, der beim KATRIN Experiment benutzt wird, ist das Übergangsmatrixelement energieunabhängig, da es sich um einen übererlaubten Übergang handelt [Alt03]:

$$|M(E)^2| = |M|^2 = const.$$
 (2.5)

Die Anzahl der Zustände im Volumen V im Impulsintervall [p, p + dp] ist gegeben durch

$$dn = \frac{4\pi p^2 \cdot dp \cdot V}{h^3},\tag{2.6}$$

wobe<br/>i $4\pi p^2\cdot dp$ das Volumen einer Kugelschale mit dem Radius<br/> pund der Dickedpund<br/>  $\frac{h^3}{V}$ das Volumen eines Zustandes im Impulsraum sind. Mit der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung

$$E^{2} = p^{2} + m^{2} \Leftrightarrow p \, dp = E \, dE \quad \text{mit } c = 1 \tag{2.7}$$

kann man schreiben

$$dn = \frac{4\pi p \cdot E \, dE \cdot V}{h^3} \iff \frac{dn}{dE} = \frac{4\pi p \cdot E \cdot V}{h^3} = \frac{p \cdot E \cdot V}{2\pi^2 \hbar^3}.$$
(2.8)

Mit der Annahme, dass Elektron und Antineutrino unkorreliert voneinander emittiert werden, ergibt sich für die Endzustandsdichte:

$$\rho(E) = \frac{dn_e}{dE_e} \cdot \frac{dn_\nu}{dE_\nu} = \frac{p_e \cdot E_e \cdot p_\nu \cdot E_\nu \cdot V^2}{4\pi^4 \hbar^6}.$$
(2.9)

Benutzt man  $E_e + E_\nu = (E_{kin} + m_e) + E_\nu = E_0 + m_e = const.$ , so ergibt sich

$$\rho(E) = \frac{p_e \cdot (E_{kin} + m_e) \cdot \sqrt{(E_0 - E_{kin})^2 - m_\nu^2} \cdot (E_0 - E_{kin}) \cdot V^2}{4\pi^4 \hbar^6}.$$
(2.10)

Das Übergangsmatrixelement M lässt sich als Produkt des leptonischen und hadronischen Anteils mit einem konstanten Vorfaktor schreiben [Alt03].

$$M = G_F \cdot \cos\theta_c \cdot M_{lep} \cdot M_{had} \tag{2.11}$$

Dabei ist  $G_F$  die Fermi-Kopplungskonstante und  $\theta_C$  der Cabibbo-Winkel. Für den leptonischen Anteil kann man schreiben

$$|M_{lep}^2| = \frac{1}{V} \cdot F(E_{kin}, Z+1), \qquad (2.12)$$

wobei  $F(E_{kin}, Z + 1)$  die Fermifunktion ist, die eine Wechselwirkung zwischen dem emittierten Elektron und dem zurückbleibenden Kern beschreibt. Sie hängt von der kinetischen Energie des Elektrons und von der Ladungszahl des Tochterkerns ab. Ohne Wechselwirkung wäre die Fermifunktion F = 1, was z.B. bei Neutrinos der Fall ist. Der hadronische Anteil, das sog. Kernmatrixelement, ist beim Tritium-Zerfall konstant [Alt03]:

$$|M_{had}^2| = 5,55. \tag{2.13}$$

Mit den Gleichungen (2.10)-(2.13) ergibt sich letztendlich für die Übergangsrate

$$\frac{d^2 N}{dE \, dt} = A \cdot F(E_{kin}, Z+1)(E_{kin} + m_e) p_e \sqrt{(E_0 - E_{kin})^2 - m_\nu^2} \cdot (E_0 - E_{kin}), \quad (2.14)$$

wobei

$$A = \frac{G_F^2 \cdot \cos^2 \theta_C}{2\pi^3 \hbar^7} \cdot |M_{had}^2| = const.$$
(2.15)

Gleichung (2.14) beschreibt den Zusammenhang zwischen Zählrate, kinetischer Energie der Elektronen und Neutrinomasse und bildet damit die Grundlage für die kinematische Bestimmung der Neutrinomasse aus dem  $\beta$ -Zerfallsspektrum.

## 2.2 MAC-E-Filter

Das KATRIN Spektrometer funktioniert nach dem Prinzip des MAC-E-Filters<sup>1</sup>, das im Folgenden beschrieben wird. Wie in Abb. 2.1(a) zu erkennen ist, wird von zwei supraleitenden Magneten (Solenoiden) ein Magnetfeld erzeugt. Die Feldstärke  $B_S$  ist in den Solenoiden maximal und fällt zur Mitte des Spektrometers, die man auch Analysierebene nennt, um einige Größenordnungen auf den Wert  $B_A$  ab. Das Verhältnis der magnetischen Feldstärken wird beim KATRIN Experiment  $\frac{B_S}{B_A} = 20000$  sein. Befindet sich im linken Solenoid eine Tritiumquelle, so werden die emittierten Elektronen entlang der magnetischen Feldlinien geführt werden, wobei sie aufgrund der Lorentzkraft eine Zyklotronbewegung um die Feldlinien ausführen.

 $<sup>^1 \</sup>rm{Die}$  Abkürzung MAC-E-Filter steht für <u>Magnetic A</u>diabatic <u>C</u>ollimation combined with an <u>E</u>lectrostatic Filter

Die Gesamtenergie der Elektronen Ekann als Summe der longitudinalen Komponente $E_{\parallel}$ und der transversalen Komponente $E_{\perp}$ geschrieben werden:

$$E = E_{\parallel} + E_{\perp} = E \cdot \cos^2 \theta + E \cdot \sin^2 \theta, \qquad (2.16)$$

wobei  $\theta$  der Winkel zwischen dem Impuls des Elektrons und der magnetischen Feldlinie ist. Da die Elektronen bei nicht verschwindender Transversalenergie  $E_{\perp}$  eine Zyklotron-



(b) Die Impulsänderung des Elektrons auf dem Weg von der Quelle zum Detektor

adiabatic transformation  $E_{\parallel} \rightarrow E_{\parallel}$ 

Abbildung 2.1: Das Prinzip des MAC-E-Filters.

bewegung um die magnetischen Feldlinien ausführen, besitzen sie ein magnetisches Bahnmoment  $\mu$ . Auf dieses wirkt im veränderlichen Magnetfeld die Gradientenkraft

$$\vec{F}_{\nabla} = \vec{\nabla} \left( \vec{\mu} \cdot \vec{B} \right) \tag{2.17}$$

Diese Gradientenkraft bewirkt eine Beschleunigung des Elektrons parallel zu den Magnetfeldlinien. Solange die Änderung des Magnetfeldes pro Zyklotronumlauf hinreichend klein ist, verläuft dieser Prozess adiabatisch und es gilt [Jac02]

$$\mu \cdot \gamma = const. \tag{2.18}$$

mit  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ . Im nichtrelativistischen Fall mit  $\gamma \approx 1$  wird  $\mu$  selbst zur Erhaltungsgröße und es gilt

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = const. \tag{2.19}$$

Da die Gesamtenergie im statischen Magnetfeld erhalten ist, wird bei abnehmendem Magnetfeld *B* Transversalenergie  $E_{\perp}$  in Longitudinalenergie  $E_{\parallel}$  umgesetzt. Die Abb. 2.1(b) zeigt wie der Impuls  $\overrightarrow{p_e}$  eines Elektrons, das in der Quelle mit einer großen transversalen Komponente startet, sich auf dem Weg zum Detektor entlang der Magnetfeldlinie ausrichtet. Besitzt ein Elektron aus dem Tritiumzerfall die gesamte maximale Energie  $E_{kin}$  von 18,6 keV als Transversalkomponente, so beträgt diese in der Analysierebene maximal:

$$E_{\perp max,A} = E_{kin,max} \cdot \frac{B_A}{B_S} = 18,6 \text{ keV} \cdot \frac{1}{20000} \approx 0,93 \text{ eV}.$$
 (2.20)

Um die Elektronen nach Energien selektieren zu können, wird ein elektrisches Gegenfeld angelegt, das in der Analysierebene sein Maximum besitzt. Die von der Quelle emittierten Elektronen werden zunächst bis zur Mitte hin abgebremst. Reicht die longitudinale Energie aus, um die Gegenspannung  $U_0$  zu überwinden, so werden die Elektronen nach dem Passieren der Analysierebene zum Detektor hin wieder beschleunigt und dort gezählt. Durch eine stufenweise Verringerung der Gegenspannung kann das  $\beta$ -Spektrum vermessen werden. Somit funktioniert der MAC-E-Filter als integrierender Hochpassfilter. Der Aufbau ist nicht sensitiv auf die transversale Energiekomponente. Der maximale Wert von  $E_{\perp}$  in der Analysierebene ist die Energieauflösung des Spektrometers und beträgt nach Gleichung (2.20)  $\Delta E \approx 0,93$  eV. Neben der guten Energieauflösung ist die große Raumwinkelakzeptanz, die eine hohe Luminosität ermöglicht, eine weitere positive Eigenschaft des MAC-E-Filters. Ob ein Elektron die Potentialbarriere überwinden kann, hängt nicht nur von der Gegenspannung  $U_0$  ab, sondern auch von seiner Longitudinalenergie  $E_{\parallel}$  und vom Startwinkel  $\theta_S$ . Nur diejenigen Elektronen, die in der Analysierebene eine Longitudinalenergie  $E_{\parallel,A} > 0$  besitzen, werden transmittiert. Es muss also gelten:

$$E_{\parallel,A} = E_S - qU_0 - E_{\perp,A}$$
  
=  $E_S - qU_0 - E_{\perp,S} \cdot \frac{B_A}{B_S}$   
=  $E_S - qU_0 - E_S \cdot \sin^2 \theta_S \cdot \frac{B_A}{B_S} > 0$  (2.21)

Die Folge davon ist, dass nur diejenigen Elektronen, die die Bedingung

$$\theta_S < \arcsin\left(\sqrt{\frac{E_S - qU_0}{E_S} \cdot \frac{B_S}{B_A}}\right) \tag{2.22}$$

erfüllen, transmittiert werden. Wie groß der relative Anteil der die Potentialbarriere überwindenden Elektronen ist, beschreibt die Transmissionsfunktion:

$$T = \frac{\Delta\Omega}{2\pi} = 1 - \cos\theta_S = 1 - \sqrt{1 - \sin^2\theta},\tag{2.23}$$

wobei  $\Delta\Omega$  die durch den Kegel (2.22) definierte Raumwinkelakzeptanz bezeichnet. Der sich hieraus ergebende Verlauf der Transmissionsfunktion ist in Abb. 2.2 dargestellt. Man erkennt drei Abschnitte:

$$T = \begin{cases} 0 & \text{für } E_S < qU_0 \\ 1 - \sqrt{1 - \frac{E_S - qU_0}{E_S} \cdot \frac{B_S}{B_A}} & \text{für } E_S - E_S \cdot \frac{B_A}{B_S} \le qU_0 \le E_S \\ 1 & \text{für } qU_0 \le E_S - E_S \cdot \frac{B_A}{B_S} \end{cases}$$
(2.24)



Abbildung 2.2: Theoretischer Verlauf der Transmissionsfunktion des KATRIN Experiments.

### 2.3 Untergrundreduktion durch Drahtelektrode

Um auf die Neutrinomasse schließen zu können, wird beim KATRIN Experiment das Energiespektrum des Tritium  $\beta$ -Zerfalls untersucht. Der Verlauf des Spektrums und die Position des Endpunkts sind ein Maß für die Neutrinomasse. Das Vermessen des Endpunktbereichs ist eine große Herausforderung, denn die relative Zählrate dort ist außerordentlich gering. Auf den Bereich 1 eV unterhalb des Endpunkts kommen nur ca.  $2 \cdot 10^{-13}$  aller Elektronen. Eine effektive Unterdrückung des experimentellen Untergrundes ist daher essentiell für das Experiment. Der Hauptuntergrund wird von den Elektronen aus der Tankwand erzeugt. Diese entstehen entweder, wenn kosmische Strahlung den Tank trifft, oder durch radioaktive Einschlüsse im Edelstahl selbst. Wird ein Elektron von der Tankoberfläche emittiert, so erfährt es aufgrund der vorhandenen magnetischen Felder eine Lorenzkraft. Dies führt dazu, dass die meisten Elektronen nicht in das Tankinnere gelangen, sondern sich entlang der magnetischen Feldlinien auf Kreisbahnen bewegen. Der Anteil der Elektronen, der diese magnetische Abschirmung überwindet, beträgt etwa  $10^{-7} - 10^{-5}$ .

Um den Untergrund weiter zu reduzieren wird eine quasi-masselose Drahtelektrode eingebaut, die gegenüber der Tankwand auf negativerem Potential liegt und damit Elektronen reflektiert. Das effektive Potential  $U_{eff}$ , das sich in Abhängigkeit vom Drahtpotential  $U_D$  und Tankpotential  $U_T$  ergibt, ist in einem ausreichend großem Abstand von der Drahtelektrode bis zur Tankmitte annähernd konstant.

$$U_{\rm eff} = U_{\rm D} + \frac{U_{\rm T} - U_{\rm D}}{A} \tag{2.25}$$

Der durch diese Formel definierte elektrische Abschirmfaktor A lautet [Val04]:

$$A \approx 1 + \frac{2\pi l}{s \cdot \ln \frac{s}{\pi d}}.$$
(2.26)

Seine Größe hängt vom Drahtdurchmesser d, dem Abstand zwischen den Drähten s und dem Abstand l zwischen der Drahtlage und der Wand ab. Um Schwankungen des effektiven Potentials

$$\Delta U_{\rm eff} = \Delta U_{\rm D} \left(1 - \frac{1}{A}\right) + \frac{1}{A} \Delta U_{\rm T}$$
(2.27)

möglichst gering zu halten, muss der Abschirmfaktor A möglichst groß gewählt werden. Wie man aus der Formel (2.26) erkennt, tendiert man aus diesem Grund dazu einen möglichst großen Abstand l zur Wand und Drahtdurchmesser d zu wählen, während der Abstand zwischen den Drähten s möglichst klein sein sollte.

Aufgrund der Konfiguration der elektromagnetischen Felder kann es dazu kommen, dass geladene Teilchen im Spektrometer gespeichert werden, also sich auf bestimmten Bahnen hin und zurück bewegen ohne das Spektrometer zu verlassen. Diese können mit Restgaspartikeln stoßen und durch Ionisation Sekundärelektronen auslösen. Um solche Teilchenfallen zu entleeren, wird zwischen den Messungen kurzzeitig ein elektrisches Dipolfeld an die Drahtelektrode angelegt, welches die Teilchen mit Hilfe der  $\vec{E} \times \vec{B}$ -Drift aus ihren Bahnen ablenkt. Wegen der dafür benötigten hohen Spannungen ist ebenfalls ein großer Drahtdurchmesser notwendig, da sonst die elektrische Feldstärke, die proportional zu 1/r ist, Feldemissionen hervorruft. Der Dipol-Modus-Betrieb ist also ein weiteres Argument, warum man einen dicken Draht braucht. Um ein Dipolfeld zu erzeugen, muss die gesamte Drahtelektrode entlang der Längsachse des Spektrometers in zwei Hälften geteilt werden.

Andererseits möchte man möglichst wenig Material einbauen, denn die Drahtelektrode selbst ist ebenfalls eine potentielle Quelle von Untergrundelektronen. Die geometrische Abdeckung des Tanks durch die Elektrode ist durch das Verhältnis  $\frac{d}{s}$  gegeben, das minimal sein sollte. Hieraus ergibt sich eine Forderung nach einem dünnen Drahtdurchmesser und großen Drahtabständen.

Um die widersprüchlichen Anforderungen zu berücksichtigen, wird ein Modul mit zwei Drahtlagen. Aufgrund des kleinen Drahtdurchmessers der inneren Lage entsteht eine geringe geometrische Abdeckung. Die Potentialdifferenz zwischen der Tankwand und der ersten Drahtlage sei  $\Delta U_1$ , zwischen den beiden Drahtlagen  $\Delta U_2$  (Abb. 2.4). Die erste Drahtlage liegt am negativerem Potential gegenüber der Tankwand; die zweite Drahtlage gegenüber der ersten ebenfalls. Somit schirmt die zweite Drahtlage auch diejenigen Elektronen ab, die in der ersten Lage und der Haltestruktur entstehen. Mit dem



Abbildung 2.3: Das Drahtelektrodenprinzip.



Abbildung 2.4: Die Abbildung zeigt den schematischen Aufbau der Drahtlagen. Der Abstand zwischen den Drähten ist in beiden Lagen gleich  $s_1 = s_2 = s$ , wobei die zweite Lage gegenüber der ersten um  $\frac{s}{2}$  versetzt ist.

Einbau der zweiten Drahtlage lässt sich zudem ein hoher elektrischer Abschirmfaktor A erreichen. Das effektive Potential, das von der ersten Drahtlage erzeugt wird, stellt sich schon in einem kleinen Abstand von der Elektrode ein und lautet nach Gleichung (2.25):

$$U_{\rm eff,1} = U_{\rm D,1} + \frac{U_{\rm T} - U_{\rm D,1}}{A_1}.$$
(2.28)

Mit dem Einbau der zweiten Lage ergibt sich im Tankinneren das Effektivpotential  $U_{\text{eff},2}$ , welches jetzt von  $U_{\text{eff},1}$  abhängt:

$$U_{\rm eff,2} = U_{\rm D,2} + \frac{U_{\rm eff,1} - U_{\rm D,2}}{A_2}.$$
(2.29)

#### 2.3. UNTERGRUNDREDUKTION DURCH DRAHTELEKTRODE

Setzt man die Gleichung (2.28) in (2.29) ein, so ergibt sich:

$$U_{\rm eff,2} = U_{\rm D,2} + \frac{1}{A_2} \cdot \left( U_{\rm D,1} + \frac{U_{\rm T} - U_{\rm D,1}}{A_1} - U_{\rm D,2} \right).$$
(2.30)

Liegen die Drähte beider Lagen auf dem gleichen Potential, so vereinfacht sich die Gleichung  $\left(2.30\right)$ zu:

$$U_{\rm eff,2} = U_{\rm D} + \frac{U_{\rm T} - U_{\rm D}}{A},$$
 (2.31)

wobei jetzt $A=A_1\cdot A_2$ der gesamte elektrische Abschirmfaktor ist.

## Kapitel 3

## Experimenteller Aufbau

## 3.1 KATRIN

Das KATRIN Experiment (Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment) wird das Energiespektrum von Elektronen aus dem Tritium  $\beta$ -Zerfall (Abb. 3.1) untersuchen, um die absolute Masse des Elektronneutrinos mit einer Präzision von 0,2 eV direkt zu bestimmen. Somit sollte das KATRIN Experiment eine Größenordnung empfindlicher sein als die Vorgängerexperimente in Mainz und Troitsk. Die Messgenauigkeit muss dazu um einen Faktor 100 erhöht werden, da die eigentliche Messgröße das Quadrat der Neutrinomasse  $m(\nu_e)^2$  ist.



Abbildung 3.1: Die Abbildung zeigt das Energiespektrum der Elektronen des Tritium  $\beta$ -Zerfalls. Das linke Bild zeigt das Gesamtspektrum, während das rechte nur einen Ausschnitt aus dem Endpunktsbereich darstellt. Die rote Kurve zeigt das Spektrum unter der Annahme einer Neutrinomasse von 1 eV, während die blaue Linie das Spektrum im Falle masseloser Neutrinos wiedergibt [Dre01].

Das Experiment wird am Forschungszentrum Karlsruhe von einer internationalen Kollaboration, an der Arbeitsgruppen aus Deutschland, USA, Großbritannien, Tschechien und Russland teilnehmen, aufgebaut. Eine schematische Darstellung des etwa 70 m langen Experimentes zeigt Abb. 3.2. Man kann das Experiment in folgende Komponenten unterteilen: Tritiumquelle (WGTS), Transport- und (Kryo-)Pumpstrecke, Vorspektrometer, Hauptspektrometer und Detektor.



Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des KATRIN Experiments: a) Tritiumquelle, b) Transport- und (Kryo-)Pumpstrecke, c) Vorspektrometer, d) Hauptspektrometer, e) Detektor.

WGTS (windowless gaseous tritium source) Als Quelle des  $\beta$ -Zerfalls wird molekulares Tritiumgas benutzt. Es zerfällt in <sup>3</sup>He, wobei ein Elektron und ein Antineutrino emittiert werden (Abb. 3.3). Mit der zweitkleinsten natürlich vorkommenden Übergangsenergie von 18,57 keV ist Tritium der ideale Kandidat. Seine Halbwertszeit von 12,32 Jahren ist kurz genug um mit einer handhabbaren Menge Tritium eine ausreichende Statistik zu erhalten. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Elektronenschalenkonfiguration, die Korrekturen, z.B. für Energieverluste der emittierten Elektronen, vereinfacht. Außerdem handelt es sich beim Tritiumzerfall um einen übererlaubten Übergang, bei dem sich Spineinstellung und Parität nicht ändern.



Abbildung 3.3: Ein <sup>3</sup>H-Kern zerfällt in einen <sup>3</sup>He-Kern, wobei ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino emittiert werden.

#### 3.1. KATRIN

Das Tritiumgas befindet sich in einem zehn Meter langen Rohr, in das es in der Mitte unter einem Druck von  $3, 4 \cdot 10^{-3}$  mbar eingelassen und an den Seiten wieder abgepumpt wird (Abb. 3.4). Es wird ständig in einem Kreislauf befördert. Die Dichte wird so gewählt, dass sie einerseits groß genug ist, um eine hohe Zählrate zu erreichen, aber andererseits nicht zu groß ist, so dass die Elektronen möglichst wenig Energieverluste durch Stöße innerhalb der Quelle erleiden.

