

Inbetriebnahme der Präzisionshochspannung am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments

Masterarbeit
zur Erlangung des Grades Master of Science
im Fachbereich Physik
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von
Oliver Rest

–2014–



Dekan: Prof. Dr. M. Donath

Erster Gutachter: Prof. Dr. C. Weinheimer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. A. Khoukaz

Datum: 03.04.2014

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung	7
1.1 Motivation	8
1.2 Beginn der Neutrinoskopie	9
1.3 Der experimentelle Neutrino-Nachweis	9
1.4 Neutrinoquellen	10
1.5 Neutrinooszillation	11
1.6 Bestimmung der Neutrinomasse	14
1.7 Gliederung der Arbeit	18
2 Das KATRIN-Experiment	19
2.1 Übersicht	20
2.2 Quell- und Transportsektion	21
2.3 Spektrometer	23
2.3.1 MAC-E-Filter	24
2.3.2 Vor- und Hauptspektrometer	25
2.3.3 Monitorspektrometer	27
2.4 Detektor	28
2.5 Statistische und systematische Unsicherheiten	29
3 Das Hochspannungssystem des Hauptspektrometers	31
3.1 Überblick	32
3.2 Das Drahtelektrodensystem	34
3.3 Der HV-Schalschrank	36
3.4 Hochspannungsversorgung der Photoelektronenquelle	38
3.5 Erste Hochspannungsmessungen am Hauptspektrometer	40
4 Kapazitätsmessung des Drahtelektrodensystems	45
4.1 Motivation	46
4.2 Manuelle Kapazitätsmessung	47
4.3 Automatische Kapazitätsmessung	53
4.3.1 Theoretische Beschreibung	53
4.3.2 Technische Realisierung	57

4.3.3	Kontrollsoftware	61
4.3.4	Kalibrierung des Systems	62
4.3.5	Erste Testmessungen am Hauptspektrometer	69
5	Kalibrierung der Komponenten des Präzisionshochspannungssystems	75
5.1	Motivation	76
5.2	Konzept und Aufbau der HV-Teiler K35 und K65	76
5.3	Kalibrierung der Präzisionsmultimeter	79
5.4	Kalibrierung der 10 V-Referenzquellen	81
5.5	Kalibrierung der Spannungsteiler	83
5.5.1	Niederspannungskalibrierung	84
5.5.2	Hochspannungskalibrierung an der PTB	92
5.6	Diagnose und Reparatur des K65	94
5.7	Kalibrierung des Präzisions-Hochspannungsnetzgeräts	99
6	Zusammenfassung und Ausblick	103

KAPITEL 1

EINLEITUNG

1.1 Motivation

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt die heute bekannten Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander. Insgesamt gibt es 25 Teilchen¹, die in verschiedene Gruppen eingeteilt werden:

Die Bosonen besitzen einen ganzzahligen Spin und sind als Austauschteilchen für die Wechselwirkung zwischen Materienteilchen verantwortlich. Neben dem Photon, welches das Austauschteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung darstellt, gibt es außerdem die W^+/W^- - und das Z-Boson für die schwache, sowie acht Gluonen für die starke Wechselwirkung. Am 4. Juli 2012 wurde von der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN die Entdeckung eines weiteren Bosons bekannt gegeben, das in Einklang mit den theoretischen Anforderungen an das Higgs-Boson steht, welches für die Masse der Elementarteilchen verantwortlich ist [Cer12].

Die Fermionen, aus denen die gesamte sichtbare Materie des Universums aufgebaut ist, werden als Spin-1/2-Teilchen in Quarks und Leptonen unterteilt. Sie kommen in jeweils drei Generationen als Dublett vor. Die sechs Quarks sind die elementaren Bestandteile der Hadronen, welche als Mesonen (Quark-Antiquark Paare) oder Baryonen, zusammengesetzt aus drei Quarks, auftreten. Die bekanntesten Hadronen sind das Proton und das Neutron, aus denen die Atome aufgebaut sind. Die Leptonen unterteilen sich in Elektron, Myon und Tau und die entsprechenden Neutrinos. Letztere werden im Standardmodell als masselos angesehen.

Seit durch Neutrinooszillationsexperimente nachgewiesen wurde, dass Neutrinos eine Masse besitzen, haben verschiedene Experimente versucht, diese zu bestimmen. Bis Heute konnten jedoch lediglich Obergrenzen für die Neutrinomasse bestimmt werden. Die Kenntnis der Masse der Neutrinos ist unter anderem für die Kosmologie von Bedeutung, um den Anteil der Neutrinos an heißer dunkler Materie zu bestimmen. Mit dem KATRIN-Experiment, welches in den nächsten Jahren in Betrieb genommen wird, soll die Masse des Elektron-Antineutrinos aus dem β -Zerfallsspektrum von Tritium bestimmt werden.

Da es sich bei KATRIN um ein Hochpräzisionsexperiment handelt, ist die genaue Kenntnis der statistischen und systematischen Unsicherheiten essenziell. Einen wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit liefert das am Hauptspektrometer anliegende Analysepotential, mit dem das Zerfallsspektrum aufgezeichnet werden soll. Dieses muss bei einer absoluten Spannung von etwa -18,6 kV mit einer Präzision im ppm²-Bereich überwacht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Inbetriebnahme und erste Testmessungen des Hochspannungssystems beschrieben. Insbesondere wird dabei ein System zur Überwachung der Integrität des Drahtelektrodensystems vorgestellt, sowie Kalibrationsmessungen der beiden für das Experiment entwickelten Präzisions-Hochspannungsteiler. Zu Beginn werden zunächst theoretische Grundlagen zur Neutrino-Physik erläutert, bevor das KATRIN-Experiment näher beschrieben wird. Schließlich folgt eine genauere Beschreibung des Hochspannungssystems am Hauptspektrometer, sowie der im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Messungen.

¹die entsprechenden Anti-Teilchen wurden nicht eingerechnet

²parts per million, 10^{-6}

1.2 Beginn der NeutrinoPhysik

Neutrinos sind die am häufigsten auftretenden bekannten massereichen Elementarteilchen im Universum. Es handelt sich um drei³ elektrisch neutrale Fermionen (Elektronneutrino ν_e , Myonneutrino ν_μ und Tauneutrino ν_τ), die zusammen mit dem Elektron e^- , Myon μ^- und Tau τ^- als schwaches Isospin-Dublett im Standardmodell beschrieben sind. Die Neutrinos unterliegen der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation.

Erste Hinweise auf ihre Existenz kamen in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts durch Chadwick auf [Cha14], welcher das Energiespektrum des β -Zerfalls untersuchte. Beim β -Zerfall wird ein Neutron unter der Aussendung eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos in ein Proton umgewandelt:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e. \quad (1.1)$$

Das Neutrino konnte aufgrund geringer Wechselwirkung in den Zerfallsexperimenten nicht detektiert werden, sodass man keine Kenntnis von seiner Existenz hatte und von einem Zweikörperzerfall ausging. Entsprechend erwartete Chadwick ein diskretes Energiespektrum wie beim α -Zerfall, bei dem es sich um einen Zweikörperzerfall handelt. Beobachtet wurde hingegen ein kontinuierliches Energiespektrum, welches die Annahme von Energie- und Impulserhaltung lange Zeit infrage stellte.

In seinem bekannten Brief vom 4. Dezember 1930 postulierte Pauli zur Lösung dieses Problems ein elektrisch neutrales Spin-1/2-Teilchen, welches er Neutron nannte. Dieses neue Elementarteilchen sollte gleichzeitig mit dem Elektron vom Kern emittiert werden und einen Teil der Energie tragen. Außerdem würde das Teilchen die Detektoren unbeobachtet durchdringen und somit schwer nachzuweisen sein. Nachdem Chadwick etwa in der gleichen Zeit außerdem das elektrisch neutrale Nukleon - das heute bekannte Neutron - entdeckte, wurde das von Pauli postulierte Teilchen auf den Vorschlag Enrico Fermis, welcher eine umfassende Theorie des β -Zerfalls aufstellte, Neutrino genannt.

1.3 Der experimentelle NeutrinoNachweis

Der experimentelle Nachweis des Neutrinos gelang Cowan und Reines et al. 23 Jahre nach der Postulierung im Jahr 1956 [Rei59]. Um eine ausreichend starke Neutrinoquelle zu garantieren, wurde das Experiment in der unmittelbaren Umgebung eines Kernreaktors durchgeführt. Die Grundidee des Experiments ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Zum Nachweis der Neutrinos wurde ein Tank, gefüllt mit in Wasser gelöstem Cadmium-Chlorid, verwendet. Die beobachtbare Wechselwirkung der Neutrinos findet mit den Protonen im Wassertank durch den inversen β -Zerfall statt:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+. \quad (1.2)$$

³Es existieren theoretische Modelle über die Existenz steriler Neutrinos, welche lediglich der gravitativen Wechselwirkung unterliegen und somit bei schwachen Reaktionen nicht beobachtet werden können. Über Neutrinooszillationen könnten sie erzeugt bzw. vernichtet werden. Je nach ihrer Masse könnten diese Teilchen zusätzlich zu den drei bekannten Neutrinoarten einen signifikanten Anteil an der dunklen Materie tragen.

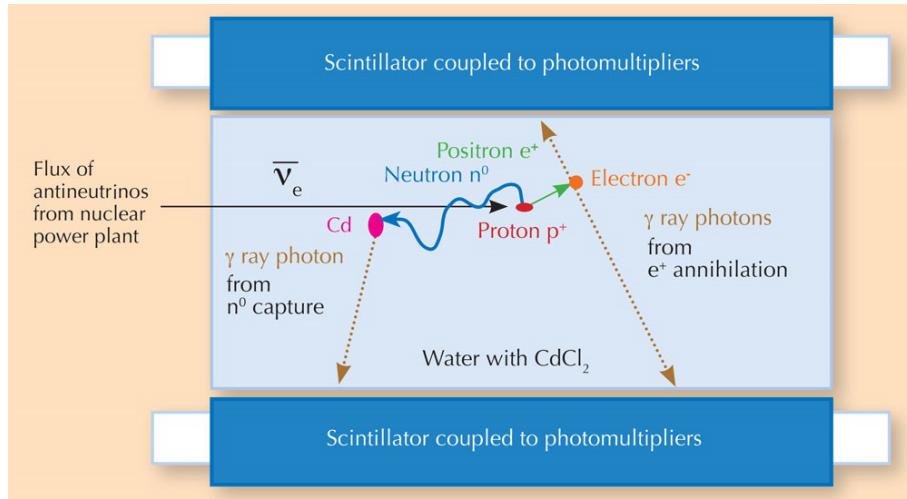


Abbildung 1.1: **Prinzip des Cowan-Reines-Experiments:** Ein Elektron-Antineutrino aus einem Kernreaktor tritt mit einem Proton innerhalb des Wassertanks, welcher mit einer Cadmium-Chlorid-Lösung gefüllt ist, in Wechselwirkung. Durch den Prozess des inversen β -Zerfalls entstehen ein Positron und ein Neutron. Das Positron annihielt mit einem Elektron unter der Emission zweier Photonen. Das Neutron wird vom Cadmium eingefangen, wodurch ebenfalls ein Photon emittiert wird. Die Photonen werden mit einem System aus Szintillatoren und Photomultipliern detektiert [Sis11].

Die erzeugten Positronen e^+ annihieltern mit den Elektronen in ihrer Umgebung unter der Aussendung zweier Photonen γ mit einer Energie von je 511 keV. Diese werden mit Hilfe von Szintillatoren und Photomultipliern nachgewiesen. Die bei der Reaktion entstehenden Neutronen werden durch das Wasser moderiert und zu thermischen Energien abgebremst. Die Neutronen werden vom Cadmium durch die folgende Reaktion absorbiert:



Das durch die Absorption des Neutrons angeregte Cadmium kehrt unter der Emission eines Photons in den Grundzustand zurück. Dieses Photon wird ebenfalls nachgewiesen, wobei die Detektion aufgrund der Dauer des Moderationsvorgangs zeitlich etwas verzögert ist. Für den experimentellen Nachweis des Neutrinos wurde Frederick Reines 1995 der Nobelpreis für Physik verliehen [Rei95]. Clyde Cowan verstarb 1974 und wurde deshalb nicht ausgezeichnet.

1.4 Neutrinoquellen

Cowan und Reines verwendeten zum Nachweis des Neutrinos eine **künstliche Quelle**: einen Kernreaktor. Diese stellen den größten Teil der von Menschen erzeugten Neutrinoquellen dar. Da bei den Spaltprozessen in Kernreaktoren Tochterkerne mit Neutronenüberschuss erzeugt werden, werden aufgrund des β^- -Zerfalls dieser Isotope Elektron-Antineutrinos

emittiert. Durch die heutige Detektortechnologie können nur hochenergetische Neutrinos mit einer Energie im MeV-Bereich nachgewiesen werden. Der Großteil der Reaktorneutrinos liegt unterhalb der Nachweisschwelle.

Eine zweite künstliche Neutrinoquelle stellen Beschleunigerexperimente dar. Der Vorteil dieser Quelle ist die Möglichkeit, einen gerichteten Strahl der erzeugten Neutrinos zu erzeugen. Dies wird durch die Art der Erzeugung ermöglicht: indem hochenergetische Protonen auf ein fixiertes Target geleitet werden, gelingt die Erzeugung geladener Pionen und Kaonen⁴. Diese lassen sich durch magnetische Felder ablenken. Die Neutrinos, welche beim Zerfall der instabilen Hadronen entstehen, werden aufgrund der relativistischen Geschwindigkeit vorzugsweise in Form eines gerichteten Strahls emittiert.

Einen weitaus größeren Anteil an der Neutrinoerzeugung haben **natürliche Quellen**. An dieser Stelle sind zunächst die durch den Urknall erzeugten Neutrinos zu nennen. Diese bilden den kosmischen Neutrinhintergrund, welcher aufgrund der niedrigen Energie der Neutrinos bisher nicht nachgewiesen werden konnte, sondern lediglich aufgrund indirekter Hinweise vorausgesagt wird.

Auf der Erde durch den β -Zerfall radioaktiver Nuklide, zum Beispiel ^{238}U , erzeugte Neutrinos werden Geoneutrinos genannt. Die hochenergetischen Neutrinos aus den Zerfällen können durch Neutrindetektoren nachgewiesen werden.

