

Verifikation der Energiekalibration und Untersuchung von Störeinflüssen am **KATRIN Hochspannungssystem**

Diplomarbeit von

Stanislav Chirkov

An der Fakultät für Physik Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Erstgutachter: Zweitgutachter: Betreuender Mitarbeiter: Dr. Thomas Thümmler

Prof. Dr. Guido Drexlin Prof. Dr. Thomas Müller

Bearbeitungszeit: 15. März 2012 – 14. März 2013

Erklärung

Ich versichere wahrheitsgemäß, diese Arbeit selbstständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

> Stanislav Chirkov Karlsruhe, 14. März 2013

Inhaltsverzeichnis

1.	Einle	eitung	1
2.	Das	KATRIN-Experiment	3
	2.1.	Neutrinos	3
	2.2.	Der Aufbau des KATRIN-Experiments	6
		2.2.1. Das MAC-E-Filter-Prinzip	6
		2.2.2. Quellbereich und Transportstrecke	8
		2.2.3. Spektrometer- und Detektorbereich	9
		2.2.4. Das Monitorspektrometer	11
	2.3.	Statistische und systematische Unsicherheiten	12
3.	Hoc	hspannungssystem am KATRIN-Hauptspektrometer	15
	3.1.	Erzeugung und Verteilung des Retardierungspotenzials	15
		3.1.1. Spannungsversorgung der Drahtelektrode	16
		3.1.2. Hochspannungsverteileranlagen	18
	3.2.	Überwachung des Retardierungspotenzials	20
	3.3.	Präzisions-Hochspannungsteiler	21
		3.3.1. K35-Spannungsteiler	22
		3.3.2. K65-Spannungsteiler	23
		3.3.3. Kalibration der Hochspannungsteiler	26
	3.4.	Hochspannungsnachregelung	28
4.	Kalil	brationskonzept der Hochspannung	31
	4.1.	Kalibration der Multimeter	31
	4.2.	Überwachung der Hochspannung am Monitorspektrometer	34
		4.2.1. Kalibrationsquellen	34
	4.3.	Verifikation der Spannungsstabilität	35
		4.3.1. Bestimmung der Linienposition am Monitorspektometer	36
		4.3.2. K-32-Linie	38
		4.3.3. L_3 -32-Linie	41
5	Unte	ersuchung der Störeinflüsse der TMP auf die HV-Stabilität	43
э.	5.1	Turbomolekularnumpen im KATBIN-Experiment	43
	5.2	Aufbau des TMP-Teststandes	44
	5.2.	Messungen	46
	0.0.	5.3.1 Messzustände	46
		5.3.2 Messungen des Frequenzspektrums	48
		5.3.3 Messungen des Ableitstroms	-10 52
	54	Zusammenfassung der Froehnisse	52
	0.4.		54

6. Zusammenfassung

Anhang		55	
А.	Kalibrationsdaten der Fluke 8505A Multimeter	55	
В.	Schaltpläne	58	
Literaturverzeichnis			
Abbildungsverzeichnis			

1. Einleitung

Die Geschichte des Neutrinos hat vor über 80 Jahren angefangen. Der späte erste Nachweis dieses Elementarteilchens, der erst 26 Jahre nach seiner Postulierung erbracht worden ist, lässt bereits erahnen, dass es starken Anstrengungen bedarf, um die Erforschung dieses schwer nachweisbaren Teilchens voranzutreiben. Während das Neutrino im Standardmodell der Teilchenphysik ein masseloses Teilchen darstellt, konnten die Beobachtungen der Neutrinooszillationen das Gegenteil beweisen. Damit wurde das Fenster zur Physik jenseits des Standardmodells geöffnet. Eine endliche Neutrinomasse könnte bei der anfänglichen Phase der Universumbildung eine bedeutende Rolle gespielt haben. Seit der Entdeckung der Neutrinooszillationen wunden viele Versuche unternommen, die Neutrinomasse zu bestimmen.

Eines der Experimente zur Bestimmung der Neutrinomasse ist das KATRIN-Experiment, um das sich bei dieser Arbeit die ganzen Untersuchungen drehen. Im Vergleich zu anderen Experimenten, bei denen die Massenbestimmung modellabhängig ist, benutzt das KATRIN-Experiment die Kinematik des Dreikörperzerfalls, der beim β -Zerfall eines Tritiumatoms gegeben ist. Damit kann die Neutrinomasse modellunabhängig bestimmt werden.

Bei den bisherigen Experimenten, die auf dem gleichen Prinzip wie das KATRIN-Experiment basierten, wurde eine Obergrenze der Elektron-Antineutrinomasse von 2,3 eV gefunden. Diese Experimente waren nicht sensitiv genug, um die tatsächliche Masse zu bestimmen. Das KATRIN-Experiment weist eine um Faktor 10 verbesserte Sensitivität gegenüber den bisherigen Experimenten auf. Sollte die Masse des Elektron-Antineutrinos zwischen 0,3 eV und 2,3 eV liegen, wird sie vom KATRIN-Experiment mit ausreichender Signifikanz bestimmt. Andernfalls wird die Obergrenze der Neutrinomasse auf 0,2 eV herabgesetzt und nach neuen experimentellen Möglichkeiten der Massenbestimmung gesucht.

Die Verbesserung der Sensitivität um Faktor 10 gegenüber den bisherigen Experimenten impliziert eine Verbesserung vieler Parameter um Faktor 100. Eines der wichtigsten Parameter stellt die Erzeugung der stabilen Hochspannung am Analysierteil des KATRIN-Experiments – dem Hauptspektrometer – dar. Zu hohe Schwankungen der Hochspannung wirken sich auf die Bestimmung der Neutrinomasse negativ aus. So dürfen die Hochspannungsschwankungen nur im niedrigen ppm-Bereich auftreten. Deshalb muss die eingestellte Hochspannung mit ausreichender Präzision ständig überwacht werden.

Diese Arbeit befasst sich mit den Überwachungsmaßnahmen der Hochspannung, der Verifikation der Spannungsstabilität am Monitorspektrometer sowie den Untersuchungen der Störungen, die beim Betrieb der Turbomolekularpumpen entstehen können.

2. Das Karlsruher Tritium Neutrino-Experiment

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wird ein Überblick über die Neutrinoforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gegeben. Dabei wird zuerst auf die Neutrinos und die Möglichkeiten ihrer Massenbestimmung eingegangen, gefolgt von der Beschreibung des Karlsruher Tritium Neutrino-Experiments (KATRIN-Experiment) zur Bestimmung der Elektron-Antineutrino-Masse. Letzter Abschnitt des Kapitels widmet sich der Betrachtung des Einflusses der Störungen auf die Bestimmung der Neutrinomasse im KATRIN-Experiment.

2.1. Neutrinos

Die Geschichte des Neutrinos begann im Jahr 1930 mit der Postulierung dieses Teilchens durch Wolfgang Pauli [Pau30]. Mit diesem Teilchen konnten fundamentalen Erhaltungssätze der Physik, wie Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung ihre Gültigkeit beibehalten. Heute sind drei verschiedene Neutrinoarten bekannt: das Elektron-Neutrino ν_e , das Myon-Neutrino ν_{μ} und das Tau-Neutrino ν_{τ} . Zusammen mit den Elektronen e⁻, Myonen μ^- und Tauonen τ^- bilden die Neutrinos die Gruppe der Leptonen und stellen zusammen mit den sechs Quarkt die 12 Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik. Abbildung 2.1 zeigt die Gruppierung der Teilchen nach den Generationen, sowie die Eichbosonen der fundamentalen Wechselwirkungen.

Im Standardmodell der Teilchenphysik sind die Neutrinos masselos und unterliegen nur der Wirkung der schwachen Wechselwirkung. Damit werden Neutrinos zum Beispiel bei radioaktiven Zerfällen erzeugt beziehungsweise vernichtet. Die Neutrinos der ersten Generation und ihre Antiteilchen sind an folgenden semileptonischen Reaktionen beteiligt:

$$n \longrightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e$$
 (2.1)

$$\overline{\nu}_e + p \longrightarrow n + e^+$$
 (2.2)

$$e^- + p \longrightarrow n + \nu_e$$
 (2.3)

Die erste Reaktion ist typisch für den β -Zerfall eines Atomkerns. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weitere Prozesse, die zur Entstehung der Neutrinos führen, wie die rein leptonische Reaktionen:

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu$$
 (2.4)

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu}_\mu \tag{2.5}$$



Abbildung 2.1.: Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Abbildung aus [Wik13].

Da die Neutrinos zu den am häufigsten vorkommenden Teilchen zählen, existieren eine ganze Reihe verschiedener Neutrinoquellen. Diesen Quellen unterscheiden sich in Energien und Flussdichten der Neutrinos um viele Größenordnungen. Abbildung 2.2 zeigt die Vielfalt der Neutrinoquellen und ihre Unterscheidung im Neutrinofluss und Neutrinoenergie. Die größte Flussdichte wird von den Neutrinos aus der früheren Anfangsphase des Universums, den kosmologischen Neutrinos, verursacht. Jedoch ist die Energie dieser Neutrinos so klein, dass kein Nachweis bisher gelungen ist.

Die Fusionsreaktionen im Inneren der Sonne, in Folge derer Wasserstoff auf verschiedenen Wegen zu Helium fusioniert wird, liefern eine Menge an Elektron- und Antielektronneutrinos. Die Energien dieser Neutrinos bewegen sich im keV und MeV Bereich. Der Beitrag zum Neutrinofluss von anderen Sterne, die sich im stabilen Zustand befinden, ist dabei um viele Größenordnungen kleiner, aufgrund der enormen Abstände zu ihnen.

Supernovaneutrinos entstehen beim Kernkollaps der Sterne mit mindestens 8 Sonnenmassen am Ende ihres Lebens, wenn keine Fusionsprozesse mehr möglich sind.

Atmosphärische Neutrinos sind sehr energiereich. Sie entstehen in Folge der Wechselwirkungskette der kosmischer Strahlung mit der Erdatmosphäre. Obwohl die Flussdichte dieser Neutrinos im Vergleich zu den anderen Quellen gering ist, ermöglichen hohe Energien atmosphärischer Neutrinos ihre leichtere Detektion, da der Wechselwirkungsquerschnitt mit steigender Neutrinoenergie ebenfalls ansteigt.

Neben den Neutrinos aus natürlichen Quellen, zu denen auch Neutrinos aus Zerfallsprozessen der radioaktiven Elemente im Erdinneren gehören, gibt es auch künstliche erzeugte Neutrinos. Die Kernreaktoren, Forschungsreaktoren und Teilchenbeschleuniger gehören zu den Quellen, bei denen Neutrinos auf künstlichem Wege produziert werden.

Durch Analyse der von der Sonne emittierten Neutrinos wurde Festgestellt, dass Neutrinos eine Masse besitzen müssen. Durch Verständnis der Vorgänge in der Sonne kann die Anzahl der emittierten Elektron-Neutrinos berechnet werden. Die Messungen zeigen allerdings, dass nur ca. 40 % von den erwarteten Neutrinomenge die Erde erreichen. Daher ist davon auszugehen, dass diese sich während des Fluges von der Sonne zur Erde in eine andere Neutrinoart (Neutrinoflavour) umgewandelt haben. Diese Neutrinooszillation setzt voraus, dass die Flavoureigenzustände ν_{α} eine Superposition der Masseneigenzustände ν_i sind. Damit setzen Neutrinooszillationen eine endliche Masse voraus. Der Neutrinofluss



Abbildung 2.2.: Neutrinofluss unterschiedlicher Quellen. Abbildung aus [Dre11].

von der Sonne, der die Neutrinooszillationen zeigt wurde von mehreren unabhängigen Experimenten vermessen.

Eine der Methoden zur Massenbestimmung des Neutrinos besteht in der Vermessung des Spektrums der Elektronen, die beim β -Zerfall des Tritiumkerns entstehen (siehe Abbildung 2.3). Beim Dreikörperzerfall verteilen sich die Impulse zu unterschiedlichen Teilen auf alle drei Körper. Die Auswirkung der von Null verschiedener Neutrinomasse auf das Elektronenspektrum wird erst in der Nähe des Tritiumendpunktes sichtbar.

Auf der Vermessung des β -Spektrums des Tritiumzerfalls nahe des Endpunktes basiert die Massenbestimmung beim KATRIN-Experiment sowie seiner Vorgängerexperimente in Mainz und Troitsk.



Abbildung 2.3.: Energiespektrum der Elektronen beim Tritium- β -Zerfall. Erst im Bereich nahe des Endpunktes wird der Einfluss der endlichen Neutrinomasse auf des Elektronenspektrum sichbar. Abbildung aus [Thu07].



Abbildung 2.4.: **Aufbau des KATRIN-Experiments.** Zur Erläuterung siehe Kapitel 2.2. Abbildung aus [Kra12].

2.2. Der Aufbau des KATRIN-Experiments

Das am KIT im Aufbau befindliche KATRIN-Experiment, das die Masse des Elektron-Antineutrino modellunabhängig bestimmen soll, wird auf die Messung der Neutrinomasse mit einer Sensitivität von 0,2 eV (90 % C. L.)¹ ausgelegt sein. Damit wird die Sensitivität gegenüber den bisherigen Experimenten zur modellunabhängigen Massenbestimmung des Neutrinos um Faktor 10 gesteigert. Um genügend Statistik zu erreichen wird eine Messzeit beim KATRIN-Experiment von mindesten 3 Jahren nötig sein.

Das Design des Experiments und seine technische Umsetzung wurde von einem Team aus über einhundert Mitarbeitern der KATRIN Kollaboration im KATRIN Design Report [A⁺04] eingehend beschrieben.² Die Massenbestimmung des Neutrinos folgt aus der Betrachtung des Elektronenspektrums der β -Elektronen aus dem Tritium- β -Zerfall in der Nähe seines Endpunktes. Dazu wird das Elektronenenergiespektrum in integraler Form vermessen. Die Elektronen müssen ein elektrostatisches Potenzial überwinden, das von einem Spektrometer gebildet wird. Beim Verfahren des elektrostatischen Potenzials um die Energie des Tritiumendpunktes wird somit gesamtes Elektronenspektrum am interessierenden Endpunkt aufgenommen.

Im Folgenden wird ein Überblick über das KATRIN-Experiment gegeben, dessen Gesamtaufbau (siehe Abbildung 2.4) grob in zwei Bereiche unterteilt wird:

- Quell- und Transportbereich. Dazu gehören die in Abbildung 2.4 blau gefärbtes Teil der Trituimquelle (a) und rot gefärbte Teile der Transportstrecke (b), (c).
- **Spektrometer- und Detektorbereich**. Es sind die beiden Spektrometer (d) und (e) in Abbildung 2.4, sowie der Detektor (f).

Auf die einzelne Komponente (a) bis (f) des Experiment-Aufbaus wird weiter unten näher eingegangen.

2.2.1. Das MAC-E-Filter-Prinzip

Den wichtigsten Teil des KATRIN-Experiments stellt das MAC-E-Filter³, nach dessen Prinzip das Vorspektrometer und das Hauptspektrometer arbeiten, dar. Das MAC-E-Filter bietet die Möglichkeit der Vermessung des Elektronenspektrums in der Nähe des Tritiumendpunktes. Abbildung 2.5 zeigt die Funktionsweise eines MAC-E-Filters. Die Tritiumquelle, die sich links im Bild in einem starken Magnetfeld befindet, emittiert aus dem β -Zerfall entstandene Elektronen in den Spektrometer. Diese Elektronen werden adiabatisch

¹Confidence Level – Vertrauensbereich.

²Sofern nicht weiter angegeben, stammen alle Angeben in diesem Kapitel aus dem KATRIN Design Report.

 $^{{}^{3}}M$ agnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter



Abbildung 2.5.: **Das MAC-E-Filter-Prinzip.** Die von der Tritiumquelle T₂ erzeugten Elektronen (rot) werden entlang der magnetische Feldlinien (blau) adiabatisch zum Detektor geführt. Die grüne Elektrode erzeugt ein elektrisches Gegenfeld, das von den Elektronen überwunden werden muss. p_e gibt die Ausrichtung des Impulses der Elektronen ohne elektrisches Feld an.

entlang der magnetischen Feldlinien, die zwischen den beiden supraleitenden Magneten gebildet werden, spiralförmig zum Detektor geführt. Damit wird eine erhöhte Signalrate erzielt, da Elektronen aus einem großen Raumwinkel (bis zu 2π) detektiert werden. Die magnetischen Feldlinien haben eine um die Mittelebene symmetrische Gestalt. Dort ist auch die Stärke des Magnetfeldes am geringsten.

Den Aufbau eines MAC-E-Filters vervollständigt ein Elektrodensystem, das den von den Magneten gebildeten Flussschlauch zylindersymmetrisch umschließt und das symmetrisch zur Mittelebene ein elektrostatisches Gegenfeld erzeugt. In der Mittelebene, die Analysierebene genannt wird, herrscht somit das maximale elektrische Potenzial.