Eine wesentliche Herausforderung ist die Tritiumquelle auf einer konstanten Temperatur zu halten, da die Dichte der Gassäule und damit die Anzahl der beim Zerfall entstandenen Elektronen sehr stark von der Temperatur abhängt. Es sollte eine Temperatur von 27 K mit Schwankungen von maximal 30 mK herrschen. Ei-



Abbildung 3.4: Schematische Darstellung der WGTS [Hab06].

ne weitere Herausforderung ist, Tritiumgas in genügend großen Mengen und mit einer Reinheit von mindestens 95 % bereit zu stellen. Dies kann europaweit momentan nur vom Tritiumlabor im Forschungszentrum Karsruhe realisiert werden und ist einer der Gründe, warum das Experiment in Karlsruhe aufgebaut wird.

#### Das Transportsystem

Im Transportsystem werden Elektronen, die beim Tritiumzerfall in der Quelle entstehen, entlang magnetischer Feldlinien, die durch supraleitende Magnete mit der Feldstärke von 3,6 Tesla erzeugt werden, zum Vorspektrometer geführt. Um zu verhindern, dass Tritiummoleküle



Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Transportsystems [Eic05].

in das Vorspektrometer gelangen und somit zu einer Erhöhung des Untergrunds führen<sup>1</sup>, werden auf der Strecke mehrere Turbomolekularpumpen mit einer Gesamtleistung von 12000 l/s angeschlossen. Durch DPS2-F-Block wird der Tritiumanteil um einen Faktor  $10^5$  reduziert. Mit dem Einbau von Kryofallen (CPS) ist es möglich den Anteil weiter um einen Faktor  $10^7$  zu verringern. Dafür wird die Wegstrecke nicht gradlinig gebaut, sondern mit Biegungen versehen. Während die Elektronen aufgrund ihrer Ladung entlang der magnetischen Feldlinien der Wegstrecke folgen, bewegen sich die Tritiumatome geradeaus, bis sie auf die 4,5 K [Stu07] kalten Wände der CPS treffen und dort adsorbiert werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Tritiummoleküle im Vorspektrometer können dort zerfallen und somit den Untergrund erhöhen. Die Obergrenze für die Aktivität dieser Zerfälle sollte den Wert von  $10^{-3}$  Ereignissen pro Sekunde nicht überschreiten [KAT04].

#### Das Vorspektrometer

Man kann das Vorspektrometer, das 3,4 m lang ist und einen Durchmesser von 1,7 m hat, als Prototyp des Hauptspektrometers bezeichnen, siehe Abb. 3.6. Die Aufgabe des Vorspektrometers ist es, als Vorfilter nichtrelevante niederenergetischste Elektronen auszusortieren. Um zum Hauptspektrometer zu gelangen, müssen Elektronen im Vorspektrometer eine Potentialbarriere von etwa 18,4 keV überwinden. Hierbei ist nur eine moderate Energieauflösung



Abbildung 3.6: Das Vorspektrometer.

von etwa 100 eV nötig. Um die Ionisation von Restgas durch Elektronen zu reduzieren, wird ein Vakuum von weniger als  $10^{-11}$  mbar benötigt. Das Vorspektrometer steht bereits seit 2003 im Forschungszentrum Karlsruhe zur Verfügung. Seitdem laufen dort Tests, wie z.B. Messungen der Transmissionsfunktion oder die Bestimmung der Leck- und der Ausgasrate. Das Kühl-Heiz-System wird ebenfalls getestet. Dabei wird ein spezielles Öl, das um das Spektrometer herum zirkuliert, durch Wärmeübertragung den Tank auf Temperaturwerte im Bereich von -20 °C bis 230 °C bringen. Mit Hilfe weiterer elektrischer Heizungen können höhere Temperaturwerte bis etwa 350 °C erreicht werden.

#### **Das Hauptspektrometer**

Das Hauptspektrometer, das bei der Firma DWE in Deggendorf gebaut wurde, ist mit seiner Länge von 23 m und einen Durchmesser von  $10~{\rm m}$ die wichtigste Komponente des KATRIN Experiments (Abb. 3.7). Wie auch das Vorspektrometer besteht es aus dem nichtmagnetischen Edelstahl 1.4429 (316LN). Eine große Herausforderung ist bei einem Volumen von etwa 1250  $m^3$ einen Druck von weniger als  $10^{-11}$  mbar zu erreichen. Um diese Anforderung zu erfüllen,



Abbildung 3.7: Das Hauptspektrometer.

werden SAES NEC Getterpumpen, sowie 12 Turbomolekularpumpen mit einem Gesamtsaug-

#### 3.2. DRAHTELEKTRODE

vermögen von ca.  $10^5$  l/s eingesetzt.

Das Hauptspektrometer funktioniert nach dem Prinzip des MAC-E-Filters (Kap. 2.2). Die energiereichsten Elektronen, welche die Gegenspannung im Vorspektrometer überwunden haben, werden im Hauptspektrometer noch einmal nach Energien selektiert.

Um die Energie der Elektronen möglichst genau messen zu können, muss die an das Hauptspektrometer angelegte Spannung von ca. 18,6 keV während eines mehrjährigen Zeitraums der Datenaufnahme stabil bleiben. Zur Überwachung der Retardierungsspannung wird ein Messaufbau mit einer Genauigkeit und Stabilität im ppm-Bereich benötigt. Da kommerziell kein Gerät erhältlich ist, das solche hohe Spannungen genau messen kann, wurde an der Universität Münster im Rahmen der Doktorarbeit von Thomas Thümmler ein hochpräziser Spannungsteiler entwickelt. Dieser ermöglicht eine Messgenauigkeit und Langzeitstabilität im sub-ppm-Bereich [Thü06]. Zusätzlich wird parallel zum Hauptspektrometer ein Monitorspektrometer<sup>2</sup> an die gleiche Hochspannungsquelle angeschlossen. Mit diesem Monitorspektrometer wird als natürlicher Standard eine <sup>83m</sup>Kr-Kalibrationsquelle vermessen. Man beobachtet die natürliche K32-Linie der Konversionselektronen mit einer Energie von 17,8 keV im Energiespektrum. Aus der Position der Linie schließt man auf die an das Spektrometer anliegende Spannung, die mit Hilfe des Spannungsteilers auf eine Spannung im Bereich von 0 V bis 10 V skaliert wird. Diese kann dann mit modernen Geräten mit hoher Präzession vermessen werden.

#### Der Detektor

Die Elektronen, die im Haupspektrometer die Analysierebene passiert haben, werden wieder beschleunigt und zum Detektor geleitet. Hierbei kommt ein segmentierter Siliziumdetektor mit einer hohen Nachweiseffizienz für niederenergetische Elektronen zum Einsatz. Die Energieauflösung für Elektronen, die den Detektor mit einer Energie von 18,6 keV treffen, beträgt ca. 600 eV. Für eine gute Ortsauflösung wird der Detektor in bis zu 150 Segmente geteilt. Zur Reduktion von Untergrundereignissen muss der Detektor gegen kosmische Strahlung abgeschirmt werden.

### 3.2 Drahtelektrode

Um das Eindringen von Elektronen, die aufgrund der kosmischen Strahlung oder radioaktiver Verunreinigungen des Tankmaterials aus der Tankoberfläche emittiert werden, in das Spektrometer zu verhindern, wird das gesamte Spektrometer von innen mit einer zweilagigen Drahtelektrode ausgekleidet. Diese ist modular aufgebaut und besteht aus insgesamt 240 Modulen (Abb. 3.8). Im zylindrischen Teil des Tanks werden ringweise fünf Reihen mit jeweils 20 Modulen eingebaut. Alle 100 hier eingebauten Module sind identisch aufgebaut. Die Entwicklung und der Aufbau eines Prototypen für ein solches Modul war das Ziel dieser Arbeit und wird im Kapitel 4 ausführlich beschrieben. In an den zylindrischen Teil des Spektrometers anschließenden konischen Teilen werden drei Reihen mit jeweils

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Als Monitorspektrometer dient das früher im Mainzer Experiment eingesetzte Spektrometer.

ebenfalls 20 Modulen auf jeder Seite des Spektrometers montiert. In den darauf folgenden kleinen Konusteilen wird auf jeder Seite nur eine Reihe mit 10 Modulen sowie eine Vollmetallelektrode eingebaut.

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, werden pro Modul zwei Drahtlagen aufgespannt. Im ursprünglichen Design war vorgesehen Draht mit einem Durchmesser 0,5 mm für die erste Lage und mit dem Durchmesser 0,15 mm für die zweite Lage zu benutzen. Leider stellte sich heraus, dass der 0,15 mm-Draht schon bei ca. 13 N aus der Keramik, die den Draht hält, herausrutscht. Da z.B. beim Transportieren oder beim Einbau im Hauptspektrometer das Modul unerwünschten Verformungen ausgesetzt werden kann, wurde entschieden, für die zweite Lage einen 0,2 mm-Draht zu benutzen, der bis etwa 30 N in der Keramik festsitzt.

Weiterhin wurde, um weniger Masse und Oberfläche ins Spektrometer einzubringen und so den Untergrund niedrig zu halten, der 0,5 mm-Draht durch Draht mit einem Durchmesser von 0,3 mm ersetzt. Dies hat auch den Vorteil, dass sich dünnerer Draht aufgrund seiner geringeren Masse bei glei-



Abbildung 3.8: Die Abbildung zeigt schematisch die Aufteilung des Hauptspektrometers für die Elektrodenmodule (Zeichnung von H.-W. Ortjohann).

cher Spannung weniger durchbiegt. Andererseits führt dies nach Gleichung (2.26) zur Reduzierung des elektrischen Abschirmfaktors, was unerwünscht ist. Um das zu vermeiden, wurde der Abstand zwischen den beiden Drahtlagen von zunächst geplanten 50 mm auf 70 mm vergrößert.

## Kapitel 4

# Design und Tests des Drahtmodulprototyps

Ein wesentliches Ziel dieser Diplomarbeit bestand im Aufbau von Prototypmodulen für die Drahtelektrode des KATRIN Hauptspektrometers. Im diesem Kapitel werden Entwicklung und Bau eines Prototypmoduls für den zylindrischen Teil des Spektrometers, sowie anschließende Tests beschrieben.

## 4.1 Design eines Drahtmoduls für den Zentralteil des Spektrometers

Wie in Kapitel 3.2 schon erwähnt, besteht die Drahtelektrode für das Hauptspektrometer aus 240 Modulen. Abb. 4.1 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Moduls für den Zylinderteil. Es besteht aus zwei Kämmen, vier C-Profilen, 120 Drähten und 240 Keramikisolatoren. Die technischen Zeichnungen befinden sich in Anhang A. Die beiden Kämme, die sich in einem Abstand von ca. 180 cm voneinander befinden, spannen zwei Drahtlagen mit jeweils 60 Drähten auf. Innerhalb einer Drahtlage beträgt der Abstand *s* zwischen den Drähten etwa 25 mm. Die Drähte der ersten (äußeren) Lage haben einen Durchmesser von  $d_1 = 0,3$  mm und der zweiten (inneren) Lage  $d_2 = 0,2$  mm. Die erste Drahtschicht ist 150 mm von der Tankwand entfernt. Der Abstand zwischen den beiden Drahtlagen beträgt 70 mm. Das Modul wird stabilisiert, indem man die Kämme mit den C-Profilen verschraubt. Dazu besitzt jedes C-Profil an beiden Enden speziell angefertigte Endstücke. Man könnte an Stelle von C-Profilen runde Edelstahlstäbe benutzen. Der Nachteil wäre ein wesentliches höheres Gewicht. Das Modul sollte nicht schwerer als ca. 20 kg sein, damit es von zwei Personen gehandhabt werden kann. [Val05a]. Die C-Profile bieten sich an, da sie leicht sind und gleichzeitig eine gute Stabilität liefern.

Um die Drähte aufspannen zu können, werden in jedem Kamm 120 Bohrungen für Keramikisolatoren vorgesehen, welche einerseits die Drähte festhalten und andererseits als



Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines Moduls.

Isolatoren dienen. Das ermöglicht, die Drahtlagen und die Haltestruktur auf unterschiedliche elektrische Potentiale zu legen.

Die Keramikisolatoren sind zylinderförmig mit einem Durchmesser von 2 mm und einer Länge von 2,5 mm. Für die Befestigung des Drahtes werden zwei Bohrungen in der Keramik benötigt.

Die von uns verwandten Keramiken entstammen einer Standardproduktion und besitzen sechs Borungen von je 0,4 mm Durchmesser. Aus vakuumtechnischer Sicht sind die zusätliche Bohrungen nachteilig, da sie eine zusätzliche Oberfläche darstellen. Bei insgesammt mehr als 50000 benötigten Keramiken wäre aber eine Spezialanfertigung der Keramikisolatoren nicht finanzierbar gewesen. Die Abb. 4.2 zeigt, wie die Drähte mit der Keramik festgehalten werden. Zunächst wird der Draht durch das mittlere Loch durchgeführt, dann mit einer dafür speziell entwickelten Biegemaschine um 180° gebogen und anschließend wieder in eine der restlichen 5 Bohrungen eingeführt. Diese Methode der Befestigung hat sich als sicher genug erwiesen. Wie unsere Messungen gezeigt haben, wird der 0,2 mm Draht bis etwa 30 N und der 0,3 mm Draht bis etwa 75 N festgehalten.

Aufgrund der Größe wird für das Zusammenbauen des Moduls ein Gestell benötigt, dessen Grundkomponenten vier Standfüße, zwei Längsträger mit einer Länge von über zwei Metern und zwei entlang der Längsträger verschiebbare Querträger bilden.



Abbildung 4.2: Befestigung der Drähte mit Hilfe einer Keramikkapillare.
## 4.2 Eigenschaften der Drähte

Die für Prototyptests eingesetzten Edelstahldrähte des Werkstoffs 1.4404 (316L) wurden in unterschiedlichen Durchmessern und Qualitäten hauptsächlich von der Firma "Vogelsang" aus Hagen geliefert. Mit diesen wurden unterschiedliche Tests durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden, um ihre Eigenschaften in Bezug auf die Vorgaben des KATRIN Experiments zu überprüfen.

#### 4.2.1 Optische Untersuchung der Drahtoberfläche

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Drahtes ist die Oberflächenqualität. Gibt es an der Drahtoberfläche scharfe Spitzen, so entstehen lokal sehr hohe elektrische Felder, da die elektrische Feldstärke proportional zu 1/r ist. Dies könnte zur Feldemission von Elektronen und damit zur Erhöhung des Untergrunds führen. Aus diesem Grund wurden verschiedene Drahtproben unter dem Lichtmikroskop untersucht. Dabei wurden ein 8-fach vergrößerndes Okular und ein 16-fach vergrößerndes Objektiv benutzt. Somit wurden die Oberflächen mit 8.16=128-facher Vergrößerung untersucht. Als erster Kandidat wurde der Edelstahldraht untersucht, der bereits bei der Drahtelektrode des Vorspektrometers benutzt wurde. Dieser Draht mit Durchmesser d = 0.5 mm kommt aus den USA von der Firma "California Fine Wire Company" und wurde nach einem speziellen Prozess ("ultra finish") hergestellt [CFW]. Die Abbildung 4.4(a) zeigt Fotos der Drahtoberfläche. Eine Vergleichsskala (0,1 mm) in jedem Bild bietet die Möglichkeit der Abschätzung der Dimensionen.

Zum Vergleich wurden andere Drahtproben eines Edelstahldrahtes desselben Werkstoffs von der Firma "Vogelsang" [Vogel] aus Hagen untersucht, dessen Ober-



Abbildung 4.3: Aufbau zur Untersuchung der Drahtoberfläche. Verwendet wird ein Lichtmikroskop mit 128-facher Vergrößerung und einer aufgesetzten Digitalkamera.

fläche in der Abb. 4.4(b) zu sehen ist. Es fällt auf, dass der Draht der Fa. Vogelsang deutlichere Riefen vom Ziehprozess aufweist als der "ultra finish"-Draht. Abgesehen davon sind keine signifikanten Qualitätsunterschiede sichtbar. Insbesondere was die Anzahl von Kratzern oder mikroskopischen Kratern auf der Drahtoberfläche betrifft, ist kein Vorteil der "ultra finish"-Behandlung erkennbar. Es bleibt zu bedenken, dass die Oberflächenqualität stark vom Zustand des verwandten Ziehsteins abhängt und daher zwischen verschiedenen Lieferungen schwanken kann. Außerdem ist zu beachten, dass die Oberfläche nur stichprobenartig untersucht wurde und man mit Unterschieden in der Qualität entlang des Drahtes



(a) Die Oberfläche des "ultra finish" Edelstahldrahtes 1.4404 (316L) der Firma "California Fine Wire".

(b) Die Oberfläche des Edelstahldrahtes 1.4404 (316L) der Firma "Vogelsang" aus Hagen.

Abbildung 4.4: Mikroskopaufnahmen der Drahtoberflächen. Die Länge der Skala entspricht 0,1 mm.

rechnen muss. Aus Kosten- und Lieferzeitgründen wurde entschieden, den Edelstahldraht von der Firma "Vogelsang" zu benutzen. Alle nachfolgenden Messungen wurden mit diesem Draht durchgeführt.

#### 4.2.2 Elastizität und ihre Grenzen

Es stellt sich die Frage, wie stark die Drähte im Modul gespannt werden sollen. Um den Durchhang aufgrund des Eigengewichtes der Drähte gering zu halten, möchte man die Drähte möglichst stark spannen. Dies führt jedoch zu einem anderen Problem: Wie man weiß, verformen sich alle Körper, wenn auf sie Kräfte ausgeübt werden. Bei den Metallen gibt es den sogenannten "elastischen Bereich", in dem sich der Draht nach dem Hookeschen Gesetz verhält:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \tag{4.1}$$

dabei ist die relative Längenänderung  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  proportional zur anliegenden Spannung  $\sigma = \frac{F}{A}$ , also der Kraft F pro Querschnittsfläche A. Der Proportionalitätsfaktor E ist eine Materialkonstante und wird Elastizitätsmodul genannt.

Spannt man die Drähte zu stark, so besteht einerseits die Gefahr, dass man den elastischen Bereich verlässt und die Drähte permanent verformt werden, andererseits wird der Modulrahmen zu stark verformt, da die auf ihn wirkende Gesamtkraft der 120 Drähte zu groß ist. Daher muss man einen Kompromiss wählen. Zunächst wurde der elastische Bereich der Drähte experimentell bestimmt. Dazu wurden Drähte mit dem Durchmesser von 0,2 mm und 0,3 mm bei einer Länge von ca. 180 cm auf einem Messtisch aufgespannt. Zunächst wurde der Draht mit der Keramik an einem Ende des Messtisches befestigt. Das andere Drahtende wurde an einem Kraftmessgerät fixiert, das die beim Spannen angewandte Kraft misst. Dieses kann bis zu Kräften von 200 Newton eingesetzt werden, was für uns völlig ausreichend ist. Beim Kraftmessgerät handelt es sich um die von der Firma "Weiss Robotics" hergestellte Wägezelle "WRC-01 USB". Diese ist ausgestattet mit einem hochintegrierten Messverstärker für Kraftmesswandler und Platin-Widerstandsthermometer, der direkt mit dem USB-Port eines Computers verbunden ist. Direkt neben der Wägezelle befindet sich eine mechanische Messvorrichtung, die mit der Genauigkeit 1/100 mm die Längenänderung  $\Delta l$  des Drahts anzeigt. Mit diesem Aufbau wurde die absolute Längenänderung  $\Delta l$  gegen die Kraft F gemessen. Der Nullpunkt des Durchhangs wurde bei einer Kraft von 1 N gesetzt. Die Tabellen und die dazu gehörigen Diagramme befinden sich im Anhang B. Um das elastische Verhalten beider Drähte besser miteinander vergleichen zu können, ist es sinnvoll ein Diagramm zu erstellen, in der die **Spannung**  $\sigma = \frac{F}{A}$  gegen die absolute Längenänderung aufgetragen ist, siehe Abb. 4.5. Man erkennt im Diagramm, dass sich die Längenänderung gegenüber der Spannung zunächst linear verhält und zu großen Kräften immer mehr von der Linearität abweicht. Es wurde eine Gerade an die Daten angepasst. Es ergibt sich:

$$\emptyset \ 0, 3 \ \text{mm} : \Delta l(\sigma) = \sigma \cdot (0,01092 \pm 0,00002) \ \frac{\text{mm}^3}{\text{N}} - (0,163 \pm 0,005) \ \text{mm}$$
$$\emptyset \ 0, 2 \ \text{mm} : \Delta l(\sigma) = \sigma \cdot (0,01088 \pm 0,00001) \ \frac{\text{mm}^3}{\text{N}} - (0,354 \pm 0,003) \ \text{mm}$$
(4.2)

Setzt man die Querschnittsfläche der Drähte in die Formel (4.2) ein, so bekommt man folgenden Zusammenhang zwischen der Längenänderung und der Kraft:

$$\emptyset \ 0, 3 \ \text{mm} : \Delta l(F) = F \cdot (0, 1544 \pm 0, 0003) \ \frac{\text{mm}}{\text{N}} - (0, 163 \pm 0, 005) \ \text{mm}$$
  
$$\emptyset \ 0, 2 \ \text{mm} : \Delta l(F) = F \cdot (0, 3463 \pm 0, 0003) \ \frac{\text{mm}}{\text{N}} - (0, 354 \pm 0, 003) \ \text{mm}$$
(4.3)



Abbildung 4.5: Die Bestimmung des Elastizitätsbereichs der Drähte. Aufgetragen ist die Längenänderung gegen die mechanische Spannung. Sichtbare Abweichungen von einem linearen Zusammenhang treten ab einer Spannung von ca. 400 N/mm<sup>2</sup> auf, wodurch sich der elastische Bereich festlegen lässt.