Eine weitere signifikante natürliche Neutrinoquelle stellen Sterne bzw. die Sonne dar. Durch die in der Sonne stattfindenden Kernfusionsprozesse wird eine große Anzahl an Elektronneutrinos freigesetzt. Der wichtigste Prozess für Sterne mit einer Masse in der Größenordnung unserer Sonne ist dabei der pp-Zyklus, bei dem es sich um eine Kette von Fusionsprozessschritten handelt, wobei ausschließlich Elektronneutrinos emittiert werden (für ausführliche Details sei hier auf [Gru05] verwiesen). Die einzigen Neutrinos, die ausreichend viel Energie besitzen um auf der Erde nachgewiesen werden zu können, stammen dabei aus der Reaktion



Eine weitere wichtige Neutrinoquelle stellen Supernova-Explosionen dar, welche hier nicht näher ausgeführt werden sollen. Außerdem gibt es atmosphärische Neutrinos, die durch Kollisionen von kosmischer Strahlung mit Gasatomen in der Erdatmosphäre entstehen. Wenn hochenergetische Protonen mit Energien im Bereich bis zu 10^{20} eV auf die Atmosphäre treffen, kommt es zur Ausbildung von Teilchenschauern, die neben einer geladenen Komponente, wie beispielsweise Myonen, auch eine ungeladene Komponente, die Neutrinos, besitzen.

1.5 Neutrinooszillation

Nach ihrer Detektion galten Neutrinos lange Zeit als masselos. In den letzten Jahren wurde dagegen mehrfach und unabhängig voneinander experimentell durch die Beobachtung von

⁴Es handelt sich hierbei um Mesonen, die aus u, d und s- bzw. deren Antiquarks zusammengesetzt sind.

Neutrinooszillation erwiesen, dass Neutrinos eine Masse ungleich Null besitzen. Der Nachweis der Neutrinooszillation stellt bis heute die einzige Theorie im Bereich der Kern- und Teilchenphysik dar, die nicht im Standardmodell beschrieben ist. Bevor die experimentelle Bestätigung der Neutrinooszillation näher diskutiert wird soll zunächst das theoretische Konzept kurz erläutert werden. Neutrinooszillation erfordert zwei Annahmen:

1. Die Flavour-Eigenzustände $|\nu_\alpha\rangle (\alpha = e, \mu, \tau)$ sind nicht identisch mit den Masseneigenzuständen $|\nu_i\rangle (i = 1, 2, 3)$ der Neutrinos. Die jeweiligen Eigenzustände sind eine Superposition aller Massen- bzw. Flavour-Eigenzustände, verknüpft über eine unitäre 3x3-Matrix U:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

Die Matrix U wird als Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix (PMNS-Matrix) bezeichnet und beinhaltet drei Mischungswinkel und eine CP-verletzende Phase.

2. Die Masseneigenzustände unterscheiden sich in ihren Massen und mindestens ein Masseneigenzustand ist ungleich Null.

Ein Neutrino eines beliebigen Flavours kann somit beschrieben werden als

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U |\nu_i\rangle \quad (1.6)$$

bzw. in Massendarstellung

$$|\nu_i\rangle = \sum_i U^* |\nu_\alpha\rangle. \quad (1.7)$$

Für einen vereinfachten Fall mit nur zwei Neutrinoflavours lässt sich die Wahrscheinlichkeit P, dass ein Neutrino des Flavors α in den Zustand β übergeht, zu

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2(2\Theta) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4} \cdot \frac{L}{E}\right). \quad (1.8)$$

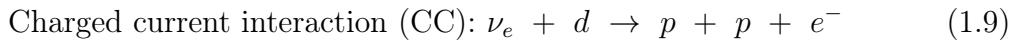
herleiten. Dabei ist L die Länge der zurückgelegten Strecke in km, E die Energie in GeV, Θ der Mischungswinkel und Δm in eV die Massendifferenz. Anhand von Gleichung 1.8 ist erkennbar, dass weder der Mischungswinkel, noch die Massendifferenz verschwinden dürfen, damit Neutrinooszillation möglich ist. Der Mischungswinkel bestimmt die Amplitude und die Massendifferenz die Phase bzw. Frequenz der Mischung. Da lediglich die Differenz der Neutrinosmassen bedeutend für die Neutrinooszillation ist, können keine Aussagen über die absoluten Massen getroffen werden.

Die größte Neutrinoquelle, welche für Messungen auf der Erde zur Verfügung steht, stellt die Sonne dar. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts gab es einige Experimente, die den Fluss solarer Neutrinos untersucht haben, um die Vorhersagen des Standard-Sonnen-Modells (SSM) zu überprüfen. Dabei wurde unter anderem von Davis et al. festgestellt, dass der beobachtete Neutrinofluss von der Sonne um etwa einen Faktor drei kleiner ist als man aus theoretischen Beschreibungen der Fusionsprozesse in der Sonne erwarten würde [Dav98]. Diese Tatsache wurde als "Solares Neutrinoproblem" bekannt und konnte erst 2001

durch das Sudbury Neutrino Observatorium (SNO) geklärt werden. Die SNO-Kollaboration konnte bestätigen, dass die Ursache für das Defizit in der Beobachtung der solaren Neutrinos Neutrinooszillationen sind [Ahm01].

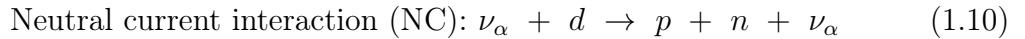
Das Experiment befindet sich zum Schutz vor kosmischer Strahlung in der Creighton Mine in Kanada mehr als 2000 m unterhalb der Erdoberfläche. Als Detektor fungiert ein mit 1000 Tonnen schwerem Wasser (D_2O) gefüllter Tank aus Acrylglas mit einem Durchmesser von 12 m. Um den Tank vor mechanischen Störungen zu schützen und zur Abschirmung radioaktiver und kosmischer Strahlung befindet sich der Tank vollständig in einem mit normalem Wasser gefüllten Becken. Durch diesen Aufbau beträgt die Rate, mit der durch kosmische Strahlung erzeugte Myonen in den Detektor eindringen, lediglich etwa 3 Myonen/Stunde [Aha13]. Der Nachweis der Neutrinos erfolgt mit Hilfe von 9456 installierten Photomultipliern, mit denen einer der folgenden Prozesse registriert wird:

1.



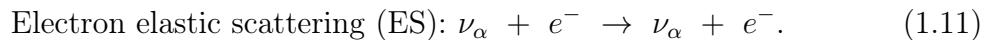
Wenn ein Elektronneutrino vom Neutron eines Deuterons absorbiert wird, spricht man von einem geladenen Strom. Das Neutron wird in ein Proton umgewandelt und ein Elektron wird emittiert. Dieses Elektron trägt den größten Teil der Energie des ursprünglichen Neutrinos und kann durch die Emission von Cherenkov-Strahlung detektiert werden. Da die in der Sonne produzierten Neutrinos weniger Energie besitzen als die Ruhemasse von Myonen oder Tauonen, kann die Reaktion nur mit Elektronneutrinos ablaufen und dieser Reaktionstyp ist somit nur auf diese Neutrinos sensitiv.

2.



Ein Neutrino kann durch Streuprozesse ein Deuteron in seine Komponenten aufspalten. Nach der Wechselwirkung verlässt das Neutrino den Detektor und das frei gewordene Neutron kann über den Neutroneneinfang an ein Deuteron gebunden werden. Dabei wird ein Gammaquant mit einer Energie von 6,25 MeV emittiert, was als Nachweis dieser Reaktion dient. Dieser Prozess ist nicht abhängig vom Neutrinoflavour und somit für alle drei Neutrinos sensitiv.

3.



Im Fall der elastischen Streuung eines Neutrinos an einem Elektron wird dieses durch Cherenkov-Strahlung nachgewiesen. Dieser Prozess ist ebenfalls unabhängig von der Neutrinoart und somit für alle Neutrinos sensitiv.

Die Messungen von SNO ergaben, dass der über die NC-Reaktion gemessene Gesamtfluss mit den Vorhersagen des Standard-Sonnen-Modells übereinstimmt (siehe Abbildung 1.2). Mit Hilfe der CC-Messung konnte gezeigt werden, dass nur ein Teil der solaren Neutrinos - ungefähr ein Drittel - die Erde als Elektronneutrino erreicht. Den fehlenden Anteil machen Myon- und Tauneutrinos aus. Würden Neutrinos nicht oszillieren, wäre der Gesamtfluss nur durch die Elektronneutrinos bestimmt. Da der durch die NC-Reaktion bestimmte Gesamtfluss jedoch größer ist als der Elektronneutrinofluss konnte belegt werden, dass die ursprünglich als Elektronneutrinos erzeugten Teilchen zwischen den drei Flavour-Eigenzuständen oszillieren.

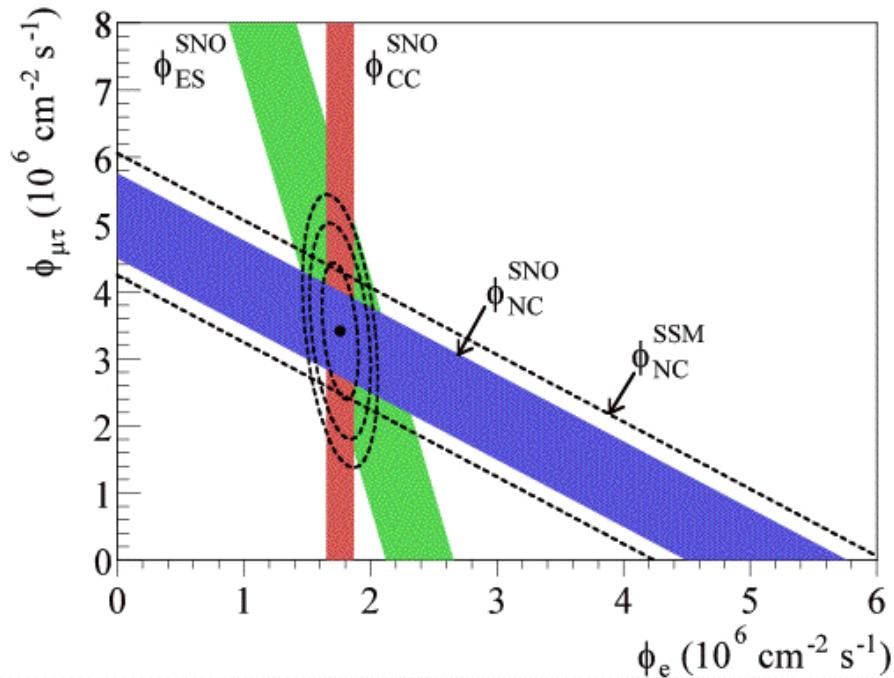


Abbildung 1.2: **Ergebnisse des SNO-Experiments.** Aufgetragen ist der Elektronneutrino-Fluss Φ_e gegen den Myon- und Tauneutrino-Fluss $\Phi_{\mu\tau}$. Die einzelnen Flüsse wurden bestimmt durch NC-, CC- und ES-Reaktionen. Der Gesamtfluss, der über die NC-Reaktion bestimmt wurde, stimmt mit den Vorhersagen aus dem Standard-Sonnen-Modell überein. Der Fluss der Elektronneutrinos trägt zu etwa einem Drittel zum Gesamtfluss bei [Aps05].

In den letzten Jahren wurden Neutrinooszillationen bei verschiedenen Experimenten sowohl bei solaren (SNO), wie auch bei atmosphärischen (Super-Kamiokande) und bei Reaktorneutrinos (KamLAND) nachgewiesen.

1.6 Bestimmung der Neutrinomasse

Die Experimente zum Nachweis der Neutrinooszillation liefern keine Informationen über die absolute Masse der Neutrinos, da lediglich Massendifferenzen bestimmt werden. In diesem Unterkapitel sollen daher wesentliche experimentelle Methoden zur Bestimmung der Neutrinomasse vorgestellt werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf die direkte Massenbestimmung aus kinematischen Untersuchungen des Tritium- β -Zerfalls gelegt, da diese Methode Grundlage des KATRIN-Experiments ist.

1. Kosmologische Beobachtungen

Durch die Analyse der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, der Strukturbildung des Universums und Supernova-Explosionen können Aussagen über die Summe

der Masse aller drei Neutrinoarten $\sum m(\nu_i)$ getroffen werden. Die dadurch bestimmte Obergrenze für die Neutrinomasse ist dabei modellabhängig. Je nach dem kosmologischen Parameter und der Analyseart gibt es in diesem Gebiet eine Vielzahl von vorhergesagten Obergrenzen für die Neutrinomasse. Die Mehrheit der Experimente geht von einer summierten Masse unter 1 eV für alle drei Neutrinogenerationen aus [Goo06].

2. Neutrinoloser Doppel- β -Zerfall

Für einige β -Strahler ist der einfache β -Zerfall energetisch nicht möglich. Stattdessen gehen diese Kerne durch den sogenannten Doppel- β -Zerfall ($2\nu\beta\beta$) in einen energetisch günstigeren Zustand größerer Bindungsenergie über. Dabei werden zwei Neutronen innerhalb des Kerns unter der Emission zweier Elektronen und zweier Elektron-Antineutrinos in Protonen umgewandelt. Dieser Vorgang wurde erstmals 1987 bei dem Isotop ^{82}Se experimentell beobachtet. Beim neutrinolosen Doppel- β -Zerfall ($0\nu\beta\beta$), der bisher nicht experimentell nachgewiesen werden konnte, annihilieren die beiden beim Zerfall erzeugten Neutrinos im Kern, sodass kein Neutrino emittiert wird:



Dies ist nur möglich, wenn das Neutrino sein eigenes Antiteilchen ist⁵. Der Prozess verletzt außerdem die Leptonenzahlerhaltung und ist im Standardmodell der Teilchenphysik verboten. Informationen über die Neutrinomasse sind durch die Bestimmung der Zerfallsrate $\Gamma_{0\nu\beta\beta}$ zugänglich [Dre13]:

$$\Gamma_{0\nu\beta\beta} \propto |\sum U^2 m(\nu_i^2)| := m_{ee}^2. \quad (1.13)$$

Dabei ist U die Neutrinomischungsmatrix und m_{ee} die Summe der Neutrinomassen $m(\nu_i)$, die koherent zum neutrinolosen doppelten β -Zerfall beitragen.