Das Zusammenwirken des magnetischen und elektrostatischen Feldes ermöglicht die Umwandlung der transversalen Komponente E_{\perp} der kinetischen Energie der Elektronen in die longitudinale Komponente E_{\parallel} . Dies ist nötig, um die Gesamtenergie der Elektronen und das bei der Zyklotronbewegung entstehende magnetische Moment μ konstant zu halten. Die Stärke des Magnetfeldes zur Mitte des MAC-E-Filters nimmt ab. Dementsprechend muss auch die transversale Komponente E_{\perp} der Energie, gemäß

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = const. \tag{2.6}$$

abnehmen. Die Zerlegung der kinetischen Energie E_{kin} erfolgt nach

$$E_{\parallel} = \cos^2\left(\theta\right) \cdot E_{kin} \tag{2.7}$$

$$E_{\perp} = \sin^2\left(\theta\right) \cdot E_{kin} \tag{2.8}$$

 θ ist der Winkel zwischen der Spektrometerachse und dem Geschwindigkeitsvektor. Damit Elektronen zum Detektor gelangen können, müssen sie die elektrostatische Potenzialbar-



Abbildung 2.6.: Quellbereich und Transportstrecke des KATRIN-Experiments. Abbildung aus [Thu07].

riere überwinden, die von der Retardierungsspannung U_R gegeben wird. Damit muss die Energie E_{\parallel} der Elektronen in der Analysierebene größer als qU_R sein. Der MAC-E-Filter ist somit ein Hochenergiepassfilter. Seine Energieauflösung wird gegeben durch

$$\frac{\Delta E}{E_R} = \frac{B_A}{B_{max}} \approx \frac{A_{Quelle}}{A_{Spektr}}$$
(2.9)

wobei $E_R = qU_R$, B_A das magnetische Feld in der Analysierebene und A_{Quelle} , A_{Spektr} Flächen der Quelle und der Analysierebene sind. Die beste Auflösung wird bei einer möglichst kleinen Quelle und möglichst großem Spektrometer erreicht und wird für das Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments mit 0,93 eV angegeben [A⁺04].

Das beschriebene Prinzip der Elektronenführung zur Energieanalyse mittels eines MAC-E-Filters wurde bereits erfolgreich bei den Experimenten in Mainz und Troitsk eingesetzt.

2.2.2. Quellbereich und Transportstrecke

Im Quellbereich und der Transportstrecke findet der β -Zerfallsprozess des Tritiumgases und die adiabatische Führung daraus entstandener β -Elektronen zu den beiden Spektrometern. Dabei muss eine Kontamination der Spektrometer mit Tritium, der beim Zerfall zur Verfälschung des Elektronenenergiespektrums führen kann, vermieden werden. Deshalb wird der Tritiumfluss aus der WGTS⁴ um Faktor ~ 10¹⁴ reduziert.

Abbildung 2.6 zeigt schematisch einzelne Komponente des Quell- und Transportbereiches. Das 10 Meter langer Rohr des WGTS-Modul dient als Einlass und Zerfallsbereich für das Tritiumgas, das mit einem Druck von etwa $3,4 \cdot 10^{-3}$ mbar über 250 Löcher in die WGTS eingeblasen wird. Innerhalb von einer Sekunde diffundiert das Gas zu den beiden Enden der WGTS und zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 10^{-9} . Bei einem Durchmesser des Stahlrohres von 90 mm, aus dem die WGTS im Wesentlichen besteht, ergibt sich eine Teilchensäulendichte von rund $5 \cdot 10^{17}$ Teilchen/cm², was zur einer Aktivität des Tritiums von etwa 10^{11} Bq führt. Mit Hilfe supraleitender Magnete werden die β -Zerfallselektronen adiabatisch auf spiralförmigen Bahnen zu den beiden Enden der WGTS geführt.

Auf beiden Enden der WGTS befinden sich differenzielle Pumpstrecken (DPS) DPS1-R und DPS1-F. Zusammen mit dem WGTS-Rohr bilden sie den unter (a) in Abbildung 2.4 gezeigten blauen Bereich. Beide Pumpstrecken sorgen für die erste Reduktion des Tritiumflusses um 99% durch das Abpumpen mit den Turbomolekularpumpen (TMP's). Im geschlossen Kreislauf wird das Tritiumgas wiederaufbereitet und in die WGTS injiziert.

Am linken Ende der DPS1-R befindet sich das Rear-System (gelbes Teil in Abbildung 2.4). Es gehört zum Calibration and Monitoring System (CMS) und wird zur Überwachung der Quellaktivität, sowie zur Aufrechterhaltung des Quellpotentials verwendet.

⁴Windowless Gaseous Tritium Source



Abbildung 2.7.: DPS2-F- und CPS-Module. Abbildung aus [Fra10].

Die Transportstrecke besteht aus zwei Komponenten, der differenziellen Pumpstrecke DPS2-F und der kryogenen Pumpstrecke CPS (schematisch als roter Bereich (b) und (c) in Abbildung 2.4 dargestellt). Ein Schema der beiden Module ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Am Ende der CPS wird der Fluss des Tritiumgases von der anfänglichen Injektionsrate von 1,8 mbar·l/s auf 10^{-14} mbar·l/s herabgesetzt. Die DPS2-F besteht aus 5 gegeneinander gebogenen Teilen. Während die geladenen Elektronen entlang magnetischer Feldlinien durch die gebogene Konstruktion der DPS2-F weiter zur CPS geführt werden, treffen die ungeladenen Teilchen (Tritium und sein Tochterkern ³He) auf die Rohrwände, was die Wahrscheinlichkeit ihres Abführens durch die TMP's aus dem Transportbereich erhöht. Damit wird eine Reduktion des Tritiumflusses in der DPS2-F um Faktor 10^5 erreicht. Die Führung der Elektronen im Strahlrohr wird mit Hilfe fünf supraleitender Magneten erreicht.

Letzter Abschnitt der Transportstrecke, die CPS, weist ebenfalls eine gebogene Konstruktion der Elektronenführenden Teile auf. Bei diesem Modul wird die Pumpwirkung durch die Kryoadsorption erreicht, da mit weiterem Pumpen auf mechanischem Weg keine Verbesserung zu erreichen ist. Das Innenrohr der CPS wird auf unter 4,5 K mit flüssigem Helium gekühlt. Auf der inneren Oberfläche des Strahlrohres befindet sich eine dünne Schicht Argonschnee, die Absorptionsrate erhöht. Damit können pro Tag etwa 10¹⁷ Teilchen absorbiert werden.

2.2.3. Spektrometer- und Detektorbereich

Der Spektrometerbereich besteht aus zwei hintereinander geschalteten Spektrometern nach dem MAC-E-Filter-Prinzip. Das Vorspektrometer (mit (d) in Abbildung 2.4 gekennzeichnet) dient der Vorselektion der Elektronen. Die Spannung zur Erzeugung seines Retardierungsfeldes wird auf einen festen Wert von rund $-18,3 \,\mathrm{kV}$ gelegt. Das sind rund 300 V weniger als die Energie des Tritiumendpunktes (ca. 18,6 keV). Damit werden die Elektronen, die keine Information über die Neutrinomasse tragen herausgefiltert, sodass vom ursprünglichen Elektronenfluss von 10^{11} Elektronen/s nur 10^3 Elektronen in einer Sekunde in den Hauptspektrometer (Abbildung 2.4 (e)) gelangen. Außerdem wird dem Elektronenuntergrund, der durch Stöße mit Restgasmolekülen entsteht, entgegen gewirkt. Die Auflösung des Vorspektrometers liegt im Bereich von $100 \,\mathrm{eV}$. Das Spektrometer misst $1,7 \,\mathrm{m}$ im Durchmesser bei einer Länge von $3,38 \,\mathrm{m}$. Die supraleitenden Magnete der Stärke $4,5 \,\mathrm{T}$ an beiden Enden des Spektrometers erzeugen ein magnetisches Führungsfeld, das in der Analysierebene auf $27 \,\mathrm{mT}$ abfällt. Neben der Außenhülle, die auf $-18,3 \,\mathrm{kV}$ gelegt wird, besitzt das Vorspektrometer ein Elektrodensystem zur Feinformung des elektrostatischen



Abbildung 2.8.: Schnittmodell des Hauptspektrometers. Abbildung aus [Zac09].

Retardierungspotenzials und zur Reduktion des durch kosmische Strahlung entstehenden Elektronenuntergrunds. Um die Wechselwirkung der Elektronen mit den Luftmolekülen soweit wie möglich zu reduzieren, herrschen im Vorspektrometer Ultrahochvakuumbedienungen (Druck von 10^{-11} mbar).

Das Hauptspektrometer nach dem MAC-E-Filter-Prinzip hat eine Länge von 23,3 m und einen Durchmesser von 9,8 m. Das Magnetfeld, das an der Detektorseite erzeugt wird hat eine Stärke von 6 T im Vergleich mit den 4,5 T an der Vorspektrometerseite. Damit der aus dieser Magnetenkonfiguration resultierender Flussschlauch nicht die Wände des Spektrometers berührt, verwendet das KATRIN-Experiment ein Luftspulensystem, das den Durchmesser des magnetischen Flussschlauches auf 9m komprimiert. Die Luftspule dient außerdem der Kompensation des Erdmagnetfeldes. Die Stärke des magnetischen Feldes in der Analysierebene beträgt lediglich 0,3 mT. Zur Feinformung des elektrischen Retardierungsfeldes besitzt das Hauptspektrometer an seiner Innenseite ebenfalls ein Elektrodesystem, das in sich ein System aus Drahtelektrodensegmenten darstellt. Abbildung 2.8 zeigt den modularen Aufbau der Elektrodensegmente mit der Nummerierung einzelner Modulringe. Es lässt sich ein Dipolmodus mit dem Elektrodensystem realisieren. Damit werden im Spektrometer gespeicherte Elektronen abgeführt. Der Aspekt der Spannungsversorgung der Drahtelektrode wird im Kapitel 3.1.1 beschrieben. Um das Elektronenspektrum am Tritiumendpunkt zu vermessen, wird die Spannung des Hauptspektrometers auf rund $-18.6 \,\mathrm{kV}$ gelegt und um diesen Bereich verfahren. Bei dieser Stärke des entsprechenden elektrisches Feldes gelangen von den 10^3 Elektronen nur noch weniger als 10^{-2} Elektronen in einer Sekunde zum Detektor. Genau wie beim Vorspektrometer wird beim Hauptspektrometer ein Vakuum von 10^{-11} mbar benötigt.

Den letzten Teil des Spektometer- und Detektorbereiches stellt der Focal Plane Detector (FPD, Teil (f) der Abbildung 2.4) dar. Die Kernkomponente bildet ein Silizium-Halbleiter-Detektor, der aus einer Matrix von 148 gleichgroßen Segmenten besteht (Abbildung 2.9). Diese sind in 12 Ringe mit je 12 Segmenten und 4 zentrale Segmente angeordnet. Damit wird eine räumliche Auflösung der Elektronenauftreffpunkte gewährleistet. Ein Magnetfeld von 3 T Stärke am Detektorort komprimiert den magnetischen Flussschlauch von 9 m in der Analysierebene auf 9 cm. Der Flussschlauch von 191 T/cm² wird dabei vom 9 cm großen Detektor vollständig abgedeckt. Mit diesem Detektor können Elektronen mit Energien zwischen 5 keV und 50 keV bei einer Auflösung von 1 keV detektiert werden. Für die Reduktion des Untergrundes durch natürliche Radioaktivität und kosmische Strahlung wird der Detektor mit Blei und Kupfer abgeschirmt. Weitere Beschreibung sowie aktuelle



Abbildung 2.9.: Segmentierung der Detektoroberfläche. Die Skala im linken Bild ist in [cm] angegeben. Abbildung aus [Har12].

Untersuchungen zum FPD befinden sich in [Har12].

2.2.4. Das Monitorspektrometer

Zur Überwachung der Spannungsstabilität des Hauptspektrometers wird im KATRIN-Experiment ein drittes Spektrometer nach dem MAC-E-Filter-Prinzip eingesetzt. Es hat eine Länge von 3,5 m bei einem Durchmesser von 1 m. Das Spektrometer wird Monitorspektrometer genannt und es befindet sich im separaten Gebäude in 15 m Entfernung zum Gebäude des Hauptspektrometers. Beim Monitorspektrometer (siehe Abbildung 2.10) handelt es sich um einen verbesserter Aufbau des Mainzer Neutrinomassenexperiments [P+92]. Der Aufbau am KIT und Inbetriebnahme wurden ab 2010 erfolgreich durchgeführt [Gou10], [Sch11c].

Mit dem Monitorspektrometer wird es möglich sein im laufenden Betrieb des Experiments die Hochspannung am Hauptspektrometer zu überwachen. Dazu werden beide Spektrometer mit der Hochspannung aus der selben Spannungsquelle versorgt. Durch den Einsatz der Kalibrationsquellen am Monitorspektrometer kann somit die eingestellte Spannung kontrolliert werden. Näheres zu den Kalibrationsquellen befindet sich im Kapitel 4.2. Im Gegensatz zu den beiden Spektrometer der primären Messkette, wird die Hülle des Monitorspektrometers auf Erdpotenzial gelegt. Die Erzeugung und Feinformung des Analysierpotenzials wird vom inneren Elektrodensystem gewährleistet. Auch hier besteht die Möglichkeit der Reduktion des durch kosmische Strahlung entstehenden Untergrundes.

Die Energieauflösung beim Mainzer Neutrinomassen experiment betrug $4,8 \,\mathrm{eV}$ (bei $18,6 \,\mathrm{kV}$ Retardierung spotenzial). Um die gleiche Energieauflösung von $1 \,\mathrm{eV}$ wie beim Haupt spektrometer zu erreichen, wurde das Magnetfeld in der Analysiere bene des Monitorspektrometers mit Hilfe der Luft spulen auf $0,3 \,\mathrm{mT}$ korrigiert. Mit dem Feld von $6 \,\mathrm{T}$ der supraleit enden Magnete wird somit die gleiche Auflösung von rund $1 \,\mathrm{eV}$ erreicht. Der damit verbunden Verlust an Luminosität ist für die verwendeten Kalibration squellen nicht kritisch.

Die Sensitivität des KATRIN-Experiment fordert eine Stabilität der Hochspannung im ppm^5 Bereich. Neben dem Monitorspektrometer werden zur Überwachung der Spannungsstabilität noch Präzisions-Hochspannungsteiler und Präzisions-Multimeter eingesetzt. Zusammen stellen sie das Kalibrationskonzept der Hochspannung dar. Im Kapitel 4 wird das Kalibrationskonzept eingehend beschrieben.

⁵**p**arts **p**er **m**illion



Abbildung 2.10.: Das Monitorspektrometer. Abbildung aus [Erh12].

2.3. Statistische und systematische Unsicherheiten

Letzter Abschnitt dieses Kapitels befasst sich mit der Auswirkung verschiedener Störungen auf die Messung der Neutrinomasse beim KATRIN-Experiment. Besondere Interesse gilt bei dieser Arbeit den statistischen und systematischen Unsicherheiten, die sich auf die Hochspannung beziehen. Nur durch die Kenntnis dieser Unsicherheiten ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Präzision der Hochspannungsystems. Die beim KATRIN-Experiment auftretenden Unsicherheiten und Ihre Auswirkung auf die Messung der Neutrinomasse wurden im KATRIN Design Report $[A^+04]$ eingehend untersucht. Hier soll eine kurze Zusammenfassung erfolgen.

Das Spannungsintervall, in dem das Spektrum aufgenommen wird ist gegeben durch

$$[E_0 - 25 \,\mathrm{eV}, E_0 + 5 \,\mathrm{eV}]$$
 (2.10)

mit der Energie des Tritiumendpunktes $E_0 \approx 18,6 \,\mathrm{keV}$. Die Vergrößerung des Messintervalls würden zur keinen Verbesserung der Neutrinomasse führen. Die Absenkung des Auswerteintervalls würde sogar zu Versärkung der systematischen Unsicherheiten führen. Zwar sinken dabei die statistischen Unsicherheiten, jedoch muss ein Kompromiss zwischen den beiden Unsicherheitsarten gefunden werden, da diese miteinander gekoppelt sind. Im angegeben Auswerteintervall wird die statistische Unsicherheit mit

$$\Delta m_{stat}^2 = 0.018 \,\mathrm{eV}^2 \tag{2.11}$$

angegeben. Bei den systematischen Unsicherheiten wird versucht den Wert der statistischen Unsicherheit nicht zu übersteigen:

$$\Delta m_{syst,total}^2 \le 0.017 \,\mathrm{eV}^2 \tag{2.12}$$

Durch die gleich große Beiträge der beiden Unsicherheiten folgt aus ihrer quadratischen Aufsummierung die kleinste Gesamtunsicherheit. Der Beitrag zur systematischen Unsicherheit setzt sich beim KATRIN-Experiment im Wesentlichen aus fünf Hauptbeiträgen. Damit beträgt die systematische Unsicherheit einzelner Beiträge jeweils

$$\Delta m_{syst}^2 \le 0.0075 \,\mathrm{eV}^2 \tag{2.13}$$

Die zentrale Rolle bei dieser Arbeit liefert der Beitrag zu der systematischen Unsicherheit, der von der Überwachung des Retardierungspotenzials stammt. Da die Hochspannung einen direkten Einfluss auf die Transmission der Elektronen hat, wirken sich ihre Schwankungen auf die Gestalt des Elektronenspektrums und damit auf die Neutrinomasse. Die unerkannte Fluktuationen der Hochspannung liefern einen Beitrag zu den systematischen Unsicherheiten von

$$\Delta m_{\nu}^2 = -2\sigma^2 \le 0.0075 \,\mathrm{eV}^2 \tag{2.14}$$

$$\sigma \le 0.061 \,\mathrm{eV} \tag{2.15}$$

Bei einem Wert von $18,6 \,\mathrm{kV}$ bedeutet eine Schwankung von $61 \,\mathrm{mV}$ einer relativen Abweichung von $3,3 \,\mathrm{ppm}$. Die Präzision der Hochspannung auf diesem Niveau muss im Zeitraum eines Messzyklus eingehalten werden, um die Design-Sensitivität des KATRIN-Experiments bei der Neutrinomassenbestimmung zu erreichen.

3. Hochspannungssystem am KATRIN-Hauptspektrometer

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Versorgung und Verteilung der Retardierungsspannung auf den Haupt- und Monitorspektrometer gegeben werden. Es wird auf die technische Umsetzung und Realisierung des Hochspannungssystems eingegangen.

Die Hauptkomponenten des KATRIN-HV-System werden grob in fünf Abschnitte unterteilt. Dazu gehören:

- Erzeugung und Verteilung der Spannung auf das Hauptspektrometer und die Drahtelektroden
- Messung mit Aufnahme in die Datenbank (Protokollierung)
- Überwachung der Spannungsstabilität und Kalibration relevanter Messgeräte
- Steuerungssystem
- Sicherheitssystem

Abbildung 3.1 stellt diese Hauptkomponente anschaulich dar.