Um den elastischen Bereich besser abschätzen zu können, wird für den jeweiligen Drahtdurchmesser die Abweichung von der Linearität, also die Differenz der beiden Graphen

#### 4.2. EIGENSCHAFTEN DER DRÄHTE

dl gebildet, siehe Abb. 4.6. Der elastische Bereich erstreckt sich bis etwa 400 N/mm<sup>2</sup>. Umgerechnet auf die Kraft bedeutet dies, dass der 0,2 mm Draht bei einer Kraft bis 13 N und der 0,3 mm Draht bis 28 N im elastischen Bereich bleiben.



Abbildung 4.6: Für die Abschätzung des elastischen Bereiches ist die Darstellung der Abweichung von der Linearität sinnvoll.

## 4.2.3 Durchhang

Eine wichtige Frage ist wie stark die Drähte aufgrund der Erdanziehung durchhängen. Idealerweise sind die Drähte masselos, gerade und parallel zur Wandfläche aufgespannt. In der Realität ist der Abstand zwischen der Tankwand und den Drahtlagen an unterschiedlichen Positionen im Tank aufgrund der Gravitation verschieden groß; an der Oberseite größer und an der Unterseite geringer. Der nicht konstante Abstand führt dazu, dass das Potential nicht rotationssymmetrisch ist und somit die Transmissionsfunktion an Orten mit demselben Radius eine Abhängigkeit vom Azimutwinkel aufweist. Es ist daher wichtig die Toleranzen der Drahtposition zu kennen, sowie die Spannung entsprechend einstellen zu können.

Aus diesem Grund wurde der Durchhang des Drahtes in Abhängigkeit von der Drahtspannung gemessen. In der Mitte des Drahtes ist die Durchbiegung maximal. Es besteht folgender Zusammenhang zwischen der Durchbiegung  $\Delta y$  und der Kraft F, mit der der Draht gespannt ist [Pla05]:

$$\Delta y = \frac{\rho A l^2 g}{8 F},\tag{4.4}$$

wobei folgende Bezeichnungen gelten:

- $\rho$  : Dichte des Materials,
- A : Querschnittfläche des Drahtes,
- l : Drahtlänge,
- g : Erdbeschleunigung

Für die von uns verwandten Drähte ( $\rho$ =7,98 kg/dm<sup>3</sup>, l=180 cm) ergibt sich nach (4.4) eine theoretische Durchbiegung von

$$\emptyset 0, 3 \text{ mm} : \Delta y(F) = \frac{1}{F} \cdot 0,996 \text{ mm N},$$
  
 $\emptyset 0, 2 \text{ mm} : \Delta y(F) = \frac{1}{F} \cdot 2,241 \text{ mm N}.$  (4.5)

Ähnlich dem Aufbau für die Bestimmung des elastischen Bereiches ist ein Drahtende in einem Keramikisolator an einem Ende des Messtisches befestigt, während das andere Ende an dem Kraftmessgerät befestigt wird. Der Draht hat ebenfalls eine Länge von 180 cm. An der Position der Drahtmitte ist ein Mikroskop angebracht, welches über eine Mikrometerschraube senkrecht zum Draht nach oben und nach unten bewegt werden kann (Abb. 4.7). Das Okular des Mikroskops hat ein Fadenkreuz, das auf die Mitte des Drahtes ausgerichtet wird. Nach der Variation der Drahtspannung, was zu einer Änderung im Durchhang führt, wird die Position des Fadenkreuzes nachjustiert. Die Ergebnisse der Messung sind in Abb. 4.8 gezeigt,



Abbildung 4.7: Die Bestimmung der Drahtdurchbiegung mit Hilfe des Mikroskops.

wobei als Fehler  $\pm 0, 5$  N und  $\pm 0, 01$  mm angegeben werden können. Die dazu gehörigen Tabellen befinden sich im Anhang C. Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen dem Durchhang  $\Delta y$  und der Kraft F:

$$\emptyset \ 0,3 \ \text{mm} : \ \Delta y(F) = (1,168 \pm 0,001) \ \text{mm} - \frac{1}{F} \cdot (1,49 \pm 0,01) \ \text{mm N}$$
  
$$\emptyset \ 0,2 \ \text{mm} : \ \Delta y(F) = (1,125 \pm 0,011) \ \text{mm} - \frac{1}{F} \cdot (0,65 \pm 0,06) \ \text{mm N}$$
 (4.6)

34



(b) Der Durchhang des Drahtes mit 0,2 mm Durchmesser.

Abbildung 4.8: Aufgetragen ist der Durchhang der Drähte in Abhängigkeit von der Kraft. Der Nullpunkt des Durchhangs ergibt sich aus der Asymptote der Durchbiegung für große Drahtspannung.

Die beiden kraftunabhängigen Konstanten sind justagebedingt und bedeutungslos. Die beiden  $\frac{1}{F}$ -proportionalen Konstanten stimmen im Rahmen der Fehler nicht mit den Ergebnissen (4.5) überein. Die großen Abweichungen kommen vermutlich daher zustande, dass die Formel (4.4) nur näherungsweise für sehr dünne Fäden gilt, die keinen Widerstand (wie z.B. Torsion oder Scherung) gegen den Durchhang leisten.

Mit Hilfe von Simulationen des Feldverlaufs im KATRIN Hauptspektrometer wurde eine erste, konservative Abschätzung der benötigten Positionierungsgenauigkeit der Module des Elektrodensystems vorgenommen [Val05b]. Hieraus ergibt sich im zentralen Teil des Spektrometers eine Toleranz für die Drahtpositionierung von  $\pm 0,2$  mm. Um die geforderte Toleranz einzuhalten, wurde entschieden, den 0,3 mm Draht mit 10 N im Modul zu spannen. Damit hängt er in seiner Mitte um 0,16 mm durch. Der 0,2 mm Draht sollte mit 5 N aufgespannt werden, was einem Durchhang von 0,13 mm entspricht. Wie man Diagramm 4.5 entnehmen kann, befinden sich die Drähte bei diesen Kräften noch sicher im elastischen Bereich.

#### 4.2.4 Radioaktivitätsmessung

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die im Modul verwandten Drähte eine geringe Radioaktivität aufweisen sollten<sup>1,2</sup>, da man sonst einen erhöhten Untergrund misst. Dies würde die Messung des Endpunktes des Spektrums verschlechtern, da in diesem Bereich das Signal- zu Rausch-Verhältnis ohnehin schon besonders kritisch ist. Wichtige Kandidaten für  $\beta$ -Emitter sind  ${}^{137}_{55}$ Cs und  ${}^{60}_{27}$ Co. Diese zerfallen zu 100% nach  ${}^{137}_{56}$ Ba bzw.  ${}^{60}_{28}$ Ni. Nach dem Zerfall des Cäsiums entsteht ein angeregter Zustand des Bariums, der unter Ausstrahlung eines 661,7 keV-Photons in den Grundzustand übergeht (Abb. 4.9(a)). Zerfällt Kobalt, so entsteht der angeregte Zustand von Nickel, der hauptsächlich über Emission von zwei Photonen mit Energien von 1173,2 keV und 1332,5 keV in den Grundzustand übergeht (Abb. 4.9(b)). Somit kann man diese Photonen als Indikatoren für die oben genannten  $\beta$ -Zerfälle interpretieren und zur Messung der Aktivität nutzen. Natürlich gibt es auch andere Zerfallsprozesse, die berücksichtigt werden sollen. Um eine Aussage über die Aktivität der Drähte machen zu können, wurde das  $\gamma$ -Spektrum im Energieintervall von 0 bis 1800 keV aufgenommen.

In Abbildung 4.10 ist der Messaufbau dargestellt. Um den Detektor wird mit Hilfe von Bleiziegeln eine Abschirmung aufgebaut. Die Wanddicke beträgt ca. 10 cm, während Boden und Dach jeweils ca. 5 cm dick sind. Das Dach enthält zusätzlich eine ca. 1 cm dicke Eisenplatte. Innerhalb der Abschirmung wurde eine Spule des Edelstahldrahtes 1.4404 (316L) der Firma "Vogelsang" platziert. Die Spule wiegt 2,3 kg, ist 10 cm lang und hat einen Durchmesser von 11 cm. Rechts von der Spule in einem Abstand von 2,5 cm ist der

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Die  $\beta^-$ -Emitter sind dabei am kritischsten, da sie aufgrund höheren lokalen Ionisationsdichte Sekundärelektronen auslösen können, welche möglicherweise zum Detektor gelangen und nicht von den Tritium-Elektronen unterschieden werden können.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Die Obergrenze für die spezifische Aktivität des Spektrometermaterials beträgt 0,4 Bq/kg für  $^{137}_{55}$ Cs und 2 Bq/kg für  $^{60}_{27}$ Co [Dra02].



(c) Die Zerfallschema von  $^{22}_{11}\mathrm{Na.}$ 

Abbildung 4.9: Die Zerfallschemata der relevanten radioaktiven Isotope [Nudat].

Detektor zu erkennen, mit dem die Spektren vermessen werden. Es handelt sich um einen Germaniumdetektor, der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Direkt am Detektor befindet sich der Vorverstärker, der mitgekühlt wird, um sein Eigenrauschen zu reduzieren.

Die Dimensionen des Detektors betragen: Durchmesser ca. 5 cm und Länge ca. 4 cm. Damit ergibt sich ein Gesamtvolumen von ca. 80 cm<sup>3</sup>. Der Detektor wurde mit einer Sperrspannung von U = 2000 V betrieben. Es konnten keine erkennbaren Änderungen im Energiespektrum festgestellt werden, wenn man die Spannung weiter erhöht hat. Dieser Wert ist also ausreichend groß, um die nötige Sperrschichtdicke, die proportional zu  $\sqrt{U}$  ist, zu erzeugen. Bevor die eigentliche Messung stattfinden kann, muss der Detektor geeicht werden. Dazu wurden zwei Eichquellen benutzt:  $^{60}_{27}$ Co, das Photonen von 1173,2 keV und 1332,5 keV liefert (Abb. 4.9(b)) und  $^{22}_{11}\mathrm{Na^3},$  das Photonen von 551 keV und 1274,6 keV liefert (Abb. 4.9(c)). Die Abbildung 4.11(a) zeigt das Eichspektrum. Die Breite der gemessenen Linien beträgt etwa 3 keV. Da die Linienbreite der Übergänge vernachlässigbar klein ist, lässt sich die Auflösung des Detektors auf etwa 3 keV abschätzen. Außerdem erkennt man die zugehörigen Compton-Kanten. Die Energiewerte der beobachteten Linien wurden in Abhängigkeit von der Kanalnummer aufgetragen und es wurde ein linearer Zusammenhang angepasst<sup>4</sup> (Abb. 4.11(b)). Es ergibt sich folgender Zusammenhang:



Abbildung 4.10: Der Messaufbau zur Abschätzung der Eigenradioaktivität des Drahtmaterials.

$$y = x \cdot (0,43799 \pm 0,00005) \text{ keV} - (1,9 \pm 0,1) \text{ keV}$$
 (4.7)

wobei y den Energiewert in keV angibt und x für die Kanalnummer steht. Die nachfolgenden Radioaktivitätsmessungen wurden mit Hilfe dieser Eichung ausgewertet. Zunächst wurde ohne Drahtspule das Untergrundspektrum ca. 68 Stunden lang aufgenommen. Die anschließende Radioaktivitätsmessung mit Draht hat ca. 49 Stunden gedauert. Abbildung 4.12 zeigt die beiden aufgenommenen Spektren, wobei das Drahtspektrum zunächst auf die Messdauer von 68 Stunden hochskaliert wurde. Um die Radioaktivität der Drähte zu bestimmen, muss das Untergrundspektrum vom Drahtspektrum subtrahiert werden. Gesucht wurde vor allem nach Hinweisen auf  $\frac{137}{55}$ Cs und  $\frac{60}{27}$ Co; also bei Energien von 661,7

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Das Element <sup>22</sup><sub>11</sub>Na ist ein Strahler, der zu 99,94% in den angeregten Kernzustand von <sup>22</sup><sub>10</sub>Ne übergeht. Das im  $\beta^+$ -Prozess (90,5%) emittierte Positron annihiliert mit einem Elektron, wobei zwei 511 keV-Photonen entstehen. Die 1274,6 keV-Linie entsteht, wenn der angeregte <sup>22</sup><sub>10</sub>Ne-Zustand in den Grundzustand übergeht.

 $<sup>^4\</sup>mathrm{Die}$  Diagramme zur genauen Bestimmung der Linienpositionen befinden sich im Anhang D auf der Seite 88.



(a) Das mit Hilfe von  $^{22}_{11}$ Na und  $^{60}_{27}$ Co aufgenommene Eichspektrum.



Abbildung 4.11: In Bild (a) ist das zur Detektorkalibrierung aufgenommene Eichspektrum zusehen, während Bild (b) die daraus resultierende Eichkurve zeigt.

keV, 1173,2 keV und 1332,5 keV. An der Position der erwarteten  $^{60}_{27}$ Co-Linien wurden im Energiespektrum keine Erhöhungen der Zählrate feststellt, während die  $^{137}_{55}$ Cs-Linie erkennbar ist, da sie eine natürliche Untergrundlinie ist (Abb. 4.14). Das Differenzspektrum (Abb. 4.13) ergibt aber bei keiner der gemessenen Linien eine signifikante Erhöhung für die Messung mit Drahtspule. Wie man auf den Spektren erkennt, sind die Linien einiger Elemente bei der Untergrundmessung sogar höher als bei der Messung mit dem Draht. Da die Drahtspule ziemlich nah am Detektor lag, hat sie neben einer Eigenaktivität mögli-



Abbildung 4.12: Die gemessenen Energiespektren mit und ohne Drahtspule.

cherweise auch eine abschirmende Wirkung, was zu einer niedrigeren Zählrate führen kann. Für uns ist es von großer Bedeutung die Obergrenzen für die spezifische Aktivitäten angeben zu können. Da für die Eichung des Detektors bereits  $^{60}_{27}$ Co benutzt wurde, wissen wir genau wo seine beiden Linien zu erwarten sind und wie breit die jeweiligen Linien sein sollten. Die Position und die Breite der  $^{137}_{55}$ Cs-Linie wurde aus der Eichung des Drahtspektrums entnommen. Für die Bestimmung der Zählraten wurde ein  $\pm 2\sigma$ -Fenster<sup>5</sup> um die Linienposition benutzt:

$$661, 77 \text{ keV} \pm 3, 76 \text{ keV}$$

$$1173, 30 \text{ keV} \pm 2, 26 \text{ keV}$$

$$1332, 49 \text{ keV} \pm 2, 34 \text{ keV},$$

$$(4.8)$$

wobe<br/>i $\sigma$ die Standardabweichung der Gaußverteilung ist. Werden die in den oben genannten Energiefenstern ausgerechneten Zähraten der Untergrundmessung von den Zählraten der Radio<br/>aktivitätsmessung mit dem Draht subtrahiert, so ergibt sich:

$$661,77 \text{ keV} \Rightarrow \Delta N = (1909 \pm \sqrt{1909}) - (1897 \pm \sqrt{1897}) = (11 \pm 61,68)$$
  

$$1173,30 \text{ keV} \Rightarrow \Delta N = (576 \pm \sqrt{576}) - (543 \pm \sqrt{543}) = (33 \pm 33,45)$$
  

$$1332,49 \text{ keV} \Rightarrow \Delta N = (358 \pm \sqrt{358}) - (333 \pm \sqrt{333}) = (25 \pm 26,30)$$
(4.9)

<sup>5</sup>Bei Gaußverteilung beinhaltet ein  $\pm 2\sigma$ -Energieintervall 95% der gesamten Zählrate (95% C.L.).



Abbildung 4.13: Differenz der in Abb. 4.12 gezeigten Spektren.

Nach Feldman-Cousins ergeben sich mit 95% C.L. folgende Obergrenzen [Fel98]:

$$661,77 \text{ keV} \Rightarrow N_{up} = 132,0 \text{ counts}$$

$$1173,30 \text{ keV} \Rightarrow N_{up} = 99,0 \text{ counts}$$

$$1332,49 \text{ keV} \Rightarrow N_{up} = 76,5 \text{ counts}$$

$$(4.10)$$

Die spezifische Aktivität lässt sich nach folgender Formel ausrechnen:

$$A = \frac{N_{up}}{t \cdot m_D} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{4\pi}{\Delta\Omega} \cdot \frac{1}{c}$$
(4.11)

Die Dauer der Radioaktivitätsmessung beträgt t = 243612 s. Die Masse des auf die Spule gewickelten Drahtes beträgt  $m_D = 2,39$  kg. Die Photoeffizienz des Detektors  $\varepsilon$  ist energieabhängig und beträgt [Gam05]:

$$661,77 \text{ keV} \Rightarrow \varepsilon = 10,3 \pm 0,6 \%$$

$$1173,30 \text{ keV} \Rightarrow \varepsilon = 9 \pm 1 \%$$

$$1332,49 \text{ keV} \Rightarrow \varepsilon = 8,3 \pm 0,6 \%$$

$$(4.12)$$



Abbildung 4.14: In den gezeigten Energie<br/>intervallen erwartet man die  $^{137}_{55}$ Cs-Linie bei 662 keV (a) und  $^{60}_{27}$ Co-Linien bei 1173 keV (b) und 1332 keV (c).

#### 4.2. EIGENSCHAFTEN DER DRÄHTE

Der *c*-Faktor ist ein Korrekturfaktor des für die Zählrate gewählten Energieintervalls. Da in unserem Fall ein Energiefenster mit 95 % aller Peakereignisse benutzt wurde, beträgt er c = 0,95. Um den Raumwinkelanteil  $\frac{\Delta\Omega}{4\pi}$  auszurechnen, wurde ein Programm geschrieben (Anhang E). Berücksichtigt man nur die Geometrie des Versuchsaufbaus, beträgt der Raumwinkelanteil etwa 3,2 %. Unter Berücksichtigung der Absorptionslänge im Edel-

	$\lambda$ in Fe [mm]	$\lambda$ in Ge [mm]
$^{137}Cs \ (662 \ \text{keV})$	17	27
$^{60}$ Co (1173 keV)	22,9	$35,\!4$
$^{60}$ Co (1332 keV)	24,4	38

Tabelle 4.1: Die Absorptionslängen der Photonen im Eisen und Germanium.

 $\operatorname{stahl}^6$  und Germanium für die jeweilige Photonenenergie (Tabelle 4.1) ergibt sich für die drei verschiedenen Energien in etwa der gleiche Raumwinkelanteil:

$$661,77 \text{ keV} \Rightarrow \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = 0,01$$

$$1173,30 \text{ keV} \Rightarrow \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = 0,01$$

$$1332,49 \text{ keV} \Rightarrow \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = 0,01$$

$$(4.13)$$

Das Programm ist so ausgelegt, dass die Photonen erst nach Durchlaufen der mittleren freien Weglänge im Germaniumdetektor detektiert werden. Da die mittlere freie Weglänge der Photonen im Germanium mit der wachsenden Energie ansteigt, verlängert sich die Strecke zwischen der Drahtspule und Detektionsort. Dies führt zu dem kleineren Raumwinkelanteil. Da die mittlere freie Weglänge der Photonen im Edelstahl mit der wachsenden Energie ebenfalls ansteigt, wächst auch die Anzahl der im Detektor nachgewiesenen Photonen. Die beide Effekte heben sich in etwa weg. Das ist der Grund für die gleichen Ergebnisse in (4.13).

Setzt man alle Werte in die Formel (4.11) ein, so ergeben sich folgende Obergrenzen für die spezifische Aktivität:

$$A[^{137}Cs (661, 77 \text{ keV})] = 0,23 \text{ Bq kg}^{-1}$$

$$A[^{60}Co (1173, 30 \text{ keV})] = 0,20 \text{ Bq kg}^{-1}$$

$$A[^{60}Co (1332, 49 \text{ keV})] = 0,17 \text{ Bq kg}^{-1}$$
(4.14)

Die Ergebnisse sind im Bereich der angeforderter Aktivität des Spektrometermaterials  $(0,4 \text{ Bq/kg} \text{ für } {}^{137}_{55}\text{Cs} \text{ und } 2 \text{ Bq/kg} \text{ für } {}^{60}_{27}\text{Co} \text{ [Dra02]})$  und können aus dieser Sicht für die Drahtelektrode verwendet werden.

 $<sup>^6\</sup>mathrm{Da}$ der Edelstahl hauptsächlich aus Eisen besteht, wurde für die Berechnung die mittlere freie Weglänge in Eisen benutzt.