3. Kinematische Untersuchungen des β -Spektrums

Im Gegensatz zu den anderen beiden in diesem Kapitel vorgestellten Methoden ermöglicht die kinematische Untersuchung des Tritium- β -Spektrums eine direkte und modellunabhängige Bestimmung der Neutrinomasse. Zur Massenbestimmung wird in diesem Fall die relativistische Energie-Impuls-Relation $E = p^2 + m^2$ ausgenutzt. Dabei wird die Masse des Elektron-Antineutrinos bestimmt, die nach Gleichung 1.6 eine Superposition aller Masseneigenzustände darstellt:

$$m(\nu_e)^2 := \sum |U|^2 m(\nu_i)^2. \quad (1.14)$$

Prinzipiell kann das Spektrum eines beliebigen β -Strahlers zur Analyse verwendet werden. Der Zerfall von Tritium



bietet allerdings wesentliche Vorteile:

⁵Majorana-Neutrino im Gegensatz zur Theorie des Dirac-Neutrinos, bei der Teilchen und Antiteilchen nicht identisch sind

- eine niedrige Endpunktsenergie von $E_{end} = 18,6$ keV, sodass der Anteil an Zerfallselektronen im Endpunktbereich vergleichsweise groß ist
- eine kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren, sodass eine große Aktivität und somit Zerfallsrate gewährleistet ist
- beim Zerfall handelt es sich um einen übererlaubten Übergang, was bedeutet, dass das Kernmatrixelement M maximal und energieunabhängig ist.

Das Kernmatrixelement bestimmt nach Fermis goldener Regel zusammen mit der Phasenraumdichte $\varrho(E)$ die Übergangsrate eines Zerfalls im Zeitintervall dt und dem Energieintervall $[E; E + dE]$ zu

$$\frac{d^2 N}{dtdE} = \frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{2\pi}{\hbar} |M|^2 \varrho(E). \quad (1.16)$$

Nach [Alt03] ergibt sich für das β -Spektrum

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = R(E) \sqrt{(E_{end} - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \Theta(E_{end} - E - m_{\nu_e} c^2) \quad (1.17)$$

mit

$$R(E) = \frac{G_F^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cos^2(\Theta_C) |M|^2 F(Z + 1, E) p(E + m_e c^2) (E_{end} - E). \quad (1.18)$$

Dabei ist

G_F die Fermi-Kopplungskonstante,

Θ_C der Cabibbo-Winkel,

M das Kernmatrixelement,

F die Fermifunktion,

p der Impuls des Elektrons,

E die kinetische Energie des Elektron,

E_{end} die Endpunktenergie des Spektrums und

$m_{e,\nu_e} c^2$ die Ruheenergie des Elektrons bzw. des Elektron-Antineutrinos.

Dabei wurde zur Vereinfachung der Zerfall eines unendlich schweren Kernes angenommen. Bei der exakten Beschreibung müssen beispielsweise die Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen und mögliche angeregte Zustände des Atoms bzw. Moleküls berücksichtigt werden.

Die Neutrinomasse hat durch den Faktor

$$\sqrt{(E_{end} - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \quad (1.19)$$

direkten Einfluss auf die Form des Spektrum, wobei der Einfluss für Elektronen mit einer Energie im Endpunktbereich am größten ist. Da der genaue Endpunkt des Spektrums aufgrund des Untergrundrauschens nicht zu bestimmen ist, wird die Form des Spektrums im Endbereich analysiert (vgl. Abbildung 1.3).

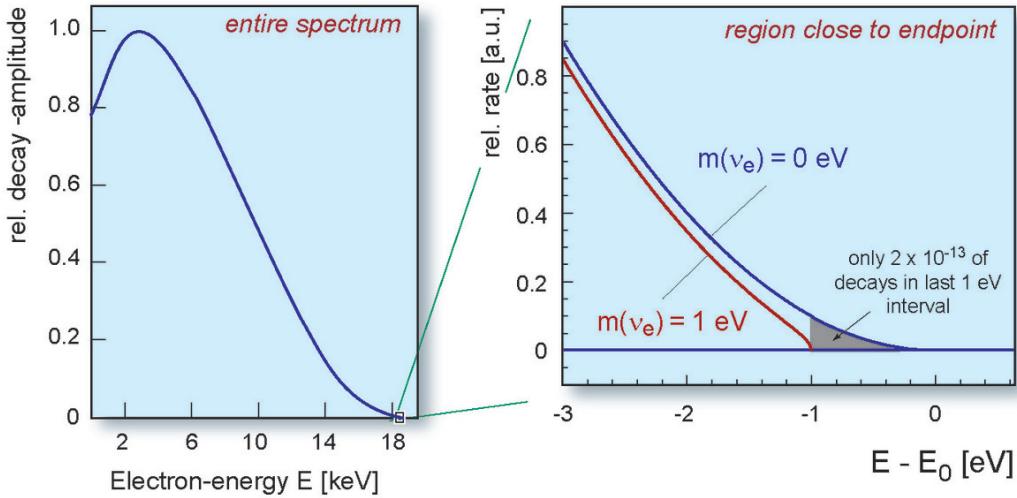


Abbildung 1.3: **Bestimmung der Neutrinomasse aus dem Tritium- β -Spektrum.** Im linken Teil der Abbildung ist der gesamte Teil des β -Spektrums abgebildet. Rechts ist ein vergrößerter Ausschnitt aus dem Endpunktbereich dargestellt. Die blaue Kurve stellt den Verlauf des Spektrums für eine verschwindende, die rote Kurve für eine Neutrinomasse von 1 eV dar. Durch die Analyse der Form des Spektrums kann bei hinreichender Sensitivität die Masse des Elektron-Antineutrinos bestimmt werden [Kat14].

Aus den bisher sensitivsten Messungen des Tritium- β -Spektrums mit den Experimenten in Mainz und Troizk wurde die aktuelle Obergrenze für die Masse des Elektronneutrinos zu

$$\text{Mainz: } m(\nu_e) < 2,3 \text{ eV}/c^2 \text{ [Kra05]} \quad (1.20)$$

$$\text{Troizk: } m(\nu_e) < 2,1 \text{ eV}/c^2 \text{ [Lob03]} \quad (1.21)$$

jeweils mit einem 95-prozentigem Konfidenzbereich bestimmt.

1.7 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Inbetriebnahme des Hochspannungssystems am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments zur Bestimmung der Masse des Elektron-Antineutrinos. Dabei werden Ergebnisse erster Hochspannungsmessungen am Hauptspektrometer, sowie Kalibrationsmessungen der für KATRIN entwickelten Präzisions-hochspannungsteiler präsentiert. Außerdem werden insbesondere die Kapazitätsmessungen des Drahtelektrodensystems, sowie dessen Automatisierung vorgestellt.

- **Kapitel 1** gibt neben der Motivation für diese Arbeit einen kurzen Überblick über die Eigenschaften von Neutrinos und bisherige experimentelle Entdeckungen aus dem Bereich der Neutrino-physik.
- In **Kapitel 2** werden das KATRIN-Experiment und dessen einzelne Komponenten erläutert. Außerdem wird ein kurzer Überblick über die statistischen und systematischen Unsicherheiten des Experiments gegeben, insbesondere über die Anforderungen an die Spannungsüberwachung.
- In **Kapitel 3** wird das Hochspannungssystem des Hauptspektrometers des KATRIN-Experiments näher erläutert. Dabei werden sowohl das Konzept und die installierte Hardware, wie auch erste Testmessungen während der Inbetriebnahme des Hauptspektrometers im Sommer 2013 gezeigt.
- **Kapitel 4** bietet eine Beschreibung der Kapazität der Drahtelektrode des Hauptspektrometers. Dabei wird zunächst das theoretische Konzept der Kapazitätsmessung erläutert, bevor die Ergebnisse der manuellen Kapazitätsmessung vorgestellt werden. Außerdem wird das Konzept des Systems einer automatisierten Kapazitätsmessung sowie dessen theoretische Grundlagen, die technische Realisierung und erste Messungen gezeigt.
- In **Kapitel 5** werden die Kalibrierungen der Präzisions-Hochspannungskomponenten des KATRIN-Experiments beschrieben. Insbesondere werden dabei Kalibrationsmessungen der beiden KATRIN Hochspannungsteiler behandelt: die Niederspannungska-librierung sowie die Hochspannungskalibrierung an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Bei letzterer wies einer der beiden Spannungsteiler Auffälligkeiten der Spannungsabhängigkeit des Maßstabsfaktors auf, die daraufhin untersucht und behoben wurden. Dies wird ebenfalls in diesem Kapitel erläutert.
- **Kapitel 6** bietet eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Arbeit und einen Ausblick auf weiterführende Aufgaben.

KAPITEL 2

DAS KATRIN-EXPERIMENT

2.1 Übersicht

Das **K**Arlsruhe **T**RItium Neutrino-Experiment ist ein Experiment zur direkten Neutrino-massenbestimmung aus dem Endpunkt des Tritium- β -Zerfalls. Das Experiment befindet sich in Karlsruhe auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), wo durch den Standort des Tritiumlabors Karlsruhe (TLK), einem der weltweit größten Tritium-Labore, die für das Experiment erforderliche Menge Tritium zur Verfügung gestellt werden kann. Analog zu den direkten Vorgängerexperimenten in Mainz und Troizk wird mit Hilfe eines Spektrometers die Energie der Tritium- β -Zerfallselektronen bestimmt, um aus dem Verlauf des Spektrums im Endpunktbereich die Elektronen-neutrino-masse zu bestimmen. Verglichen mit den Vorgängerexperimenten in Mainz und Troizk sind für KATRIN die technischen Anforderungen signifikant größer um die bisherige Obergrenze der Neutrino-masse von etwa 2 eV zu unterschreiten und eine Sensitivität von $m_\nu = 0,35$ eV (5σ) zu erreichen. Falls kein Signal der Neutrino-masse detektiert werden sollte, kann eine neue Obergrenze von $m_\nu < 0,2$ eV (90% C.L.) bestimmt werden. Ein großer Vorteil der Neutrino-massenbestimmung aus der Kinetik des Tritium- β -Zerfalls ist wie in Kapitel 1.6 beschrieben die Eigenschaft, dass dieses Messprinzip modell-unabhängig ist. Der Aufbau des Experiments ist in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Sektionen kurz erläutert, wobei für eine ausführliche Beschreibung auf den KATRIN-Design-Report verwiesen wird [Kat04].

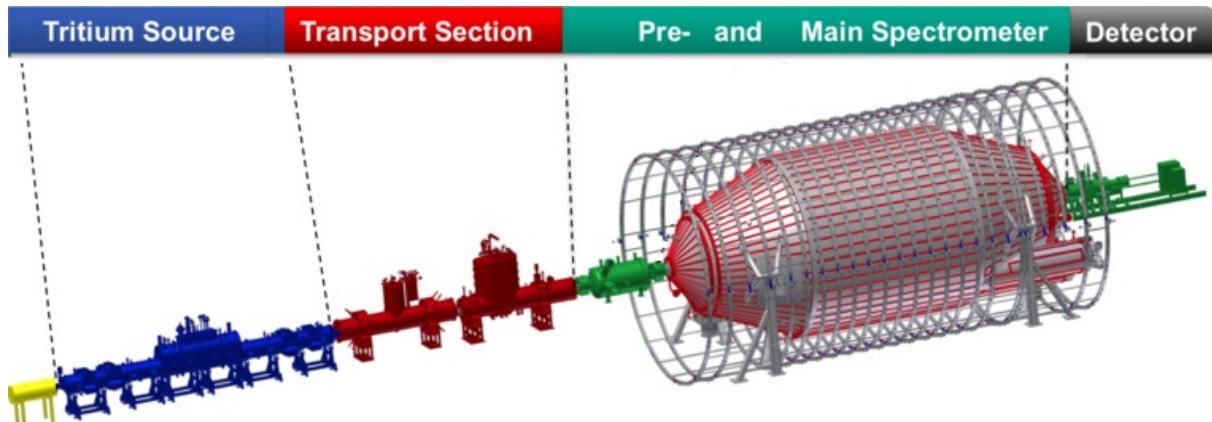


Abbildung 2.1: **Aufbau des KATRIN-Experiments.** In der fensterlosen **Tritiumquelle** zerfällt Tritium unter der Emission eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos zu ${}^3\text{He}$. Die Elektronen werden durch magnetische Felder zur **Transportsektion** geführt, in der nicht zerfallenes Tritium und Zerfalls-kerne durch eine differentielle (DPS) und eine kryogene (CPS) Pumpstrecke abgeführt werden. Im **Vor- und Hauptspektrometer** findet die Energie-selektion der Elektronen nach dem Prinzip eines MAC-E-Filters statt (siehe Kapitel 2.3.1). Die transmittierten Elektronen werden mit Hilfe des **Detektors** nachgewiesen [Kat14].

2.2 Quell- und Transportsektion

Die fensterlose **Tritiumquelle** (windowless gaseous tritium source, **WGTS**) besteht aus einem 10 m langen zylindrischen Rohr mit einem Durchmesser von 90 mm (siehe Abbildung 2.2). Das Tritium-Gas mit einer Isotopenreinheit von über 95% wird auf 30 K heruntergekühlt und über mehrere Kapillare in der Mitte des Rohres mit einem Druck von $p = 3,4 \cdot 10^{-3}$ mbar eingelassen. Dies führt zu einer Einlassrate von 2 mbar 1/s. Da ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor des Experiments in der Quellsäulendichte liegt (siehe Kapitel 2.5), welche wiederum temperaturabhängig ist, muss die Temperatur mit einer Genauigkeit von 30 mK stabilisiert sein. Außerdem wird durch ein Puffervolumen beim Einlass gewährleistet, dass der Einlassdruck des Tritiums zeitlich konstant ist. Durch Diffusionsprozesse breitet sich das Gas zu beiden Enden des Rohrs aus, wobei durch den β -Zerfall emittierte Elektronen durch ein Magnetfeld adiabatisch zu den beiden Enden des Rohrs geführt werden. Das Gas wird an beiden Seiten des Rohres abgepumpt und unter Voraussetzung der gleichen Isotopenreinheit in die Quelle zurück geführt, sodass eine Rate von 10^{11} Zerfallselektronen pro Sekunde erreicht wird.