In diesem Kapitel wird näher auf die ersten drei Abschnitte eingegangen, da diese Punkte von grundlegender Bedeutung für die Untersuchung der Spannungsstabilität sind. Dabei spielen diese Abschnitte hardwareseitig eine große Rolle, während die beiden letzten Komponente des KATRIN-HV-Systems von der Softwareseite interessant sind.

Im Vergleich zum Monitorspektrometer wird der Hauptspektrometer auf hohen Potenzial gelegt (etwa $-18,6\,\mathrm{kV}$ beim Tritiumendpunkt) und gegen die Erde gestützt, was die Einhaltung strenger Sicherheitsvorkehrungen für Personen in der Hauptspektrometerhalle nach sich führt. Im Falle des nicht reibungslosen Ablaufs während eines Messzyklus besteht die Möglichkeit das Potenzial des Hauptspektrometertank und daran angeschlossener Geräte schnell auf Erdpotenzialniveau zu setzen. Der Bereich, der in Abbildung 3.1 von roter Linie umrandet ist, darf während des Messbetriebs von keiner Person betreten werden.

3.1. Erzeugung und Verteilung des Retardierungspotenzials

Erzeugung notwendiger Hochspannung für den Hauptspektrometertank und sein Drahtelektrodensystem beinhaltet auch gleichzeitig die Verteilung der Potenziale auf das 46teiliges Drahtelektrodensystem. Der Hauptspektrometertank wird auf eine Spannung gelegt, die leicht positiver als die benötigten -18,6 kV ist. Das präzise Retardierungsfeld wird



Abbildung 3.1.: Grobe Skizze des Layouts der Hochspannungsversorgung. Abbildung aus [Gro10].

vom Drahtelektrodensystem erzeugt, dessen Potenzial gegenüber dem Hauptspektrometertank um einige hundert Volt negativer ausfällt. Während für den Spektrometertank volle 18,6 kV an Potenzialdifferenz vom Versorgungsnetzteil aufgebracht werden müssen, wird das Potenzial der Drahtelektroden gegen das Tankpotenzial gestützt, und damit Spannungen im Niedervoltbereich (bis 1000 V) benötigt.

Für die Erzeugung der Hochspannung am Hauptspektrometertank werden speziell angefertigte Netzgeräte vom Typ HCP 18M-35000 der Firma FuG verwendet. Sie können Spannungen mit ausreichender Präzision bis 35 kV erzeugen. Da die Verteilung dieser Spannungen im KATRIN-Experiment über lange Strecke erfolgen muss, kann die Stabilität der Spannung beeinträchtigt werden. Dies könnte zum Beispiel durch Einkoppelung elektromagnetischer Störungen geschehen oder durch die Schwankung des Erdpotenzials oder durch zu hohe Leitungswiderstände. Zur Überwachung der anliegenden Hochspannung beziehungsweise zur Vermeidung des Stabilitätsverlustes werden spezielle Maßnahmen ergriffen die in Unterkapiteln 3.2 und 3.4 beschrieben sind.

3.1.1. Spannungsversorgung der Drahtelektrode

Ein deutlich komplizierteres Drahtelektrodensystem, das etwa 23000 Drähte umfasst und die Feineinstellung des elektrischen Feldes im Spektrometertank ermöglicht, benötigt die Versorgung seiner 46 Segmente mit Spannung, die Überwachung einzelner Segmente und die Verteilung einzelner Spannungen zu den Segmenten. Das Konzept der Spannungsversorgung der Drahtelektrode ist in Abbildung 3.2 oben zu sehen. Auf die Beschreibung der Einkopplung der Spannung in den Spektrometertank und Weiterleitung zu den einzelnen Segmenten wird an dieser Stelle verzichtet, da es den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Es sei auf [Pra11] verwiesen, wo diese Aspekte beschrieben sind.

Für die Versorgung der Drahtelektrode notwendige Komponente wurden in zwei Spannungs-Verteilerschränke untergebracht (unterer Teil der Abbildung 3.2), die auf das Potenzial des Hauptspektrometertanks gelegt werden. In [Ros11] befindet sich ausführliche Beschreibung zum Aufbau und Test der Hochspannungsschränke, sowie ihrer Komponente. Hier soll eine Zusammenfassung des Aufbaus erfolgen, da es eine bedeutende Rolle in der KATRIN-Hochspannungsversorgung spielt.



Abbildung 3.2.: **Spannungs-Verteilerschrank für die Drahtelektroden.** Oben ist das Konzept der Hochspannungsversorgung gezeigt. Unten sind fertig aufgebauten West- und Ost-Schrank für beide Spektrometerhälften zu sehen. Abbildungen aus [Ros11] und [Kra12]. Beide Versorgungsschränke werden auf gleichen Potenzial wie der Hauptspektrometertank gelegt. Die meisten Geräte in den Schränken werden jedoch gegen das Potenzial des Hauptspektrometers gestützt und somit in einem isolierten Bereich (isolierte Box) untergebracht. Der linke West-Schrank verteilt dabei die Spannungen auf die 22 Segmente der westlichen Hälfte des Drahtelektrodensystems. Der rechte Schrank verteilt entsprechende Spannungen auf die östliche Hälfte der Drahtelektrode. Die dazu verwendeten Netzteile (ISEG EHS 8205P-505-KSHV, bis 500 V) befinden sich in beiden Hochspannungsschränken. Das Netzgerät ISEG NHQ-226L für die Anti-Penning-Elektrode – die Spannungen bis 4 kV benötigt – befindet sich dabei im West-Schrank und versorgt diese Elektrode mit zwei Spannungen. Das Netzgerät FuG HCV 2M-1000 für die Realisierung des Dipolmodus erzeugt Spannungen bis 1 kV und befindet sich im Ost-Schrank. Beide zuletzt genannte Netzteile sind auf dem Photo in Abbildung 3.2 als unterste Einheit in beiden Versorgungsschränken zu erkennen.

Die Verteilung der Spannungen auf die inneren und äußeren Drahtlagen der Segmente wird mit Hilfe einer Buchsen-Matrixtafel (Patch panel) realisiert. Die Tafel ist im oberen Teil des Photos in Abbildung 3.2 zu sehen.¹

Die Steuerung von außen übernehmen zwei PXI Systeme vom National Instruments. Diese Systeme sind leicht programmierbar und ermöglichen die Messung und Steuerung der Spannungen, sowie die Überwachung der Widerstände der Drahtsegmente. Auf dem Photo befinden sich die PXI Einheiten direkt unterhalb der Spannungsnetzteile für die Differenzspannung.

Zur Energieversorgung der elektronischen Komponente wird eine DC/DC-Wandlerschaltung verwendet. Sie versorgt sowohl das auf dem Tankpotenzial liegendes Netzgerät für die Anti-Penning-Elektrode, Dipolspannungsquelle und Belüftungssystem, als auch auf dem Elektrodenpotenzial liegende Geräte der isolierten Box.² Dazu hat die DC/DC-Wandlerschaltung galvanisch getrennte Ein- und Ausgänge.

$3.1.2. \ Hoch spannung sverteiler anlagen$

Damit das Monitorspektrometer an das KATRIN-HV-System eingebunden werden kann, wurde im Rahmen der Diplomarbeit von M. Kraus [Kra12] zwei Hochspannungsverteileranlagen (kurz: HV-Verteiler) entwickelt. Dort befindet sich auch ausführliche Beschreibung zu den einzelnen Komponenten und zu ihrer Funktionalität. Hier soll das Funktionsprinzip verdeutlicht werden. Das Prinzip der Einbindung der HV-Verteiler ist in Abbildung 3.3 zu sehen.³ Die Einbindung der HV-Verteiler ermöglicht es verschiedene Schaltszenarien zwischen den einzelnen Hochspannungsrezipienten zu realisieren. So können beide Spektrometer mit derselben Spannungsquelle versorgt werden – was den eigentlichen Sinn des Monitorspektrometers (MoS) ausmacht – oder die Versorgung aus separaten Netzteilen erfolgen. Das ermöglicht die Kalibrationsmessungen am Monitorspektrometer (MS) problemlos durchzuführen. Ebenso kann leicht zwischen den beiden KATRIN-Hochspannungsteilern (K35 Div und K65 Div, siehe Unterkapitel 3.3) gewechselt werden. Bei der Überwachung der Hochspannung an einem der beiden Spektrometern mit beiden Hochspannungsteilern, können Funktionalitätsstörungen eines Teilers leicht erkannt werden. Der Einsatz des Julie-Research-Spannungsteiler (JRL Div) ist hier von zweitrangiger Bedeutung.

Anhand der Skizze des inneren Aufbaus eines HV-Verteilers wird verdeutlicht, wie die Verteilung der Hochspannung zwischen den Komponenten des HV-Systems funktioniert.

 $^{^1 \}mathrm{Direkt}$ darunter befinden sich Netzteile für die Differenzspannung der 44 Drahtelektrodensegmente.

 $^{^{2}}$ Die Komponente der isolierten Box sind im oberen Schema der Abbildung 3.2 rot umrandet.

³Abbildung B.3 im Anhang zeigt, wie die Verbindung einzelner Komponente des HV-Systems mit den HV-Verteilern erfolgen soll.



Abbildung 3.3.: Einbindung der Hochspannungsverteiler in das HV-System. Zu sehen ist die räumliche Anodnung (460, 461 sind die Gebäudenummern) der HV-Verteiler und alle relevanten Verbindungen. Auf diese Weise wird das Monitorspektrometer (MoS) an das KATRIN-HV-System gebunden. K35 Div und K65 Div sind die beiden KATRIN-Hochspannungsteiler. JRL Div ist der Julie-Research-Spannungsteiler, MS – das Hauptspektrometer. Nicht gezeigt ist die Anbindung der Verteiler an das Steuerungs- und Überwachungssystem.

Dazu ist in Abbildung 3.4 das Schema und das Photo⁴ der HV-Verteileranlage, die in Monitorspektrometerhalle installiert wurde, zu sehen. Die Hauptkomponente der HV-Verteileranlagen bilden drei Relais (schwarze Zylinder im Bild), die das Umschalten zwischen verschiedenen Verbindungsszenarien ermöglichen. Die gasgefüllten Relais sind für Hochspannungen bis 50 kV ausgelegt. Die sechs Relais der beiden HV-Verteiler ermöglichen insgesamt $2^6 = 64$ Schaltszenarien, von denen einige keinen Sinn ergeben beziehungsweise unbrauchbar für das Experiment sind. Wie die Relais geschaltet sein müssen um gewünschtes Ergebnis der Spannungsverteilung zu erreichen, wird vorher ermittelt und in die Steuerungssoftware implementiert. Verbindungsstellen einzelner Zuleitungen werden auf Keramikisolatoren gestützt, die voneinander ausreichenden Abstand haben, um Überschläge und Kriechströme zu vermeiden. Zur Kontrolle der Spannung an Leitungen, die nicht durch Spannungsteiler überwacht werden, befinden sich im hinteren Teil des HV-Verteilerkastens zwei Komparatorschaltungen, die ein Signal liefern, sofern die Spannung an Leitungen 50 V nicht übersteigt. Umschlossen werden alle Systemkomponente von einer innen liegenden Kunststoffbox, die in einem geerdeten Metallgehäuse liegt. Einerseits werden damit Personen vom Kontakt mit Hochspannung geschützt, andererseits besteht der Schutz der Verteilerkomponente vor Einkoppelung der Störungen von außen und vor Eindringen des Staub, der zu Kriechströmen führen kann.

Der automatisierte Wechsel zwischen zwei Verteilungsszenarien impliziert die Anbindung der HV-Verteiler an das Steuerungs- und Überwachungssystem. Dabei wird der Sicherheitsaspekt an erster Stelle gelegt. Sollte ein bevorstehendes Umschalten ein Risiko für Geräte oder Personen darstellen, wird es vom Steuerungsprogramm blockiert.

Angestrebter Einsatzzweck der Hochspannungsverteileranlangen sollte die Hochspannungs-

 $^{^4\}mathrm{Zum}$ Zeitpunkt der Aufnahme befand sich der HV-Verteiler in der Aufbauphase.





Abbildung 3.4.: **HV-Verteiler des Monitorspektrometers.** Gezeigt sind das Schema und das Photo der Hochspannungs-Verteileranlage, die in Monitorspektrometerhalle platziert wird (in Abbildung 3.3 mit HV Distributor MoS bezeichnet). Zur weiteren Beschreibung siehe Unterkapitel 3.1.2. Bilder aus [Kra12].

festigkeit und ihre Stabilität in keiner Weise beeinflussen. Deswegen wurden im Rahmen dieser Arbeit entsprechende Untersuchungen durchgeführt, die im nächsten Abschnitt (Kapitel 4) dargestellt werden, um den Einfluss der HV-Verteiler auf die Hochspannungsstabilität zu überprüfen.

3.2. Überwachung des Retardierungspotenzials

Die Skizze des Hochspannungslayouts (Abbildung 3.1) verdeutlicht, dass die Maßnahmen der Spannungsüberwachung einen geschlossenen Kreislauf mit der Steuerung und Spannungserzeugung bilden. Die Hauptaufgabe der Spannungsüberwachung besteht darin, die am Spektrometertank und an den Drahtelektroden anliegende Spannung mit mV Präzision zu messen und zu protokollieren. Für diese Aufgabe verwendet das KATRIN-Experiment Präzisionsmultimeter, Präzisionsspannungsteiler und das Monitorspektrometer.

Während das Multimeter und der Hochspannungsteiler direkt für die Messung der Retardierungsspannung eingesetzt werden, bietet das Monitorspektrometer eine Möglichkeit der Spannungsüberwachung mit Hilfe der Kalibrationsquellen (näheres dazu ist im Kapitel 4.2 beschrieben). Eng mit Spannungsüberwachungsmaßnahmen ist die Kalibration der Multimeter (Kapitel 4.1) und der Spannungsteiler (Unterkapitel 3.3.3) verbunden.

Die genannten Überwachungsmaßnahmen beziehen sich in erster Linie auf die Spannung der Hauptspektrometeraußenhülle. Die Versorgungsnetzteile der Drahtelektroden sind gegen das Tankpotenzial gestützt. Damit müssen sie lediglich Spannungsdifferenzen von einigen hundert Volt aufbringen. Für die Präzision der Spannungseinstellung bedeutet es, dass eine relative Schwankung der Versorgungsspannung der Drahtelektroden von z. B. 50 ppm (bei 300 V Spannungsdifferenz) eine absolute Schwankung von weniger als einem ppm bei 18,6 kV bedeutet. Die verwendeten Netzteile ISEG EHS 8205P-505-KSHV besitzen eine Restwelligkeit von maximal 5 mV [ISE09], was einer absoluten Schwankung von rund



Abbildung 3.5.: Einfacher Spannungsteiler. Aus [Bau09].

 $0.3\,\rm ppm$ bei 18,6 kV entspricht. Damit fallen die erzeugten Potenziale der Drahtelektroden nicht in das Konzept der Präzisionsüberwachung.

3.3. Präzisions-Hochspannungsteiler

Da eine direkte Messung der Hochspannung mit Multimetern mit der benötigten Präzision nicht möglich ist, verwendet das KATRIN-Experiment Präzisions-Hochspannungsteiler, um die Spannung auf einen niedrigeren Wert herunter zu teilen. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von 10 V. Somit können kommerziell erhältlichen Voltmeter, die im 20 V Messbereich ihre höchste Präzision und Stabilität erreichen, zur Spannungsmessung eingesetzt werden. Im Gegensatz zu den Multimetern mussten die Hochspannungsteiler speziell für die Anforderungen des KATRIN-Experiments entwickelt und gebaut werden, da Stabilitätsanforderung von 3 ppm über die Messdauer von im Handel erhältlichen Spannungsteilern nicht erfüllt werden.

Bei einem Retardierungspotenzial von -18,6 kV muss die Spannung um Faktor 1860 reduziert werden damit 10 V gemessen werden können. Da für die Kalibration mit nuklearem Standard am Monitorspektrometer Spannungen bis 32 kV eingestellt werden, ergibt die Messung der mit dem selben Faktor von 1860 herunter geteilten Spannung einen Wert von etwa 17 V. Das kann zu unerwünschten Abweichungen aufgrund der nichtlinearen Verstärkung des Multimeters führen, da Multimeter mit einer 10 V Referenzspannung kalibriert werden. Um den gemessenen Spannungswert so nah wie möglich an 10 V zu halten, benötigt der Spannungsteiler zusätzlich die Reduzierungsmöglichkeit um den Faktor 3200. Beide im Experiment verwendeten Spannungsteiler besitzen diese Möglichkeit, die Spannung in verschiedenen Verhältnissen herunter zu teilen.

Bei einem einfachen Spannungsteiler (Abbildung 3.5), der aus zwei in Reihe geschaltete Widerständen R_1 und R_2 besteht, fällt die Eingangsspannung U_{in} über beide Widerstände und die Ausgangsspannung U_{out} über den Widerstand R_2 . Das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung wird als Maßstabsfaktor M bezeichnet.

$$M = \frac{U_{in}}{U_{out}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$
(3.1)

Wie bereits erwähnt sollen KATRIN-Spannungsteiler Maßstabsfaktoren von 1860:1 und 3200:1 haben, um die geteilte Spannung am präzisesten messen zu können.

Nachfolgend wird auf beide Präzisions-Hochspannungsteiler näher eingegangen. Ausführliche Beschreibung, Angefangen von der Entwicklung über den Zusammenbau bis zu Kalibrationsmessungen, befinden sich für den ersten KATRIN-Spannungsteiler in [Thu07], [TMW09], [Ros11] und für den zweiten Hochspannungsteiler in [Hoc08], [Bau09].