# 4.3 Prototyp-Fertigung

Im Folgenden soll die Fertigung eines Prototyps für die Drahtelektrodenmodule des zylindrischen Teils des KATRIN Hauptspektrometers beschrieben werden. Kurz zusammengefasst funktioniert der Aufbau folgendermaßen: Zunächst werden die beiden Kämme an beweglichen Querträgern eines Aluminiumprofilgestells befestigt und zueinander auf einen Abstand von ca. 150 cm gebracht. Danach werden genau abgelängte Drähte befestigt. Anschließend werden die Kämme auseinandergezogen und C-Profile dazwischen montiert. Durch diesen Schritt werden die vorher durchhängenden Drähte auf die nötige Spannung gebracht. Das fertige Modul ist in der Abb. 4.15 gezeigt.



Abbildung 4.15: Prototyp der Drahtelektrodenmodule für den Zentralteil des KATRIN Hauptspektrometers.

Das Bespannen der Kämme geht wie folgt vor sich: Zunächst wird an ein Drahtende nach dem in der Abb. 4.2 gezeigten Prinzip ein Keramikstück angebracht. Hier muss beachtet werden, dass alle Drahtenden an der gleichen Position gebogen werden, da sich sonst nicht die notwendige Drahtlänge ergibt. Schon sehr kleine Längenunterschiede haben große Auswirkungen auf die Drahtspannung (z.B. für  $\emptyset$  0,3 mm:  $\Delta x = 1 \text{ mm} \Longrightarrow \Delta F \approx 6,5 \text{ N}$ ). Um diese Anforderung zu erfüllen, wurde in der Werkstatt eine spezielle Biegeapparatur gebaut (Abb. 4.16(a)). Diese hat einen Hebel, der um senkrechte Achse beweglich ist.

#### 4.3. PROTOTYP-FERTIGUNG

Zunächst wird der Draht in eine Öffnung bis zum Anschlag eingeführt. Danach wird der Hebel um etwa 180° gedreht und somit der Draht gebogen. Die Größe der Öffnung kann mit Hilfe einer Schraube an den Drahtdurchmesser angepasst werden. Nachdem an einem Drahtende das Keramikstück angebracht ist, wird der Draht mit Hilfe einer an einem der Längsträger des Aluminiumprofilgestells angebrachten Apparatur unter Spannung auf die exakt benötigte Länge geschnitten. Dazu wird der Draht auf der einen Seite durch eine versenkte Bohrung in einem Balken gefädelt und von der zuvor befestigten Keramik gehalten. Das andere Drahtende wird an einer Wägezelle fixiert, die direkt an der Drahtablängvorrichtung angebracht ist. Zunächst hängt der Draht spiralförmig, da er vorher auf einer Spule aufgewickelt war. Deshalb wurde der Draht vorgespannt. Abgeschnitten werden die Drähte mit einer neben der Wägezelle angebauten Zange (Abb. 4.16(b)). Diese kann mit Hilfe einer Mikrometerschraube mit der Genauigkeit von 1/100 mm waagerecht entlang der Drahtrichtung bewegt werden, um die Drähte bei der notwendigen Länge abzuschneiden. Alle Drähte wurden bei einer Kraft von 7 N auf vorher berechnete Längen abgeschnitten, damit sie nach dem Einbauen im Modul mit 5 N in der oberen Schicht und mit 10 N in der unteren Schicht gespannt sind.



(a) Die Biegeapparatur.



(b) Die Drahtablenkvorrichtung mit der Wägezelle und die Zange.

Abbildung 4.16: Das Bild (a) zeigt die Biegeapparatur, mit der die Drahtenden gebogen werden. Das Bild (b) zeigt die Drahtablängvorrichtung, an die die Wägezelle für die Kraftmessung angebracht ist. Man erkennt auf dem Bild ebenfalls eine Zange, mit der die Drähte geschnitten werden.

Nach dem Abschneiden hat man somit einen Draht mit einer Keramik an einem seiner Enden. Das freie Ende wird durch die Bohrungen beider Kämme gefädelt. Nach diesem Schritt wird das andere Ende des Drahtes ebenfalls mit einer Keramik versehen. Wie im Balken sind auch in den Kämmen spezielle Bohrungen für die Keramikstücke (Abb. 4.17(a)). Nachdem alle Drähte plaziert sind, werden die Kämme auseinandergeschoben . Dabei muss beachtet werden, dass alle Keramiken in den Bohrungen sitzen (Abb. 4.17(b)), da sonst die Gefahr besteht, dass die Drähte überzogen werden. Anschließend werden die C-Profile zwischen den Kämmen eingebaut. Somit werden die Drähte mit der gewünschten Kraft aufgespannt, vorausgesetzt, sie wurden auf die richtige Länge geschnitten.



(a) Das Bild zeigt einen Zahn des Kammes. Man erkennt eine durchgehende Bohrung für den Draht sowie eine Bohrung für die Keramik.



(b) Das Bild zeigt einen Zahn des Kammes, in dem bereits ein Keramikstück festsitzt.

Abbildung 4.17: Die Abbildung zeigt einen Kammzahn (a) ohne und (b) mit Keramikstück.

Damit alle Drähte einer Lage auf dem gleichen elektrischen Potential liegen, müssen sie miteinander leitend verbunden werden.

Dies kann realisiert werden, indem man einen Draht quer verlegt, welcher durch die Ösen zwischen dem Drahtbogen und der Keramik läuft, s. Abb. 4.18. Die Kämme liegen im aktuellen Design auf dem Potential der ersten Lage, während die zweite Drahtlage auf etwa 100 V negativerem Potential liegt. Deswegen ist bei der Verbindung der Drähte der zweiten Lage besonders wichtig, dass sie nicht mit den Kämmen in Kontakt kommen.

Werden alle Drähte einer Drahtlage auf die gleiche Länge geschnitten, ergibt sich die im Folgenden beschriebene Problematik. Zunächst wurde ein Prototypmodul gebaut, welches mit gleich langen Drähten



Abbildung 4.18: Die Abbildung zeigt eine Möglichkeit, die Drähte einer Lage miteinander leitend zu verbinden.

innerhalb einer Drahtlage bestückt wurde. Bevor das Modul gebaut wurde, musste die Drahtlänge bestimmt werden, damit nachher die korrekte Spannung erreicht wird. Die genaue Drahtlänge wurde iterativ bestimmt, indem mehrmals nur einige Drähte in jeder Lage gespannt wurden. Bei eingebauten C-Profilen wurde dann die resultierende Spannung gemessen und bei einer Abweichung vom gewünschten Wert (10 N für die erste und 5 N für die zweite Lage) wurde die Länge der Drähte entsprechend angepasst. Nachdem so die nötige Drahtlänge bestimmt worden ist, wurde der Prototyp vollständig bestückt.

Am vollständigen Modul wurde die Spannung jedes Drahtes nach der im Kapitel 4.4.2 erklärten Methode gemessen. Dabei wurde festgestellt, dass die Drahtspannung innerhalb





(b) Die Drahtspannung der zweiten Lage bei konstanter Drahtlänge.

Abbildung 4.19: Die Variation der Drahtspannung.



![](_page_55_Figure_2.jpeg)

Abbildung 4.20: Die Drahtspannung nach der Längenkorrektur. Die blaue gestrichelte Linie zeigt zum Vergleich die Drahtspannung vor der Längenkorrektur.

einer Drahtlage deutlich variiert. Die gemessenen Drahtspannungswerte befinden sich in den Tabellen F.1-F.2. In Abb. 4.19 ist die Drahtspannung F gegen die Drahtnummer x dargestellt. Man erkennt einen periodischen Verlauf. An diesem wurde eine Sinuskurve angepasst. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

Den beobachteten Verlauf der Drahtspannung kann man sich leicht erklären. Man erkennt vier Stellen, an denen die Drähte am stärksten gespannt sind. Diese liegen genau an den Positionen der C-Profile. Zwischen den C-Profilen ist die Drahtspannung niedriger, weil sich die Kämme dort unter der Last der Drahtspannung biegen. In der ersten Drahtlage beträgt die maximale Spannungsdifferenz etwa 8 N, während sie in der zweiten Drahtlage etwa 4 N groß ist.

Da die Drähte einer Lage so unterschiedlich stark gespannt sind, hängen sie aufgrund der Erdanziehung auch unterschiedlich durch. Die stärker gespannten Drähte hängen weniger durch. Die maximale Durchhangsdifferenz in der ersten Lage beträgt ca. 0,18 mm und in der zweiten 0,09 mm.<sup>7</sup> Dies ergibt sich nach Formel 4.6 aus den Diagrammen in Abb. 4.8. Somit ist die Anforderung, dass der Lagenabstand entlang des gesamten Moduls konstant sein soll, nicht erfüllt. Wie man aus den Messergebnissen der Elastizitätsmessung, die sich im Anhang B.1 auf Seite 84 befinden, erkennt, werden zur Korrektur der Drahtspannung ganz kleine Längenänderungen benötigt. Man kann die Variation der Drahtspannung kompensieren, indem man die Drähte entsprechend unterschiedlich lang schneidet. Bei dieser Methode muss man jeden Draht unterscheiden und an die richtige Position bringen, denn jeder Draht hat eine andere Länge. Eine alternative Lösung wären unterschiedlich tiefe Bohrungen für die Keramiken in den Kämmen. Dies wäre technisch gesehen bei der Massenproduktion leichter realisierbar. Für den Prototypen wurde versucht die Drahtspannung zu kompensieren, indem die Drähte unterschiedlich lang geschnitten wurden. Mit Hilfe der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Elastizitätsmessung (Abb. 4.5) lässt sich bei bekannter Abweichung der Drahtspannung die gewünschte Längenkorrektur ausrechnen. Die genauen Werte der korrigierten Drahtlängen befinden sich im Anhang G.

Nach der Kompensation der Drahtlänge ist die Amplitude der Drahtspannungsvariation deutlich geringer geworden. Tabelle H enthält die gemessenen Drahtspannungswerte. In der Abb. 4.20 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Die roten Punkte zeigen die Drahtspannung nach der Längenkorrektur, während die blaue gestrichelte Linie den Drahtspannungsverlauf vor der Korrektur bei konstanter Drahtlänge beschreibt. Die Schwankungen in der Drahtspannung wurden bis auf eine Restschwankung von maximal 3 N bei der ersten Lage und 2 N bei der zweiten Lage erfolgreich kompensiert.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Hier ist zu beachten, dass die Durchbiegungsdifferenz nicht nur von der Drahtspannungsdifferenz, sondern auch von den **absoluten** Spannungswerten abhängt.

# 4.4 Vermessung des Prototypen

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Bestimmung der Drahtspannung und zum Vermessen der Modulgeometrie beschrieben. Die Ergebnisse werden im Kapitel 4.5.2 präsentiert.

## 4.4.1 Messmaschine

Für das Vermessen der Drahtspanung und der Modulgeometrie wurde eine manuell verfahrbare 3D-Messmaschine der Firma "Stiefelmayer" Typ System C gekauft. Der Messtisch wiegt ca. 2500 kg. Das maximale Messvolumen beträgt 2000x1000x1400 mm<sup>3</sup>. Die Messmaschine wurde an der Universität Münster automatisiert [Jöh07]. Dazu wurde jede der drei Achsen mit einem computergesteuerten Motorantrieb versehen. Dieser ermöglicht eine Positionierungsgenauigkeit des Messarms von 0,01 mm in jede Richtung.

Für die Bestimmung der Drahtspannung wurde an den Arm der Messmaschine ein optischer Sensor angebaut, der dann über den Drähten des Modules positioniert werden kann. Für das Vermessen der Modulgeometrie wurde an dem Arm eine digitale Kamera befestigt, mit der man an den relevanten Positionen Bilder automatisch aufnehmen kann.

![](_page_57_Picture_6.jpeg)

Abbildung 4.21: Die Stiefelmayer 3D-Messmaschine.

### 4.4.2 Drahtspannung

Die Spannung der Drähte eines komplett bespannten Moduls sollte moglichst berührungsfrei vermessen werden. Dazu wurde ein in Rahmen der Diplomarbeit von Holger Gottschlag [Got05] entwickelter Sensor verwendet, der den Zusammenhang zwischen der Drahtspannung und der Eigenfrequenz des Drahtes ausnutzt. Der theoretische Zusammenhang lautet [Schw]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{S}{\rho}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}} \qquad \Longleftrightarrow \qquad F = 4l^2 A \rho \cdot f^2, \tag{4.16}$$

wobei folgende Bezeichnungen gelten:

- f : Eigenfrequenz,
- l : Drahtlänge,
- S : Drahtspannung,
- $\rho$  : Dichte des Materials,
- F : Zugkraft,
- A : Querschnittfläche des Drahtes.

Dabei wird angenommen, dass der Draht keinen Widerstand gegen die Scherkraft leistet, was in der Realität nicht der Fall ist. Der theoretisch erwartete Zusammenhang für die benutzten Drähte lautet nach Gleichung (4.16):

wobei die Dichte des für den Draht benutzten 1.4404-Edelstahls  $\rho$ =7,98 kg/dm<sup>3</sup> und die Länge des Drahtes l=180 cm betragen.

Die tatsächliche Kraft-Frequenz-Abhängigkeit der Drähte, die wir gemessen haben, ist in der Abb. 4.22 zu sehen. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

Ø 0,3 mm :  

$$F(f) = f^2 \cdot (0,00739 \pm 0,00003) \frac{N}{Hz^2} - f \cdot (0,0094 \pm 0,0023) \frac{N}{Hz} + (0,16 \pm 0,05)N$$

 $\emptyset 0, 2 \, \text{mm}$ :

$$F(f) = f^2 \cdot (0,00322 \pm 0,00001) \frac{N}{Hz^2} - f \cdot (0,0048 \pm 0,0008) \frac{N}{Hz} + (0,08 \pm 0,02)N$$
(4.18)

Man erkennt, dass die in (4.18) erhaltenen Koeffizienten sehr gut mit den theoretisch erwarteten (4.17) übereinstimmen. Kennt man also die Eigenfrequenz des Drahtes, so

![](_page_59_Figure_1.jpeg)

![](_page_59_Figure_2.jpeg)

![](_page_59_Figure_3.jpeg)

![](_page_59_Figure_4.jpeg)

Abbildung 4.22: Die Kraft-Frequenz-Abhängigkeit der Drähte.

#### 4.4. VERMESSUNG DES PROTOTYPEN

kann man auf die mechanische Spannung des Drahtes zurückschließen. Die Bestimmung der Eigenfrequenz des Drahtes kann berührungsfrei durchgeführt werden. Dafür wurde ein optischer Sensor benutzt, welcher eine Leuchtdiode als Sender und eine Photodiode als Empfänger besitzt (Abb. 4.23(a)). Das von der LED emittierte Licht wird an der

![](_page_60_Figure_2.jpeg)

Abbildung 4.23: Das Bild (a) zeigt das Funktionsprinzip des optischen Sensors. Der Sender emittiert das Licht, welches an der Drahtoberfläche reflektiert im Empfänger nachgewiesen wird. Dieser erzeugt ein Spannungssignal, das maximal ist, falls der Draht sich im Fokus des Sensors befindet [Got05]. In Bild (b) sind das vom Empfänger erzeugte Spannungssignal sowie seine Fouriertransformierte zu sehen.

Drahtoberfläche reflektiert und in der Photozelle detektiert. Diese erzeugt ein elektrisches Signal, das linear zum Licheinfall ist. Das Signal wird zunächst verstärkt und dann an die Messkarte "NI PCI-6014" [NatIn], die an einen Rechner angeschlossen ist, weitergeleitet. Die Samplingfrequenz der Karte beträgt mehrere kHz. Dies ist völlig ausreichend, da die Grundfrequenz der schwingenden Drähte etwa 20-80 Hz beträgt. Um das Signal auslesen zu können, wurde ein LabVIEW Programm geschrieben, welches die Ausgangsspannung des Signals misst. Um eine möglichst große Lichtintensität messen zu können, sollte der Draht in den Fokus des Senders in einem Abstand von 5 mm gebracht werden. Wird der Draht zur Schwingung angeregt, so schwingt er nach ca. 5 sec hauptsächlich in der Grundmode. Die reflektierte Lichtintensität ist maximal, wenn das Licht die Mitte des Drahtes trifft und minimal, wenn das Licht den Draht verfehlt. Man beobachtet also ein sinusförmiges Signal (Abb. 4.23(b)). Führt man die Fouriertransformation durch, so bekommt man die Eigenfrequenz des Drahtes und so mit Hilfe von Gleichung 4.18 die mechanische Spannung.

#### Modulgeometrie 4.4.3

Um zu untersuchen welche Auswirkungen das Ausheizen auf die Module hat, muss die Modulgeometrie vor und nach dem Ausheizen genauestens vermessen und miteinander verglichen werden. Zu diesem Zweck wurde eine 1 Megapixel CCD-Kamera "AVT Marlin F-080B" mit einem Objektiv von der Firma "Opto" mit der Brennweite von f = 37 mm benutzt (Abb. 4.24) [Pra06]. Die mit der Kamera aufgenommenen Bilder, die eine Auflösung von 1024 x 768 Pixel haben, werden über Firewire zum Computer übertragen und mit Hilfe eines speziell geschriebenen LabVIEW-Programms ausgewertet und gespeichert. Die Auflösung des Bildes beträgt ca. 7,6  $\mu$ m pro Pixel.

Abb. 4.25 zeigt eine typische Aufnahme eines durch eine Keramik gehaltenen Drahtendes.

Rechts im Bild ist der Zahn zu sehen, in dem der Draht eingespannt ist. Bei den im Prototypmodul verwandten Kämmen erlauben Schlitze in den Bohrungen eine freie Sicht auf Draht und Keramik. Die von dem Bildverarbeitungsprogramm ermittelte Position der äußeren Kante der Keramik ist mit einem Fadenkreuz markiert. Die CCD-Kamera wird an dem Arm der Messmaschine angebaut und kann im gesamten Messbereich der Messmaschine bewegt werden. Mit Hilfe dieser Kamera sind wir in der Lage, die Drahtpositionen sowie den Abstand zwischen den Kämmen zu vermessen. Das letzte war ein wesentliches Ziel, denn der Abstand zwischen den Kämmen und die Drahtspannung sind sehr eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. Sollte sich die Drahtspannung ändern, hat dies Einfluss auf die Modulgeometrie. Um den Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Zähnen des Prototypmoduls auszurechnen, wurde mit Hilfe der Kamera die genaue Position jedes einzelnen Zahns ermittelt. Nachdem wir zunächst einige Bilder von den Zähnen aufgenommen haben, wurde festgestellt, dass die Position des Zahns nicht ganz

![](_page_61_Picture_5.jpeg)

Abbildung 4.24: Das Bild zeigt die "AVT Marlin F-080B" Kamera, die sich am Messarm über dem Testmodul befindet.

![](_page_61_Picture_7.jpeg)

Abbildung 4.25: Mit der Kamera aufgenommenes Bild eines durch eine Keramik im Zahn gehaltenen Drahtes.

genau bestimmt werden kann, weil dieser im Bild keine scharfen Kanten aufweist. Um das Problem zu lösen, wurden die Bilder von den Keramiken, welche in den Zähnen sitzen und die Drähte festhalten, aufgenommen, denn letztendlich ist die Drahtspannung über den Abstand zwischen den gegenüberliegenden Keramiken definiert. Diese besitzen sehr scharfe Kanten und sind im Bild sehr gut erkennbar.

# 4.5 Thermische Eigenschaften und Vakuumverhalten des Prototypen

Um ein Vakuum im Druckbereich von  $10^{-11}$  mbar erzeugen zu können, wird beim KA-TRIN Experiment das gesamte Spektrometer mit der bereits montierten Drahtelektrode ausgeheizt. Aus diesem Grund muss untersucht werden, wie sich die Elektrode beim und nach dem Ausheizen verhält. Ändern sich die Drahtspannung und Modulgeometrie? Wie hoch ist die Ausgasrate der Module? Der Aufbau einer für thermische Tests benötigten ausheizbaren Ultrahochvakuumapparatur, sowie Ergebnisse von Testmessungen zu dieser Problematik werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

## 4.5.1 Aufbau eines ausheizbaren UHV-Teststands

Um das Verhalten der Module beim und nach dem Ausheizen zu untersuchen, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit ein ausheizbarer Vakuumofen entwickelt und gebaut. Der Aufbau der Heizsteuerung innerhalb der Diplomarbeit von K. Temming [Tem07], allerdings stand sie hier noch nicht zur Verfügung. Seine Hauptkomponente ist ein elektropoliertes Rohr aus Edelstahl des Typs 1.4432 (316L), das eine Länge von zwei Meter und einen Durchmesser von 30 cm hat. Eine Seite des Rohres wird als Eingang in die Anlage benutzt, welcher mit einem DN250CF-Blindflansch geschlossen werden kann. An der anderen Seite des Rohres ist mit Hilfe eines Reduzierflansches DN250/160CF eine Edelstahlkugel mit einem Durchmesser von ca. 30 cm festgeschraubt, an welche Pumpen, Druckmessgerät und Massenfilter angeschlossen wurden. Das Rohr und die Kugel sind auf einem Aluminiumprofilgestell aufgebaut, wobei das Rohr nur von vier Schrauben mit geringer Auflagefläche unterstützt wird, um beim Ausheizen die Wärmeverluste möglichst gering zu halten. Um ein gutes Vakuum im UHV-Bereich erzeugen zu können, werden drei Pumpen kaskadiert eingebaut. Als Vorpumpe dient eine ölfreie Scroll-Vakuumpumpe "SC 15 D" der Firma "Levbold", die 1450 Umdrehungen pro Minute macht und ein Saugvermögen von 15 Kubikmeter pro Stunde besitzt. Sie erzeugt ein Vorvakuum für eine Turbomolekularpumpe "TPH 040" von "Pfeiffer", welche ein Saugvermögen von 25 Liter pro Sekunde besitzt und von dem Frequenzwandler "TCP 040" gesteuert wird. Anschließend wurde eine weitere magnetgelagerte Turbomolekularpumpe "TURBOVAC 340 M" von "Leybold" angebaut, welche mit einem Frequenzwandler "TURBOTRONIK NT 10" gesteuert wird. Sie macht 51600 Umdrehungen pro Minute und hat ein Saugvermögen von 340 Liter pro Sekunde. Beim Betrieb über einen längeren Zeitraum oder beim Ausheizen der Anlage sollte diese Pumpe mit Wasser gekühlt werden. Die Temperatur der Pumpe am Flanschhals darf 100 °C nicht übersteigen. Angeschlossen wird sie am unteren Flansch der Kugel, wobei zwischen Pumpe und Kugel noch ein UHV-Schieber mit Handantrieb der Firma "VAT" eingebaut wurde. Dieser wird als Ventil benutzt und ermöglicht es, die Vakuumanlage von den Pumpen zu trennen. Beim Ausheizen muss beachtet werden, dass seine Temperatur ebenfalls 100 °C nicht übersteigt. Außer der Pumpe sind an die Kugel eine Druckmessröhre und ein Restgasanalysator (RGA) angebaut. Abb. 4.26 zeigt den schematischen Aufbau des Ofens.