Eine wichtige Eigenschaft des hier verwendeten Quellsystems ist der Verzicht auf eine mechanische Trennung von Quelle und Flussschlauch beispielsweise durch ein Fenster. Dadurch gelangt zwar Tritium in den weiteren Verlauf des Experiments und muss durch die Transportsektion entfernt werden, allerdings würde ein Fenster zu einem nicht bekannten Energieverlust der Elektronen führen, die dieses Fenster passieren müssen, um zum Spektrometer zu gelangen. Diese zusätzliche Unsicherheit würde die von KATRIN angestrebte Sensitivität nicht ermöglichen.

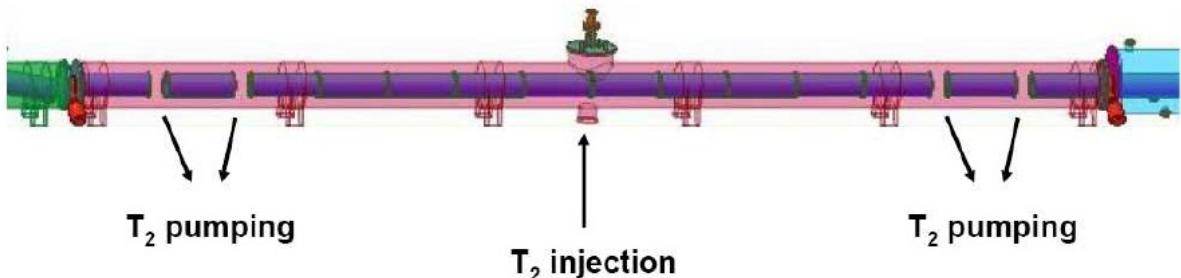


Abbildung 2.2: **Schematische Darstellung der Tritiumquelle.** In der Mitte des 10 m langen Rohres wird gasförmiges Tritium mit einer Temperatur von 30 K eingelassen, welches an beiden Enden der Quelle wieder abgepumpt und zurückgeführt wird. Die Zerfallselektronen werden durch ein Magnetfeld zur Transportsektion geleitet [Hab06].

Die Transportsektion besteht aus einer differentiellen (DPS2F) und einer kryogenen (CPS) Pumpstrecke und dient dazu, das Tritium bzw. dessen Zerfallsprodukte aus dem Flussschlauch zu entfernen.

Die **DPS2F**¹ besteht aus 5 Rohren mit je 1 m Länge, von denen zwei mit einem Winkel

¹differential pumping section

von 20° zur Hauptachse des Experiments angeordnet sind (siehe Abbildung 2.3). Während die Elektronen durch magnetische Felder durch die DPS geführt werden, kollidieren neutrale Atome und Moleküle mit der Rohrwand und werden abgepumpt. An den vier Verbindungs punkten der fünf Sektionen befindet sich dazu jeweils eine Turbomolekularpumpe mit einer Pumpleistung von mindestens 2000 l/s. Positiv geladene Ionen folgen wie Elektronen den magnetischen Feldlinien auf Zyklotronbahnen. Um die Ionen aktiv aus dem Flussschlauch zu entfernen sind an zwei Stellen elektrische Dipolelektroden installiert. Mit Hilfe der DPS findet eine Reduzierung des Tritiumflusses von etwa $3 \cdot 10^{17}$ Molekülen pro Sekunde auf ca. $3 \cdot 10^{12}$ Moleküle pro Sekunde statt.

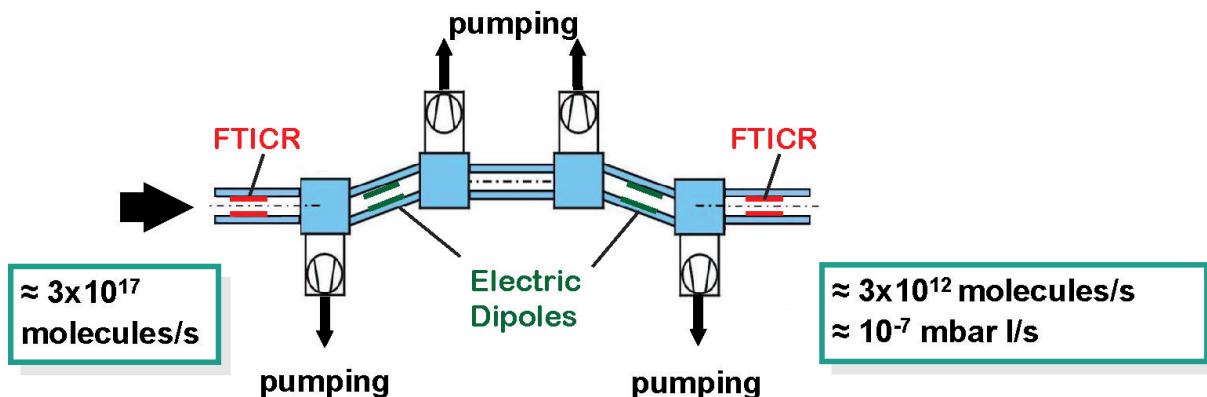


Abbildung 2.3: **Schematische Darstellung der DPS.** Von der WGTS gelangen neben den Elektronen, die durch ein magnetisches Feld geführt werden, durch Diffusionsprozesse auch neutrale Tritiummoleküle und Ionen in die DPS. Durch vier Turbomolekularpumpen werden die Atome und Moleküle abgepumpt. Während die Elektronen durch das magnetische Feld durch den Flussschlauch geführt werden, kollidieren die ungeladenen Atome und Moleküle mit den Wänden des Rohrs und werden abgepumpt. Um positiv geladene Ionen zu entfernen, sind an zwei Stellen Dipolelektroden installiert [Kat14].

Die **CPS²** besteht ebenfalls aus verwinkelten Rohrsegmenten, um eine direkte Diffusion der Tritiummoleküle ins Spektrometer zu verhindern und die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass die Moleküle mit der Wand kollidieren (vgl. Abbildung 2.4). Durch Kryo-Adsorption wird das Tritium an der Wandfläche des Rohres gebunden. Diese wird auf 3 K gekühlt und ist mit einer Goldschicht überzogen, auf der sich eine Schicht Argonfrost befindet. Dadurch wird die Oberfläche der Wand und damit die Wahrscheinlichkeit, dass ein Tritiummolekül adsorbiert, vergrößert. Wenn die Oberfläche nach etwa 60 Tagen mit Tritium gesättigt ist, wird das System auf 100 K geheizt. Die wieder frei werdenden Moleküle werden dann durch eine Turbomolekularpumpe aus dem System entfernt.

Am Ende der Transportsektion ist der Partialdruck des Tritiums um 12 Größenordnungen gegenüber der WGTS reduziert worden. Die Elektronen werden durch magnetische Felder geführt und durchqueren die Transportsektion ohne Energieverlust, bevor sie zur Spektrometersektion gelangen.

²cryogenic pumping section

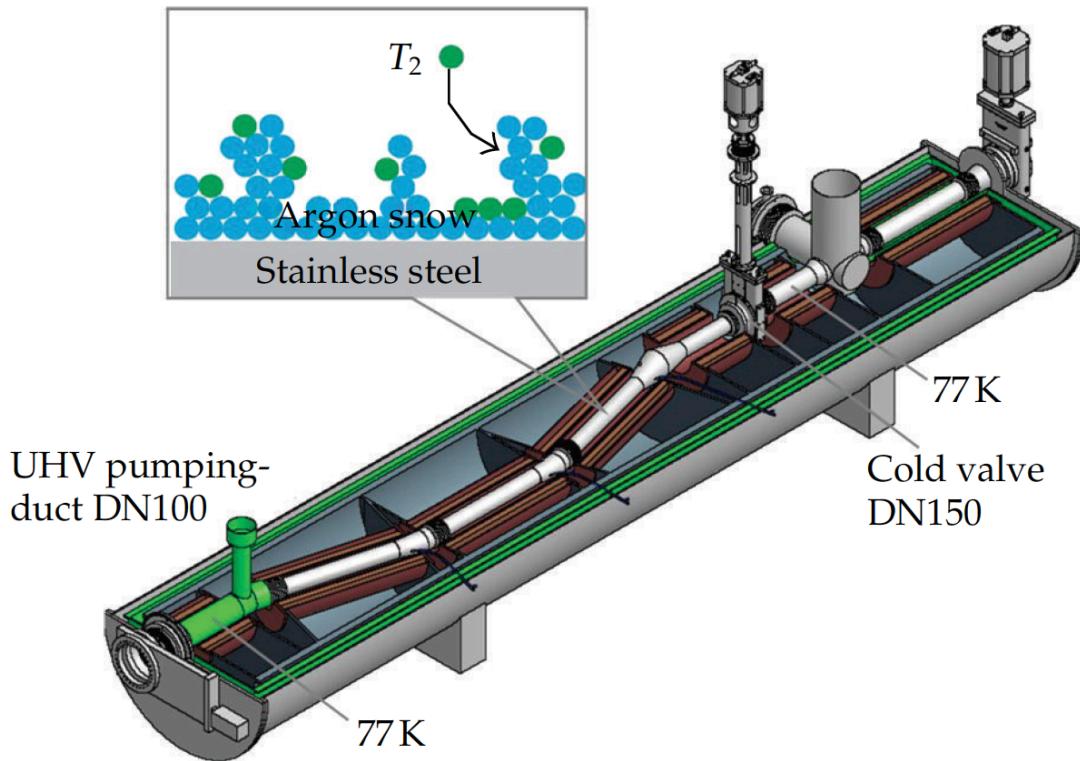


Abbildung 2.4: **Schematische Darstellung der CPS.** In den Sektionen, in denen die Kryo-Adsorptionsprozesse stattfinden, wird das Tritium an der etwa 3 K kalten und mit Argonfrost bedeckten Oberfläche gefangen. Am Ende der Transportsektion wird der Tritiumfluss durch DPS und CPS auf etwa $10^{-14} \frac{\text{mbar}}{\text{s}}$ abgefallen sein [Dre13].

2.3 Spektrometer

Die Spektrometersektion besteht aus drei eigenständigen elektrostatischen Spektrometern, die alle nach dem Prinzip eines MAC-E-Filters (Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter) arbeiten. Die einzelnen Komponenten sind:

1. das Vorspektrometer als Hochpass-Filter zur Reflexion der Elektronen im niederenergetischen Bereich, die keine zugänglichen Informationen zur Neutrinomasse tragen,
2. das Hauptspektrometer, welches die kinetische Energie der Elektronen im Endpunktbereich des Tritium- β -Zerfalls nach dem Prinzip eines integrierenden Hochpass-Filters bestimmt und
3. das Monitorspektrometer, mit welchem die Position der monoenergetischen Konversionselektronenlinien von radioaktivem ^{83m}Kr vermessen wird. Dadurch wird die Spannungsstabilität des Hauptspektrometers überwacht werden. Das Monitorspektrometer befindet sich lediglich über das Retardierungspotential mit dem restlichen Aufbau des Experiments in Verbindung.

Bevor die einzelnen Komponenten näher beschrieben werden, soll im nächsten Kapitel eine detailliertere Betrachtung des Funktionsprinzips eines MAC-E-Filters erfolgen.

2.3.1 MAC-E-Filter

Das Prinzip des MAC-E-Filters wurde erstmals 1980 von Beamson et al. vorgeschlagen [Bea80]. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Der Grundgedanke der Funktionsweise beruht auf einem elektrostatischen Spektrometer:

Mit Hilfe von zwei supraleitenden Magnetspulen an den Öffnungen des Spektrometers wird ein magnetisches Feld erzeugt, durch welches Elektronen vom Eingang zum Ausgang des MAC-E-Filters geführt werden. Die Elektronen bewegen sich auf Zyklotronbahnen um die magnetischen Feldlinien und gelangen unter einer Winkelakzeptanz von 2π ins Spektrometer. Ein durch zylindrisch angeordnete Elektroden erzeugtes elektrisches Feld stellt das Retardierungspotential U dar, welches nur von Elektronen mit einer ausreichend hohen kinetischen Energie E_{kin} überwunden werden kann:

$$\text{Transmissionsbedingung: } e \cdot U < E_{kin}. \quad (2.1)$$

Elektronen unterhalb einer durch das an die Elektroden angelegte Potential definierbaren Grenzenergie werden reflektiert. Eine Unterscheidung verschiedener Elektronenenergien oberhalb der Grenzenergie ist nicht möglich. Es handelt sich insgesamt somit um einen integrierenden Hochpassfilter, mit dem durch Variation des Retardierungspotentials ein integriertes Spektrum der Elektronenenergien aufgenommen werden kann.