3.3.1. K35-Spannungsteiler

Wichtigstes Kriterium beim Bau der KATRIN-Spannungsteiler ist die Stabilität der Maßstabsfaktoren gewesen, die über den Messzyklus von 60 Tagen auf 3 ppm stabil sein müssen, um Anforderungen des Experiments gerecht zu werden. Die Einhaltung der geforderten Stabilität wird durch die Wahl geeigneter Präzisionswiderstände, durch die Formgebung des elektrischen Feldes sowie durch die Regelung klimatischer Bedienungen im Inneren des Spannungsteilers gewährleistet.

Der erste KATRIN-Präzisions-Hochspannungsteiler wurde nach dem Vorbild des MT100 Referenzspannungsteilers der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt (PTB Braunschweig) an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster gebaut [Mar01]. Er wird nachfolgend mit K35-Spannungsteiler bezeichnet, da der Teiler für Spannungen bis 35 kV ausgelegt ist.⁵ Der Spannungsteiler besteht aus einer Reihe von Widerstands- und Kondensatorketten. Die Ketten werden in Primär-, Sekundär-, und Tertiär-Teilerketten unterteilt.

Die Primär-Teilerkette bildet den eigentlichen Spannungsteiler. Sie besteht aus 100 Präzisionswiderständen mit je 1,84 M Ω , die den Teilerwiderstand darstellen, und 6 Widerständen mit je 140 k Ω , an denen der Spannungsabgriff erfolgt. Damit werden zwei Maßstabsfaktoren realisiert, die nah bei den oben geschilderten liegen:

- $M_1^{K35} \approx 1972$
- $M_2^{K35} \approx 3945$

Die Präzisionswiderstände werden zu je 25 Stück zwischen fünf Kupferelektroden auf vier Ebenen verteilt (siehe Abbildung 3.7). Die fünfte Ebene, die sich unterhalb der untersten Elektrode befindet, wird Abgriffebene genannt. Dort befinden sich restlichen sechs Widerstände der Primär-Teilerkette.

Zusätzlich zu den beiden Maßstabsfaktoren M_1^{K35} und M_2^{K35} wurde ein 100:1 Abgriff realisiert. Die notwendigen Umbaumaßnahmen wurden in [Ros11] beschrieben. Der 100:1 Abgriff, mit dem Maßstabsfaktor

•
$$M_3^{100} \approx 95,2$$

wird bei den Messungen mit $-18,6\,\mathrm{kV}$ und $-32\,\mathrm{kV}$ nicht benötigt. Jedoch spielt der Zusätzliche Abgriff eine wesentliche Rolle bei der Kalibration des Hochspannungsteilers mit Niederspannung. Auf diese Möglichkeit der Kalibration wird im folgenden Unterkapitel entwas näher eingegangen.

Linker Teil der Abbildung 3.6 zeigt ein Ersatzschaltbild des K35-Spannungsteilers.⁶ Hier sind die Sekundär- und Tertiär-Teilerketten zu einem Kontrollteiler zusammengefasst. Die Hochspannungswiderstände der Sekundär-Teilerkette dienen der Formung des elektrischen Feldes zwischen den Kupferelektroden. Die Teilerkette besteht aus vier Widerständen mit je 44 M Ω zwischen den Kupferelektroden und zwei 90 k Ω Widerständen, die in der Abgriffebene platziert sind und zur Kontrolle der Spannung unabhängig von der Primär-Kette genutzt werden können. Vier Hochspannungskondensatoren der Tertiär-Teilerkette mit je 2,5 nF sollen die Widerstände der Primär-Teilerkette vor Überspannungen schützen.

Mechanischer Aufbau des K35-Spannungsteilers ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Die Widerstände der Primär-Teilerkette sind spiralförmig angeordnet, wobei sich ihre Drehrichtung nach jeder Ebene ändert. Damit sollen Induktivitäten reduziert werden. Zu erkennen sind

⁵Dementsprechend wird der zweite Präzisions-Hochspannungsteiler mit K65-Spannungteiler bezeichnet.

⁶Vollständige Anordnung der Präzisionswiderstände und der Hochspannungskondensatoren ist im Anhang in Abbildung B.1 zu sehen.



Abbildung 3.6.: Ersatzschaltbilder der KATRIN-Hochspannungsteiler. Sowohl die Widerstände der Primär-Teilerkette des K35-Spannungsteilers (links), als auch des K65-Spannungsteilers (rechts) wurden für jede Ebene zusammengefasst. Die Widerstände der Primärkette der Abgriffebene beim K65-Spannungsteiler wurden zu einem 1,5 MΩ Widerstand zusammengefasst. Schaltpläne aus [Bau09].

ebenfalls die vier blauen Hochspannungswiderstände und vier grüne Hochspannungskondensatoren. Die gesamte Konstruktion wird mit einem Edelstahlbehälter umschlossen. Dieser dient als Faradayscher Käfig und ermöglicht eine interne Temperaturregelung. Fertig aufgebauter Spannungsteiler ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

3.3.2. K65-Spannungsteiler

Nach den ersten Kalibrationsphasen des ersten Spannungsteilers am PTB in 2005 und 2006 (siehe [Thu07]) wurde 2007 mit der Entwicklung des zweiten Hochspannungsteilers begonnen [Hoc08]. Das Hauptziel ist dabei die verbesserte Langzeitstabilität der Maßstabsfaktoren gewesen. Außerdem werden durch das Vorhandensein zweier Hochspannungsteiler beim Ausfall eines Teilers im laufenden Messbetrieb des KATRIN-Experiments die Unterbrechungen vermieden. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit gegenseitiger Kalibration. So könnte eine aktuell durchgeführte Kalibration eines Spannungsteilers bei PTB für die Kalibration des Anderen unmittelbar am Ort des KATRIN-Experiments verwendet werden.

Arbeiten von F. Hochschulz [Hoc08] und S. Bauer [Bau09] befassen sich ausführlich mit Entwicklung, Untersuchungen und Inbetriebnahme des zweiten KATRIN-Hochspannungsteilers. In diesem Abschnitt soll ein Überblick des K65-Spannungsteiler gegeben werden.

Mechanischer und elektrischer Aufbau des zweiten Spannungsteilers orientiert sich an den K35-Spannungsteiler. Die gewonnen Erfahrungen beim Bau des ersten Spannungsteilers flossen dabei in die Entwicklung des K65-Spannungsteiler hinein. Um den Einsatzgebiet des zweiten Spannungsteilers zu erweitern, wurde die Spannungsfestigkeit auf 65 kV erhöht.

Der elektrischer Aufbau des K65-Spannungsteilers ist im rechten Teil der Abbildung 3.6 dargestellt. Der Spannungsteiler besteht ebenfalls aus drei Teilerketten, wobei die elek-



Abbildung 3.7.: Präzisions-Spannungsteiler ohne Gehäuse. Linkes Bild zeigt den K35-Spannungsteiler (aus [Thu07]), rechtes Bild zeigt den K65-Spannungsteiler, beide ohne Edelstahlbehälter (aus [Bau09]). Der K65-Teiler besitzt 7 Kupferelektroden, die 6 Ebenen bilden. Die Widerstände der Primär-Kette sind auf 5 obere Ebenen verteilt, die untere Ebene ist die Abgriffebene. Im Gegensatz dazu, besitzt der K35-Spannungsteiler 4 Ebenen, wobei die Abgriffswiderstände unterhalb der untersten Kupferelektrode platziert sind. Bei beiden Spannungsteilern ist die spiralförmige Anordnung der Widerstände der Primär-Teilerkette zu erkennen, die nach jeder Ebene ihre Drehrichtung ändert. Die Bilder sind nicht maßstabsgetreu.



Abbildung 3.8.: Fertige Spannungsteiler mit Steuereinheiten. Links ist der K35-Spannungsteiler und rechts der K65-Spannungsteiler zu sehen (Photos aus [Ros11] und [Bau09]). Beide Spannungsteiler samt Steuereinheiten sind in stabilen Aluminiumrahmen mit R\u00e4dern verbaut. Somit bleiben sie leicht transportabel f\u00fcr Wartungs- und Kalibrationsarbeiten. Die Bilder sind nicht ma\u00dfstabsgetreu. trischen Bauteile, die für den Abgriff der Spannung eingesetzt werden, in die separate Ebene untergebracht sind. Die 165 Präzisionswiderstände der Primär-Teilerkette (mit je 880 k Ω) sind auf fünf obere Ebenen verteilt und die Abgriffwiderstände befinden sich zwischen den beiden untersten Kupferelektroden (siehe Abbildung 3.7). Im Ersatzschaltbild der Abbildung 3.6 sind die Widerstände der Abgriffebene zu einem 1,5 M Ω Widerstand zusammengefasst.⁷ Aus der Konfiguration der Widerstände lassen sich somit folgende Maßstabsfaktoren realisieren:

- $M_1^{K65} \approx 1818$
- $M_2^{K65} \approx 3636$
- $M_3^{K65} \approx 500$
- $M_4^{K65} \approx 100$

Der im K35-Spannungsteiler nicht vorhandene 500:1 Abgriff soll beim K65-Spannungsteiler die Option bieten, Spannungen von 5 kV auf einen 10 V Messbereich herunter teilen zu können.

Mechanischer Aufbau des K65-Spannungsteilers ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Im Vergleich zum ersten Spannungsteiler wurde die Zahl der Kupferelektroden auf sieben erhöht, sowie deren Durchmesser vergrößert. Diese Maßnahme war nötig, um bei höheren Spannungen Überschläge zu vermeiden. Abgeschlossen wird der K65-Spannungsteiler ebenfalls mit einem Edelstahlkessel, der den Teiler vor Einstrahlung elektromagnetischer Störungen und Personen vor Spannungsschlägen schützt. Außerdem ist eine Durchspülung des Innenraums mit Stickstoff bei beiden Spannungsteilern möglich. Damit lässt sich die Feuchtigkeit im Inneren auf ein Minimum reduzieren. Der gesamte Spannungsteiler mit Steuereinheiten wurde in einem Aluminiumrahmen mit Rädern montiert und ermöglicht somit leichte Transportierbarkeit für Wartungs- und Kalibrationsmaßnahmen (Abbildung 3.8).

Im Zeitraum dieser Arbeit stand K65-Spannungsteiler für die Messungen am Monitorspektrometer nicht bereit. Alle im Kapitel 4 durchgeführten Messungen wurden mit dem K35-Spannungsteiler durchgeführt.

3.3.3. Kalibration der Hochspannungsteiler

Einen wichtigen Punkt in der Kalibrationskette des KATRIN-HV-Systems stellt die Überwachung der Stabilität der Hochspannungsteiler dar.⁸ Diese Überwachung erfolgt durch regelmäßige Kalibration. Dabei werden Maßstabsfaktoren der Spannungsteiler ermittelt und eine Langzeit Kalibrationshistorie aufgestellt.

Zur Kalibration der Spannungsteiler können verschiedene Methode eingesetzt werden. Eine Kalibrationsmethode, bei der Maßstabsfaktoren direkt bestimmt werden, besteht im Anlegen einer sehr genauen Eingangsspannung und anschließender Messung der Ausgangsspannung. Aus dem Verhältnis beider Spannungen wird der Maßstabsfaktor bestimmt (Gleichung 3.1). Da bei hohen Spannungswerte keine Spannungsquelle ausreichende Stabilität bietet, muss diese Spannung mit einem Referenzspannungsteiler kontrolliert werden. Ein geeigneter Referenzteiler ist der MT100 Referenzspannungsteiler der PTB Braunschweig. Mit diesem Teiler werden beide KATRIN-Spannungsteiler regelmäßig kalibriert. Den prinzipiellen Aufbau dieser Kalibrationsmethode stellte Abbildung 3.9 dar. Hier wird gezeigt, wie der Maßstabsfaktor des 100:1 Abgriffes direkt bestimmt werden kann.

⁷Vollständige Konfiguration der Widerstände der Primär-Teilerkette in der Abgriffebene befindet sich im Anhang in Abbildung B.2.

⁸Andere Glieder der Kalibrationskette, wie die Multimeterkalibration und Überwachung der Hochspannungstbilität, werden im Kapitel 4 beschrieben.



Abbildung 3.9.: Blockschaltbild zur direkten Bestimmung der Maßstabsfaktoren des K35-Spannungsteiler. Zur weiteren Beschreibung siehe Kapitel 3.3.3. Abbildung aus [Bau09].

Ein Spannungsnetzteil versorgt beide Spannungsteiler gleichzeitig. Die dazu verwendete Spannungsquelle Fluke 5720A Calibrator, die Spannungen bis 1 kV erzeugen kann, besitzt zwar ausreichende Stabilität, jedoch wird ihre Spannung zusätzlich mit einem Fluke 752A Referenzteiler überwacht, um die gewünschte ppm-Präzision zu erreichen. Die Ausgangsspannungen an beiden Spannungsteilern werden getrennt mit Präzisionsmultimetern gemessen. Die Multimeter werden ihrerseits mit einer 10 V Referenzspannungsquelle Fluke 732A kalibriert (ausführlich im nächsten Kapitel beschrieben). Bei der geschilderten Konfiguration ergeben sich Ausgangsspannungen von etwa 10 V. Die Vermessung anderer Maßstabsfaktoren (hier M_1^{K35} und M_2^{K35} beim K35-Spannungsteiler) würde Ausgangsspannungen unter 0,5 V liefern. Bei diesen Werten spielen Thermospannungen einen zu großen Einfluss auf die Messung. Deswegen werden andere Spannungsquellen und Referenzspannungsteiler benötigt, die im selben Spannungsbereich arbeiten, wie der zu untersuchende Hochspannungsteiler.

Eine weitere Methode der Kalibration bietet sich bei wechselseitiger Kalibration mit zwei Präzisions-Spannungsteilern. Diese Methode kann beim Vorhandensein beider KATRIN-Spannungsteiler unabhängig vom MT100 Referenzspannungsteiler angewandt werden.

Bei der dritten Methode wird ein Spannungsteiler ausschließlich mit Niederspannungen bis 1 kV kalibriert. Der Ablauf beider letztgenannter Methode ist in [Bau09] beschrieben.

3.4. Hochspannungsnachregelung

Die oben geschilderten Maßnahmen zur Überwachung der Hochspannungsstabilität, sowie die im nächsten Kapitel beschrieben weiteren Kalibrationsmaßnahmen, beziehen sich auf die Stabilität im Gleichspannungsbereich. Die Stabilität des KATRIN-HV-Systems kann außerdem von Einkoppelung hochfrequenter Störungsanteile gefährdet werden. Diese Störungen können vor allem von dem Stromnetz verursacht werden, aus dem verschiedene Hilfsgeräte mit einer Wechselspannung versorgt werden. Einige dieser Geräte, wie zum Beispiel die Turbomolekularpumpen, werden im laufenden Betrieb auf dem selben Potenzial wie der Hauptspektrometer betrieben, wodurch mit Störungen gerechnet werden muss, die bei der galvanischen Trennung der Geräte vom Stromnetz entstehen. Der Hauptspektrometertank wirkt dabei als eine Antenne und da der Außentank kapazitiv mit dem innen liegenden Drahtelektrodensystem verbunden ist, können hochfrequente Störungen direkt in das System eingestrahlt werden. Damit stellt sich die Frage nach der Reduktion beziehungsweise Glättung der in das HV-System eingekoppelter hochfrequenter Störungen.

Als Lösung dieses Problems wurde eine Hochspannungs-Hochfrequenz-Nachregelung (kurz: Nachregelung) entwickelt und am Vorspektrometer [Gro10] und Monitorspektrometer [Wie12] getestet. Als Beispiel werden hier kurz die Testergebnisse von den Messungen am Monitorspektrometer dargestellt, die in der Arbeit von V. Wiedmann [Wie12] ausführlich geschildert sind.

Prinzipiell besteht die Nachregelung aus einem Hochpassfilter, der die Auslesung der Wechselspannungsanteile ermöglicht und der Glätteinheit. Als Hochpassfilter dient ein hochspannungsfester Keramikkondensator (Ripple-Pick-up-Probe), der an das Analysierpotenzial angeschlossen ist. Die Rolle des aktiven Regelgliedes übernimmt eine Triode. Zwischen den beiden Einheiten befindet sich noch ein Hochspannungsnachregulator, der Eingangssignal für die Triode erzeugt. Die Messungen am Monitorspektrometer zeigen, dass die vorhandene Restwelligkeit der Hochspannung innerhalb der Anforderungen des KATRIN-Experiments liegt und deshalb dort auf den Einsatz der Nachregelung verzichtet werden kann. Mit der Nachregelung konnte jedoch eine Reduktion der Amplitude der Restwelligkeit der Hochspannung um Faktor 10 reduziert werden. So beträgt die Amplitude bei einer Analysierspannung von $-17,8\,\mathrm{kV}$ rund 50\,\mathrm{mV} ohne und rund 5 mV mit Nachregelung. Werden mögliche Drifts in die Betrachtung der Restwelligkeit einbezogen, bleibt die

Schwankung im Bereich von $\pm 15 \,\mathrm{mV}$ liegen. Bei einer Spannung von $-17,8 \,\mathrm{kV}$ entspricht es einer Abweichung von weniger als einem ppm.

Für die Analyse des Einflusses einer sinusförmigen Störung am Hauptspektrometer wurden Störungen in die Berechnung der Transmissionsfunktion implementiert [Wie12]. Dadurch können Störungen, die hardwareseitig nicht beseitigt werden, bei der Auswertung berücksichtigt werden, was zum korrekten Spektrum des Tritiumendpunktes führen kann. Da im Zeitraum dieser Arbeit das Hochspannungssystem am Hauptspektrometer noch nicht in Betriebt genommen wurde, steht der abschließende Test der Wirksamkeit der Hochspannungsnachregelung am Hauptspektrometer mit seiner komplizierteren Geräteausstattung noch aus.
4. Kalibrationskonzept der Hochspannung

Einen wichtigen Punkt für die Überwachung der Hochspannung stellt regelmäßige Kalibration relevanter Geräte dar. Neben der Kalibration der Präzisions-Hochspannungsteiler sind dies zum einen verschiedene Multimeter mit denen die Spannungen ermittelt werden, zum anderen müssen die Hochspannungsquellen an sich kalibriert werden. Nachfolgend wird auf die einzelnen Aspekte dieser Kalibrationsmaßnahmen eingegangen.