Bei dem Druckmessgerät handelt es sich um eine Ionisationsmessröhre "VIG17", die nach dem Bayard-Alpert-Prinzip funktioniert. Die Messröhre stellt ein Triodensystem aus Glühkathode, Elektronenkollektor und Ionenauffänger dar (Abb. 4.27). Die Glühkathode emittiert Elektronen, die auf ihrem Weg zum Elektronenkollektor die in der Umgebung befindlichen Gasmoleküle ionisieren. Die dabei entstehenden positiven Ionen werden auf dem Weg zum Ionenauffänger beschleunigt, der auf dem niedrigsten Potential liegt, und erzeugen einen Ionenstrom. Dieser ist proportional zu der Anzahl der Gasmoleküle und somit zum Druck. Allerdings ist die Messröhre nur im Druckbereich  $10^{-4}$  mbar -  $10^{-11}$  mbar einsetztbar. Die Sensitivität der Messröhre wird

![](_page_63_Figure_3.jpeg)

Abbildung 4.27: Der schematische Aufbau der Ionisationsmessröhre.

durch die sogenannte Röntgengrenze eingeschränkt. Ist der Druck in der Umgebung der Röhre zu niedrig, so treffen die emittierten Elektronen keine Gasmoleküle und gelangen ungehindert zum Elektronenkollektor, wo sie Bremsstrahlung erzeugen. Diese Photonen sind dann in der Lage über den Photeffekt an der Ionenauffänger-Oberfläche Elektronen herauszulösen und somit einen Ionenstrom vorzutäuschen. Die obere Grenze des Messbereichs ist dadurch beschränkt, dass aufgrund einer zu hohen Anzahl von Gasteilchen die Ionen keinen druckproportionalen Strom mehr erzeugen. Als Anzeige- und Steuergerät wurde ein "Ion Gauge Controller IGC 21" benutzt. Es ist zu beachten, dass der angezeigte Druck gasartabhängig ist. Dies hängt mit den verschiedenen mittleren Ionisationsenergien unterschiedlicher Gasmoleküle zusammen. Je nach Gassorte muss der angezeigte Druck mit einem Korrekturfaktor multipliziert werden. Dieser ist für Luft gleich eins, so dass wir für unsere Anwendung den angezeigten Druck direkt übernehmen können.

Für die Restgasanalyse wird ein Quadrupol-Massenspektrometer "Transpector 2", Typ "H200F/M" von der Firma "Inficon" benutzt. Den Aufbau eines Quadrupolmassenspektrometers (QMS) kann man grob in drei Komponenten unterteilen: Ionenquelle, Stabsystem und Detektor (Abb. 4.28). Innerhalb der Ionenquelle befindet sich als Filament ein Iridiumdraht, welcher Elektronen emittiert. Diese ionisieren die Atome des Restgases. Die

## 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN57

![](_page_64_Figure_1.jpeg)

![](_page_64_Picture_2.jpeg)

Abbildung 4.26: In (a) ist der schematische Aufbau der Vakuumanlage dargestellt. Bild (b) zeigt das mit Autodesk Inventor gezeichnete Modell des Vakuumofens auf dem Aluminiumprofilgestell.

dabei entstehenden Ionen gelangen in den nächsten Bereich, in dem von vier Elektrodenstäben ein Quadrupolfeld erzeugt wird. An diese Elektroden wird eine Gleichspannung und eine hochfrequente Wechselspannung angelegt, wobei die gegenüberliegenden Elektroden auf dem gleichen Potential liegen. Aufgrund des erzeugten elektrischen Feldes bewegen sich die Ionen auf Spiralbahnen. Nur Ionen eines bestimmten Masse-zu-Ladungs-Verhältnisses kommen bis zum Detektor. Damit sie ungehindert zum Detektor gelangen können, kann der Massenfilter nur bei niedrigen Drücken ( $<10^{-7}$  mbar) betrieben werden. Beim Ausheizen muss beachtet werden, dass das QMS nur bis 150 °C betrieben werden darf. Bei Temperaturen oberhalb 250 °C muss die Elektronik abgebaut werden. Maximal darf der Massenfilter bis 350 °C ausgeheizt werden. Das ist für uns völlig ausreichend, da das KATRIN Hauptspektrometer ebenfalls bis 350 °C ausgeheizt wird [KAT04].

![](_page_65_Figure_2.jpeg)

Abbildung 4.28: Der schematische Aufbau eines Quadrupol-Massenspektrometers [NASA].

Es wurden bereits einige Massenspektren mit dem eingebauten Quadrupolmassenspektrometer aufgenommen. Man kann sich das gewünschte Fenster von Atommassen anschauen, indem man die minimale und die maximale atomare Masseneinheit amu eingibt. Abb. 4.29 zeigt Partialdrücke in mbar von Elementen bis 50 amu des leeren Ofens (a) bevor er ausgeheizt wurde und (b) nach dem Ausheizen. Man erkennt, dass vor dem Ausheizen ein kleiner H<sub>2</sub>-Anteil bei 2 amu und ein relativ großer H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>-Anteil bei 18 amu, sowie OH<sup>+</sup> und O<sup>+</sup> bei 17 bzw. 16 amu vorhanden sind<sup>8</sup>. Außerdem erkennt man noch weitere Komponenten der Luft: N<sub>2</sub><sup>+</sup> und CO<sup>+</sup> bei 28 amu, sowie CO<sub>2</sub><sup>+</sup> bei 44 amu. Wie man der Abbildung 4.29(b) entnehmen kann, ist die H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>-Linie nach dem Ausheizen deutlich kleiner geworden, während die Linien bei 28 amu und 44 amu immer noch zu hoch sind, was das Vorhandensein eines Lecks vermuten lässt.

Für das Ausheizen der gebauten Vakuumanlage wurden mehrere Heizbänder der Firma "Horst" benutzt [Horst]. Diese sind mit einem Schutzgeflecht versehen, sehr flexibel, können bis 450 °C heiß werden und sind in diversen Längen lieferbar. Für das Rohr wurden 4 Heizbänder der Länge 5 m mit jeweils 1250 Watt benutzt. Diese wurden um das

 $<sup>^8\</sup>mathrm{Es}$  wurden nur die wesentlichen Moleküle erwähnt. Da bei der Ionisation von Molekülen unterschiedliche Bruchstücke mit dem gleichen m/Q Verhältnis entstehen können, überlagern sich eventuell mehrere Linien zu einer Linie.

## 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN59

![](_page_66_Figure_1.jpeg)

(b)

Abbildung 4.29: Massenspektren des leeren Ofens. Bild (a) zeigt das vor dem Ausheizen aufgenommene Spektrum bei Zimmertemperatur, während das Spektrum (b) nach dem Ausheizen bis 300 °C aufgenommen wurde. Der Partialdruck von Wassermolekülen hat um mehr als eine Größenordnung abgenommen.

Rohr gewickelt, wobei der Abstand zwischen den Windungen etwa 10 cm beträgt (Abb. 4.30(a)). Für das Ausheizen anderer Vakuumkomponenten wurden weitere Heizbänder in unterschiedlichen Längen benutzt:

Baukomponente	Länge (m)	Heizleistung (W)	Nenntemperatur ( $^{\circ}C$ )
Rohr	4 x 5	$4 \ge 1250$	450
Kugel	3	750	450
Schieber	2	500	450
Massenfiler	1,5	350	450
Reduzierflansch	$1,\!5$	350	450

Tabelle 4.2: In der Tabelle sind die an verschiedenen Komponenten des Vakuumofens installierten Heizbänder aufgelistet.

Abb. 4.30(b) zeigt die mit dem Heizband umwickelte Kugel. Man erkennt den unter der Kugel eingebauten Schieber, der ebenfalls mit einem Heizband versehen ist. Somit sind an der Anlage insgesamt acht Heizbänder installiert. Die gewünschte Leistung wird mit Hilfe von Transformatoren eingestellt.

![](_page_67_Picture_5.jpeg)

Abbildung 4.30: Installation der Heizbänder am zylindrischen Teil des UHV-Ofens (a) sowie an der kugelförmigen Kammer für Pumpe und Messinstrumente (b).

Um die Temperatur der Vakuumanlage auslesen und dann falls nötig mit Hilfe der Transformatoren nachregeln zu können, wurden 8 Platin-Temperatursensoren  $PT-100^9$  an un-

 $<sup>^9\</sup>mathrm{PT}$ -100 Widerstände sind im Temperaturbereich -200 °C bis 850 °C einsetzbar und basieren auf der temperaturabhängigen Widerstandsänderung, wobei die Temperatur-Widerstand-Abhängigkeit annähernd linear ist. Die PT-Bezeichnung steht für Platinwiderstand. Die den Typ bezeichnende Zahl 100 besagt, dass der Widerstand bei 0 °C 100 Ohm beträgt.

## 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN61

terschiedlichen Orten angebracht. Fünf davon sind am Rohr eingebaut, um den Temperaturgradienten entlang des Rohres beobachten zu können. Hier sind sie mit Hilfe von Schlauchschellen befestigt (Abb. 4.31(a)). Drei weitere PT-100s befinden sich an der Kugel an den kritischen Stellen: Schieber, RGA und "VIG17" Druckmessröhre (Abb. 4.31(b)). Hier muss besonders beachtet werden, dass die Temperatur nicht den maximal erlaubten Wert überschreitet, um die Funktionstüchtigkeit der Geräte gewährleisten zu können. Der Schieber darf bis 100 °C, das RGA bis 350 °C (vorausgesetzt, dass die Elektronik abgebaut ist) und die VIG17 Messröhre bis 250 °C ausgeheizt werden.

![](_page_68_Picture_2.jpeg)

(a) Die PT-100-Temperaturfühler sind mit Hilfe von Schlauchschellen am Rohr befestigt.

![](_page_68_Picture_4.jpeg)

(b) An der Kugel sind die PT-100s mit Hilfe kleiner Kupfer-Klemmen befestigt.

Abbildung 4.31: Befestigung der Temperatursensoren.

Alle PT-100-Ausgänge sind über ein Board verbunden, welches an ein Datenaufnahmesystem "Agilent 34970A" mit dem "34901A"-Modul angeschlossen ist. In diesem werden die Widerstandswerte der PT-100s in Temperaturwerte umgerechnet und zum Computer weitergeleitet. Mit Hilfe eines hierfür geschriebenen LabVIEW-Programms sind wir in der Lage die Temperaturwerte jederzeit auszulesen und in einer Text-Datei zu speichern. Außerdem ist es wünschenswert, den Druck in der Vakuumanlage digital auslesen und abspeichern zu können, um z.B. Druckanstiegsmessungen durchführen zu können. Dafür wurde der analoge Spannungsausgang des Druckmessgerätes "IGC 21" benutzt. Dieser liefert je nach Druck Spannungswerte zwischen 0 V und 10 V. Bevor die Spannung U[V] mit dem geschriebenen LabVIEW-Programm auf den Druck p[mbar] umgerechnet wird, musste eine Druck-Spannungs-Eichung durchgeführt werden (Abb. 4.32).

Die zur Eichung gehörige Tabelle befindet sich in Anhang J. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\mathbf{p} = 1,27 \cdot 10^{-11} \cdot \exp(U \cdot 1,84 \,\mathrm{V}^{-1}) \,\mathrm{mbar}. \tag{4.19}$$

![](_page_69_Figure_1.jpeg)

Abbildung 4.32: Zusammenhang zwischen dem angezeigten Druck und dem Spannungsausgang der "IGC 21"-Auslese.

![](_page_69_Figure_3.jpeg)

Abbildung 4.33: Das LabVIEW-Programm zeigt die Temperaturwerte sowie den Druck in der Vakuumanlage.

## 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN63

Abbildung 4.33 zeigt die Oberfläche des im Rahmen der Diplomarbeit entwickelten LabVIEW-Programms, welches über den Zusammenhang (4.19) den Druck anzeigt. Während des Betriebs kann man die Temperaturwerte und den Druck in einer Datei speichern lassen, damit man später den Verlauf analysieren kann.

Damit beim Ausheizen möglichst wenig Wärmeverluste auftreten, müssen Heizbänder und Apparatur gut wärmeisoliert sein. Dafür wurde die gesamte Anlage mit der Steinwolle "Heralan-WM-D8" von der Firma "Heraklith" [Herak] verpackt, siehe Abb. 4.34(a). Diese hat eine Dicke von 50 mm, ist nicht brennbar, hochtemperaturbeständig und wärmedämmend. Um eine möglichst gute Wärmeisolation zu erreichen, wurde das Rohr mit zwei Schichten Steinwolle umwickelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Ränder der Wolle möglichst dicht aneinander befinden.

![](_page_70_Picture_3.jpeg)

(a) Das mit Steinwolle umwickelte Rohr.

![](_page_70_Picture_5.jpeg)

(b) Die mit Steinwolle umwickelte Kugel. Man erkennt den Massenfilter, der ebenfalls umwickelt wurde.

Abbildung 4.34: Vakuumofen mit Steinwolle zur Wärmeisolation.

Auch die Kugel mit Messröhre und Massenfilter wurde mit Steinwolle isoliert, siehe Abb. 4.34(b). Anschließend wurde die gesamte Vakuumanlage mit einem wärmeisolierenden Stoff ummantelt. Für das Ende des Rohres, an dem sich der DN250CF-Blindflansch befindet, wurde ebenfalls aus Steinwolle und wärmeisolierendem Stoff eine Art Deckel gebaut. Für den Massenfilter wurde ebenfalls eine Kappe gebaut, die problemlos entfernt werden kann, falls die Elektronik an den Massenfilter angeschlossen werden soll. Wie der fertige Vakuumofen aussieht, zeigt Abb. 4.35.

Thermische Tests zum Verhalten der Drahtelektrodenmodule während und nach dem Ausheizen, sowie Messungen zur Ausgasrate der Module können aufgrund der Abmessungen nicht mit dem in Kap. 4.3 vorgestellten Prototypen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Testmodul konstruiert, welches die gleiche Länge jedoch zwei kürzere Kämme und zwei runde Edestahlstäbe anstatt der C-Profile hat (Abb. 4.36(a)). Technische Zeichnung des Kamms befindet sich im Anhang K.1. In der ersten Lage können zehn Drähte und in der zweiten neun Drähte gespannt werden.

Die Komponenten des Testmoduls wurden vor dem Zusammenbau gründlich gereinigt, um realistische Bedingungen für die Ausgasmessungen zu schaffen. Die Kämme und Schrauben, die zur Montage des Moduls benutzt werden, wurden im Ultraschallbad gereinigt, während die Stäbe wegen ihrer Größe manuell mit Alkohol gesäubert wurden.

![](_page_71_Picture_3.jpeg)

Abbildung 4.35: Der vollständige Vakuumofen.

Beim Einbringen in den Ofen wird das Testmodul auf eine Halterung gelegt. Diese besteht aus zwei ca. 1,80 m langen Edelstahlstäben, die entlang des Rohres verlaufen, und einem Querträger. Die beiden Enden der Stäbe haben Gewinde. Das eine Ende wird in den DN250/160CF-Reduzierflansch eingeschraubt, während das andere Ende am Querträger befestigt ist. Abb. 4.36(b) zeigt, wie das Testmodul im Vakuumofen auf der Halterung liegt.
### 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN65



Abbildung 4.36: Die Abbildung (a) zeigt das für thermische Tests konstruierte Testmodul. Es wird im Ofen von zwei festinstallierten Schienen gehalten (b).

### 4.5.2 Thermisches Verhalten der Module

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, welche Auswirkung das Ausheizen auf das Testmodul und insbesondere die Drahtspannung hat.

Bevor das Testmodul ausgeheizt wurde, wurde die Drahtspannung und die Modulgeometrie nach den in Abschn. 4.4.2 bzw. 4.4.3 beschriebenen Methoden vermessen. Danach wurde das Testmodul im Vakuumofen bei ca. 350 °C etwa 2 Stunden<sup>10</sup> lang ausgeheizt und wieder auf Zimmertemperatur abgekühlt. Hier muss beachtet werden, dass die Temperatur sich nicht schneller als 1 °C pro Minute ändern sollte, da bei zu hohen Temperaturdifferenzen an den Verbindungsstellen der Apparatur Lecks auftreten können. Nach dem Ausheizvorgang wurde das Modul ein zweites Mal vermessen und das Ergebnis mit den vorherigen Messungen verglichen. Nach dem ersten Ausheizvorgang wurden deutliche Änderungen sowohl in der Drahtspannung als auch im Abstand zwischen den Kämmen festgestellt (Abbildungen 4.37 und 4.38). Die Drahtspannung in der ersten Lage hat sich um durchschnittlich 2,6 N und in der zweiten um 1,5 N erhöht, während der Kammabstand um durchschnittlich 0,18 mm in der ersten Lage und 0,37 mm in der zweiten Lage kleiner geworden ist.

Die Verkürzung des Abstands zwischen den Kämmen wird durch die erhöhte Drahtspannung bewirkt, die die Kämme näher zusammenzieht. Die Abstandsänderung in der zweiten Lage ist wesentlich größer, da diese weiter von den Verbindungsstäben entfernt ist und die Kämme sich dort stärker verbiegen (Abb. 4.39(a)).

Es stellt sich die Frage, ob die Drahtspannung bei weiteren Ausheizvorgängen weiter steigt, oder ob ein Sättigungseffekt eintritt. Um darauf eine Antwort geben zu können, wurde das Testmodul drei weitere Male ausgeheizt und nach jedem Ausheizvorgang die Drahtspan-

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Beim Heizen steigt der Druck im Vakuumofen, weil sowohl der Ofen selbst, als auch das Testmodul ausgast. Es sollte am besten so lange geheizt werden, bis der Druck wieder abfällt.



(a) Änderung der Drahtspannung der ersten Lage nach wiederholtem Ausheizen.



0.2 mm wire tension before and after baking at 350℃ (2nd layer)

(b) Änderung der Drahtspannung der zweiten Lage nach wiederholtem Ausheizen.

Abbildung 4.37: Die Abbildung zeigt, wie sich die Drahtspannung des Testmoduls nach drei Heizvorgängen geändert hat. Die Tabellen mit den Messwerten befinden sich im Anhang L.



(a) Änderung des Abstandes in der ersten Lage nach wiederholtem Ausheizen.



Abbildung 4.38: Abstand zwischen den Kämmen vor und nach drei Heizvorgängen. Die Tabellen mit den Messwerten befinden sich im Anhang L.

nung und die Modulgeometrie erneut vermessen. Abbildungen 4.37 und 4.38 zeigen die Ergebnisse.

Man erkennt nach dem ersten Ausheizen die wesentlichen bereits beschriebenen Änderungen, während nach den weiteren Ausheizvorgängen die Unterschiede in der Drahtspannung und Modulgeometrie immer kleiner werden. Schon nach dem dritten Ausheizen sind die Änderungen so klein, dass sie sich innerhalb der Messunsicherheit nicht eindeutig feststellen lassen.

Die Erhöhung der Drahtspannung kann dadurch erklärt werden, dass kleine Defekte im Material, welche beim Ziehen des Drahtes entstehen, schon bei relativ niedrigen Temperaturen, wie den im UHV-Ofen erreichten 350 °C, ausheilen können [Mai07]. Unterstützt wird dieser Erklärungsansatz auch durch ein Verfahren, dass die metallverarbeitende Firma "Sandvick" für die Behandlung von Federstahldraht empfiehlt [Sandv]. Dabei kann die Zugfestigkeit des Drahtes durch Tempern bei Temperaturen zwischen 300 °C und 400 °C für eine Dauer von 30 min bis 3 Stunden um bis zu 350 Mpa erhöht werden (siehe Abb. 4.39(b)). Dies war bei uns genau der Fall. Das Testmodul wurde bei jedem Ausheizvorgang etwa 2 Stunden lang bei ca. 350 °C ausgeheizt.

Um beim Bau zukünftiger Elektrodenmodule eine nachträgliche Anderung der Drahtspannung zu vermeiden, sollte man die Drähte daher vor dem Einbau ins Modul wie oben beschrieben tempern. Allerding muss auch beachtet werden, dass es Effekte gibt, die zu Verlusten bei der Drahtspannung führen. Im Laufe der Messzeit, die beim KATRIN Experiment etwa drei Jahre betragen wird, können die Drähte einen Teil der ursprünglichen Spannung verlieren; es kommt zu Relaxation.