Da sich die Elektronen auf Zyklotronbahnen bewegen, ist ein Teil der kinetischen Energie in ihrer Transversalbewegung E_{\perp} zur Spektrometerachse gespeichert:

$$E_{kin} = E_{\perp} + E_{\parallel}. \quad (2.2)$$

Die Besonderheit des MAC-E-Filters ist, dass diese Energie adiabatisch, also ohne Energieverlust, in longitudinale Bewegungsenergie E_{\parallel} umgewandelt wird, sodass die Elektronen in der Analyseebene des Spektrometers ausschließlich einen Impuls parallel zur Spektrometerachse besitzen. Dies wird erreicht, da die magnetische Feldstärke beim Spektrometereingang durch die Magnetspule am größten ist, langsam zur Spektrometermitte hin abnimmt, und dann aufgrund der Magnetspule am Ausgang wieder größer wird. Das magnetische Moment μ kann aufgrund der langsamen Änderung als konstant angesehen werden:

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = const. \quad (2.3)$$

Die Elektronen, die eine ausreichende Energie besitzen um die Analyseebene zu überschreiten, werden zum Ausgang des Spektrometers auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt. Die relative Auflösung des MAC-E-Filters bestimmt sich aus dem Verhältnis vom minimalen zum maximalen Magnetfeld:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{min}}{B_{max}}. \quad (2.4)$$

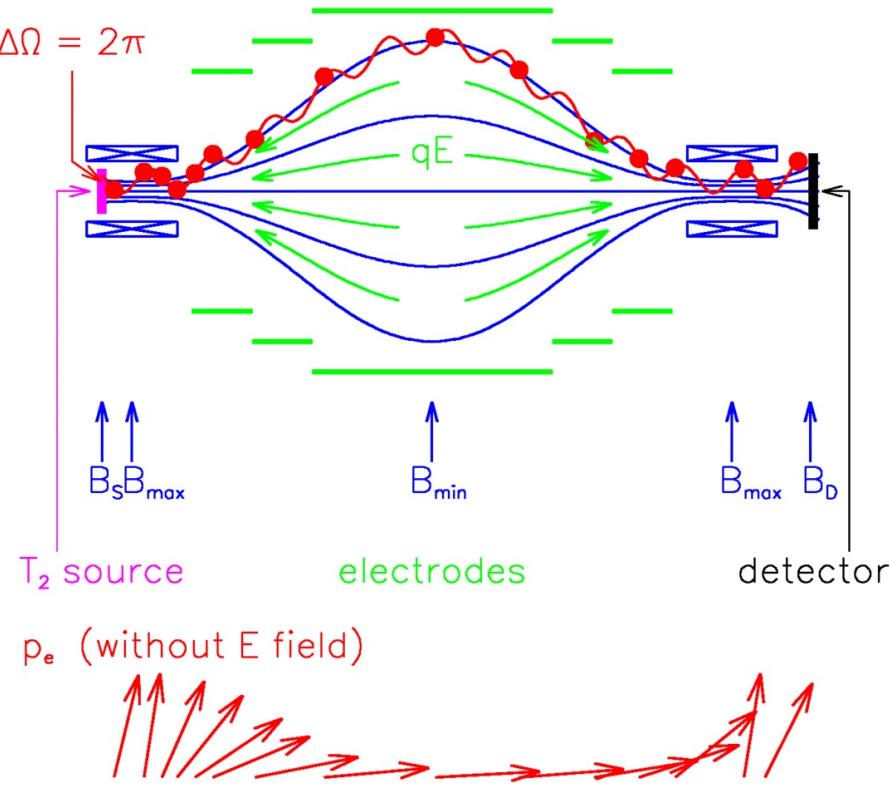


Abbildung 2.5: **Funktionsprinzip eines MAC-E-Filters.** Die Elektronen folgen auf Zyklotronbahnen den magnetischen Feldlinien, die durch zwei supraleitende Magnetspulen an den beiden Spektrometeröffnungen erzeugt werden. Die magnetische Feldstärke wird zur Spektrometermitte geringer, wobei sie in der Analyseebene ihr Minimum erreicht. Da die Abnahme der magnetischen Feldstärke langsam erfolgt wird der Transversalimpuls der Elektronen, in dem ein Teil ihrer kinetischen Energie gespeichert ist, zur Mitte adiabatisch in einen Impuls parallel zur Spektrometerachse umgewandelt. Durch ein Elektrodensystem wird ein elektrisches Retardierungspotential erzeugt, welches Elektronen unterhalb einer Grenzenergie reflektiert. Elektronen oberhalb der Grenzenergie werden transmittiert und gelangen zum Spektrometerausgang [Kat14].

2.3.2 Vor- und Hauptspektrometer

Bei den beiden Vorgängerexperimenten von KATRIN in Mainz und Troizk wurde der im vorigen Kapitel beschriebene Spektrometertyp verwendet. Bei KATRIN wird das Prinzip beibehalten und die technische Realisierung auf die höheren Anforderungen angepasst und weiterentwickelt.

Von der Transportsektion gelangen die Elektronen zunächst ins **Vorspektrometer**. Abbildung 2.6 zeigt den Aufbau. Der größte Teil der Elektronen aus dem Tritium- β -Zerfall liegt nicht im Endpunktbereich des Energiespektrums und wird reflektiert. Eine Reduktion der Elektronenanzahl bereits vor dem Hauptspektrometer ist insbesondere erforderlich, um Stö-

ße der Elektronen mit den Restgasmolekülen im Hauptspektrometer zu minimieren, was zu einer signifikanten Reduzierung des Untergrunds führt.

Das Potential zur Erzeugung des elektrischen Gegenfeldes wird direkt an den Tank angelegt und mit Hilfe einer inneren Elektrode feinjustiert. Da das Vorspektrometer ein leicht positiveres Potential aufweist als das Hauptspektrometer, werden nur Elektronen im Endpunktbereich des Spektrums transmittiert. Eine Potentialdifferenz von beispielsweise 300 V führt dazu, dass nur Elektronen mit einer Mindestenergie von 300 eV unterhalb des Endpunktes ins Hauptspektrometer gelangen.



Abbildung 2.6: **Das Vorspektrometer.** Der zylindrische Tank besitzt einen äußerer Durchmesser von 1,70 m bei einer Wandstärke von 10 mm und einer Länge von 3,38 m. Die beiden Magnetspulen an den Spektrometerenden (türkis) sind im Abstand von 4,30 m aufgebaut und formen das magnetische Feld [Kat14].

Das **Hauptspektrometer** (siehe Abbildung 2.7) schließt direkt an das Vorspektrometer an. Hier wird der Endpunktbereich des Spektrums mit bisher unerreichter Präzision untersucht. Nach Gleichung 2.4 hängt die Auflösung eines MAC-E-Filters direkt von dem Verhältnis zwischen minimaler und maximaler magnetischer Feldstärke ab. Mit den an den Spektrometeröffnungen installierten Magneten wird eine maximale magnetische Feldstärke von etwa $B_{max} = 3,5T$ erreicht. In der Analyseebene fällt die Feldstärke auf etwa $B_{min} = 3 \cdot 10^{-4}T$ ab. Analog zum Vorspektrometer wird das Retardierungspotential direkt an den Tank angelegt. Zur Feinjustierung des elektrischen Feldes und zur Untergrundreduktion befindet sich innerhalb des Tanks außerdem ein Drahtelektrodensystem, welches in Kapitel 3.2 näher beschrieben wird.

Der Spektrometertank weist im Zentralteil einen inneren Durchmesser von 9,80 m auf bei einer Gesamtlänge von 23,28 m. Die innere Oberfläche beträgt 650 m^2 und das Volumen beträgt 1400 m^3 . Der Vakuumtank wurde mit Hilfe von Turbomolekular- und Getterpumpen bereits erfolgreich auf einen Druck von 10^{-11} mbar evakuiert. Bei diesem Tankvolumen wurde dabei weltweit erstmals ein Druck dieser Größenordnung erreicht.

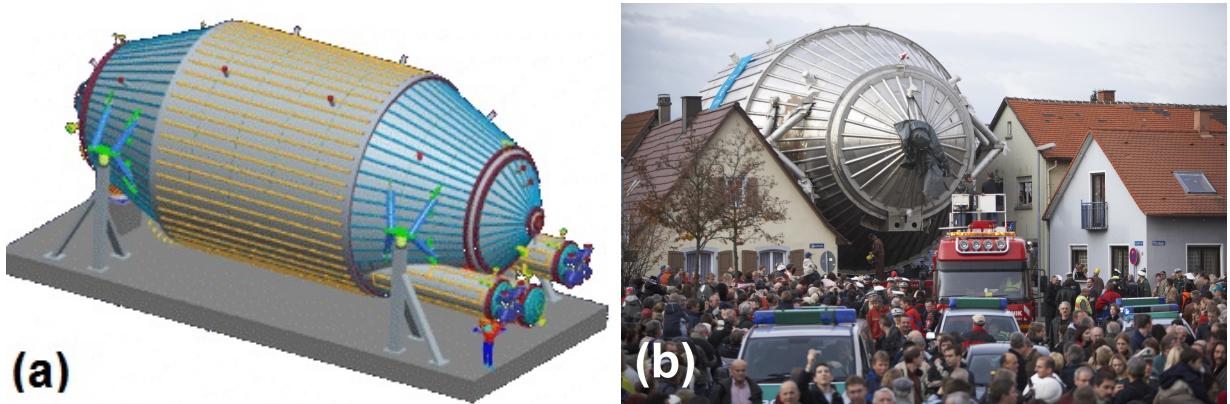


Abbildung 2.7: (a) **Schematische Darstellung des Hauptspektrometers.** Die Länge beträgt 23,28 m bei einem Durchmesser von 9,8 m. An der rechten Seite des Spektrometers sind die drei Pumpports zu erkennen, über die der Tank mit Hilfe von Vakuumpumpen evakuiert werden kann. (b) **Transport des Hauptspektrometers.** Vom Konstruktionsort in Deggendorf wurde der Spektrometertank zum Karlsruher Institut für Technologie in Eggenstein-Leopoldshafen transportiert [Kat14].

2.3.3 Monitorspektrometer

Das Spektrometer des Mainzer Neutrinoexperiments (siehe Abbildung 2.8) wird im Rahmen des KATRIN-Experiments als Monitorspektrometer genutzt, um die Stabilität des am Hauptspektrometer anliegenden Retardierungspotentials zu überwachen. Dazu liegt an beiden Spektrometern das gleiche Potential an. Um mit Hilfe des Monitorspektrometers die angelegte Spannung zu bestimmen, werden Konversionselektronen des ^{83m}Kr als Standardreferenz genutzt, da beim Zerfall des Isotops emittierte Konversionselektronen monoenergetisch sind.



Abbildung 2.8: **Das Monitorspektrometer.** Zur Überwachung des Retardierungspotentials des Hauptspektrometers wird das Spektrometer des Mainzer Neutrinoexperimentes verwendet [Kat14].

Da die Überwachung des Retardierungspotentials von essentieller Bedeutung für KATRIN ist, wird die Spannung außerdem mit einem der beiden Präzisions-Hochspannungsteiler überwacht, die in Kapitel 5.2 näher beschrieben werden.

2.4 Detektor

Elektronen mit ausreichend hoher Energie um das angelegte Retardierungspotential zu überwinden gelangen zum Detektor und werden dort nachgewiesen. Um Untergrundeffekte zu minimieren werden die Elektronen mit bis zu 30 kV nachbeschleunigt, bevor sie auf die Silizium-PIN-Diode treffen. Diese ist kreisförmig aufgebaut und besteht aus 148 gleich großen Segmenten. Der Durchmesser der gesamten Fläche beträgt 90 mm, wobei die einzelnen Segmente in 12 Ringe mit je 12 Pixeln angeordnet sind. Diese Unterteilung ermöglicht es mögliche Inhomogenitäten im elektrischen und magnetischen Feld in der Datenanalyse zu berücksichtigen. Das Zentrum des Detektors ist in 4 Abschnitte unterteilt (siehe Abbildung 2.9).

Prinzipiell ist für den Detektor keine hohe Energieauflösung erforderlich, da eine Energiebestimmung bereits im Hauptspektrometer erfolgt. Zur Untergrundreduktion wird jedoch eine Auflösung von unter 1 keV bei einer Endpunktenergie von 18,6 keV angestrebt. Weitere wichtige Anforderungen an den Detektor sind der Betrieb in sehr starken Magnetfeldern, eine hohe Nachweiseffizienz für Elektronen sowie eine geringe Untergrundzählrate. Um einen nicht detektierten Energieverlust der Elektronen zu minimieren ist die Totschicht des Detektors außerdem sehr gering.

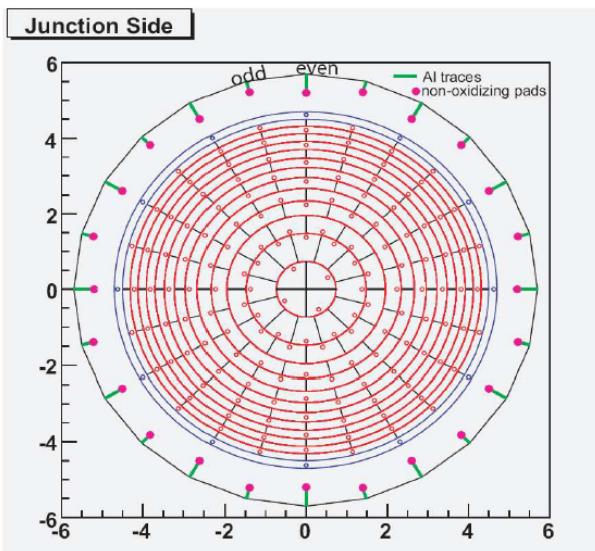


Abbildung 2.9: **Der segmentierte Detektor.** Schematische Darstellung der in 148 Pixel unterteilten PIN-Diode [Ste07].

2.5 Statistische und systematische Unsicherheiten

Die Sensitivität von KATRIN für eine Neutrinomasse im Sub-eV-Bereich wird durch die systematischen und statistischen Unsicherheiten des Experiments definiert. Eine ausführliche Beschreibung der Unsicherheiten und entsprechende Monte-Carlo-Simulationen sind im KATRIN-Design-Report [Kat04] aufgeführt. In diesem Kapitel wird anhand von [Thu08] ein kurzer Überblick über die Unsicherheiten und den Einfluss einer auftretenden Störung auf das Spektrum gegeben.

Die systematischen und statistischen Unsicherheiten hängen im Wesentlichen von der Breite des Analyseintervalls um den Endpunkt des Spektrums ab. Ein breites Analyseintervall führt zu einer geringeren statistischen und einer größeren systematischen Unsicherheit. Ein kleines Intervall verringert die systematischen Effekte, bietet dagegen aber auch eine schlechtere Statistik. Nach Simulationen in [Kat04] ist ein Analyseintervall von $[E_0 - 25 \text{ eV}; E_0 + 5 \text{ eV}]$ geeignet, um eine neue Obergrenze der Neutrinomasse von 0,2 eV mit einem Konfidenzbereich von 90% zu erreichen. Simulationen haben für dieses Intervall eine statistische Unsicherheit von

$$\Delta m_{stat}^2 = 0,018eV^2/c^4 \quad (2.5)$$

ergeben. Die gesamte Unsicherheit wird unter der Annahme, dass beide Anteile etwa gleichbedeutend sind, durch die quadratische Summierung der Einzelbeiträge bestimmt. Sie ist am niedrigsten, wenn beide Unsicherheiten etwa gleich groß sind. Das bedeutet, dass die systematische Unsicherheit ebenfalls diese Größe haben sollte:

$$\Delta m_{sys}^2 \approx 0,018eV^2/c^4. \quad (2.6)$$

Die systematische Unsicherheit setzt sich im Wesentlichen aus fünf großen Anteilen zusammen:

1. Transmissionsfunktion und Energieverlust der WGTS
2. Überwachung der effektiven Säulendichte der WGTS
3. Verteilung der Endzustände des $(\text{He}^3\text{T})^+$ -Moleküls
4. elastische Streuung der Elektronen mit Atomen/ Molekülen
5. Überwachung des Retardierungspotentials und Bestimmung der Spannungsdifferenz zwischen Quelle und Hauptspektrometer.