4.1. Kalibration der Multimeter

Bei der Überwachung der Hochspannung wird der im Kapitel 3.3 beschriebene Präzisionsspannungsteiler verwendet. Er dient zur Reduktion der Hochspannung in einen Messbereich der Größenordnung von etwa 10 V, bei dem die Messungen mit kommerziell erhältlichen Multimetern am präzisesten sind. Die im KATRIN-Experiment zu diesen Zwecken verwendeten Multimeter 8508A der Firma Fluke mit $8\frac{1}{2}$ -stelliger Anzeige wurden im Rahmen dieser Arbeit von Juni bis Dezember 2012 in regelmäßigen Abständen kalibriert. Dabei wurde besondere Beachtung dem Multimeter gewidmet, das während dieser Zeit die Retardierungsspannung am Monitorspektometer über den K35-Spannungsteiler gemessen hat. Dieses Multimeter wird nachfolgend als Fluke-A bezeichnet. Die Ergebnisse der Kalibration von Fluke-A werden in diesem Kapitel dargestellt. Das zweite 8508A-Multimeter (Fluke-B) wurde für die Spannungsmessung über dem Julie-Research-Spannungsteiler¹ am Monitorspektrometer eingesetzt und soll später an den zweiten KATRIN-Hochspannungsteiler angeschlossen werden. Da Fluke-B Multimeter weitaus seltener als Fluke-A kalibriert wurde, werden seine Kalibrationsdaten (siehe Tabelle A.2 im Anhang) an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

Ein Kalibrationszyklus des Multimeters dauert in der Regel 20–24 Minuten und beinhaltet in sich die Messung des Offsets U_0 und die Messung der Referenzspannung U_{10}^{meas} . Der Offset stellt die Verschiebung des Messsignals vom Nullpunkt dar. Beide Messreihen werden jeweils 5 bis 7 Minuten lang aufgezeichnet, wobei dem Multimeter 4 bis 5 Minuten Zeit für das Einschwingen in den stabilen Zustand gegeben wird. Da alle 4 Sekunden ein Wert aufgezeichnet wird und somit zwischen 70 und 100 Werte entstehen, ergeben sich bei der Mittelwertberechnung (die U_{10}^{meas} darstellt) statistische Fehler im sub-ppm Bereich. Über

¹Dieser kommerziell erhältliche Hochspannungsteiler weist eine für das KATRIN-Experiment nicht ausreichende Stabilität von etwa 10 ppm.

das Kurzschließen der Eingänge wird der Offset ermittelt. Die Messung der Referenzspannung erfolgt durch das Anschließen der 10 V Referenzspannungsquelle an das Multimeter. Die zu diesen Zwecken verwendeten Referenzquellen Fluke 732A werden jährlich von der PTB in Braunschweig mit einem Josephson-Normal kalibriert und haben einen präzise bekannten Spannungswert U_{10}^{ref} . Es wurden zwei 732A-Referenzspannungsquelle für die Kalibration der Multimeter verwendet. Ein Referenzspannungsgerät (interne Bezeichnung: Ref-D) hat einen Referenzwert von $U_{10}^{ref} = 10,000144$ V [Sch11a] und wurde für die Kalibrationen beider Multimeter bis Ende Juli verwendet. Die andere Referenzquelle (Ref-C) hat einen Referenzwert von $U_{10}^{ref} = 9,99985$ V [Sch11b]. Sie wurde nur für die Kalibration des Fluke-A Multimeters ab August 2012 eingesetzt, während Fluke-B weiterhin mit Ref-D Spannungsquelle kalibriert wurde.

Es lässt sich ein Kalibrationsfaktor für den Multimeter bestimmen, der als Verstärkungsfaktor V bezeichnet wird (nach [Thu07]):

$$V = \frac{U_{10}^{ref}}{U_{10}^{meas} - U_0} \tag{4.1}$$

Die Unsicherheit des Verstärkungsfaktors wird bestimmt durch:

$$\sigma_V = V \sqrt{\left(\frac{\sigma_{10}^{ref}}{U_{10}^{ref}}\right)^2 + \left(\frac{1}{U_{10}^{meas} - U_0}\right)^2 \left((\sigma_{10}^{meas})^2 + (\sigma_0)^2\right)}$$
(4.2)

Hierbei setzten sich Unsicherheiten einzelner Größen wie folgt zusammen:

- Die Unsicherheit der Referenzspannung σ_{10}^{ref} wird von der PTB während der Kalibration bestimmt und beträgt für die Dauer dieser Arbeit für die zwei verwendeten Referenzquellen $2.5 \cdot 10^{-5}$ V (95 % C. L.)² ([Sch11b] und [Sch11a]).
- Beide Werte von der Spannungsmessung σ_{10}^{meas} und σ_0 beinhalten statistische Unsicherheit von der Bildung des Mittelwertes einzelner Größen und die Unsicherheiten der Multimeteranzeige.³

Messungen zwischen 24. Mai und 1. August 2012 haben keine evidente Drift der Verstärkungsfaktoren von Fluke-A ergeben (siehe Abbildung 4.1). Die Streuung einzelner Verstärkungsfaktoren ist deutlich kleiner als die 1σ Umgebung des Referenzspannungwertes U_{10}^{ref} . Dieses Ergebnis ist konsistent mit den Messungen aus [Kra12]. Anders verhält es sich mit den Kalibrationsdaten des Fluke-A Multimeters ab August. Hier kann man eine leichte Drift erkennen, die jedoch deutlich kleiner ist, als die geforderte 3 ppm Abweichung. Abbildung 4.2 zeigt die Abweichung der um den Offset korrigierter 16 Messwerte relativ zum festen Spannungswert von $U_{10}^{ref} = 9,99985$ V der 10 V Referenzspannungquelle in Abhängigkeit vom Aufnahmedatum. Dementsprechend werden die Unsicherheiten einzelner Messpunkte wie folgt bestimmt:

$$\sigma_U^{meas} = V \sqrt{\left(\frac{1}{U_{10}^{meas} - U_0}\right)^2 \left((\sigma_{10}^{meas})^2 + (\sigma_0)^2\right)}$$
(4.3)

Die Abweichung A in ppm ergibt sich aus:

$$A = 10^6 \cdot (V - 1) \tag{4.4}$$

Es ist eine Drift von $(0,22 \pm 0,03)$ ppm/Monat zu erkennen. Für die Periode eines Messzyklus beim KATRIN-Experiment von 60 Tagen würde sich somit die Anzeige der Multimeter um durchschnittlich 0,44 ppm ändern.



Abbildung 4.1.: Kalibration des Multimeters Fluke-A bis Ende Juli. Das Multimeter befand sich in der Monitorspektrometerhalle. Die grüne Gerade stellt den Mittelwert der Messpunkte dar. Dabei wurde der Ausreißer vom 31. Mai nicht in die Berechnung des Mittelwertes einbezogen. Die blauen Geraden kennzeichnen die 1 σ Umgebung von U_{10}^{ref} bezüglich des Mittelwertes der Messpunkte. Einzelne Messpunkte können der Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden.



Abbildung 4.2.: Kalibration des Multimeters Fluke-A ab August. Das Multimeter wurde in die Hauptspektrometerhalle verlegt. Die grüne Gerade stellt das Ergebnis der linearen Regression an die Messpunkte dar. Sie hat eine Steigung von $(0,22\pm0,03)$ ppm/Monat. Die blauen Geraden kennzeichnen die 1σ Umgebung von U_{10}^{ref} . Einzelne Messpunkte können der Tabelle A.1 im Anhang entnommen werden.

Die Erkennbarkeit der Drift des Verstärkungsfaktors ab August 2012 im Vergleich zu vorherigen Messungen lässt sich auf die bessere Reproduzierbarkeit der Messbedienungen zurückführen. Der Fluke-A Multimeter wurde Ende Juli zusammen mit dem K35-Spannungsteiler in die Hauptspektrometerhalle verlegt. Die klimatischen Bedienungen der Hauptspektometerhalle im Vergleich zur Monitorspektrometerhalle, wo beide Geräte bisher untergebracht waren, sind stabiler. Als wichtigstes Kriterium für die Reproduzierbarkeit der Messwerte ist hier die Stabilität der Raumtemperatur zu nennen. So schwankt sie in der Hauptspektrometerhalle zwischen 21° C und 22° C, wohingegen sie in der kleineren Monitorspektrometerhalle größeren Schwankungen unterliegt. Die temperaturbedingte Abweichung des Fluke 8508A Referenz Multimeters wird im Bereich zwischen 15° C und 30° C mit 0,3 ppm/° C angegeben [Flu02]. So zeigt zum Beispiel der Verstärkungsfaktor von Fluke-A am 31. Mai 2012 (siehe Tabelle A.1 im Anhang und Ausreißermesspunkt in Abbildung 4.1) deutliche Abweichung zu den anderen Werten, weil an diesem Tag die Raumtemperatur etwa 24° C betrug (bedingt durch das Ausheizen des Monitorspektrometers), im Vergleich zu den durchschnittlichen 18°C. Außerdem wirkt sich die relative Nähe anderer Messgeräte in der Monitorspektrometerhalle auf die Reproduzierbarkeit der Messung negativ aus. Diese räumliche Enge ist in der Hauptspektrometerhalle nicht gegeben.

Die erkennbare Drift der Verstärkungsfaktoren könnte eine Folge der Drift des Referenzwertes U_{10}^{ref} der 10 V Referenzspannungsquelle sein. Ebenso könnte das Multimeter selbst für die Drift verantwortlich sein. Da aber alle Messpunkte in Abbildung 4.2 sowei 4.1 innerhalb der 1 σ Umgebung des Referenzspannungswertes U_{10}^{ref} liegen, lässt sich die Ursache der Drift nicht eindeutig identifizieren. Als Ergebnis der Kalibration lässt sich somit festhalten, dass die Stabilitätsanforderungen für die Messung der Hochspannung seitens der Multimeter erfüllt sind.

4.2. Überwachung der Hochspannung am Monitorspektrometer

Das KATRIN-Experiment verwendet zur Überwachung der Stabilität der Hochspannung im Hauptspektrometer im laufenden Betrieb das in Kapitel 2.2.4 beschriebene Monitorspektrometer. Dabei können verschiedene Kalibrationsquellen eingesetzt werden, die es erlauben, die Stabilität der erzeugten Hochspannungen zu kontrollieren. Hier soll das Prinzip der Hochspannungsüberwachung erläutert werden. Die Vielfalt der Kalibrationsquellen wird im folgenden Unterkapitel geschildert.

4.2.1. Kalibrationsquellen

Die Kalibrationsquellen müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllen, um als solche beim KATRIN-Experiment eingesetzt zu werden. Sie müssen Elektronen mit scharf definierten Energien in der Nähe der Energie des Tritiumendpunktes freisetzen können. Dabei muss der Elektronenfluss hinreichend hoch sein, damit das Signal am Detektor das Untergrundsignal deutlich übersteigt. Für diese Zwecke können beim KATRIN-Experiment verschiedene Quellarten eingesetzt werden $[A^+04]$:

- ^{83m}Kr-Quellen in verschiedenen Aggregatzuständen
- ²⁴¹Am/Co-Quelle
- ¹⁰⁹Cd-Quelle

 $^{^2 \}mathrm{Der}$ Wert der Messgröße befindet sich im Regelfall mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa $95\,\%$ im zugeordneten Überdeckungsintervall.

³Diese können dem Fluke 8508A Spezifikationsblatt (siehe [Flu02]) entnommen werden.



Abbildung 4.3.: Zerfallsschema von ⁸³Rb/^{83m}Kr. Elektroneneinfang von ⁸³Rb führt zur Bildung von ^{83m}Kr im metastabilen Zustand. Nach einer Halbwertszeit von 1,83 Stunden werden bei weiterem Zerfall von ^{83m}Kr die Konversionselektonen mit einer Energie von 17824,3 eV freigesetzt. Diese Elektronen aus der K-Schale bilden die K-32-Linie, die zur Kalibration der Hochspannung verwendet wird. Abbildung aus [Wie12].

Die radioaktiven ^{83m}Kr-Kerne erzeugen beim Zerfall scharfe Elektronenlinien. Es können gasförmige, kondensierte und feste ^{83m}Kr-Quellen verwendet werden. Bei der zweiten Quellenart handelt es sich um eine Photoelektronenquelle mit wohldefinierten Photonenenergien. Bei der ¹⁰⁹Cd-Quelle werden freigesetzte Auger-Elektronen für die Kalibration benutzt.

Als besonders geeignet hat sich eine 83 Rb/ 83m Kr-Festkörperquelle erwiesen. Diese Quelle erzeugt monoenergetische Konversionselektronen, die Analysierebene des Monitorspektometers passieren und vom Detektor erfasst werden. Dabei können Schwankungen der am Spektometer anliegenden Hochspannung leicht sichtbar gemacht werden. Das Zerfallsschema der 83 Rb/ 83m Kr-Festkörperquelle ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Die K-32-Linie der Konversionselektonen mit einer Energie von 17824,3 eV liegt dabei nur etwa 800 eV unterhalb der Energie des Tritiumendpunktes. Mit großen Zählraten eignet sie sich somit besonders für die Verwendung zur Überwachung der Spannungsstabilität im laufenden Messbetrieb des KATRIN-Experiments. Die fehlenden 800 eV können durch das Anlegen der Spannung dieser Größe an die Quelle ausgegliechen werden.

4.3. Verifikation der Spannungsstabilität am Beispiel der ^{83m}Kr-Linien

Ausgehend von dem oben beschriebenen Kalibrationskonzept wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Versuche unternommen, um die erforderliche Spannungsstabilität zu überprüfen beziehungsweise die bereits vorhandene Stabilität zu verifizieren. Anhand der am Monitorspektrometer aufgenommenen Daten, konnte nicht nur die Funktionalität der Hochspannungsverteileranlagen, sondern auch deren Präzision genauestens untersucht werden. Wie bereits erwähnt eignet sich der radioaktive Zerfall der ⁸³Rb/^{83m}Kr-Festkörperquelle besonders für die Überprüfung der Stabilität der Analysierspannung nahe der Energie des Tritiumendpunktes. So wurden am Monitorspekrometers regelmäßig Spektren verschiedener Zerfallslinien aufgenommen. Für die Verifikation der Spannungsstabilität wurden zwei Zerfallslinien analysiert, die im Vergleich zu den anderen Linien⁴ bessere Messstatistik aufweisen. Damit lassen sich aussagekräftigere Schlussfolgerungen machen. Das ist zum einen

⁴Ausführliche Beschreibung des Spektrums der ⁸³Rb/^{83m}Kr-Quelle befindet sich in [Zbo11].

die K-32-Linie der Konversionselektronen mit der mittleren Energie von 17824,3 eV und der Breite von 2,71 eV. Die andere, L₃-32-Linie, wird ebenfalls von den Konversionselektronen hervorgerufen und besitzt bei der mittleren Energie von 30472,3 eV eine Breite von 1,19 eV. Im Zerfallsspektrum von $^{83\mathrm{m}}\mathrm{Kr}$ werden beide Linien nicht von den benachbarten beeinflusst.

Einen wichtigen Aspekt bei der Verifikation der Spannungsstabilität mit dem Monitorspektrometer stellt die Überprüfung der Abhängigkeit der Linienposition von der Anordnung messrelevanter Geräte dar. Die in Abbildungen 4.5 und 4.7 zu sehenden Linienpositionen werden in drei Gruppen unterteilt:

- Schwarze Datenpunkte (Kreise): Messungen vor Einbau der HV-Verteiler (siehe Kapitel 3.1.2). Das Monitorspektrometer und der K35-Spannungsteiler wurden auf direktem Weg mit der Hochspannung versorgt. Dabei waren diese Messgeräte in der Monitorspektrometerhalle untergebracht.
- Rote Datenpunkte (Quadrate): Die Verteilung der Hochspannung erfolgte mittels des HV-Verteiler. Die Relais des HV-Verteilers blieben dabei in fester Einstellung. Die Verwendung verschiedener Umschaltszenarien war zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Die von der Spannungsquelle kommende Hochspannung wurde auf den K35-Spannungsteiler und den Julie-Research-Spannungsteiler verteilt (die Verteilung der Hochspannung auf die Elektroden des Monitorspektrometers erfolgte außerhalb des HV-Verteilers). Der K65-Spannungsteiler und der Hauptspektometer-HV-Verteiler waren nicht verfügbar beziehungsweise nicht fertig gestellt.
- Blaue Datenpunkte (Rauten): Der K35-Spannungsteiler wurde an seine endgültige Position in die Hauptspektrometerhalle transportiert. Dementsprechend wurde der Verbindungskabel verlängert, weil die HV-Verteileranlage an ihrem urspünglichen Ort blieb. Das Multimeter Fluke-A wurde ebenfalls in die Hauptspektrometerhalle verlegt.

Mit diesen Konfigurationen lässt sich nach der Auswertung der Linienposition eine Aussage machen, in wieweit die HV-Verteileranlagen die Reproduzierbarkeit und Stabilität der Analysespannung beeinflussen.

4.3.1. Bestimmung der Linienposition am Monitorspektometer

Die Vermessung der Linienposition soll in diesem Unterkapitel erläutert werden. Dabei beinhaltet dieser Prozess zwei wichtige Komponente: die hardwaretechnische Messung am Monitorspektrometer und die Bestimmung der Parameter der Linienposition aus den Messdaten.