Abbildung 4.39: Aufgrund der Erhöhung der Drahtspannung verbiegen sich die Kämme (a) (übertriebene Darstellung). Die Abbildung (b) zeigt, wie sich beim Tempern die Zugfestigkeit von Federstahldrähten in Abhängigkeit von der Temperatur ändert [Sandv].

#### 4.5.3 Bestimmung der Ausgasrate

Wie bereits erwähnt wird das KATRIN Hauptspektrometer ausgeheizt werden, um ein Vakuum mit einem Enddruck von  $\leq 10^{-11}$  mbar erreichen zu können. Während des Ausheizens verdampfen Verunreinigungen von der Oberfläche der Module und des Tanks. Nach der KATRIN Spezifikation darf die Ausgasrate des Hauptspektrometers maximal  $q < 10^{-12} \frac{\text{mbar-l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$  betragen (elektropoliert und ausgeheizt) [Spe03]. Da die Oberfläche aller Module etwa so groß wie die Tankoberfläche ist, würde eine zu hohe Ausgasrate der Module den Druck im Spektrometer deutlich verschlechtern. Aus diesem Grund muss die Ausgasrate der Module gemessen werden. Dazu wurde das vorher gereinigte Testmodul in der UHV-Anlage bei etwa 350 °C ausgeheizt. Nachdem es wieder abgekühlt war, wurde bei ca. 30 °C eine Druckanstiegsmessung durchgeführt (Abb. 4.40(a)). Diese dauerte etwa



Abbildung 4.40: Messung der Ausgasrate (a) von Testmodul und Vakuumofen und (b) des leeren Ofens nach dem Ausheizen.

3 Stunden, wobei alle 20 Sekunden ein Druckmesswert aufgenommen wurde. Fittet man die Ergebnisse mit der Funktion:

$$p(t) = a + b(1 - e^{-c \cdot t}), \tag{4.20}$$

so ergibt sich

$$p(t) = (3, 19\pm0, 04) \cdot 10^{-8} \text{mbar} + (7, 94\pm0, 02) \cdot 10^{-7} (1 - e^{-(10,46\pm0,05) \cdot 10^{-5} \cdot t}) \text{mbar}. (4.21)$$

Die Ausgasrate lässt sich folgendermaßen berechnen [Int04]:

$$Q = V \cdot (a+b) \cdot c, \tag{4.22}$$

wobei V das Volumen bezeichnen. Vernachlässigt man das Volumen des Testmoduls, so ergibt sich das Gesamtvolumen der UHV-Anlage aus der Summe von Rohrvolumen  $V_r$  und Kugelvolumen  $V_k$ :

$$V_o = V_r + V_k = \pi \cdot r_r^2 \cdot l_r + \frac{4}{3}\pi \cdot r_k^3$$
  
=  $\pi \cdot (1, 5 \text{ dm})^2 \cdot 20 \text{ dm} + \frac{4}{3}\pi \cdot (1, 5 \text{ dm})^3$   
=  $141 \text{ dm}^3 + 14 \text{ dm}^3 = 155 \text{ dm}^3 = 155 \text{ l.}$  (4.23)

Setzt man die Koeffizienten aus (4.21) und das Ergebnis aus (4.23) in die Formel (4.22) ein, so ergibt sich für die Ausgasrate der UHV-Anlage mit dem Testmodul

$$Q_w = 155 \, l \cdot (3, 19 \cdot 10^{-8} + 7, 94 \cdot 10^{-7}) \cdot 10, 46 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \approx 1, 34 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mbar} \cdot l}{\text{s}}.$$
 (4.24)

Um die Ausgasrate des Testmoduls allein zu bestimmen, wurde noch der Druckanstieg vom leeren Ofen gemessen (Abb. 4.40(b)). Hierfür ergibt sich

$$p(t) = (12, 68\pm0, 02) \cdot 10^{-8} \text{mbar} + (11, 79\pm0, 06) \cdot 10^{-7} (1 - e^{-(2, 88\pm0, 02) \cdot 10^{-5} \cdot t}) \text{mbar}. (4.25)$$

Somit ergibt sich für die Ausgasrate des leeren ausgeheizten Ofens

$$Q_{wo} = 155 \, l \cdot (12, 68 \cdot 10^{-8} + 11, 79 \cdot 10^{-7}) \cdot 2, 88 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar}}{\text{s}} \approx 5, 83 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mbar} \cdot l}{\text{s}}.$$
 (4.26)

Die Messung des leeren Ofens wurde aufgrund von Zeitproblemen bei ca. 60 °C durchgeführt (das Abkühlen des Ofens auf Raumtemperatur dauert wegen der guten Isolation mehrere Tage). Vergleicht man die beiden Messungen, so erkennt man, dass bei der Messung der Ausgasrate des leeren Ofens der Druckanstiegsverlauf fast im ganzen Messintervall eine kleinere Steigung hat. Nur zu Anfang der Messung steigt der Druck steil an. Dies kann man sich dadurch erklären, dass die Restgasmoleküle in der Vakuumanlage aufgrund der höheren Temperatur andere Dampfdrücke besitzen und somit für manche Molekülsorten eher ein Sättigungseffekt eintritt.

Um die Ausgasrate pro Fläche des leeren Vakuumofens zu erhalten, muss noch die Oberfläche des Ofens ausgerechnet werden. Diese ergibt sich aus der Summe der Oberfläche des Rohrs  $O_r$ , der Kugel  $O_k$  und des DN250CF-Blindflansches  $O_b$ :

$$O_o = O_r + O_k + O_b = 2 \pi r_r \cdot l_r + 4 \pi \cdot r_k^2 + \pi \cdot r_d^2$$
  
= 2 \pi \cdot 15 \cons \cons 200 \cons + 4 \pi \cons (15 \cons)^2 + \pi \cons (15 \cons)^2  
= 18850 \cons^2 + 2830 \cons^2 + 700 \cons^2 = 22380 \cons^2. (4.27)

70

#### 4.5. THERMISCHE EIGENSCHAFTEN UND VAKUUMVERHALTEN DES PROTOTYPEN71

Somit ergibt sich für die Ausgasrate pro Fläche des leeren Vakuumofens

$$q_{wo} = \frac{Q_{wo}}{O_o} = \frac{5,83 \cdot 10^{-9}}{22380} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} = 2,6 \cdot 10^{-13} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}.$$
(4.28)

Das Ergebnis stimmt mit der KATRIN Spezifikation überein, so dass sich unsere Vakuumapparatur als ausreichend erweist, um solche Tests zuverlässig durchzuführen.

Bildet man die Differenz von (4.24) und (4.26), so ergibt sich für die Ausgasrate des Testmoduls

$$Q_m = 1,34 \cdot 10^{-8} \,\frac{\text{mbar} \cdot l}{\text{s}} - 5,83 \cdot 10^{-9} \,\frac{\text{mbar} \cdot l}{\text{s}} = 7,57 \cdot 10^{-9} \,\frac{\text{mbar} \cdot l}{\text{s}}.$$
 (4.29)

Mit Hilfe eines CAD-Programms (Autodesk Inventor) wurde die Oberfläche des Testmoduls  $O_m \approx 3320 \ cm^2$  bestimmt. Somit lässt sich seine Ausgasrate pro Fläche berechnen:

$$q_m = \frac{Q_m}{O_m} = \frac{7,57 \cdot 10^{-9}}{3320} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} = 2,3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}.$$
(4.30)

Im allgemeinen kann man mit dem Ergebnis für die Ausgasrate pro Fläche des Testmoduls zufrieden sein. Nach der KA-TRIN Spezifikation sollte die Ausgasrate von Kompenenten des Hautspektrometers kleiner als  $10^{-12} \frac{\text{mbar l}}{\text{cm}^2 \text{s}} \sin^{11}$  [Spe03]. Allerdings ist das Ergebnis fehlerbehaftet. Zum einem wurden die Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Außerdem muss die Saugleistung der Messröhre ebenfalls berücksichtigt werden.

Das Testmodul, welches hauptsächlich manuell gereinigt wurde, kommt dieser Spezifikation sehr nahe. Die Ausgasrate der Module hängt in erster Linie davon ab, wie gründlich die Modulkomponenten gereinigt werden. Für die Reinigung der Mo-



Abbildung 4.41: Reinigungsanlage. In einem etwa 2 m x 0,3 m x 0,4 m großen Bad werden die Modulkomponenten mit Hilfe von Ultraschall gereinigt. Man erkennt drei Vorratstanks, in denen sich Axarel 9100, Almeco und hochreines Wasser befinden.

dule wird eine spezielle Reinigungsanlage gebaut [Tem07]. Abb. 4.41 zeigt ein Foto der im Aufbau befindlichen Anlage. Dort werden die Modulkomponenten im Ultraschallbad mit Axarel 9100, Almeco und anschließend mit hochreinem Wasser gereinigt. Danach wird

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Die Tests mit dem Vorspektrometer liefern bei einer Temperatur von +20 °C eine Ausgasrate von  $5,3 \cdot 10^{-13} \frac{\text{mbarl}}{\text{cm}^2 \text{ s}}$  [KAT04].

die Ausgasrate erneut bestimmt und mit den vorherigen Ergebnissen verglichen werden. Somit kann auch festgestellt werden, wie effektiv die Reinigungsprozedur ist. Mit Hilfe des Massenfilters kann man im Vakuumofen eine Restgasanalyse durchführen, um eventuelle Verunreinigungen durch Reinigungsmittelrückstände feststellen zu können.

### Kapitel 5

## Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Prototypmodul für die Drahtelektrode des KATRIN Hauptspektrometers konstruiert. Diese Module bestehen im Zentralteil des Spektrometers aus zwei Drahtlagen mit je 60 Drähten, die von Kammstrukturen gehalten werden. Die Entwicklung der Elektrodenmodule im zentralen Teil ist nach der Durchführung notwendiger Tests am Prototypmodul im Wesentlichen abgeschlossen. Insbesondere wurden die Eigenschaften der Drähte und das Verhalten der Module nach dem Ausheizen studiert.

Um den für die Elektrode am besten geeigneten Draht zu finden, wurden diverse Tests durchgeführt. Als erstes wurden die Oberflächen verschiedener Drahtproben unter dem Lichtmikroskop untersucht. Es wurden Edelstahl-Drähte des Werkstoffs 1.4404 (316L), hauptsächlich der "ultra finish"-Draht der Firma "California Fine Wire Company", der bereits bei der Drahtelektrode des Vorspektrometers benutzt wurde, und Draht der Firma "Vogelsang" miteinander verglichen. Dabei wurden keine signifikanten Unterschiede der Oberflächenqualität festgestellt. Aus Kosten- und Lieferzeitgründen wurde der Edelstahldraht der Firma "Vogelsang" gewählt und in allen nachfolgenden Messungen untersucht.

Die Drähte der ersten (äußeren) Lage haben einen Durchmesser von 0,3 mm und der zweiten (inneren) Lage von 0,2 mm. Um die Anforderung an die Drahtpositionierung einzuhalten, wird der 0,3 mm Draht mit 10 N und der 0,2 mm Draht mit 5 N im Modul gespannt. Der Durchhang beträgt damit 0,16 mm bzw. 0,13 mm, siehe Abschnitt 4.2.3.

Mit Hilfe der Elastizitätsmessung konnte der elastische Bereich der Drähte bestimmt werden. Dafür wurde die Längenänderung in Abhängigkeit von der Drahtspannung aufgenommen (Abschn. 4.2.2). Der elastische Bereich erstreckt sich bis 400 N/mm<sup>2</sup>. Dies entspricht einer Kraft von 28 N für den 0,3 mm-Draht und 13 N für den 0,2 mm-Draht. Somit ist man sicher, dass sich die im Modul eingespannten Drähte mit 10 N und 5 N im elastischen Bereich befinden und nicht überdehnt sind. Außerdem ist diese Messung für die Längenkorrektur der Drähte hilfreich. Kennt man die Abweichung der Drahtspannung von dem Sollwert, so kann man aus der Spannungsdifferenz auf die Längendifferenz schließen und somit die Drahtlänge dementsprechend korrigieren. Um die Spannung der im Modul verarbeiteten Drähte zu bestimmen, wurde die Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Drahtes von deiner Spannung genutzt (Abschn. 4.4.2). Die Drahtspannung wurde mit einer Wägezelle und die Eigenfrequenz mit einer Diode gemessen und beide in einem Diagramm (Abb. 4.22) gegeneinander aufgetragen. Misst man die Eigenfrequenz der im Modul eigebauten Drähte, so kennt man damit ihre Spannung.

Eine weitere Eigenschaft der Drähte, die untersucht werden muss, ist ihre Eigenaktivität, insbesondere bezüglich der Isotope  ${}^{137}_{55}$ Cs und  ${}^{60}_{27}$ Co (Kap. 4.2.4). Mit Hilfe eines Germaniumdetektors wurde dazu  $\gamma$ -Spektrum einer 2,39 kg schweren Probe des Drahtmaterials im Bereich von 0 keV bis 1800 keV aufgenommen und mit dem Untergrundspektrum des Aufbaus verglichen. Um auf die Aktivität des Drahtes schließen zu können, wurde die Differenz der beiden Spektren gebildet (Abb. 4.13). Innerhalb der Sensitivität der Messung wurden keine Erhöhungen festgestellt. Als Obergrenze für die spezifische Aktivität von  ${}^{137}_{55}$ Cs und  ${}^{60}_{27}$ Co ergibt sich:

 $\begin{aligned} &A[^{137}\text{Cs}~(661,77~\text{keV})] \leq 0,23~\text{Bq}~\text{kg}^{-1} \\ &A[^{60}\text{Co}~(1173,30~\text{keV})] \leq 0,20~\text{Bq}~\text{kg}^{-1} \\ &A[^{60}\text{Co}~(1332,49~\text{keV})] \leq 0,17~\text{Bq}~\text{kg}^{-1} \end{aligned}$ 

Die magnetischen Eigenschaften des Drahtes wurden mit Hilfe des Permeabilitätsmessgerätes "Ferromaster" der Firma "Stefan Mayer Instruments" untersucht. Dabei ergaben sich für den verwandten Draht Werte im Bereich von  $1, 1 \leq \mu_r \leq 1, 2$ . Obwohl die Permeabilität der Drähte damit vom gewünschten Wert von  $\mu_r \approx 1,02$  abweicht, stellt dies kein Problem dar, da die Materialmenge (ca. 30 kg) im Vergleich zum Gesamtgewicht der Elektrode zu vernachlässigen ist.

Nach dem Bau des ersten Prototypmoduls stellten wir eine deutliche Variation der Drahtspannung innerhalb einer Lage fest. In der ersten Drahtlage beträgt die maximale Spannungsdifferenz etwa 8 N, während sie in der zweiten Drahtlage etwa 4 N groß ist (Abb. 4.19). Die Spannung ist an der Position der C-Profile maximal und zwischen den C-Profilen minimal, da sich die Kämme dort aufgrund der Zugspannung der Drähte verbiegen. Die unterschiedlichen Drahtspannungen führen zu unterschiedlichen Durchbiegungen der Drähte aufgrund ihres Eigengewichtes. Um einen möglichst konstanten Drahtspannungverlauf in einer Lage zu bekommmen, wurden die Drähte auf individuelle Längen geschnitten. Somit wurden die Schwankungen in der Drahtspannung bis auf eine Restschwankung von maximal 3 N bei der ersten Lage und 2 N bei der zweiten Lage erfolgreich kompensiert (Abb. 4.20). Da dieses Verfahren für die Massenproduktion zu aufwändig ist, könnte man alternativ zur beschriebenen Prozedur entweder die Löcher in den Kämmen verschieden tief bohren oder die Kämme entgegen der Durchbiegung vorspannen.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, wie sich die Module nach dem Ausheizen verhalten. Zu diesem Zweck wurde eine ausheizbare Vakuumanlage gebaut. Seine Hauptkomponente ist ein zwei Meter langes Rohr mit einem Durchmesser von 30 cm, in welches ein speziell für diese Untersuchungen konstruiertes Testmodul mit 19 Drähten in zwei Lagen eingebracht

werden kann (Abb. 4.36). Vor dem Ausheizen des Testmoduls wurde die Drahtspannung sowie die Modulgeometrie vermessen. Letztere wurde mit Hilfe einer an dem Arm der Messmaschine angebrachten CCD-Kamera bestimmt, indem der Abstand zwischen zwei gegenüberliegenden Keramiken gemessen wurde. Nach diesen Messungen wurde das Testmodul etwa 2 Stunden lang bei ca. 350 °C ausgeheizt und anschließend erneut vermessen. Nach dem Ausheizen hat sich die Drahtspannung in der ersten Lage um durchschnittlich 2,6 N und in der zweiten um 1,5 N erhöht, während der Abstand der Kämme um durchschnittlich 0,18 mm in der ersten Lage und 0,37 mm in der zweiten Lage kleiner geworden ist (Abb. 4.37 und 4.38). Der Abstand zwischen den Kämme naher zusammenzieht. Nach weiteren Ausheizmessungen wurden nur minimale Änderungen sowohl in der Drahtspannung als auch in der Modulgeometrie festgestellt.

In weiteren Tests wird das Verhalten der Module nach dem Ausheizen noch genauer studiert werden. Die Änderung der Drahtspannung und somit auch der Modulgeometrie kann eventuell vermieden werden, wenn man die Drähte vor dem Einbau ins Modul tempert. Es wurden bereits Proben der Drähte etwa zwei Stunden lang bei ca. 350 °C im Ofen getempert. Momentan wird dieser Draht für weitere Messungen in das Testmodul eingespannt. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in der Diplomarbeit von Martina Reinhardt vorgestellt werden.

Mit Hilfe der konstruierten Vakuumanlage ist es auch möglich Messungen zur Bestimmung der Ausgasrate durchzuführen. Die ersten Tests liefern eine Ausgasrate für das Testmodul von  $q_m = 2, 3 \cdot 10^{-12} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ , wobei es vorher etwa 2 Stunden bei ca. 350 °C ausgeheizt wurde. Dieser Wert liegt nahe bei der KATRIN Spezifikation von  $q < 10^{-12} \frac{\text{mbar} \cdot 1}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$  (elektropoliert und ausgeheizt). Nach Fertigstellung der Ultraschallreinigungsanlage (Kap. 4.5.3) werden diese Messung wiederholt werden, um eine verlässliche Aussage über die Ausgasrate der Elektrodenmodule machen zu können.

Im Anschluss an diese Arbeit wird das endgültige Design der Drahtelektrodenmodule festgelegt werden, welches das mechanische und elektrische Schnittstelle zum Spektrometertank berücksichtigen wird und ein Konzept zur Formung des elektrischen Feldes zwischen den Modulen durch Kompensationsreifen über den Kämmen enthält.

Die Massenproduktion der Module wird im Jahr 2007 starten.

Anhang A

# Technische Zeichnungen der Bauelemente des Prototypmoduls



Abbildung A.1: Technische Zeichnung des Kamms.



Abbildung A.2: Technische Zeichnung des C-Profils.



### 80ANHANG A. TECHNISCHE ZEICHNUNGEN DER BAUELEMENTE DES PROTOTYPMODULS

Abbildung A.3: Technische Zeichnung des Endstücks für das C-Profil.

## Anhang B

# Elastizitätsmessungen

Längenänderung (mm)	Kraft (N)	Spannung $(N/mm^2)$
0	1	14,15
0,25	2,58	$36{,}50$
0,5	4,24	$59,\!98$
0,75	5,91	83,61
1	7,56	106,95
1,25	9,16	129,59
1,5	10,78	152,51
1,75	12,43	175,85
2	14,06	198,91
2,25	$15,\!68$	221,83
2,5	17,28	244,46
2,75	18,91	$267,\!52$
3	20,53	290,44
3,25	22,06	312,09
$3,\!5$	23,67	334,86
3,75	25,26	$357,\!36$
4	26,81	$379,\!28$
4,25	28,38	401,49
4,5	29,9	423,00
4,75	31,47	445,21
5	33	466,85
5,25	34,52	488,36
5,5	36	$509,\!30$
5,75	37,5	$530,\!52$
6	39	551,74
6,25	40,47	$572,\!53$
6,5	41,92	$593,\!05$

Längenänderung (mm)	Kraft $(N)$	Spannung $(N/mm^2)$
6,75	$43,\!4$	613,98
7	44,83	634,21
$7,\!25$	46,3	$655,\!01$
$7,\!5$	47,73	$675,\!24$
$7,\!75$	49,16	$695,\!47$
8	$50,\!6$	$715,\!84$
$^{8,25}$	52	$735,\!65$
$^{8,5}$	$53,\!41$	$755,\!60$
8,75	$54,\!81$	$775,\!40$
9	$56,\!22$	$795,\!35$
$9,\!25$	$57,\!6$	814,87
9,5	$58,\!93$	$833,\!69$
9,75	60,31	853,21
10	$61,\!61$	871,60
$10,\!25$	62,96	890,70
10,5	64,28	$909,\!38$
10,75	$65,\!58$	927,77
11	66,9	946,44
11,25	68,21	964,97

Tabelle B.1: Die Tabelle zeigt die Messwerte für die Bestimmung des elastischen Bereichs beim 0,3 mm Draht. Die dritte Spalte zeigt die ausgerechneten Spannungswerte. Diese erhält man, wenn man die Kraft durch die Querschnittfläche des Drahtes dividiert.