Insgesamt darf der Beitrag jeder einzelnen Unsicherheit somit maximal

$$\Delta m_{sys,single}^2 \leq 0,0075eV^2/c^4 \quad (2.7)$$

betragen. Da es in dieser Arbeit um das Hochspannungssystem des KATRIN-Experiments geht soll der Beitrag des letzten Anteils näher diskutiert werden.

Durch Variation des Retardierungspotentials wird das integrale β -Spektrum aufgezeichnet. Eine Unsicherheit bei der genauen Kenntnis dieses Potentials führt direkt zu einer Unsicherheit der Transmissionsfunktion des Hauptspektrometers und damit zu einer Unsicherheit der Observablen m_ν . Da bei der Analyse des Spektrums der Endpunkt als freier Parameter

betrachtet wird ist nicht die absolute Energieskala Quelle der systematischen Unsicherheit, sondern Fluktuationen des Potentials. Dabei muss die Unsicherheit der Hochspannungsquelle in Kombination mit der Unsicherheit der Spannungsüberwachung betrachtet werden. Der Einfluss von Störungen auf das Retardierungspotential wird nachfolgend anhand einer gaußförmigen Störung exemplarisch gezeigt.

Das β -Spektrum nimmt wie in Kapitel 1.6 beschrieben für den Endpunktbereich die folgende Form an:

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = a \cdot (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \quad (2.8)$$

Dabei wurden alle für dieses Beispiel nicht relevanten Größen unter dem konstanten Vorfaktor a zusammengefasst. Da die Neutrinomasse kleiner als 2 eV ist kann die Form des Spektrums durch eine Taylorentwicklung um $m_{\nu_e}^2 = 0$ angenähert werden. Die Entwicklung bis zur zweiten Ordnung ergibt

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = a \cdot (E_0 - E)^2 - a \frac{1}{2} m_{\nu_e}^2 + O(m_{\nu_e}^4). \quad (2.9)$$

Betrachtet wird eine gaußförmige Fluktuation der Retardierungsspannung mit der Breite σ und dem Erwartungswert $\mu = 0$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.10)$$

die durch eine Faltung in das vereinfachte β -Spektrum mit verschwindender Neutrinomasse

$$g(E) = \frac{d\dot{N}}{dE} (m_{\nu_e} = 0) = a(E_0 - E)^2 \quad (2.11)$$

integriert wird:

$$f * g(E) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(E - x) dx = a \cdot (E_0 - E)^2 + a \cdot \sigma^2. \quad (2.12)$$

Durch den Vergleich mit Gleichung 2.9 folgt

$$m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2. \quad (2.13)$$

Da nach Gleichung 2.7 die Obergrenze für die Unsicherheit $0,0078 \text{ eV}^2/\text{c}^4$ ist, ergibt sich für die Obergrenze der Standardabweichung

$$\sigma \leq 0,061 \text{ eV}. \quad (2.14)$$

Die Endpunktenergie des Tritium- β -Zerfalls liegt bei etwa 18,6 keV, sodass die erforderliche relative Stabilität und Reproduzierbarkeit bei 3,3 ppm liegt. Diese Stabilität muss von der Hochspannungsversorgung bzw. den Überwachungssystemen über einen KATRIN-Messzyklus über mehrere Monate gewährleistet sein, damit die Restriktionen an die systematische Unsicherheit des HV-Systems nicht überschritten werden.

KAPITEL 3

DAS HOCHSPANNUNGSSYSTEM DES HAUPTSPEKTROMETERS

3.1 Überblick

In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Komponenten des Hochspannungssystems am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments kurz erläutert, sowie erste Testmessungen während der Inbetriebnahme vorgestellt werden. Der Fokus liegt dabei auf dem generellen Funktionsprinzip. Für technische Details sei auf [Bau13a] bzw. auf die jeweils angegebenen Referenzen verwiesen. Eine schematische Übersicht des HV-Systems ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die Hochspannung wird hauptsächlich zur Erzeugung des Retardierungspotentials der Spektrometer benötigt. Da das Monitorspektrometer zur Spannungsüberwachung des Hauptspektrometers vorgesehen ist, befinden sich beide auf dem gleichen Potential, welches durch ein Präzisionsnetzgerät erzeugt wird. Dieses Potential wird ebenfalls mit Hilfe der bei KATRIN entwickelten Präzisions-Hochspannungsteiler überwacht. Die Verteilung der Hochspannung an die einzelnen Komponenten findet im Hochspannungsschalschrank (HV-Schrank) statt.

Da, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, bereits kleinste Unsicherheiten der am Spektrometer anliegenden Spannung Einfluss auf die Bestimmung der Neutrinomasse haben, gibt es mehrere Systeme, um die Spannung mit hoher Präzision zu überwachen.

Mit Hilfe des Monitorspektrometers wird die Stabilität des Retardierungspotentials überwacht. Eine absolute Spannungs- bzw. Energiekalibrierung wird mit einer kondensierten Kryptonkonversionselektronenquelle ([Ost09]) erreicht, welche an der CPS eingebaut wird. Das radioaktive Isotop ^{83m}Kr zerfällt unter der Emission von Konversionselektronen, deren Zerfallsenergie konstant und genau bekannt ist. Durch die Bestimmung der Linienposition ist es möglich, das System zur Spannungsüberwachung zu kalibrieren.

Ein weiteres wichtiges Überwachungssystem bieten die zwei für KATRIN entwickelten Präzisions-Hochspannungsteiler K35 und K65. Da es technisch keine Möglichkeit gibt die Spannung im kV-Bereich mit ausreichend hoher Präzision direkt zu messen, wird diese mit Hilfe der Spannungsteiler in einen Bereich von 0 bis 20 V geteilt, in dem die verwendeten Multimeter die erforderliche Präzision besitzen. Um das absolute Teilverhältnis der Spannungsteiler zu bestimmen, müssen regelmäßig Kalibrationsmessungen durchgeführt werden, die in Kapitel 5 näher erläutert werden.

Bevor in Kapitel 3.3 der HV-Schalschrank näher erläutert wird, sollen im nächsten Unterkapitel der Aufbau und die Anforderungen des Drahtelektrodensystems an die Hochspannungsverteilung gezeigt werden. Anschließend folgt eine Beschreibung der Spannungsversorgung der winkelselektiven Photoelektronenquelle, welche im Rahmen der SDS¹-Inbetriebnahme im Sommer 2013 verwendet wurde, bevor erste Messungen am Spektrometer gezeigt werden.

¹Spektrometer Detektor Sektion

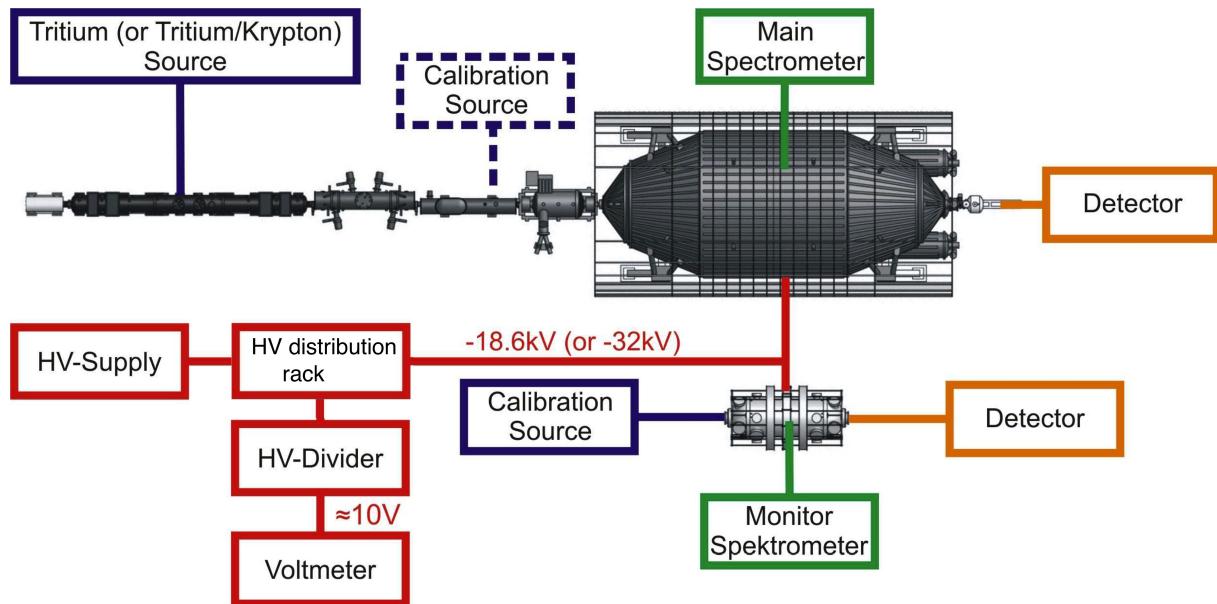


Abbildung 3.1: **Schematischer Überblick über das KATRIN HV-System.** Für die Hochspannung, die über den HV-Schalschrank auf die verschiedenen Systeme verteilt wird, gibt es mehrere Überwachungssysteme: Mit Hilfe eines Spannungsteilers und eines Präzisionsmultimeters kann die Spannung direkt gemessen werden. Das Monitorspektrometer dient als redundantes System zur Überwachung der Spannungsstabilität. Die kondensierte Kryptonkonversionselektronenquelle wird zur absoluten Spannungskalibrierung des Systems verwendet [Bau13a].

3.2 Das Drahtelektrodensystem

Das Retardierungspotential des Hauptspektrometers wird an ein zweilagiges Drahtelektrodensystem angelegt. Dieses ist im Inneren des Spektrometers verbaut und breitet sich über die gesamte innere Oberfläche aus. Der mechanische Aufbau, sowie die genaue elektrische Verschaltung, ist in [Pra11] beschrieben und soll hier kurz vorgestellt werden.

Abbildung 3.2 zeigt eine schematische Schnittansicht des Hauptspektrometers. Das Drahtelektrodensystem besteht aus insgesamt 248 Modulen (siehe Abbildung 3.3), die auf 15 Ringe aufgeteilt sind. Die Ringe sind jeweils in zwei Dipolhälften (Dipol 1, Westseite und Dipol 2, Ostseite) unterteilt. Jedes einzelne Modul besteht aus zwei Drahtlagen, die in einer Rahmenhalterung montiert sind. An die beiden Drahtlagen eines Rings kann ein unterschiedliches Potential angelegt werden, wobei die äußere Drahtlage elektrisch mit dem Rahmen eines Moduls verbunden ist. Insgesamt können 46 verschiedene Potentiale an das Drahtelektrodensystem angelegt werden: jeweils zwei an die Ringe 2 bis 6 und 12 bis 16 und für beide Dipolhälften; die benachbarten Ringe des Zentralteils 7 bis 11 sind elektrisch verbunden, sodass hier nur insgesamt 2 Potentiale pro Dipol für die innere und äußere Drahtlage aller 5 Ringe angelegt werden kann. Außerdem sind an den beiden Spektrometeröffnungen Anti-Penning-Elektroden zur Verhinderung von Penningfallen installiert, die auf ein separates Potential gelegt werden können. Durch diesen Aufbau lässt sich die Form des elektrischen Feldes im Hauptspektrometer individuell justieren.

Für die Bereitstellung dieser Anzahl an unterschiedlichen Potentialen sind mehrere Netzgeräte erforderlich. Das grundlegende Potential des Drahtelektrodensystems wird durch das speziell für KATRIN gebaute Netzgerät HCP 70M-35000 der Firma FuG Elektronik erzeugt, welches für Spannungen von 0 bis -35000 V bei einem maximalen Strom von 2 mA konzipiert ist und eine große Stabilität aufweist (näheres dazu siehe Kapitel 5.7). Mit Hilfe des sogenannten Dipolnetzteils (FuG HCV 2M-1000) kann ein Differenzpotential von $\Delta U = 1 \text{ kV}$ zwischen den beiden Dipolhälften erzeugt werden. Dies kann zur Untergrundreduktion verwendet werden, indem im Spektrometer gefangene geladene Teilchen durch entsprechende Potentialdifferenzen entfernt werden.

Zuletzt können die einzelnen Offsetpotentiale für die 46 Kanäle des Drahtelektrodensystems durch insgesamt 6 Offsetnetzgeräte mit je 8 Kanälen der Firma Iseg (EHS 8205P3) mit Spannungen von 0 bis +500 V erzeugt werden. Bevor die Anordnung der Netzgeräte und die Verschaltung innerhalb des HV-Schalschrankes im nächsten Unterkapitel beschrieben werden, sollen an dieser Stelle wesentliche Vorteile des Drahtelektrodensystems herausgestellt werden:

Im Messbetrieb wird das Potential der Drahtlagen negativer sein als der Spektrometertank, der von einem separaten Netzgerät ein um etwa 200 V positiveres Potential erhält. Dadurch gelangen Elektronen, die durch radioaktive Strahlung oder kosmische Myonen aus der Spektrometerwand emittiert werden, nicht in den Innenbereich des Spektrometers, da sie durch das negativere Potential reflektiert werden. Geladene Teilchen, die im Spektrometer durch ein Penningfallen gefangen sind, haben vor allem durch die Ionisierung von Restgasmolekülen einen negativen Einfluss auf den Untergrund des Experiments, der aufgrund der angestrebten Sensitivität möglichst gering sein muss. Der Untergrund durch geladene Teilchen kann außerdem durch die erläuterte Elektrodenkonfiguration signifikant reduziert werden, indem durch die verschiedenen Potentiale die Möglichkeit besteht, das elektrische Feld derartig zu

formen, dass Penningfallen vermieden werden.