Die von der ⁸³Rb/^{83m}Kr-Quelle freigesetzten Konversionselektronen gelangen in den MAC-E-Filter des Monitorspektrometers und werden mit Hilfe der Magnetfelder durch die Analysierebene zum Detektor geführt, wo sie gezählt werden. Die an den Elektroden des Monitorspektrometers anliegende Spannung wird sukzessive in kleinen Schritten (zum Beispiel 0,5 V-Schritte bei der K-32-Linie) um die Position der entsprechenden Linie verfahren. Bei Spannungen unterhalb der Linienposition gelangen bei einem idealen MAC-E-Filter alle Konversionselektronen in den Detektor, bei größeren Spannungen werden Elektronen in der Analyseebene so weit abgebremst, dass sie den Detektor nicht mehr erreichen.⁵ Es wird nur noch der Untergrund gezählt. Da nukleare Übergänge keine scharfe Linien bilden, sondern aufgrund Unschärferelation eine gewisse Breite besitzen, enthält auch das integrierte Spektrum einen fließenden Übergang. Die Verbreiterung der Transmissionslinie wird auch

⁵Die Elektronen mit kleineren Energien werden auf diese Weise im Spektrometer gespeichert. Die Abführung gespeicherte Elektronen erfolgt durch den Betrieb des Spektrometers im Dipol-Modus.



Abbildung 4.4.: Messung der K-32-Linienpositionen mit dem Fit des Spektrums. An die Datenpunke wurde eine entsprechende Funktion angepasst (rote Kurve). Blaue Kurve stellt entfaltetes Spektrum dar. Unten sind normalisierten Residuen des Fits zu sehen. wegen der Eigenschaften eines realen MAC-E-Filters hervorgerufen. Abbildung 4.4 zeigt die Datenpunkte einer solchen Messung.

Nachdem ein Spektrum aufgenommen wurde, muss es in ein differentielles Spektrum zurück entfaltet werden, denn die Energieanalyse mit einem MAC-E-Filter liefert ein integrales Spektrum.⁶ Dafür wird zuerst eine Funktion an die Datenpunkte mit einem Fitprogramm angepasst (rote Linie in Abbildung 4.4). Das entfaltete Spektrum ist in Abbildung 4.4 in blau zu sehen. Bei diesem Messzyklus vom 7. Juni 2012 wurden folgende Parameter ermittelt:

Amplitude	А	=	$(572 \pm 11) \ 1/s$
Position	Ε	=	$(17829,093 \pm 0,044) \text{ eV}$
Gaußbreite	σ	=	$(0,551 \pm 0,075) \text{ eV}$
Lorentzbreite	Γ	=	$2,7 \mathrm{eV}$
Untergrund	Bg	=	$(179,5\pm0,4)~1/{ m s}$
Reduziertes Chi^2	χ^2/NDF	=	1,11

Es ist eine Abweichung der Linienposition von 4,8 eV im Vergleich zum theoretischen Wert von 17824,3 eV zu sehen (Abbildung 4.3). Bei dieser Verschiebung handelt es sich um den Offset der Energie ϵ , der die Transmissionsfunktion verschiebt. Dieser Effekt kommt zum Einen dadurch zustande, dass die Elektronen von der Quelle, je nachdem wie weit sie von der Spektrometerachse entfernt fliegen, unterschiedliche Retardierungsfelder bekommen. Zum Anderen liefern Festkörpereffekte der Kalibrationsquelle einen Teil des Beitrags von 4,8 eV zum Offset. Damit beträgt die um den Offset korrigierte Spannung (vergleiche mit Gleichung 4.6):

$$U_{meas}^{real} = M \cdot V \cdot (U_{meas} - U_0) + \frac{\epsilon}{q}$$
(4.5)

Hier wird mit q die Elementarladung bezeichnet. Der Offset wird nicht vom Fitprogramm korrigiert, da die in der Kryptonquelle stattfindende Festkörpereffekte genaueren Untersuchungen bedürfen. Aktuelle Untersuchungen und Beschreibung des Messablaufs am Monitorspektrometer befinden sich in [Erh12].

4.3.2. K-32-Linie

Mit der oben beschriebenen Methode wurden Messungen zwischen dem 19. Mai und 21. August 2012 durchgeführt. Dabei wurde nur eine bestimmte Quelle betrachtet, damit die Schwankungen innerhalb verschiedener Quellen nicht das Messresultat verfälschen. Bestimmte Messparameter wurden variiert. Das ist zum einen die Integrationszeit pro Spannungswert, zum anderen der Abstand zwischen benachbarten Spannungseinstellungen. So liegt die Messzeit pro Spannungswert zwischen 30 und 200 Sekunden. Diese Variationen spiegeln sich in der Größe der Standardabweichung der Linienposition wider und haben auf die Lage der Linie nach der Faltung des Spektrums keine Auswirkung.

Der Abstand der Quelle vom Detektor sowie die Quellspannung wurden bei gleichen Einstellungen gehalten.

Die zeitlichen Abstände zwischen den Messpunkten sind nicht äquidistant, da es vom Messplan des Monitorspektrometers nicht vorgesehen worden war. Das ist aber von Vorteil, da die Messungen zu der selben Uhrzeit zum Übersehen der systematischen Effekte führen kann. Die berechneten Linienpositionen des K-32-Überganges sind in Abbildungen 4.5 und 4.6 zu sehen. Einzelne Gruppen in Abbildung 4.5 enthalten jeweils 29, 30 und 43 Messpunkte. Hier ist gut zu erkennen, dass die Schwankungen der Mittelwerte einzelner

⁶Es entsteht durch die Faltung des eigentlichen Elektronenspektrums und der Transmissionsfunktion des Spektrometers.



Abbildung 4.5.: Linienpositionen des K-32-Überganges von ^{83m}Kr. Einzelne Messpunkte der Linienposition sind in drei zeitlich voneinander getrennte Gruppen unterteilt. Zu sehen sind außerdem die Mittelwerte der Gruppen, dargestellt durch Kreise, Quadrate, Rauten oder entsprechende Farbe. Der Bereich zwischen äußeren grünen Geraden beträgt genau 3 ppm. Weitere Beschreibung befindet sich in Kapiteln 4.3 und 4.3.2.



Abbildung 4.6.: Linienpositionen des K-32-Überganges von ^{83m}Kr. Alle Messpunkte werden zusammen betrachtet. Zu sehen ist der Mittelwert aller Messpunke und seine 1,5 ppm Umgebung. Die Standardabweichung des Mittelwertes beträgt genau 1,5 ppm und fällt deshalb mit der grünen Geraden zusammen.



Abbildung 4.7.: Linienpositionen des L₃-32-Überganges von ^{83m}Kr. Die Darstellung ist wie in Abbildung 4.5. Weitere Beschreibung befindet sich in Kapiteln 4.3 und 4.3.3.



Abbildung 4.8.: Linienpositionen des L₃-32-Überganges von ^{83m}Kr. Die Darstellung ist wie in Abbildung 4.6. Hier ist die 1σ Umgebung des Mittelwertes kleiner als die 1,5 ppm Umgebung und ist als dünne Gerade dargestellt.

Messgruppen deutlich kleiner sind, als die 1,5 ppm Umgebung des gemeinsamen Mittelwertes, die in dieser Darstellung mit grünen waagerechten Geraden dargestellt wurde. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Standardabweichungen der Mittelwerte nicht in das Diagramm eingezeichnet:

- Schwarze Datenpunkte: $E_1 = (17829,096 \pm 0,035) \text{ eV}$
- Rote Datenpunkte: $E_2 = (17829,088 \pm 0,021) eV$
- Blaue Datenpunkte: $E_3 = (17829, 104 \pm 0, 021) eV$

Größte Abweichung ist zwischen den roten und blauen Messdaten zu sehen. Sie beträgt 0,016 eV oder 0,9 ppm. Die Größe der Standardabweichung des Mittelwertes aller Linienpositionen (Abbildung 4.6) lässt auf die Präzision und Reproduzierbarkeit der Messungen zurück schließen. Sie liegt bei 0,027 eV, was bei einem Wert von $E_{mitt} = 17829,097 eV$ genau 1,5 ppm entspricht. An den Werten der Standardabweichung von E_2 und E_3 ist zu erkennen, dass die Messpräzision am Monitorspektrometer im Laufe der Zeit zugenommen hat.

Eine zeitlich bedingte Drift der Linienposition lässt sich anhand der Abbildung 4.5 nicht feststellen. Ebenso lässt sich eine Abhängigkeit der Lage der Linienposition von der Anordnung messrelevanter Geräte ausschließen. Sowohl die Einbindung der HV-Verteiler in den Spannungskreislauf, wie auch die veränderte Länge und Lage der Kabel beeinflussen die Präzision der Spannungseinstellung nicht. Die geforderte Stabilität von 3 ppm wird eingehalten.

4.3.3. L₃-32-Linie

Die Ergebnisse der Auswertung der Stabilität der Spannungseinstellungen anhand der L₃-32-Linie liefern ähnliches Resultat wie bei der K-32-Linie. Bei der Analyse wurden alle Parameter nach der gleichen Schema wie bei der K-32-Linie bestimmt. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildungen 4.7 und 4.8 dargestellt. Die Anzahl der Messpunkte beträgt entsprechend ihrer Gruppen 30, 28 und 30. Hier sind die Mittelwerte mit ihren Standardabweichungen aufgelistet:

- Schwarze Datenpunkte: $E_1 = (30477,399 \pm 0,038) eV$
- Rote Datenpunkte: $E_2 = (30477, 427 \pm 0.026) \text{ eV}$
- Blaue Datenpunkte: $E_3 = (30477, 458 \pm 0, 020) \text{ eV}$

Die größte Schwankung zwischen den Mittelwerten beträgt 0,059 eV oder 1,9 ppm. Jedoch liegen auch hier die Mittelwerte einzelner Gruppen im Bereich von 3 ppm zwischen den grünen Geraden. Da die Messungen der K-32 und L₃-32-Linien abwechselnd durchgeführt wurden, ist auch hier anhand der Standardabweichungen von E_2 und E_3 zu erkennen, dass die Messpräzision mit der Zeit zugenommen hat. Der gemeinsame Mittelwert der Größe $E_{mitt} = 30477,428 \,\text{eV}$ weist eine Standardabweichung auf, die etwas kleiner als 1,5 ppm ist.

Damit lässt sich festhalten, dass auch bei deutlich höheren Energien als die Energie des Tritiumendpunktes die Spannung stabil genug gehalten werden kann. Wie bei der K-32-Linie zeigt die Analyse, dass die HV-Verteileranlagen die Präzision der Spannungseinstellung nicht beeinflusst.

Bei der Betrachtung der möglichen zeitlichen Drift der L₃-32-Linienposition liefert eine lineare Regression an die Datenpunkte eine Drift von grob 0.5 ppm/Monat. Da die Messdaten mit dem regelmäßig kalibrierten Multimeter aufgenommen wurden, könnte die in Abbildung 4.8 erkennbare Steigerung der Energie der L₃-32-Linie von der Drift des

Maßstabsfaktors M des K35-Spannungsteilers stammen. Bei der Berechnung der Spannungswerte wurde im Messzeitraum zwischen Mai und November 2012 ein fester Wert des 2000:1-Abgriffes des Spannungsteilers von M = 1972,5 einbezogen. Damit berechnet sich die am Spektrometer anliegende Spannung zu:

$$U_{meas}^{real} = M \cdot V \cdot (U_{meas} - U_0) \tag{4.6}$$

Dabei sind V der Verstärkungsfaktor (siehe Gleichung 4.1), U_0 der Offset des Multimeters und U_{meas} die gemessene Spannung.

Die in 2011 gemessene Stabilität der Maßstabsfaktoren von < 0,2 ppm/Jahr übertrifft die in der Abbildung zu sehende Drift bei weitem [Kra12]. Somit lässt sich festhalten, dass die Drift von 0,5 ppm/Monat eher von den nicht exakt reproduzierbaren Messbedingungen in der Monitorspektrometerhalle hervorgerufen wird.

5. Untersuchung der Störeinflüsse der Turbomolekularpumpe auf die Hochspannungsstabilität

In vorherigen Kapiteln wurden mögliche Störeinflüsse auf die Hochspannungsstabilität im Gleichspannungsbereich beschrieben. Es wurden geeignete Maßnahmen zur ihrer Überwachung beziehungsweise Beseitigung dargestellt. Die Rede ist vom HV-Kalibrationskonzept sowie der Wahl geeigneter Geräte zur Erzeugung und Messung der Hochspannung.

Diese Kapitel befasst sich mit den periodischen (hoch-)frequenten Störungen, die beim Betrieb der am Spektrometertank angebrachter Geräte mit Wechselspannung in das KATRIN-HV-System eingekoppelt werden können. Speziel dafür wurden die Frequenzspektren einer Turbomolekularpumpe (TMP) in verschiedenen Betriebszuständen betrachtet. Nach der Beschreibung der Einsatzmöglichkeiten der TMP's im KATRIN-Experiment wird der Testaufbau beschrieben, gefolgt von den Messergebnissen der Untersuchungen.

5.1. Turbomolekularpumpen im KATRIN-Experiment

Die Turbomolekularpumpen werden beim KATRIN-Experiment in großer Stückzahl eingesetzt. Neben dem Hauptspektrometer und dem Vorspektrometer, wo die TMP's die Hauptarbeit beim erreichen des Ultrahochvakuums leisten, benötigen der Quellbereich und die Transportstrecke des KATRIN-Experiments, genauer gesagt die DPS1 und DPS2, TMP's für das Abpumpen des Tritiumgases. Bei dem Druck, der von der TMP erreicht werden kann, übersteigt die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle um Größenordnungen die Abmessungen der Rezipienten. Für ein Teilchen bedeutet das, dass es selbst die Pumpöffnung erreichen muss, um abgepumpt zu werden. Somit führen zusätzliche Leitungsrohre zwischen den Pumpen und ihren Rezipienten zum starken Verlust der Pumpleistung. Um dem entgegen zu wirken werden die TMP's möglichst nah am Rezipienten platziert. Diese Maßnahmen implizieren bei manchen Fällen die Aussetzung der TMP's starken Magnetfelder, was zu den Einschränkungen des Betriebes der Pumpen führen kann. Der Einfluss der Magnetfelder auf die Funktionalität der im KATRIN-Experiment eingesetzten Turbopumpen, sowie das Erwärmverhalten bei verschiedenen Betriebszuständen wurden in [Gro10] und [Rie11] untersucht. Hier wird nicht näher darauf eingegangen.

Beim Hauptspektrometer verteilen sich die TMP's über die beiden äußeren Pumpports.

Dabei enthält jeder Pumpport drei TMP's mit einer Pumpleistung¹ von 2800 l/s und eine TMP mit 300 l/s Pumpleistung. Da die TMP's erst ab einem Druck von 10^{-4} mbar eingesetzt werden können, werden an den Pumpports jeweils eine Vorpumpe befestigt. Um den Enddruck des Ultrahochvakuums der Größe von 10^{-11} mbar zu erreichen, werden neben den TMP's noch NEG-Pumpen eingesetzt. Bei diesen Pumpen wird die Pumpwirkung durch Adsorptionsprozesse erreicht. Durch chemische Reaktionen werden die restlichen im Rezipienten vorhandenen Gasteilchen gebunden.

Das Vorspektrometer setzt zum Erreichen von 10^{-11} mbar Innendruck zwei TMP's und eine NEG-Pumpe ein. Die TMP's haben eine Pumpleistung von je 1300 l/s und sind an einem horizontalen Pumpport befestigt, während die NEG-Pumpe am zweiten Pumpport befestigt ist, der zum ersten in 45°-Winkel angebracht ist.

Wie bereits im Kapitel 3.4 erwähnt, befinden sich die großen Turbomolekularpumpen auf dem selben Potenzial wie der Hauptspektrometertank. Um die Pumpen vom Stromnetz galvanisch zu trennen, erfolgt ihre Stromversorgung mit Hilfe der Trenntransformatoren. Damit können jedoch Störungen vom Stromnetz in das HV-System eingekoppelt werden.

5.2. Aufbau des TMP-Teststandes

Für die Messungen der Störspektren, die beim Betrieb der Turbopumpen in das TMP-System und damit in das KATRIN-HV-System eingekoppelt werden, wurde der in Abbildung 5.1 zu sehender Aufbau verwendet. Das Schema zeigt die Hauptkomponente des TMP-Teststandes, die nachfolgend beschrieben werden.

Turbomolekularpumpe und Aluminiumrahmen

Die Kernkomponente des Teststandes bildet eine Turbomolekularpumpe MAG W 2800 von Leybold,² die in einem stabilen Aluminiumrahmen installiert ist. Diese Aluminiumkonstruktion wurde speziell für die Hochspannungstests an der TMP aufgebaut. Der Rahmen sollte ausreichende Stabilität der Turbopumpe im Fall plötzlich auftretender Drehmomente (zum Beispiel beim abruptem Verlust der Rotationsgeschwindigkeit des Innenrotors beim auftreten eines mechanischen Defektes) gewährleisten. Die TMP ist von unten und von oben mit Kunststoffplaten fest verschraubt und damit vom Aluminiumrahmen isoliert. Der Rahmen selbst bleibt dabei geerdet.

${\bf TMP}\text{-}{\bf Kontrolleinheit}$

Zur Steuerung der TMP wird eine Kontrolleinheit MAG Drive digital von Leybold verwendet, die über ein Hochstromkabel mit der TMP verbunden ist. Damit befindet sich die Kontrolleinheit auf dem gleichen Potenzial wie die TMP, so wie dies auch im endgültigen Aufbau bei KATRIN der Fall sein wird. Abbildung 5.3 zeigt die Turbopumpe mit ihrer Kontrolleinheit. Das Hoch- und Herunterfahren der TMP in den kontinuierlichen Betriebszustand erfolgt dabei per Knopfdruck. Im KATRIN-Experiment wird das Ansteuern der TMP's von der Steuerungssoftware übernommen.