Längenänderung (mm)	Kraft $(N)$	Spannung $(N/mm^2)$
0	1	$31,\!83$
0,25	1,75	55,70
0,5	2,45	$77,\!99$
0,75	3,19	101,54
1	3,91	124,46
1,25	4,62	147,06
1,5	5,34	$169,\!98$
1,75	6,06	192,90
2	6,81	216,77
2,25	$7,\!53$	$239,\!69$
2,5	8,25	262,61
2,75	8,96	285,21
3	9,71	309,08
3,25	10,43	$332,\!00$
3,5	11,14	$354,\!60$
3,75	11,85	377,20
4	12,56	$399,\!80$
4,25	13,26	422,08
4,5	$13,\!97$	444,68
4,75	14,68	$467,\!28$
5	$15,\!39$	489,88
5,25	16,09	$512,\!16$
$5,\!5$	16,79	$534,\!44$
5,75	$17,\!46$	555,77
6	18,13	$577,\!10$
6,25	18,8	$598,\!42$
6,5	19,46	$619,\!43$
6,75	$20,\!12$	$640,\!44$
7	20,81	$662,\!40$
7,25	21,48	683,73
7,5	22,11	$703,\!78$
7,75	22,77	724,79
8	$23,\!43$	745,80
8,25	24,09	766,81
8,5	24,74	$787,\!50$
8,75	$25,\!37$	807,55
9	26,01	827,92
9,25	26,64	847,98

Tabelle B.2: Die Tabelle zeigt die Messwerte für die Bestimmung des elastischen Bereichs beim 0,2 mm Draht.



Abbildung B.1: Das elastische Verhalten des Drahtes der (a) ersten und (b) zweiten Lage.

Anhang C

# Durchbiegung der Drähte

Kraft (N)	Durchbiegung (mm)
2	0,44
3	$0,\!67$
4	0,79
5	0,87
6	$0,\!92$
7	$0,\!95$
8	$0,\!98$
9	1,005
10	1,02
11	1,035
12	1,04
13	1,05
15	1,065
17	1,075
20	1,09
23	$1,\!10$
26	1,11
30	$1,\!12$
33	$1,\!125$
36	1,13
40	1,13
43	1,13

Kraft (N)	Durchbiegung (mm)
1	$0,\!66$
2	0,81
3	0,92
4	0,98
5	1,00
6	1,02
7	1,03
8	1,04
9	1,05
10	1,06
11	1,065
12	1,07
13	1,07
15	1,08
17	1,085
20	1,095

Tabelle C.1: Abhängigkeit der Durchbiegung der Drähte der ersten (links) und der zweiten (rechts) Lage von der Zugkraft.

## Anhang D

# Energiespektren



Abbildung D.1: Die Energieeichung von Germanium Detektor.

## Anhang E

# Quellcode für die Bestimmung des Raumwinkelanteils

#include <stdlib.h> #include <stdio.h> #include <math.h> #include <stdarg.h> #include <time.h> #define RMIN 47.0 // min radius of steel coil #define RMAX 55.0 // max radius of steel coil #define ZMAX 50.0 // half height of steel coil #define DELX 80.0 // distance center steel coil to detector #define RDET 30.0 // radius of cylindrical detector static int rand\_seed=-1; double lambda\_s, lambda\_g; int n; static double ran1(void){ #define IA 16807 #define IM 2147483647 #define AM (1./IM) #define IQ 127773 #define IR 2836 #define NTAB 32 #define NDIV (1+(IM-1)/NTAB) #define RNMX (1.-1.2e-7) #define STEP 0.1 int j, k; static int iy=0, iv[NTAB]; double temp; if (rand\_seed <= 0 || !iy){

```
if (-rand_seed<1) rand_seed=1;</pre>
    else rand_seed=-rand_seed;
    for (j=NTAB+7; j>=0; j--){
     k=rand_seed/IQ;
      rand_seed=IA*(rand_seed-k*IQ)-IR*k;
      if (rand_seed<0) rand_seed+=IM;</pre>
      if (j<NTAB) iv[j]=rand_seed;</pre>
    }
    iy=iv[0];
  }
  k=rand_seed/IQ;
  rand_seed=IA*(rand_seed-k*IQ)-IR*k;
  if (rand_seed<0) rand_seed+=IM;</pre>
  j=iy/NDIV;
  iy=iv[j];
  iv[j]=rand_seed;
  if ((temp=AM*iy)>RNMX) return RNMX;
  else return temp;
  #undef IA
  #undef IM
  #undef AM
  #undef IQ
  #undef IR
  #undef NTAB
  #undef NDIV
  #undef RNMX
}
void init_ran1(){
  int i;
  for (i=time(NULL)%1000; i>0; i--)
    ran1();
  return;
}
void calc_solid_angle(){
  int i,i_hit;
  double n_hit_noabsorb;
  double x0,y0,z0,x,y,z,r,phi,theta,vx,vy,vz,v,d_steel;
  i_hit = 0;
  n_hit_noabsorb = 0.0;
  for (i=0;i<n;i++){</pre>
    z0 = (1.0-2.0*ran1())*ZMAX;
    r = 2*RMAX;
    while ( (r>RMAX) || (r<RMIN) ){
      x0 = RMAX*(1.0-2.0*ran1());
      y0 = RMAX*(1.0-2.0*ran1());
```

```
r = sqrt(x0*x0+y0*y0);
    }
    theta = acos(1.0-2.0*ran1());
    phi = ran1()*2*M_PI;
   vx = STEP*sin(theta)*cos(phi);
   vy = STEP*sin(theta)*sin(phi);
   vz = STEP*cos(theta);
    v = sqrt(vx*vx+vy*vy+vz*vz);
   d_steel = 0;
   x = x0;
   y = y0;
    z = z0;
   11
          printf("%f %f %f %f %f \n",x,y,z,cos(theta),phi);
    if (vx>0) {
      while (x<DELX+lambda_g){ // go stepwise in v-direction</pre>
        x += vx;
        y += vy;
        z += vz;
        r = sqrt(x*x+y*y);
        if ( (r>=RMIN) && (r<=RMAX) && (z>=-ZMAX) && (z<=ZMAX) ){ //
check whether inside steel coil
         d_steel += v;
        }
      }
      if ((y*y+z*z)<=(RDET*RDET)){ // hit detector ?</pre>
i_hit++;
        n_hit_noabsorb += exp(-d_steel/lambda_s);
printf("%f %f %f %f %f %f %f %f \n",x0,y0,z0,cos(theta),phi,d_steel,v);
      }
    }
  }
 printf("%f %f\n",(double)i_hit/n,n_hit_noabsorb/n);
 return;
}
int main(int argc, char *argv[]){
  if (argc<4){
    printf("solid_angle n-electron lambda_steel lambda_germanium");
    printf("\n");
  } else {
    n
             = atoi(argv[1]);
    lambda_s = atof(argv[2]);
    lambda_g = atof(argv[3]);
   init_ran1();
   calc_solid_angle();
 }
 return 0;
}
```

92ANHANG E. QUELLCODE FÜR DIE BESTIMMUNG DES RAUMWINKELANTEILS

Anhang F

# Drahtspannungen bei konstanter Drahtlänge

Kraft (N)

6,3

 $^{6,3}$ 

6,7

8,1

9

9,9

11

11,45

12

12,55

12,8

11,3

11

8,9

7,9

7,5

6,7

 $^{5,5}$ 

5

-

5,3

5,4

6,2

6,9

8,2

9,9

10,45

11

 $13,\!9$ 

14,55

### F.1 Drahtspannung 1. Lage (Ø 0,3 mm)

Drahtnummer	Kraft $(N)$	Drahtnummer
1	13,7	31
2	13,7	32
3	12,7	33
4	12,6	34
5	11,6	35
6	11,4	36
7	10,3	37
8	8,9	38
9	$^{7,3}$	39
10	$^{7,2}$	40
11	$^{7,1}$	41
12	6,9	42
13	6,7	43
14	$^{7,5}$	44
15	7,8	45
16	8,2	46
17	10,1	47
18	10,4	48
19	11,9	49
20	10,9	50
21	12,1	51
22	12,5	52
23	11,5	53
24	11,1	54
25	9,75	55
26	8,4	56
27	$7,\!6$	57
28	6,7	58
29	6,3	59
30	6	60

Tabelle F.1: Die Tabelle zeigt die gemessenen Spannungswerte in der ersten Drahtlage  $(\emptyset \ 0,3 \text{ mm})$ , wobei alle Drähte eine konstante Länge von 81,3 mm haben.

#### 94

### F.2 Drahtspannung 2. Lage (Ø 0,2 mm)

Drahtnummer	Kraft $(N)$	Drahtnummer
1	8,3	31
2	$^{8,5}$	32
3	$^{8,6}$	33
4	$^{6,5}$	34
5	6,8	35
6	$^{6,8}$	36
7	$^{6,3}$	37
8	$^{5,7}$	38
9	$^{5,3}$	39
10	$^{4,7}$	40
11	$^{4,3}$	41
12	4	42
13	$^{3,8}$	43
14	$^{4,5}$	44
15	$^{4,4}$	45
16	4,8	46
17	$^{5,3}$	47
18	$^{5,4}$	48
19	7	49
20	$^{6,8}$	50
21	$^{7,5}$	51
22	$^{7,5}$	52
23	7,3	53
24	$^{6,5}$	54
25	6,3	55
26	$5,\!5$	56
27	4,8	57
28	4,4	58
29	$3,\!9$	59
30	$^{4,6}$	60

Tabelle F.2: Die Tabelle zeigt die gemessenen Spannungswerte in der zweiten Drahtlage ( $\emptyset$  0,2 mm), wobei alle Drähte eine konstante Länge von 81,3 mm haben.

Kraft (N)

 $^{4,2}$  $^{3,8}$ 4,6 4,3 $^{5,4}$ 55,76,1 $^{6,5}$ 7,18,15 6,97  $^{5,8}$  $^{5,4}$  $^{5,4}$  $^{4,5}$ 3,93,75  $3,\!45$  $3,\!65$  $3,\!5$  $3,\!8$ 4 4,8 4,9  $^{5,6}$  $^{6,1}$ 6,7 $^{7,4}$ 

Anhang G

# Korrekturen der Drahtlänge

## G.1 Korrektur der Drahtlänge 1. Lage (Ø 0,3 mm)

Draht-	Kraft (N) nach	Kraftdifferenz (N)	Längendifferenz (mm)	korrigierte
Nummer	Formel $(4.15)$	von 10 N	nach Formel $(4.3)$	Drahtlänge (mm)
1	12,26	2,26	$0,\!35$	81,65
2	$12,\!52$	2,52	$0,\!39$	81,69
3	12,42	$2,\!42$	$0,\!37$	81,67
4	11,96	1,96	0,30	81,60
5	$11,\!19$	1,19	0,18	81,48
6	10,20	0,20	$0,\!03$	81,33
7	9,09	-0,91	-0,14	81,16
8	$7,\!99$	-2,01	-0,31	80,99
9	7,01	-2,99	-0,46	80,84
10	$6,\!25$	-3,75	-0,58	80,72
11	$5,\!81$	-4,19	-0,65	$80,\!65$
12	5,72	-4,28	-0,66	80,64
13	6,00	-4,00	-0,62	80,68
14	$6,\!62$	-3,38	-0,52	80,78
15	$7,\!51$	-2,49	-0,38	80,92
16	$8,\!57$	-1,43	-0,22	81,08
17	$9,\!69$	-0,31	-0,05	81,25
18	10,75	0,75	0,11	81,41
19	$11,\!63$	$1,\!63$	$0,\!25$	81,55
20	12,24	2,24	$0,\!35$	81,65
21	$12,\!52$	2,52	$0,\!39$	81,69
22	12,43	2,43	$0,\!37$	81,67
23	$11,\!98$	1,98	$0,\!30$	81,60
24	$11,\!22$	$1,\!22$	$0,\!19$	81,49
25	10,24	0,24	0,04	81,34
26	9,14	-0,86	-0,13	81,17
27	8,03	-1,97	-0,30	81,00
28	7,04	-2,96	-0,46	80,84
29	$6,\!28$	-3,72	-0,57	80,73
30	$5,\!82$	-4,18	-0,64	80,66
31	5,72	-4,28	-0,66	80,64
32	$5,\!99$	-4,01	-0,62	80,68
33	$6,\!59$	-3,41	-0,53	80,77
34	7,47	-2,53	-0,39	80,91
35	8,52	-1,48	-0,23	81,07
36	9,64	-0,36	-0,06	81,24
37	10,71	0,71	0,11	81,41

Draht-	Kraft (N) nach	Kraftdifferenz (N)	Längendifferenz (mm)	korrigierte
Nummer	Formel $(4.15)$	von 10 N	nach Formel $(4.3)$	Drahtlänge (mm)
38	11,60	1,60	$0,\!25$	81,55
39	12,22	$2,\!22$	$0,\!34$	81,64
40	$12,\!51$	$2,\!51$	$0,\!39$	$81,\!69$
41	12,44	$2,\!44$	$0,\!38$	81,68
42	12,00	2,00	0,31	81,61
43	11,26	1,26	$0,\!19$	81,49
44	$10,\!28$	$0,\!28$	$0,\!04$	81,34
45	$9,\!18$	-0,82	-0,13	$81,\!17$
46	8,07	-1,93	-0,30	81,00
47	7,08	-2,92	-0,45	80,85
48	6,30	-3,70	-0,57	80,73
49	$5,\!83$	-4,17	-0,64	80,66
50	5,72	-4,28	-0,66	80,64
51	$5,\!97$	-4,03	-0,62	80,68
52	6,56	-3,44	-0,53	80,77
53	7,43	-2,57	-0,40	80,90
54	8,48	-1,52	-0,23	81,07
55	9,60	-0,40	-0,06	81,24
56	$10,\!67$	$0,\!67$	0,10	81,40
57	$11,\!57$	$1,\!57$	$0,\!24$	81,54
58	$12,\!20$	$2,\!20$	0,34	81,64
59	$12,\!51$	$2,\!51$	$0,\!39$	81,69
60	$12,\!45$	$2,\!45$	$0,\!38$	81,68

Tabelle G.1: Die Tabelle zeigt die korrigierten Drahtlängen der ersten Lage (Ø $0,3\,$ mm), um die Schwankungen der Drahtspannung zu kompensieren.

## G.2 Korrektur der Drahtlänge 2. Lage (Ø 0,2 mm)

Draht-	Kraft (N) nach	Kraftdifferenz (N)	Längendifferenz (mm)	korrigierte
Nummer	Formel $(4.15)$	von 5,5 N	nach Formel $(4.3)$	Drahtlänge (mm)
1	7,06	1,56	$0,\!56$	81,86
2	7,26	1,76	$0,\!63$	81,93
3	$7,\!29$	1,79	$0,\!64$	81,94
4	$7,\!13$	1,63	$0,\!58$	81,88
5	6,81	1,31	$0,\!47$	81,77
6	$6,\!35$	0,85	0,31	81,61
7	5,81	$0,\!31$	$0,\!13$	81,43
8	$5,\!23$	-0,27	-0,07	81,23
9	4,69	-0,81	-0,26	81,04
10	4,22	-1,28	-0,42	80,88
11	$3,\!89$	-1,61	-0,54	80,76
12	3,72	-1,78	-0,60	80,70
13	3,73	-1,77	-0,59	80,71
14	$3,\!92$	-1,58	-0,53	80,77
15	4,27	-1,23	-0,41	80,89
16	4,74	-0,76	-0,24	81,06
17	$5,\!30$	-0,20	-0,05	81,25
18	$5,\!87$	$0,\!37$	$0,\!15$	81,45
19	6,41	0,91	0,33	81,63
20	6,85	$1,\!35$	$0,\!49$	81,79
21	$7,\!16$	$1,\!66$	$0,\!59$	81,89
22	$7,\!29$	1,79	$0,\!64$	81,94
23	$7,\!25$	1,75	$0,\!62$	81,92
24	7,03	$1,\!53$	$0,\!55$	81,85
25	$6,\!65$	$1,\!15$	$0,\!42$	81,72
26	$6,\!16$	$0,\!66$	$0,\!25$	$81,\!55$
27	$5,\!60$	$0,\!10$	$0,\!05$	81,35
28	5,03	-0,47	-0,14	81,16
29	4,51	-0,99	-0,32	80,98
30	4,08	-1,42	-0,47	80,83
31	$3,\!81$	-1,69	-0,57	80,73
32	3,70	-1,80	-0,60	80,70
33	3,78	-1,72	-0,58	80,72
34	4,03	-1,47	-0,49	80,81
35	4,43	-1,07	-0,35	80,95
36	4,94	-0,56	-0,17	81,13
37	$5,\!51$	0,01	0,02	81,32
Draht-	Kraft (N) nach	Kraftdifferenz (N)	Längendifferenz (mm)	korrigierte
--------	-----------------	--------------------	----------------------	-----------------
Nummer	Formel $(4.15)$	von 5,5 N	nach Formel $(4.3)$	Drahtlänge (mm)
38	$6,\!07$	$0,\!57$	0,22	81,52
39	$6,\!58$	1,08	$0,\!39$	81,69
40	$6,\!98$	$1,\!48$	$0,\!53$	81,83
41	$7,\!23$	1,73	$0,\!62$	81,92
42	7,30	1,80	$0,\!64$	81,94
43	$7,\!19$	$1,\!69$	0,60	81,90
44	6,91	1,41	$0,\!51$	81,81
45	$6,\!48$	$0,\!98$	0,36	81,66
46	$5,\!96$	$0,\!46$	$0,\!18$	81,48
47	5,39	-0,11	-0,02	81,28
48	4,83	-0,67	-0,21	81,09
49	4,34	-1,16	-0,38	80,92
50	$3,\!96$	-1,54	-0,51	80,79
51	3,75	-1,75	-0,59	80,71
52	3,71	-1,79	-0,60	80,70
53	$3,\!85$	-1,65	-0,55	80,75
54	4,16	-1,34	-0,44	80,86
55	4,61	-0,89	-0,29	81,01
56	$5,\!14$	-0,36	-0,10	81,20
57	5,72	$0,\!22$	$0,\!09$	81,39
58	$6,\!27$	0,77	$0,\!28$	81,58
59	6,74	1,24	$0,\!45$	81,75
60	7,09	$1,\!59$	$0,\!57$	81,87

Tabelle G.2: Die Tabelle zeigt die korrigierten Drahtlängen der zweiten Lage (Ø0,2mm), um die Schwankungen der Drahtspannung zu kompensieren.

ANHANG G. KORREKTUREN DER DRAHTLÄNGE

102

### Anhang H

## Drahtspannungen mit der korrigierten Drahtlänge

104ANHANG H. DRAHTSPANNUNGEN MIT DER KORRIGIERTEN DRAHTLÄNGE

#### H.1 Drahtspannung 1. Lage nach der Korrektur der Drahtlänge

Drahtnummer	Kraft $(N)$	
1	$^{8,25}$	
2	8,2	
3	$7,\!05$	
4	7,75	
5	$7,\!35$	
6	$8,\!35$	
7	$^{8,6}$	
8	$^{7,6}$	
9	$7,\!9$	
10	$^{8,5}$	
11	$^{8,15}$	
12	$^{8,6}$	
13	$7,\!95$	
14	$9,\!65$	
15	$_{9,4}$	
16	$^{8,9}$	
17	8,75	
18	9	
19	$9,\!05$	
20	8,2	
21	8,75	
22	$8,\!35$	
23	$8,\!95$	
24	$^{9,1}$	
25	9,05	
26	$9,\!45$	
27	9,8	
28	9,3	
29	8,6	
30	$9,\!8$	

Drahtnummer	Kraft $(N)$
31	$9,\!35$
32	$_{9,1}$
33	$10,\!65$
34	9,3
35	9,8
36	9,9
37	9,9
38	$9,\!85$
39	8,4
40	$^{8,65}$
41	9
42	9,2
43	9,2
44	$8,\!35$
45	$^{8,65}$
46	$^{8,05}$
47	8,2
48	7,75
49	8,1
50	$^{8,5}$
51	$^{8,55}$
52	8,1
53	$^{7,4}$
54	$7,\!35$
55	7,6
56	8,2
57	8,2
58	9,1
59	8,2
60	$8,\!5$

Tabelle H.1: Die Tabelle zeigt die gemessenen Spannungswerte in der ersten Drahtlage (Ø $0,3~\rm{mm}),$ nachdem die Drahtlänge korrigiert wurde.

#### H.2 Drahtspannung 2. Lage nach der Korrektur der Drahtlänge

Kraft (N) 5,35 $^{5,5}$ 5,95,8 $5,\!6$  $^{5,5}$ 5,76 5,9 $^{6,4}$ 6,3 $5,\!8$ 54,75 4,7 $^{4,2}$  $^{4,6}$ 54,55  $^{5,2}$  $^{5,1}$  $^{5,6}$  $^{5,6}$ 6,15,95,96 6,35,5-

Drahtnummer	Kraft $(N)$	Drahtnummer
1	$6,\!15$	31
2	5,3	32
3	$4,\!65$	33
4	$5,\!25$	34
5	4,9	35
6	$^{4,2}$	36
7	$^{4,7}$	37
8	$4,\!65$	38
9	$^{4,7}$	39
10	$^{5,1}$	40
11	$4,\!65$	41
12	$^{4,6}$	42
13	4,8	43
14	$^{4,8}$	44
15	$^{4,7}$	45
16	$^{4,6}$	46
17	4,8	47
18	$4,\!35$	48
19	$^{5,4}$	49
20	$^{5,4}$	50
21	6	51
22	$^{5,4}$	52
23	$^{5,3}$	53
24	$^{5,1}$	54
25	4,8	55
26	4,8	56
27	4,7	57
28	$4,\!65$	58
29	4,7	59
30	$5,\!05$	60

Tabelle H.2: Die Tabelle zeigt die gemessenen Spannungswerte in der zweiten Drahtlage ( $\emptyset$  0,2 mm), nachdem die Drahtlänge korrigiert wurde.