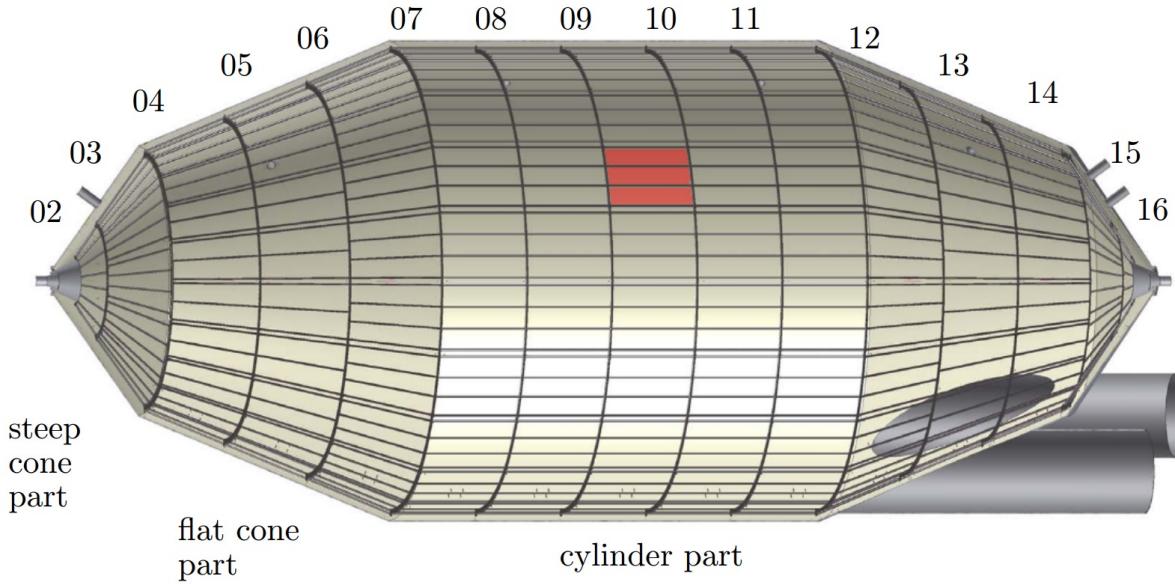


Abbildung 3.2: **Schematische Schnittansicht des Hauptspektrometers.** Zu sehen sind die Ringe 2 bis 16 des Elektrodensystems, die aus zweilagigen Drahtelektrodenmodulen bestehen. In rot ist der von einem Modul abgedeckte Bereich dargestellt [Zac09].



Abbildung 3.3: **Einzelnes Modul des Drahtelektrodensystems.** CAD-Zeichnung eines Moduls des zweilagigen Drahtelektrodensystems des Hauptspektrometers [Ben10].

3.3 Der HV-Schalschrank

Die Aufgabe des Hochspannungsschalschrankes ist hauptsächlich die Verteilung sämtlicher Hochspannungen des Hauptspektrometers auf die entsprechenden Kanäle und größtenteils deren Erzeugung. An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über das Konzept der Hochspannungsverteilung gegeben werden. Für eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise sei auf [Ros11] verwiesen.

In Abbildung 3.4 ist der Aufbau des HV-Schranks schematisch dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung sind die beiden Präzisionsnetzgeräte gezeigt, die den Tank bzw. die Drahtelektrode versorgen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, ist das Netzgerät für das Tankpotential direkt mit dem Gehäuse des HV-Schranks verbunden, sodass alle Komponenten innerhalb des Schrankes diese -18,4 kV als Bezugspotential besitzen und entsprechend auf diesem elektrischen Potential betrieben werden. Das Drahtelektrodenpotential wird über Hochspannungskabel in den HV-Schrank und in den 0 V-Eingang des Dipolnetzgeräts geführt. Dieses besitzt zwei Ausgänge, die einzeln mit einer zusätzlichen Offsetspannung von -1 kV betrieben werden können. Am jeweils anderen Ausgang liegt das ursprüngliche Potential des Netzgeräts vor dem Dipolnetzteil vor. Die beiden Ausgänge führen zu zwei isolierten Bereichen (je einer pro Dipol) innerhalb des HV-Schranks, in denen die Iseg-Netzgeräte zur Offsetspannung der Drahtelektrode installiert sind. Es gibt pro Dipol drei Offset-Netzgeräte mit je acht unabhängigen Ausgangskanälen mit Spannungen von 0 bis +500 V. Das resultierende Potential eines bestimmten Rings bzw. einer bestimmten Drahtlage setzt sich insgesamt also aus dem Grundpotential zur Versorgung der Drahtelektrode durch das Netzgerät HCP 70M-35000, dem Potential des Dipolnetzgeräts und den einzelnen Offset-Spannungen zusammen.

An dieser Stelle soll kurz die Frage der Spannungsmessung diskutiert werden. Generell gibt es die interne Spannungsmessung der Netzgeräte, die allerdings nicht sehr genau ist. Innerhalb des isolierten Bereichs des HV-Schranks ist für präzisere Messungen ein digitales Voltmeter installiert, mit dem die Spannung der Offset-Module bestimmt werden kann. Da es sich um mehrere Kanäle handelt, kann mit Hilfe eines Multiplexers jeweils ein Kanal zur Spannungsmessung ausgewählt werden. Das Grundpotential der Drahtelektrode ist wie bereits erwähnt von entscheidender Bedeutung und wird deshalb mit einem der KATRIN Präzisions-Hochspannungsteiler gemessen. Dadurch lässt sich die an der gesamten Elektrode anliegende Spannung mit der erforderlichen Präzision messen.

Die Zuordnung der einzelnen Spannungen auf die jeweiligen Ringe bzw. Drahtlagen erfolgt mit Hilfe des sogenannten Patch-Panels, welches ebenfalls im isolierten Bereich des HV-Schranks installiert ist. Dabei handelt es sich um eine Matrix aus Audiosteckern und den entsprechenden Buchsen, bei der jede Zeile mit einem Kanal der Offset-Netzgeräte und jede Spalte mit einem Kanal der Drahtelektrode verbunden ist. Dadurch lassen sich die einzelnen Ringe und Drahtlagen sowohl alle mit einem unterschiedlichen, wie auch mit dem selben Potential verbinden. Vom Patch-Panel wird die Hochspannung über eine Schutzschaltung (Details zur Schutzschaltung werden in Kapitel 4.3.2 Abb. 4.10 gezeigt), die den HV-Schrank bei Entladungen innerhalb des Spektrometers schützen soll, auf die Drahtelektrode geleitet. Außerdem befinden sich im isolierten Bereich ein PXI-System von National Instruments, mit dem das System über die sogenannten Slow-Control gesteuert wird, ein digitales Oszilloskop und das System zur automatischen Kapazitätsmessung, welches in Kapitel 4.3 beschrieben wird.

Die Spannungsversorgung aller Geräte innerhalb des HV-Schranks erfolgt über mehrere DC/DC-Wandler, die im nicht isolierten Bereich installiert sind. Zuletzt ist dort noch ein weiteres Netzgerät (ISEG NHQ 226-L) zur Versorgung der Anti-Penning-Elektroden installiert, welches bipolare Spannungen bis 6 kV erzeugen kann.

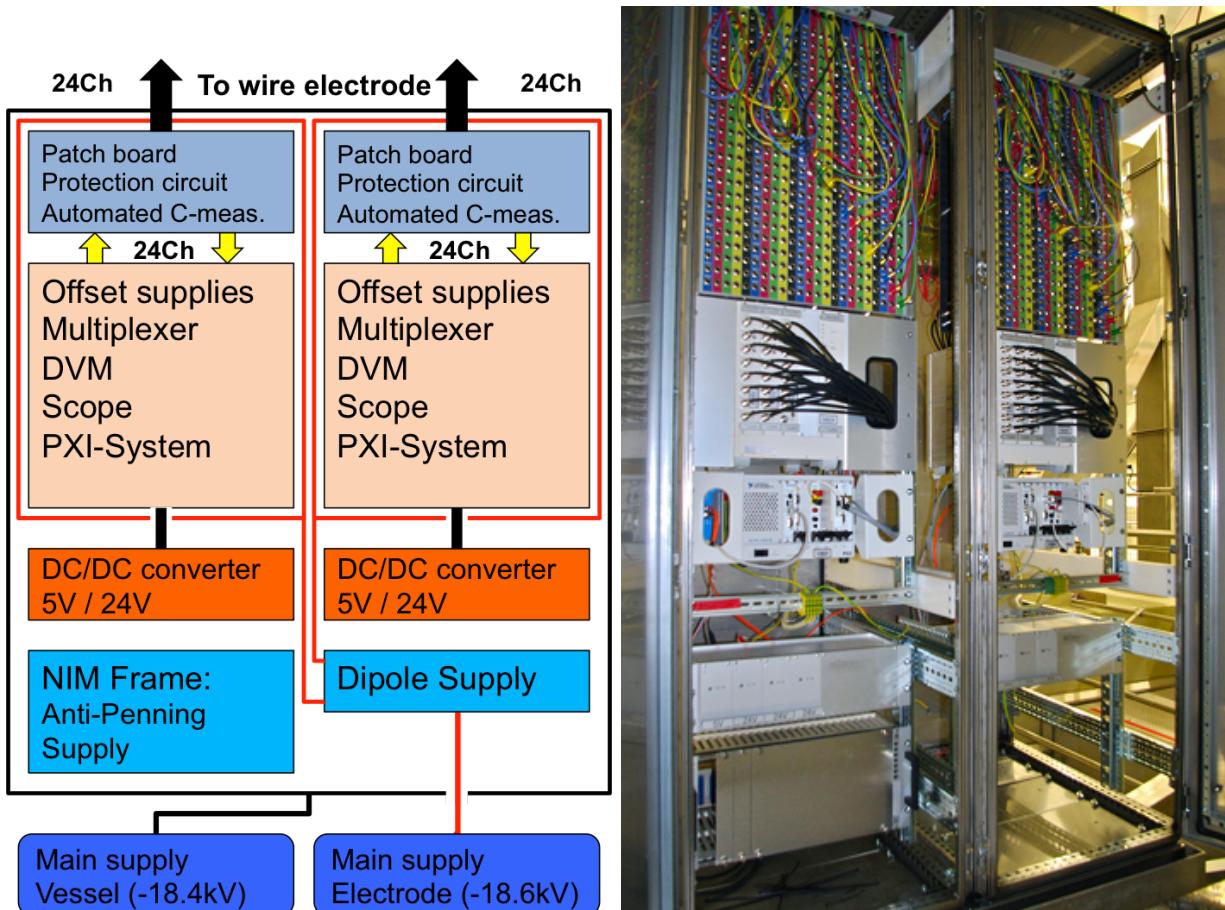


Abbildung 3.4: **Der Hochspannungsverteilerschrank.** Links: schematische Darstellung der einzelnen Komponenten und der verschiedenen Spannungen. Zur Erzeugung des Tank- (schwarz) und des Drahtelektrodenpotentials (rot) werden zwei separate Netzgeräte verwendet. Das Potential der einzelnen Kanäle der Drahtelektrode kann durch Netzgeräte innerhalb des HV-Schranks verändert werden. Dazu stehen das Dipolnetzgerät und mehrere Offset-Netzgeräte zur Verfügung. Außerdem befinden sich im isolierten Bereich das PXI-System zur Steuerung aller Komponenten, das System zur automatischen Kapazitätsmessung (siehe Kapitel 4.3), sowie ein Voltmeter und ein Oszilloskop. Die Spannungsversorgung der Geräte erfolgt über DC/DC-Wandler. Die Verteilung aller Spannungen auf die Kanäle des Drahtelektrodensystems erfolgt mit Hilfe des Patch-Panels. Rechts: Foto des montierten Schalschrankes (Ost- und Westseite des Dipols) am Hauptspektrometer. Im oberen Teil des Schrankes ist jeweils das Patch-Panel zu erkennen. [Bau13a]

3.4 Hochspannungsversorgung der Photoelektronenquelle

Während der ersten Inbetriebnahme der Spektrometer-Detektor-Sektion (SDS) wurde im Rahmen von [Han13a] eine winkelselektive Photoelektronenquelle an die Quellseite des Hauptspektrometers montiert, um Transmissionseigenschaften des Systems zu untersuchen. Die Photoelektronenquelle ist an einem Manipulator montiert, mit dem verschiedene Positionen und unterschiedliche Winkel angefahren werden können. Dadurch kann der Eintritt der Elektronen ins Spektrometer variiert werden, sodass sie auf verschiedenen Feldlinien zum Detektor gelangen.

Die Quelle besteht aus einer mit Silber bedampften optischen Faser, in die ein UV-Laser bzw. eine UV-Diode eingekoppelt wird. Die Faser ist mit einer Edelstahl-Rückplatte verbunden, an die ein negatives Startpotential U_{start} angelegt wird (siehe Abbildung 3.5 oben links). Mit Hilfe einer zweiten Edelstahl-Platte, die sich auf einem positiveren Beschleunigungspotential U_{acc} befindet und die eine Blende besitzt, wird ein gerichteter Photoelektronenstrahl erzeugt. Der Aufbau ist mit einem geerdeten Metallgehäuse umgeben. Die Spannungsversorgung des Systems erfolgt durch den HV-Schalschrank nach dem in Abbildung 3.5 dargestellten Prinzip und wurde nach dem in [Han13b] vorgeschlagenen Konzept im Rahmen dieser Arbeit technisch am Hauptspektrometer realisiert.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben gibt es im HV-Schrank zwei grundlegende Potentiale - das der Drahtelektrode U_{wire} und das des Tanks U_{vessel} - die durch zwei separate Netzgeräte erzeugt werden. Während der Inbetriebnahme des Systems wurde nur ein Netzgerät (FuG HCN 140M-35000) zur Versorgung beider Systeme verwendet, sodass $U_{wire} = U_{vessel}$ ist. Dieses Potential wird als Startspannung U_{start} der Photoelektronen genutzt, sodass die Elektronen mit dem gleichen Potential beschleunigt werden, welches das Retardierungspotential darstellt. Die Nutzung einer einzigen Quelle zur Spannungsversorgung von Hauptspektrometer und Photoelektronenquelle hat den Vorteil, dass alle Fluktuationen des Retardierungspotentials gleichermaßen zu entsprechenden Änderungen der Elektronenenergie führen. Somit ist sichergestellt, dass Spannungsschwankungen der Versorgung keinen Einfluss auf die Transmission der Elektronen haben.

Außerdem kann mit Hilfe eines Kanals der Offset-Netzgeräte die Startspannung um einen positiven Betrag verändert werden, sodass ein Energiebereich an der Grenze zwischen Transmission und Reflexion des Spektrometers untersucht werden kann. Da diese Netzgeräte nur Spannungen von 0 bis +500 V erzeugen können, wurde eine Batteriebox (siehe Abbildung 6.7 im Anhang) installiert, in der zehn 9 V Batterien so verschaltet sind, dass eine permanente Offset-Spannung von etwa -83 V erzeugt wird, um die negative Seite der Grenzenergie analysieren zu können. Die genaue Messung der Offset-Spannung erfolgt mit Hilfe des im HV-Schrank installierten Digitalvoltmeters analog zur Spannungsbestimmung der einzelnen Drahtelektroden durch die Auswahl des Kanals mit Hilfe des Multiplexers.