Ringkerntransformator

Die Stromversorgung der TMP-Kontrolleinheit und damit der Pumpe selbst erfolgt mit Hilfe eines Ringkernstransformators TRGTET 3305002 von Tauscher Transformatoren. Der Transformator wird zur galvanischen Trennung der TMP vom 230 V Verbrauchernetz verwendet. Er benötigt eine Nennleistung von 3 kW und erzeugt an seiner Sekundärwicklung die selben 230 V an Spannung. Der Ringtransformator eignet sich ebenfalls für Tests mit Hochspannung, da er für Spannungen bis 50 kV ausgelegt ist. Der verwendete Ringkerntransformator ist statisch und magnetisch abgeschirmt. Seine doppelte statische Ab-

 $^{^{1}}$ Die Pumpleistungen werden für Stickstoffgas N₂ angegeben.

 $^{^2 {\}rm Gleiche \ TMP's}$ werden beim KATRIN-Experiment am Hauptspektrometertank eingesetzt.



Abbildung 5.1.: Schema des TMP-Teststandes. Zu sehen sind die Hauptkomponente des Teststandes. Rot umrandete Komponente sind nicht geerdet. Bei dem Trenntransformator ist das nur die Sekundärwicklung. Restliche Komponente befinden sich dabei auf dem selben Grundpotential. Für verschiedene Messungen wurden verschiedene elektrische Bauteile verwendet und mit einem Oszilloskop aufgezeichnet.



Abbildung 5.2.: Photo des gesamten TMP-Versuchsaufbaus.

schirmung verhindert effizient die Einkopplung der AC-Störungen³ seiner Streufelder in die umgebende Messapparatur.

Vorpumpe

Um eine TMP verwenden zu können wird ein Vorvakuum von mindestens 10^{-4} mbar benötigt, da ansonsten durch die Luftreibung verursachende Erwärmung der Pumpe zu ihrer Zerstörung führen kann. Aus diesem Grund wird im Versuchsaufbau eine Drehschieberpumpe HiCube 80 von Pfeiffer Vacuum zur Erzeugung von Vorvakuum verwendet.⁴ Die zur Verbindung beider Pumpen miteinander eingesetzten Flanschen erlauben dabei das Erreichen eines Druckes von bis zu $5 \cdot 10^{-5}$ mbar. Um die TMP von der Vorpumpe elektrisch zu trennen, besteht ein Teil des Verbindungsrohres aus einem etwa 15 cm langen Keramikzylinder. Dieses weiße Isolationsrohr ist gut in Abbildungen 5.3 und 5.4 zu sehen.

Erdung

Abbildung 5.1 zeigt, wie einzelne Komponente des TMP-Teststandes auf selbes Potenzialniveau gelegt werden. Rot umrandet sind dabei die Komponente, die frei im Raum schweben und dabei auf einem vom Grundpotenzial verschiedenen Potenzialniveau liegen. Das sind die TMP mit ihrer Kontrolleinheit und die Sekundärwicklung des Ringkerntransformators. Damit besteht die Möglichkeit diese Komponente auf ein beliebiges Potenzialniveau zu legen. Alle anderen Versuchskomponente werden am Aluminiumrahmen geerdet, der wiederum mit dem Heizungsradiator (und damit auch geerdet) verbunden ist. Wichtig zu beachten ist, dass die Primärwicklung des Transformators auf das Potenzialniveau des Aluminiumrahmens gelegt wird. Ist das nicht der Fall und die Primärwicklung über den Netzschalter geerdet wird, wirken sich vom Verbrauchernetz eingekoppelte Reststörungen negativ auf die Messungen aus (siehe dazu Unterkapitel 5.3.3).

5.3. Messungen

Für die Messungen der Störspektren und des Ableitstroms wurde ein Oszilloskop TPS 2024 von Tektronix verwendet, der an seinen Eingängen potenzialfrei ist. Dieses Modell erlaubt Speicherung angezeigter Werte auf einen externen Datenträger (USB-Stick oder CompactFlashTM-Speicherkarte). Dabei wurden die hochfrequente Spannungssignale mit Hilfe der FFT-Funktion (Fast Fourier-Transformation) des Oszilloskops in ihre Frequenzspektren zerlegt. Zur Abschwächung des Frequenzspektrums wurde ein hochspannungsfester 10 nF Kondensator (Glättkondensator) verwendet (Abbildung 5.4). Den Spannungsabfall am K35-Spannungsteiler sollte ein 50 M Ω Widerstand simulieren. Für die Messung des Ableitstroms wurden zwei in Reihe geschaltete 500 Ω Widerstände verwendet. Die Verbindung dieser elektrischen Elemente wurde zwischen der TMP und dem Aluminiumrahmen in der Nähe des Isolationsrohres realisiert, wo auch der Abgriff der Spannung mit dem Tastkopf erfolgte (Abbildung 5.4 links).

Weiter unten werden Ergebnisse der Messungen an potenzialfreier TMP dargestellt und diskutiert.

5.3.1. Messzustände

Abgesehen von der Betrachtung des Frequenzspektrums der im laufenden Betrieb befindlichen Turbopumpe, was für die eigentliche Messungen beim KATRIN-Experiment relevant ist, wurden die Störspektren in verschiedenen Zuständen der TMP gemessen. Es wurden folgende Betriebszustände realisiert:

³Alternating Current – Wechselstrom

 $^{{}^{4}}$ Bei dieser Pumpe handelt es sich um eine Kombination aus einer Drehschieberpumpe und einer Turbopumpe zum erreichen eines Hochvakuums von unter 10^{-8} mbar.



Abbildung 5.3.: **Turbomolekularpumpe MAG W 2800 mit Kontrolleinheit.** Im linken Teil des Bildes sind die Rohrleitungen von der Vorpumpe, sowie keramisches Isolationsrohr erkennbar.



Abbildung 5.4.: Messabgriff des TMP-Teststandes. Zwischen der Turbopumpe und den Rohrleitungen der Vorpumpe erfolgt der Abgriff der Spannung, je nach Einsatzzweck, an verschiedenen elektrischen Bauteilen. Im linken Bild ist der $1 \text{ k}\Omega$ Widerstand sowie der Tastkopf des Oszilloskops zur Messung des Ableitstroms zu sehen. Rechtes Bild zeigt den 10 nF Konsensator.

- **Zustand 1**: Alle Geräte des TMP-Teststandes sind ausgeschaltet. Nur die Vorpumpe befindet sich im Dauerbetrieb.
- **Zustand 2**: Zusätzlich zur Vorpumpe wird der Trenntransformator eingeschaltet. Damit wird die Stromzufuhr zur TMP-Kontrolleinheit gewährleistet. Jedoch bleibt der Kontroller ausgeschaltet.
- **Zustand 3**: Die TMP-Kontrolleinheit wird eingeschaltet und damit die Turbopumpe mit dem Strom versorgt.
- Zustand 4: In diesem Zustand wird die TMP hochgefahren. Für das Erreichen des stabilen Betriebszustandes werden einige Minuten benötigt. Dabei wird der Innenrotor der TMP bis zu einer Rotationsfrequenz von 480 Hz beschleunigt. Die Stromaufnahme beim Hochfahren der Turbopumpe erreicht Spitzenwerte von etwa 15 A.
- **Zustand 5**: Stabiler Betriebszustand. Die TMP verbleibt bei den erreichten 480 Hz Rotationsfrequenz. Für das Halten dieser Frequenz werden zwischen 0,5 A und 1 A Strom benötigt.
- **Zustand 6**: Die TMP wird runter gefahren. Die Abbremsung dauert ebenfalls einige Minuten.

Zusätzlich zu den sechs Betriebszuständen des TMP-Versuchsaufbaus, konnte die Messung des Frequenzspektrums durch den Abgriff der Spannung an verschiedenen, oben beschriebenen, elektrischen Bauelementen erfolgen. Damit ließen sich weitere fünf Messzustände realisieren:

- **Zustand a**: Abgriff erfolgt zwischen der TMP und dem geerdeten Aluminiumrahmen direkt (ohne elektrische Bauelemente).
- Zustand b: Abgriff der Spannung am 50 M Ω Widerstand.
- Zustand c: Abgriff der Spannung am 10 nF Glättkondensator.
- Zustand d: Abgriff der Spannung an parallel geschalteten Glättkondensator und 50 M Ω Widerstand.
- **Zustand e**: Abgriff erfolgt zwischen der TMP und dem geerdeten Aluminiumrahmen, wobei die TMP auch am Aluminiumrahmen geerdet ist.

Die Messungen im letzen Messzustand wurden hier Vollständigkeit halber durchgeführt.

5.3.2. Messungen des Frequenzspektrums

Die genannten sechs Betriebszustände und fünf Messzustände des TMP-Versuchsaufbaus ließen somit 30 verschiedene Frequenzspektren aufnehmen. Die Spektren verschiedener Zustandskombination werden dabei mit Zustand 1a, Zustand 1b . . . Zustand 2a, Zustand 2b und so weiter bezeichnet.

Wie zu erwarten gewesen wäre, zeigt das Frequenzspektrum in den Zuständen 1e bis 6e (geerdete TMP) nur unkontrollierte Amplitudenschwankungen etwa gleicher Höhe im gesamten betrachteten Frequenzbereich (bis zu 50 kHz), was dem Untergrundrauschen entspricht.

Eine Auswahl der Ergebnisse sind in Abbildungen 5.5, 5.6 und 5.7 zu sehen. Messungen belegen, dass der Ringkerntransformator als einzige Quelle des Störspektrums zu identifizieren ist. Messungen im Betriebszustand 1 zeigen nur das Untergrundrauschen. Zustände 2 bis 6 der TMP zeigen ähnliche Frequenzmuster (siehe Abbildung 5.5) und belegen damit, dass die eingekoppelte Störungen nur vom Transformator stammen können.



Abbildung 5.5.: Frequenzspektrum mit Glättkondensator. Dargestellt sind die Spektren im Messzustand c, wobei den Betriebszuständen 1 bis 6 (Erläuterung siehe in Unterkapitel 5.3.1) Abbildungen c) bis h) in gleicher Reihenfolge entsprechen. Abbildungen a) und c) zeigen die Restwelligkeit der Spannung beim Zustand 1c und ihr Frequenzspektrum. Bei den restlichen Spektren erfolgte die Transformation aus dem Zeitbereichssignal in den FFT-Signal mit gleicher Rastereinstellung der Amplitudenachse (Abbildung b), 1 V pro Rastermaß).



Abbildung 5.6.: Frequenzspektrum beim Abbremsen der TMP. Alle Teilabbildungen zeigen Messungen im Betriebszustand 6 (Abbremsen der Turbopumpe). Linke Bildhälfte spiegelt den Messzustand b, rechte Bildhälfte den Messzustand d wider. Dabei erfolgte die Umrechnung des Zeitbereichssignales in seine Frequenzanteile für Abbildungen b), c) und d) aus dem Signal, dass in a) gezeigt ist. Entsprechendes gilt für die rechte Bildhälfte.



Abbildung 5.7.: Glättung des Frequenzspektrums. Abbildung a) zeigt die Spannungsamplitude im Messzustand 5a (Erläuterung siehe im Unterkapitel 5.3.1) in der Zeitbereicheinstellung des Oszilloskops. Abbildung b) zeigt die Dämpfung des Spannungssignals durch den Glättkondensator und den 50 MΩ Widerstand (Zustand 5d). Abbildungen c), d), e) und f) zeigen das Frequenzspektrum entsprechend den Zuständen 5a, 5c, 5b und 5d. Hierbei erfolgte die Transformation aus dem Zeitbereichssignal in den FFT-Signal mit gleicher Rastereinstellung der Amplitudenachse (11 V pro Rastermaß). Bei diesen Diagrammen entspricht der Hauptpeak dem 50 Hz Signal.

Der Einsatz des 10 nF Kondensators zur Glättung des Frequenzspektrums bewirkt keine nennenswerte Änderung der Form des Spektrums. Dies ist in Abbildung 5.6 gut zu sehen. Da die Spektren der Betriebszustände 2 bis 6 sich nicht unterscheiden, wurden hier exemplarisch Spektren beim Abbremsvorgang der TMP dargestellt (Abbildung 5.6). Bei allen Frequenzspektren zu sehender dominanter Peak bei 50 Hz stammt vom Verbrauchernetz.

Der 10 nF Kondensator bewirkt jedoch eine Verminderung der Amplitude der Störspitzen im Frequenzspektrum der TMP, die mit der Dämpfung der Spannungsamplitude um etwa 90 % einhergeht. Abbildung 5.7 zeigt den Effekt der Abschwächung bei stabil laufender TMP (Zustand 5). Der 50 M Ω Widerstand (Zustand b) bewirkt eine Dämpfung der Spannungsamplitude nur um etwa 8% gegenüber den Messungen im Messzustand a und hat keine Auswirkung auf die Form des Frequenzspaktrums.

Werden die Zeitbereichssignale auf die Displayanzeige des Oszilloskops optimiert, sodass sie fast komplette Anzeige belegen (zum Beispiel Teilabbildung a) in Abbildung 5.6), zeigt anschließende Umrechnung in ein Frequenzspektrum bei allen Betriebs- und Messzuständen (abgesehen von den Zuständen 1 und e) ähnliches Frequenzmuster. Neben dem Hauptpeak bei 50 Hz sind zahlreiche Nebenpeaks bei ganzzahligen Vielfachen von 50 Hz zu sehen (siehe Teilabbildungen b), c) und d) in Abbildung 5.6). Die Amplitude ist wesentlich kleiner als beim Hauptpeak, jedoch nimmt sie bis zu einer Frequenz von 350 Hz zu, um danach exponentiell zu den höheren Frequenzen hin abzunehmen. Bei diesen Nebenpeaks handelt es sich um Spiegelsignale des 50 Hz Anteiles. Die restliche Frequenzpeaks sind zufälliger Natur und stellen das Untergrundrauschen dar.

5.3.3. Messungen des Ableitstroms

Den zweiten Teil der Untersuchungen an der TMP stellt die Messung des Ableitstroms, der von der Turbopumpe zur Erde fließt. Zur Bestimmung des Ableitstroms wurde die am $1 k\Omega$ Widerstand abfallende Spannung mit dem Oszilloskop gemessen. Die Messanordnung zeigt Abbildung 5.4. Gemessen wurden Spitzenwerte von bis zu 1,5 mA. Für Personen, die mit dem Gehäuse der TMP in Kontakt kommen, stellen Ströme dieser Größe keine Gefahr dar (vorausgesetzt es liegt keine Spannung am TMP-Gehäuse). Die im Kapitel 5.2 erwähnten Erdungsmaßnahmen wirken sich auf die Messung des Ableitstroms wie folgt: wird die Primärwicklung des Ringkerntransformators über dem Aluminiumrahmen geerdet, so werden Ableitströme von rund 0,3 mA gemessen. Bleibt dagegen die Primärwicklung nur an der 230 V Netzsteckdose angeschlossen, so werden bis zu 1,5 mA erfasst. Die Erhöhung des Ableitstroms um Faktor 5 wird von kleinen Unterschieden der Grundpotenziale verursacht.

5.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zeitraum dieser Arbeit stand die Möglichkeit der Durchführung oben beschriebener Tests mit der unter Hochspannung befindlichen TMP nicht zur Verfügung. Aus den oben darstellten Ergebnissen wird deutlich, dass allein der Trenntransformator für die periodischen Störungen im Frequenzspektrum verantwortlich ist. Die Steuerungselektronik anderer Versuchskomponente übt keinen Einfluss auf das Frequenzspektrum aus. Es lässt sich somit schließen, dass keine Veränderungen im Frequenzspektrum der unter Hochspannung befindlichen TMP gegenüber der potenzialfreien TMP zu erwarten sind.

Die im Kapitel 3.4 beschriebene Nachregelung soll den 50 Hz Signal des Verbraucherstromnetzes und seine Nebensignale (Bild c) in Abbildung 5.6) vollständig beseitigen können und dabei den Ableitstrom der TMP kompensieren. Besonders zu beachten ist, dass die Primärschirmwicklung der Trenntransformatoren zusammen mit den anderen elektrischen Hilfsgeräten am gleichen Grundpotenzial geerdet werden muss. Nur bei dieser Erdungskonfiguration fließen kleinstmögliche Ableitströme.

6. Zusammenfassung

Wenn auch mehr als 80 Jahre nach der Postulierung des Neutrinoteilchens von Wolfgang Pauli vergangen sind, befindet sich heutzutage die Erforschung dieses schwer nachweisbaren Elementarteilchens im vollen Gange. Nicht nur die Frage nach der Massenverteilung, sondern auch die Frage nach der Anzahl der Neutrinogenerationen bleibt bis zum heutigen Tag offen. Die genaue Massenbestimmung der Neutrinos beziehungsweise ihre weitere Eingrenzung könnten bei der Beantwortung vieler Fragen der Physik helfen.

Das KATRIN-Experiment soll einen wesentlichen Beitrag zur Neutrinoforschung leisten, indem es die Messe des Elektron-Antineutrino mit bisher unerreichter Präzision bestimmen soll. Dabei wird die Sensitivität gegenüber den bisherigen Experimenten zur modellunabhängigen Massenbestimmung aus der Kinematik des β -Zerfalls um Faktor 10 gesteigert. Eine Neutrinomasse von zum Beispiel 270 meV wird vom KATRIN-Experiment mit einer Signifikanz von 3σ bestimmt.