#### 106ANHANG H. DRAHTSPANNUNGEN MIT DER KORRIGIERTEN DRAHTLÄNGE

Anhang I

## Technische Zeichnung des Ofens



Abbildung I.1: Technische Zeichnung vom Rohr.

Anhang J

# Spannungs-Druck-Abhängigkeit

Spannung (V)	Druck (mbar)
$2,\!57$	1,50E-09
2,83	2,30E-09
2,88	2,60E-09
$2,\!98$	3,10E-09
3,03	3,50E-09
$3,\!09$	3,80E-09
$3,\!25$	5,00E-09
$3,\!84$	1,50E-08
3,91	1,70E-08
$3,\!93$	1,80E-08
3,95	1,80E-08
$3,\!99$	1,95E-08
4,28	3,35E-08
4,31	3,50E-08
$4,\!39$	4,00E-08
4,41	4,20E-08
4,48	4,80E-08
4,54	5,20E-08
$4,\!58$	6,00E-08
$4,\!59$	5,80E-08
$4,\!60$	5,90E-08
$4,\!61$	6,00E-08
$4,\!66$	6,60E-08
$4,\!68$	6,70E-08
4,70	7,00E-08
4,75	7,80E-08
4,76	8,00E-08
4,78	8,20E-08
4,79	8,10E-08
4,81	8,80E-08
4,87	1,00E-07
4,90	1,00E-07

Spannung (V)	Druck (mbar)
$4,\!99$	1,30E-07
$5,\!10$	1,50E-07
5,14	1,60E-07
5,24	2,00E-07
$5,\!38$	2,40E-07
5,41	2,70E-07
$5,\!42$	2,50E-07
$5,\!51$	3,20E-07
$5,\!64$	3,70E-07
$5,\!65$	3,40E-07
$5,\!67$	4,30E-07
5,70	4,50E-07
$5,\!98$	$7,\!60\text{E-}07$
6,01	8,00E-07
6,03	8,50E-07
6,04	8,50E-07
$6,\!08$	9,15E-07
$6,\!13$	9,85E-07
$6,\!15$	1,05E-06
6,17	1,20E-06
$6,\!29$	1,45E-06
6,48	1,90E-06
6,54	2,30E-06
$6,\!58$	2,40E-06
6,61	2,45E-06
6,62	2,50E-06
6,77	3,30E-06
$6,\!83$	3,65E-06
$6,\!85$	3,70E-06
$6,\!92$	4,35E-06
7,15	6,50E-06
7.16	6,80E-06

Tabelle J.1: Die Tabelle zeigt wie die Spannung vom analogen Ausgang der "IGC 21" Messröhresteuerung von dem Druck abhängt. Der Druck wird mit der Ionisationsmessröhre "VIG17" gemessen.

Anhang K

## Technische Zeichnung eines Kamms des Testmoduls



Abbildung K.1: Technische Zeichnung vom Kamm des Testmoduls.

Anhang L

## Drahtspannungen und Modulgeometrie nach Ausheizen

Draht-	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)
Nummer	vorm Ausheizen	nach 1. Ausheizen	nach 2. Ausheizen	nach 3. Ausheizen
1	11,9	15,16	15,5	15,4
2	13	$15,\!55$	$15,\!92$	15,8
3	$12,\!8$	15,2	$15,\!51$	$15,\!4$
4	$12,\!45$	15	$15,\!26$	15,2
5	11,8	14,5	14,75	14,7
6	12,7	$15,\!05$	$15,\!36$	15,2
7	12	14,6	14,93	14,9
8	11,9	14,6	14,91	14,8
9	$13,\!85$	16	16,32	16,3
10	13	$15,\!62$	15,97	15,9

Die Änderung der Drahtspannung erster Lage nach Ausheizen.

Tabelle L.1: Die Tabelle zeigt die Drahtspannungen der ersten Drahtlage nach jeweiligen Ausheizvorgängen.

Draht-	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)	Drahtspannung (N)
Nummer	vorm Ausheizen	nach 1. Ausheizen	nach 2. Ausheizen	nach 3. Ausheizen
1	$^{6,4}$	$7,\!65$	7,78	7,8
2	$^{6,1}$	7,44	$7,\!59$	$7,\!6$
3	$5,\!8$	7,4	$7,\!52$	$7,\!5$
4	$5,\!86$	$7,\!3$	$7,\!45$	$7,\!5$
5	$^{5,5}$	7,1	$7,\!19$	$7,\!2$
6	5,9	7,4	$7,\!52$	$7,\!5$
7	$5,\!6$	7,2	7,37	7,4
8	$5,\!6$	7,2	7,37	7,1
9	5,8	7,43	$7,\!59$	-

Die Änderung der Drahtspannung zweiter Lage nach Ausheizen.

Tabelle L.2: Die Tabelle zeigt die Drahtspannungen der zweiten Drahtlage nach jeweiligen Ausheizvorgängen.

Draht-	Abstand (mm)	Abstand (mm)	Abstand (mm)	Abstand (mm)
Nummer	vorm Ausheizen	nach 1. Ausheizen	nach 2. Ausheizen	nach 3. Ausheizen
1	1777,67	1777,58	1777,54	1777,52
2	1777,74	$1777,\!62$	$1777,\!62$	1777,59
3	1777,77	1777,61	1777,59	1777,54
4	1777,72	1777,55	1777,51	1777,59
5	$1777,\!62$	1777,44	1777,42	1777,43
6	$1777,\!63$	1777,4	1777,4	1777,41
7	1777,64	1777,42	1777, 45	1777,41
8	1777,81	1777,57	1777,58	1777,57
9	1777,69	1777,48	1777,49	1777,48
10	1777,75	1777,54	1777,54	1777,52

Die Änderung des Abstandes in der ersten Lage nach Ausheizen.

Tabelle L.3: Die Tabelle zeigt die Abstände zwischen den Kämmen in der ersten Drahtlage nach jeweiligen Ausheizvorgängen.

Draht-	Abstand (mm)	Abstand (mm)	Abstand (mm)	Abstand (mm)
Nummer	vorm Ausheizen	nach 1. Ausheizen	nach 2. Ausheizen	nach 3. Ausheizen
1	1776,89	$1776,\!58$	$1776,\!55$	1776,64
2	1776,89	1776,58	$1776{,}53$	$1776,\! 6$
3	1776,76	1776,39	1776, 36	$1776,\!44$
4	1776,77	1776,4	1776,4	$1776,\!44$
5	$1776,\!64$	1776,23	1776,23	1776,28
6	1776,83	1776,42	1776,43	1776,5
7	1776,78	$1776,\!38$	1776,4	1776,31
8	1776,72	$1776,\!35$	1776,37	1776,4
9	1776,88	1776,49	-	-

Die Änderung des Abstandes in der zweiten Lage nach Ausheizen.

Tabelle L.4: Die Tabelle zeigt die Abstände zwischen den Kämmen in der zweiten Drahtlage nach jeweiligen Ausheizvorgängen.

116ANHANG L. DRAHTSPANNUNGEN UND MODULGEOMETRIE NACH AUSHEIZEN

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Beiträge zur Energiedichte $\Omega$ des Universums	1
1.2	Das solare Neutrinospektrum	2
1.3	Der Experimentelle Aufbau zum Nachweis des Antineutrinos	3
1.4	Die Anzahl der gemessenen Neutrinos gegen den Zenitwinkel	5
1.5	Die Ergebnisse des SNO-Experiments.	7
1.6	Die Massenparabeln.	7
1.7	Der neutrinobehaftete und der neutrinolose doppelte $\beta\mbox{-}{\rm Zerfall}.$ $\hfill$	8
1.8	Das Energiespektrum der Elektronen beim doppelten $\beta\mbox{-}{\rm Zerfall.}$	8
2.1	Das Prinzip des MAC-E-Filters	14
2.2	Transmissionsfunktion	16
2.3	Das Drahtelektrodenprinzip	18
2.4	Der schematische Aufbau der Drahtlagen.	18
3.1	Das Energiespektrum der Elektronen des Tritium $\beta$ -Zerfalls	21
3.2	Schematische Darstellung des KATRIN Experiments	22
3.3	Tritium Zerfall	22
3.4	Schematische Darstellung der WGTS.	23
3.5	Schematische Darstellung des Transportsystems.	23
3.6	Das Vorspektrometer.	24
3.7	Das Hauptspektrometer	24
3.8	Die Aufteilung des Hauptspektrometers.	26

4.1	Schematische Darstellung eines Moduls.	28
4.2	Befestigung der Drähte mit Hilfe einer Keramikkapillare	28
4.3	Aufbau zur Untersuchung der Drahtoberfläche (Lichtmikroskop)	29
4.4	Mikroskopaufnahmen der Drahtoberflächen	30
4.5	Die Bestimmung des Elastizitätsbereichs der Drähte	32
4.6	Abweichung von der Linearität für die Abschätzung des elastischen Bereiches.	33
4.7	Die Bestimmung der Drahtdurchbiegung mit Hilfe des Mikroskops	34
4.8	Der Durchhang der Drähte in Abhängigkeit von der Kraft	35
4.9	Die Zerfallschemata der relevanten radioaktiven Isotope	37
4.10	Der Messaufbau zur Abschätzung der Eigenradioaktivität des Drahtmaterials.	38
4.11	Das Eichspektrum und die Eichkurve.	39
4.12	Die gemessenen Energiespektren mit und ohne Drahtspule	40
4.13	Differenz der Energiespektren	41
4.14	Energie intervalle, in denen die $^{137}_{55}\mathrm{Cs}\text{-Linie}$ und $^{60}_{27}\mathrm{Co}\text{-Linien}$ erwartet werden.	42
4.15	Modul prototyp für den Zentralteil des KATRIN Hauptspektrometers. $\ .$ $\ .$	44
4.16	Die Biegeapparatur und die Drahtablängvorrichtung	45
4.17	Der Kammzahn ohne und mit Keramikstück.	46
4.18	Möglichkeit, die Drähte einer Lage miteinander leitend zu verbinden	46
4.19	Die Variation der Drahtspannung.	47
4.20	Die Drahtspannung nach der Längenkorrektur.	48
4.21	Die Stiefelmayer 3D-Messmaschine	50
4.22	Die Kraft-Frequenz-Abhängigkeit der Drähte.	52
4.23	Das Funktionsprinzip des optischen Sensors und das erzeugte Signal	53
4.24	Die "AVT Marlin F-080B" Kamera.	54
4.25	Mit der Kamera aufgenommenes Bild einer Keramik	54
4.27	Der schematische Aufbau der Ionisationsmessröhre	56
4.26	Der schematische Aufbau der Vakuumanlage	57
4.28	Der schematische Aufbau eines Quadrupol-Massenspektrometers	58
4.29	Massenspektren des leeren Ofens	59

4.30	Installation der Heizbänder	60
4.31	Befestigung der Temperatursensoren	61
4.32	Zusammenhang zwischen dem angezeigten Druck und dem Spannungsaus- gang der "IGC 21"-Auslese.	62
4.33	LabVIEW-Programm zur Anzeige von Temperatur und Druck	62
4.34	Vakuumofen mit Steinwolle zur Wärmeisolation.	63
4.35	Der vollständige Vakuumofen	64
4.36	Das Testmodul	65
4.37	Die Änderung der Drahtspannung des Testmoduls nach drei Heizvorgängen.	66
4.38	Abstand zwischen den Kämmen vor und nach drei Heizvorgängen. $\ . \ . \ .$	67
4.39	Die Änderung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur	68
4.40	Messung der Ausgasrate	69
4.41	Reinigungsanlage	71
A.1	Technische Zeichnung des Kamms.	78
A.2	Technische Zeichnung des C-Profils.	79
A.3	Technische Zeichnung des Endstücks für das C-Profil.	80
B.1	Das elastische Verhalten der Drähte.	84
D.1	Die Energieeichung von Germanium Detektor	88
I.1	Technische Zeichnung vom Rohr.	108
K.1	Technische Zeichnung vom Kamm des Testmoduls.	112

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

120

### Tabellenverzeichnis

4.1	Die Absorptionslängen der Photonen im Eisen und Germanium 43
4.2	Die zum Ofenbau benutzten Heizbänder
B.1	Die Elastizitätsmessung vom 0,3 mm Draht
B.2	Die Elastizitätsmessung vom 0,2 mm Draht
C.1	Die Durchbiegung der Drähte
F.1	Drahtspannung der ersten Lage bei konstanter Drahtlänge
F.2	Drahtspannung der zweiten Lage bei konstanter Drahtlänge 95
G.1	Korrektur der Drahtlänge erster Lage
G.2	Korrektur der Drahtlänge zweiten Lage
H.1	Drahtspannung erster Lage nach der Korrektur der Drahtlänge 104
H.2	Drahtspannung zweiter Lage nach der Korrektur der Drahtlänge 105
J.1	Spannungs-Druck-Abhängigkeit der "IGC 21" Messröhresteuerung 110
L.1	Drahtspannungen der ersten Drahtlage nach den Ausheizvorgängen 114
L.2	Drahtspannungen der zweiten Drahtlage nach den Ausheizvorgängen 114
L.3	Die Abstände in der ersten Drahtlage nach den Ausheizvorgängen 115
L.4	Die Abstände in der zweiten Drahtlage nach den Ausheizvorgängen 115

TABELLENVERZEICHNIS

#### Literaturverzeichnis

- [Ahm02] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), arXiv:nucl-ex/0204008
- [ALE06] ALEPH et al., "Precision Electroweak Measurements on the Z Resonance", arXiv:hep-ex/0509008
- [Alt03] G. Altarelli & K. Winter, Neutrino Mass, Springer, 2003
- [Ash04] Y. Ashie et al. (Super-Kamiokande Collaboration), arXiv:hep-ex/0404034
- [Bea80] G. Beamson et al., J. Phys. E: Sci. Instrum. 13 (1980) 64 66
- [CFW] www.calfinewire.com/particle.asp
- [Dra02] BSCW, 2002, http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d47120/Radioactive\_steel.pdf
- [Dre01] G. Drexlin, FZK Karlsruhe, Desy Seminar, November 2001
- [Eic05] http://www-zeuthen.desy.de/astro-workshop/postersession/eichelhardt.pdf
- [Fel98] Gary J. Feldman & Robert D. Cousins, Phys. Rev. D Volume 57 (1998)
- [Fer34] E. Fermi, Z. Phys. 88 (1934) 161 177
- [Gam05] Babak Alikhani, Marcus Tassler, Lars Zeidlewicz, WF-Praktikum, Gammaspektroskopie und Radioaktivitätsmessung mit einem Ge-Detektor, Oktober 2005
- [Got05] Holger Gottschlag, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Uni Münster, 2005
- [Hab06] Frank Eichelhardt & Florian Habermehl Seminar des Graduiertenkollegs "Hochenergiephysik und Teilchenastrophysik", Uni Karlsruhe, 01.12.06
- [Herak] www.heraklith.at
- [HME04] http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/jahrbuch/2004/ kernphysik/forschungsSchwerpunkt2/index.html
- [Horst] http://www.horst.de/HBS.htm

- [Int04] Interpretation of UHV Measurements, Lutz Bornschein und Joachim Wolf, August 2004
- [Jac02] J. D. Jackson, Klassische Elektrodynamik, de Gruyter, 2002
- [Jöh07] Raphael Jöhren, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Uni Münster, 2007
- [KAT04] KATRIN Design Report 2004
- [Kra05] Ch. Kraus et al., Eur. Phys. J. C 40, 466 (2005)
- [Kru83] P. Kruit & F.H. Read, J. Phys. E 16, 313 (1883)
- [Lob03] V.M. Lobashev et al., Nucl. Phys. A 719, 157c (2003)
- [Mai07] Gespräch mit Prof. Maier, Uni Bonn
- [MPI] Max-Planck-Institut für Kernphysik http://www.mpihd.mpg.de/nuastro/Viewphotos/snspectrum.html
- [NASA] http://aemc.jpl.nasa.gov/activities/mms.cfm
- [NatIn] http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/11442
- [Nudat] http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx\_dec.jsp
- [Pla05] R. Platzek, Oscillations of the Wirescanner, 13.12.2005
- [Pra06] Matthias Prall, XI. KATRIN Collaboration Meeting, Karlsruhe, 24-27 September 2006
- [Rei57] R. Reines and C. L. Cowan, Phys. Rev. 107, 1609 1611 (1957)
- [Sandv] http://www2.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01599.nsf/
- [Schw] http://ap.physik.uni-konstanz.de/Anleitungen/Saitenschwingungen.pdf
- [SK99] http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/ykphd/chap3-3.html
- [Spe03] Technical Specification of the Manufacturability Study for a very big Vacuum Vessel (The Main Spectrometer of the KATRIN Experiment), Forschungszentrum Karlsruhe, 2003
- [Stu07] Michael Sturm, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Uni Karlsruhe, 2007
- [Sut94] Christine Sutton, Raumschiff Neutrino, Birkhäuser Verlag AG (1994)
- [Tem<br/>07] Kim Temming, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Uni Münster, Februar<br/> 2007
- [Thü06] Thomas Thümmler, DPG Frühjahrestagung, Dortmund, 27.-31.03.2006

- [Val04] Kathrin Valerius, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Uni Bonn, 2004
- [Val05a] http://fuzzy.fzk.de/bscw/bscw.cgi/d157898/KurzeModule\_KValerius.pdf
- [Val05b] Kathrin Valerius, IX. KATRIN Collaboration Meeting, Karlsruhe, 26-28 September 2005
- [Val06] Kathrin Valerius, XI. KATRIN Collaboration Meeting, Karlsruhe, 25-27 September 2006
- [Vogel] www.vogelsang-edelstaehle.de

#### Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meines Studiums unterstützt haben und somit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr. Christian Weinheimer für ein sehr interessantes Thema, für die lehrreichen Aufenthalte am Forschungszentrum Karlsruhe, die Möglichkeit zur Teilnahme an der Astroteilchenschule in Obertrubach-Bärnfels und an Seminaren wie dem "Leybold-Seminar" oder an mehreren Tagungen wie DPG oder VIDMAN. Außerdem danke ich für die Unterstützung in jeder Situation, für viele wertvolle Hinweise und Ideen, die für die Verwirklichung der Arbeit sehr wichtig waren.

Mein Dank gilt ebenfalls Dr. Volker Hannen und Kathrin Valerius für die hervorragende Betreuung bei der Durchführung meiner Diplomarbeit und bei der Vorbereitung meiner Vorträge. Für die ausführliche Einführung in das KATRIN Experiment danke ich ebenfalls Kathrin Valerius.

Ein großes Dankeschön gilt an Dipl.-Ing. Hans-Werner Ortjohann für den großen Beitrag beim Aufbau der Vakuumanlage und bei der Durchführung der Messungen. Von seinem Wissen konnte ich sehr profitieren und habe von ihm jede Menge gelernt. Für die technischen Zeichnungen bin ich ihm ebenfalls dankbar. Martina Reinhardt danke ich für die Durchfürung der Tests, die ebenfalls in diese Arbeit einbezogen sind.

Ich möchte mich noch bei Thomas Thümmler, Matthias Prall und Björn Hillen für die Hilfe beim LabVIEW- und C++ Programmieren bedanken. Sie waren in jedem Moment bereit mir zu helfen. Für die Hilfestellungen und Tipps beim Datenauswerten danke ich Dr. Nikita Titov.

Herzlich danken möchte ich auch meiner Familie, insbesondere meiner Frau Irina für ihr Verständnis und ihre Geduld, gerade im letzten Abschnitt meiner Diplomarbeit.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern fürs Dasein.

Dank sagen möchte ich auch meinem Freund Babak Alikhani. Während des Studiums konnten in zahlreichen Gesprächen und Diskussionen viele physikalischen Probleme gelöst und Fragen geklärt werden.

Ich möchte mich noch bei den Mitarbeitern der mechanischen und der elektrischen Werkstatt für das Fertigstellen mehrerer Bauteile bedanken.

Dankend erwähnen möchte ich außerdem Helmut Baumeister für die Hilfe beim Arbeiten mit dem Lichtmikroskop und beim Aufbau des Ofens und Werner Hassenmeier für die tollen Bilder. Ebenfalls sehr hilfreich beim Ofenaufbau waren Virginie Grundig und Volker Hannen.

Der gesamten Arbeitsgruppe: Prof. Dr. Christian Weinhemer, Dr. Marcus Beck, Michaela Erdmann, Peter Friedag, Daniel Hampf, Dr. Volker Hannen, Björn Hillen, Frank Hochschulz, Karen Hugenberg, Raphael Jöhren, Hans-Werner Ortjohann, Beatrix Ostrick, Matthias Prall, Martina Reinhardt, Jürgen Smollich, Kim Temming, Thomas Thümmler, Dr. Nikita Titov, Kathrin Valerius, Sebastian Vöcking, Irina Wolff danke ich für die nette Atmosphäre, für viele leckere Kuchen und fürs Spaßmachen.

### Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Alexander Gebel, die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt zu haben.

Münster, 15. März 2007

Alexander Gebel