Das Eindringen in den sub-eV-Bereich stellt hohe Anforderungen an die Stabilität vieler Parameter des gesamten Experimentenaufbaus. Dabei spielt die Stabilität des Hochspannungssystems am Hauptspektrometer eine bedeutende Rolle, denn die Schwankung des Retardierungspotenzials beeinflusst die Transmission der Elektronen. Die Maßnahmen, die zur Kontrolle des Retardierungspotenzial am Hauptspektrometer ergriffen werden, beinhalten die Überwachung der Hochspannung mit den Präzisions-Hochspannungsteilern, den Präzisions-Multimetern und dem Monitorspektrometer. Um die Einhaltung der geforderten Stabilität im ppm-Bereich zu gewährleisten, müssen verwendete Präzisions-Messgeräte regelmäßiger Kalibration unterzogen werden. Damit fallen die drei genannten Komponente in den Bereich des KATRIN-HV-Kalibrationskonzepts.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Messungen durchgeführt, die belegen, dass die Hochspannung mit hinreichender Präzision stabil gehalten werden kann. Dazu wurde das Prinzip der Energiekalibration mit dem Monitorspektrometer verwendet. Hierbei werden Linienpositionen der monoenergetischen Kalibrationsquellen vermessen, deren Energiespektren genau bekannt sind. Damit werden mögliche Abweichungen der Hochspannung vom wahren Wert in der veränderten Linienposition sichtbar. Es konnte gezeigt werden, dass die Abweichungen einzelner Linienposition der ⁸³Rb/^{83m}Kr-Festkörperquelle vom Mittelwert nicht mehr als 1,5 ppm beträgt (1 σ -Umgebung des Mittelwertes). Das gilt sowohl für Elektronenenergie von 17,8 keV, die nur 0,8 keV unterhalb der Energie des Tritiumendpunktes liegt, als auch für Elektronenenergie von 30,5 keV. Damit werden KATRIN-Anforderungen, die eine maximale Schwankung der Hochspannung von 3 ppm

zulassen, erfüllt. Bei dieser Betrachtung wurde der zur Messung der Hochspannung am Monitorspektrometer verwendete Multimeter regelmäßiger Kalibration unterzogen.

Der Einfluss der Hochspannungsverteileranlagen auf die Hochspannungsstabilität, sowie die Abhängigkeit der Überwachungspräzision vom Standort des K35-Spannungsteilers, konnten ebenfalls untersucht werden. Die Hochspannungsverteileranlagen ermöglichen die automatische Verteilung der Hochspannung zu den einzelnen Gliedern der Kalibrationskette. Es wurden keine signifikanten Veränderungen in der Präzisionsmessung der Hochspannung bei der Betrachtung der Linienpositionen am Monitorspektrometer festgestellt. Damit steht der Einbindung der Hochspannungsverteileranlagen in die Verteilungs- und Kalibrationskette nichts im Wege.

Außerdem wurde untersucht, welchen Einfluss die von der Turbomolekularpumpe stammenden Störungen auf das KATRIN-HV-System haben können. Dabei wurde festgestellt, dass beim Betrieb der Turbopumpen lediglich das 50 Hz-Brummen des Verbrauchernetzes in das HV-System eingekoppelt werden kann. Diese Hochfrequente Störung kann von der Hochspannungsnachregelung reduziert werden. Außerdem kann von der Nachregelung der Ableitstrom der Turbopumpe kompensiert werden. Hierbei muss beachtet werden, dass die Größe des Ableitstroms der Turbomolekularpumpe davon abhängig ist, wie der Trenntransformator, der das Hauptspektrometer-Turbopumpe-System galvanisch vom Verbrauchernetz trennt, geerdet wird. Für das KATRIN-Experimnet wird empfohlen, den Trenntransformator zusammen mit anderen elektrischen Hilfsgeräten (vor allem Hochspannungsversorgungsnetzteile) am selben Grundpotenzial zu erden, da man so die kleinsten Ableitströme erhält.

Zusammen mit der Kalibration der Präzisions-Hochspannungsteiler wird die Hochspannung mit ausreichender Präzision gemessen. Die Überwachung am Monitorspektrometer zeigt, dass die Hochspannung äußerst stabil gehalten werden kann. Jedoch muss die Stabilität der Hochspannung am Hauptspektrometer unter realen Bedienungen untersucht und mögliche Störfaktoren gefunden und beseitigt werden.

Anhang

A. Kalibrationsdaten der Fluke 8505A Multimeter

Datum	U_0 (V)	$\sigma_0 (V)$	U_{10}^{meas} (V)	σ_{10}^{meas} (V)	Verstärkung V
24.05.2012	-4,93E-06	8,00E-07	-10,00013430	1,46E-06	1,0000015
31.05.2012	-7,33E-06	$7,\!29E-07$	-10,00012620	$1,\!29E-06$	1,0000025
05.06.2012	-5,17E-06	9,92E-07	-10,00013640	$1,\!42E-06$	1,0000013
13.06.2012	-4,46E-06	$8,\!63E-07$	-10,00013685	1,33E-06	1,0000012
18.06.2012	-4,37E-06	$7,\!80\text{E-}07$	-10,00013744	1,26E-06	1,0000011
22.06.2012	-5,33E-06	1,06E-06	-10,00013618	1,14E-06	1,0000013
28.06.2012	-5,10E-06	9,00E-07	-10,00013610	1,40E-06	1,0000013
03.07.2012	-4,71E-06	9,72E-07	-10,00013722	$1,\!34E-\!06$	1,0000011
06.07.2012	-3,85E-06	$8,\!80E-07$	-10,00013608	1,46E-06	1,0000012
10.07.2012	-5,03E-06	$9,\!32E-07$	-10,00013754	1,31E-06	1,0000011
17.07.2012	-4,33E-06	7,55E-07	-10,00013984	1,28E-06	1,0000008
20.07.2012	-3,90E-06	$9,\!22E-07$	-10,00013903	1,04E-06	1,0000009
25.07.2012	-5,07E-06	$8,\!84\text{E-}07$	-10,00013521	1,58E-06	1,0000014
27.07.2012	-5,80E-06	$1,\!12E-06$	-10,00013549	3,75E-06	1,0000014
08.08.2012	-8,67E-07	9,57E-07	-9,99985320	1,94E-06	0,9999998
13.08.2012	-1,34E-06	8,93E-07	-9,99985346	2,22E-06	0,9999998
17.08.2012	-1,65E-06	$9,\!63E-07$	-9,99985018	2,16E-06	1,0000001
21.08.2012	-1,36E-06	1,00E-06	-9,99985156	2,09E-06	1,0000000
24.08.2012	-1,21E-06	1,05E-06	-9,99984900	2,08E-06	1,0000002
05.09.2012	-1,61E-06	9,30E-07	-9,99984844	2,00E-06	1,0000003
14.09.2012	-1,63E-06	$1,\!29E-06$	-9,99984713	$2,\!19E-06$	1,0000005
25.09.2012	-1,07E-06	$9,\!15E-07$	-9,99984653	2,21E-06	1,0000005
05.10.2012	-1,06E-06	$1,\!30E-06$	-9,99984773	2,14E-06	1,0000003
16.10.2012	-1,43E-06	$9,\!94E-07$	-9,99984566	2,73E-06	1,0000006
24.10.2012	-1,39E-06	$8,\!30E-07$	-9,99984556	2,05E-06	1,0000006
06.11.2012	-2,33E-06	4,71E-07	-9,99984551	2,07E-06	1,0000007
14.11.2012	-1,16E-06	$1,\!17E-06$	-9,99984319	$2,\!17E-06$	1,0000008
23.11.2012	-1,22E-06	$1,\!10E-06$	-9,99984328	1,96E-06	1,0000008
11.12.2012	-1,03E-06	$9,\!10E-07$	-9,99984271	2,06E-06	1,0000008
18.12.2012	-2.48E-07	1.02E-06	-9.99984358	2.11E-06	1.0000007

Tabelle A.1.: Kalibrationsdaten des Fluke-A Multimeters

Datum	U_0 (V)	$\sigma_0 (V)$	U_{10}^{meas} (V)	σ_{10}^{meas} (V)	Verstärkung V
24.05.2012	-1,14E-07	5,95E-07	-10,00025100	2,40E-06	0,9999893
06.07.2012	$1,\!69E-06$	$4,\!97E-07$	-10,00025500	1,57E-06	$0,\!9999887$
20.07.2012	7,50E-07	$5,\!86E-07$	-10,00025476	2,72E-06	0,9999888
27.07.2012	-4,29E-07	$4,\!95E-07$	-10,00025680	2,79E-06	0,9999888
13.08.2012	$1,\!61E-06$	$5,\!15E-07$	-10,00025511	2,22E-06	$0,\!9999887$
17.08.2012	1,33E-06	$6,\!24\text{E-}07$	-10,00025635	$2,\!47\text{E-}06$	0,9999886
21.08.2012	8,86E-07	$5,\!22E-07$	-10,00025411	$2,\!49E-06$	0,9999889
05.09.2012	1,36E-06	$5,\!08E-07$	-10,00025553	$3,\!17E-06$	$0,\!9999887$
14.09.2012	1,74E-06	$6,\!25E-07$	-10,00025597	$3,\!19E-06$	0,9999886
25.09.2012	$8,\!29E-07$	$5,\!06E-07$	-10,00025581	2,94E-06	$0,\!9999887$
05.10.2012	1,27E-06	$6,\!08E-07$	-10,00025584	4,00E-06	$0,\!9999887$
24.10.2012	$8,\!87E-07$	$5,\!45E-07$	-10,00025920	2,86E-06	0,9999884
14.11.2012	$8,\!29E-07$	$5,\!06E-07$	-10,00025840	$3,\!11E-06$	$0,\!9999885$

Tabelle A.2.: Kalibrationsdaten des Fluke-B Multimeters

B. Schaltpläne



Abbildung B.1.: Vollständiger Schaltplan des K35-Präzisions-Hochspannungsteilers. Zu sehen sind alle elektrischen Bauteile der Primär-, Sekundär-, und Tertiär-Teilerketten, sowie fünf Kupferelektroden. In der untersten Ebene befinden sich zwei Präzisionsabgriffe und der Kontrollabgriff, der zur Überwachung der Spannung unabhängig vom Präzisionsteiler dient. Abbildung aus [TMW09].



Abbildung B.2.: Abgriffebene der Primär-Teilerkette des K65-Spannungsteilers. Zu sehen ist die Widerstandskonfiguration der Primär-Teilerkette in der Abrgiffebene, 165 zusammengefasste Präzisionswiderstände und die daraus resultierende Maßstabsfaktoren. Abbildung aus [Bau09].



Abbildung B.3.: Schema der Spannungsverteilung mittels Hochspannungsverteileranlagen. Abbildung aus [Kra12].



Abbildung B.4.: Schema der Kommunikation der Hochspannungskomponente mit dem Steuerungsprogramm.

Literaturverzeichnis

- [A⁺04] J. Angrik *et al.: KATRIN design report 2004.* Technischer Bericht, Forschungszentrum Karlsruhe, 2004. FZKA-7090.
- [Bau09] Stephan Bauer: Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisionsspannungsteilers bis 65 kV für das KATRIN-Experiment. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009.
- [Dre11] Guido Drexlin: Astroteilchenphysik-II-Vorlesung. 14.04.2011. Vorlesung Nr. 16.
- [Erh12] Moritz Erhardt: Untersuchung der Langzeitstabilität des nuklearen Standards für die Energieskala des KATRIN-Experiments. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2012.
- [Flu02] Fluke Corporation: 8508A Reference Multimeter, Extended Specifications, 2002. http://www.fluke.com/.
- [Fra10] Florian M. Fraenkle: *Background Investigations of the KATRIN Pre-*Spectrometer. Dissertation, Karlsruhe Institute of Technology, 2010.
- [Gou10] Johannes David Goullon: Installation and commissioning of the monitor spectrometer of KATRIN. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2010.
- [Gro10] Robin Groeßle: Konzeptionierung und Systematik der Hochspannungsversorgung für das KATRIN Experiment. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2010.
- [Har12] Fabian Harms: Assembly and First Results of the KATRIN Focal-Plane Detector System at KIT. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2012.
- [Hoc08] Frank Hochschulz: Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungs-Messung für das KATRIN-Experiment. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2008.
- [ISE09] ISEG: Operator's Manual, High Precision Voltage Power Supply EHS 8205 505p-K-SHV, 2009. ISEG Spezialelektronik GmbH.
- [Kra12] Marcel Kraus: Kalibration und Entwicklung von Komponenten für das KATRIN-Präzisions-Hochspannungs-System. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2012.
- [Mar01] Rainer Marx: New concept of PTB's standard divider for direct voltages of up to 100 kV. IEEE Trans. Instrum. Meas., 50:426–430, 2001.
- [P⁺92] A. Picard et al.: A solenoid retarding spectrometer with high resolution and transmission for keV elektrons. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 63:345–358, 1992.
- [Pau30] Wolfgang Pauli: Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen. 1930.

- [Pra11] Mathias Prall: Background Reduction of the KATRIN Spectrometers: Transmission Function of the Pre-Spectrometer and Systematic Test of the Main-Spectrometer Wire Electrode. Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011.
- [Rie11] Sebastian Riegel: Die Erwärmung von Turbomolekularpumpen in verschiedenen Betriebszuständen. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2011.
- [Ros11] Stephan Rosendahl: *Präzisionshochspannung für das KATRIN-Experiment*. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011.
- [Sch11a] B. Schumacher: Kalibrierschein der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin. PTB Braunschweig, 26.10.2011. Kalibrierzeichen: 20370 PTB 11.
- [Sch11b] B. Schumacher: Pr
 üfschein der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig und Berlin. PTB Braunschweig, 26.10.2011. Pr
 üfscheinnummer: 20371 PTB 11.
- [Sch11c] Michael Schupp: Inbetriebnahme des Monitorspektrometers und erste Messungen. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2011.
- [Thu07] Thomas Thuemmler: *Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment.* Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2007.
- [TMW09] Th. Thuemmler, R. Marx und Ch. Weinheimer: Precision high voltage divider for the KATRIN experiment. New J.Phys.11:103007, 2009. arXiv:0908.1523v1.
- [Wie12] Vanessa Wiedmann: Systematische Untersuchungen zur Hochspannungsstabilisierung am KATRIN-Monitorspektrometer. Diplomarbeit, Karlsruhe Institute of Technology, 2012.
- [Wik13] Wikipedia: *Standardmodell*, 20.02.2013. http://de.wikipedia.org/wiki/ Standardmodell.
- [Zac09] Michael Zacher: Electromagnetic design and field emission studies for the inner electrode system of the KATRIN main spectrometer. Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2009.
- [Zbo11] Miroslav Zbořil: Solid electron sources for the energy scale monitoring in the KATRIN experiment. Dissertation, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 2011.

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	4
2.2.	Neutrinofluss unterschiedlicher Quellen	5
2.3.	Energiespektrum der Elektronen beim Tritium- β -Zerfall	5
2.4.	Aufbau des KATRIN-Experiments	6
2.5.	Das MAC-E-Filter-Prinzip	7
2.6.	Quellbereich und Transportstrecke des KATRIN-Experiments	8
2.7.	DPS2-F- und CPS-Module	9
2.8.	Schnittmodell des Hauptspektrometers	10
2.9.	Segmentierung der Detektoroberfläche	11
2.10.	Das Monitorspektrometer	12
3.1.	Grundlegendes Hochspannungslayout	16
3.2.	Spannungs-Verteilerschrank für die Drahtelektroden	17
3.3.	Einbindung der Hochspannungsverteiler in das HV-System	19
3.4.	HV-Verteiler des Monitorspektometers	20
3.5.	Einfacher Spannungsteiler	21
3.6.	Ersatzschaltbilder der KATRIN-Hochspannungsteiler	23
3.7.	Präzisions-Spannungsteiler K35 und K65 ohne Gehäuse	24
3.8.	Präzisions-Spannungsteiler K35 und K65 fertig aufgebaut	25
3.9.	Direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren der Hochspannungsteiler	27
4.1.	Kalibration von Fluke-A bis Ende Juli 2012	33
4.2.	Kalibration von Fluke-A ab August 2012	33
4.3.	Zerfallsschema von 83 Rb/ 83m Kr-Festkörperquelle	35
4.4.	Messung der K-32-Linienposition	37
4.5.	K-32-Linienpositionen: getrennt	39
4.6.	K-32-Linienpositionen: zusammen	39
4.7.	L_3 -32-Linienpositionen: getrennt	40
4.8.	L_3 -32-Linienpositionen: zusammen	40
5.1.	Schema des TMP-Teststandes	45
5.2.	Photo des gesamten TMP-Versuchsaufbaus	45
5.3.	Turbomolekularpumpe MAG W 2800 mit Kontrolleinheit	47
5.4.	Messabgriff des TMP-Teststandes	47
5.5.	Frequenzspektrum mit Glättkondensator	49
5.6.	Frequenzspektrum beim Abbremsen der TMP	50
5.7.	Glättung des Frequenzspektrums	51
B.1.	Vollständiger Schaltplan des K35-Spannungsteilers	59
B.2.	Abgriffebene der Primär-Teilerkette des K65-Spannungsteilers	60
B.3.	Schema der Spannungsverteilung mittels HV-Verteiler	61
B.4.	Schema der HV-Kommunikation	62
Danksagung

Ich möchte mich noch bei folgenden Menschen für ihre Hilfe bei der Entstehung dieser Arbeit bedanken:

Prof. Dr. Guido Drexlin für die Bereitstellung des interessanten Themas der Diplomarbeit und für die Möglichkeit das große Forschungsprojekt hautnah zu erleben,

Prof. Dr. Thomas Müller für die Übernahme der Zweitkorrektur,

Dr. Thomas Thümmler für die sehr gute Betreuung und das Korrekturlesen dieser Arbeit,

meinem Büronachbar Marcel Kraus für die konstruktive Zusammenarbeit und für die intensive Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit,

das Monitorspektrometerteam für die Bereitstellung der Messdaten und für die Beantwortung der offenen Fragen bezüglich des Messablaufs,

Martin Slezák für die Hilfe beim Kennenlernen des Fitprogramms,

Stephan Bauer für seine Hilfestellung bei Fragen bezüglich der Hochspannungsteiler,

das Diplomanden- und Doktorandenteam des IEKP und des TLK für nette Arbeitsatmosphäre und interessante Seminarvorträge.

Außerdem möchte ich mich bei meinen lieben Eltern bedanken. Ohne ihre Unterstützung wäre das Studium kaum möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt meinem Bruder, der mich während meines gesamten Studiums motiviert hat.