Neben der Startspannung werden die Elektronen mit der Beschleunigungsspannung U_{acc} beschleunigt, die mit dem Anti-Penning-Netzgerät NHQ 226-L erzeugt wird. Durch dieses kann die Beschleunigungsspannung auf einen um bis zu 6 kV positiveren Offset gegenüber der Startspannung eingestellt werden.

Zum Schutz des HV-Schranks vor Spannungsspitzen und Entladungen, die durch Überschläge oder Penningfallen-Entladungen innerhalb des Spektrometers entstehen können, sind zwi-

schen dem HV-Schrank und der Photoelektronenquelle Widerstände zur Strombegrenzung erforderlich. Dazu wurden jeweils zwei $100\text{ k}\Omega$ -Widerstände² zu $50\text{ k}\Omega$ -Widerständen parallel geschaltet (siehe Abbildung 6.6 im Anhang). Einerseits muss der Widerstand groß genug sein, um einen möglichen Entladestrom zu begrenzen. Andererseits darf er nicht zu groß sein, da ansonsten ein zu großer Teil der Spannung darüber abfallen würden.

Eine weitere Anforderung ist, dass das Spektrometer und die Photoelektronenquelle ohne Änderungen am Aufbau elektrisch entkoppelbar sein müssen. Dazu wurde eine *Plugbox* (siehe Abbildung 6.8 im Anhang) installiert, mit der die Elektronenquelle vom HV-Schrank getrennt und mit dem Schutzerdpotential verbunden werden kann.

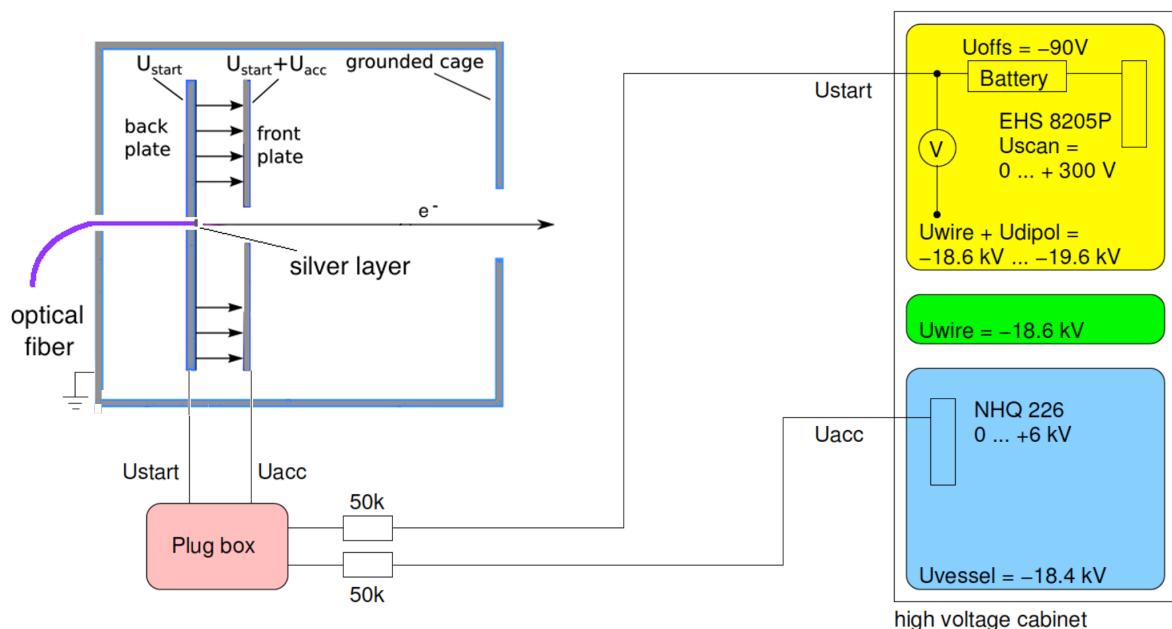


Abbildung 3.5: **Schematische Übersicht des HV-Konzepts der Photoelektronenquelle.** Oben links ist der schematische Aufbau der Photoelektronenquelle gezeigt. Durch eine mit Silber bedampfte optische Faser werden Photoelektronen erzeugt, die durch ein Beschleunigungspotential beschleunigt werden. Außerdem ist die Hochspannungsversorgung des Systems aus dem HV-Schalschrank abgebildet. Zwischen der Elektronenquelle und dem HV-Schrank sind zwei $50\text{ k}\Omega$ Widerstände zum Schutz des Schalschrankes von Entladesträumen und eine Plugbox zur Entkopplung des Systems vom Hauptspektrometer installiert [Han13b].

²Es handelt sich um $100\text{ k}\Omega \pm 5\%$ Widerstände, die für Dauerspannungen bis 35 kV und Spitzenspannungen von 70 kV für 5 Minuten bei einer Leistung von 10 W ausgelegt sind.

3.5 Erste Hochspannungsmessungen am Hauptspektrometer

Im Rahmen der SDS-Inbetriebnahme wurde unter anderem das Hochspannungssystem am Hauptspektrometer im Sommer 2013 erstmals durch den *HV-Task*, welcher sich aus Mitarbeitern des Instituts für Kernphysik in Münster und des KIT in Karlsruhe zusammensetzt, in Betrieb genommen. Die gesamte Messphase erstreckte sich über mehrere Monate, wobei unter anderem unterschiedliche Untergrundmessungen mit Hochspannung durchgeführt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Kooperation mit dem KIT die entsprechende Hardware vorbereitet und der HV-Messbetrieb teilweise begleitet. Eine umfassende Beschreibung und Analyse der während der SDS-Inbetriebnahme durchgeführten Messungen ist in [Fra14] gegeben. Im Folgenden werden einige Messungen gezeigt, welche die Funktionalität der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Komponenten des HV-Systems während der Messphase zeigen sollen.

Während der in dieser Zeit durchgeführten Messungen wurden verschiedene Potentialkonfigurationen des Drahtelektrodensystems getestet, wobei die Präzisionsgeräte (Präzisionsnetzgeräte und Spannungsteiler) zu ihrem Schutz nicht am bis dahin ungetesteten System verwendet wurden. Beide Teile des Hauptspektrometers, der Tank und die Drahtelektrode, wurden mit nur einem Netzgerät mit einer maximalen Ausgangsspannung von -35 kV versorgt. Sowohl das Dipolnetzteil, wie auch die Offset-Netzgeräte der einzelnen Drahtelektrodenkanäle waren während der Inbetriebnahme in Verwendung. Das Anti-Penning-Netzgeräte wurde zur Erzeugung der Beschleunigungsspannung der Photoelektronenquelle verwendet.

Vor der ersten Inbetriebnahme der Hochspannung am Hauptspektrometer wurde ein Isolationstest durchgeführt, um sicherzustellen, dass es nicht zu Überschlägen am Spektrometer bzw. Leckströmen kommt. Dazu wurde ein METRISO Isolationsmessgerät mit interner Spannungsquelle verwendet, mit dem die Spannung in kleinen Schritten über mehrere Minuten nach einer vorher erstellten Prozedur bis auf etwa 5 kV auf den Spektrometertank und die innere Drahtelektrode gegeben wurde. Dabei wurde der Strom überwacht. Der Widerstand des Spektrometers gegen die Schutzerde betrug bei 5 kV mehrere 10 G Ω , sodass das Spektrometer nach dem erfolgreichen Isolationstest erstmals mit Hochspannung betrieben werden konnte. Während dieses Isolationstests und während das Spektrometer das erste Mal auf ein Potential von -18,6 kV gelegt wurde, befand sich aus Sicherheitsgründen eine Metallplatte vor dem Detektor, mit dem die Zählrate der Untergrundelektronen nach dem Prinzip des Faraday-Detektors grob bestimmt werden kann. Dadurch wurde ausgeschlossen, dass der Detektor von einem zu hohen Elektronenstrom, verursacht beispielsweise durch Konditionierungseffekte, beschädigt wird.

Nachdem sichergestellt wurde, dass im Hochspannungsbetrieb eine für den Detektor ungefährliche Elektronenrate auftritt, wurde das Spektrometer erstmalig mit zugeschaltetem Detektor auf Hochspannung gelegt (Tank und Drahtelektrode auf gleichem Potential). Das Hochfahren der Spannung, sowie die jeweilige Zählrate des Detektors ist in Abbildung 3.6 gezeigt.

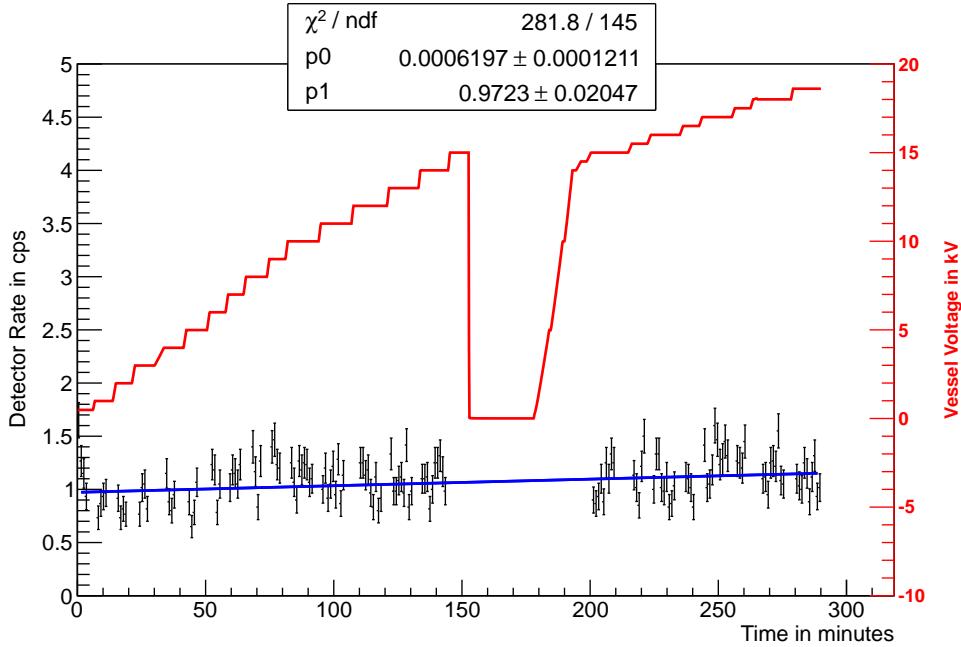


Abbildung 3.6: **Erste Hochspannungsmessung am Hauptspektrometer.** Gezeigt ist der Spannungsverlauf des Hauptspektrometers (Tank und Drahtelektrode) über mehrere Stunden (rot), sowie die währenddessen mit dem Detektor aufgezeichnete Zählrate in 1/s. Die Datenaufnahme wurde während der Spannungsänderungen gestoppt [Elo13c].

Die einzelnen Spannungen wurden für etwa fünf bis zehn Minuten konstant gehalten, wobei die Zählrate am Detektor beobachtet wurde. Nach etwa 150 Minuten und bei einer Spannung von 15 kV wurde das Netzgerät zu Testzwecken durch eine automatische Sicherung herunter gefahren. Nach einer Überprüfung des Systems wurde der Test anschließend bis zu einer Spannung von -18,6 kV fortgesetzt. Die Untergrundrate hängt, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist, nicht signifikant von der am Spektrometer anliegenden Spannung ab und liegt bei etwa 1 Hz. Allerdings muss der Zusammenhang durch weitere Messungen genauer untersucht werden, da es sich hier um einen ersten Test handelt. Außerdem muss beachtet werden, dass unmittelbar vor diesem Test bereits höhere Spannungen an das Spektrometer angelegt wurden, sodass möglicherweise bereits eine Konditionierung des Systems stattgefunden hat.

Abbildung 3.7 zeigt das aufgenommene Spektrum einer der ersten Hochspannungsmessungen am Hauptspektrometer. Die detektieren Elektronen wurden durch Feldemissionen und durch ionisierende Strahlung erzeugt, die Photoelektronenquelle war während dieser Messung nicht in Betrieb. Das Spektrum zeigt einen Peak bei einer Energie von 25,7 keV, was bei einer Spektrometerspannung von -18,6 kV und einer Nachbeschleunigung von etwa 10 kV im Rahmen der Unsicherheit erwartet wird.

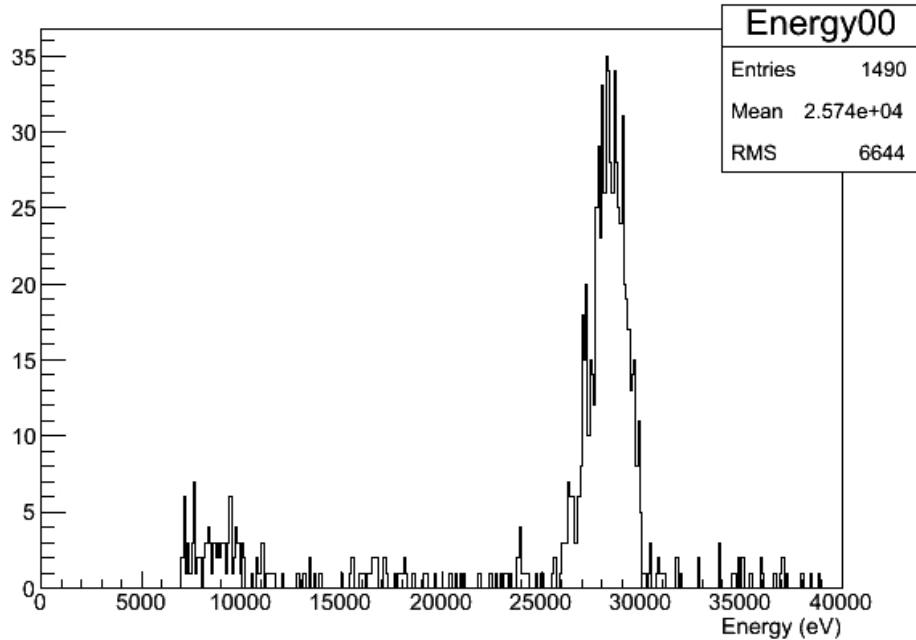


Abbildung 3.7: **Energiespektrum einer Hochspannungsmessung am Hauptspektrometer.** Analyse einer der ersten Hochspannungsmessungen des Hauptspektrometers. Das Tank- und Elektrodenpotential betrug -18,6 kV und die Nachbeschleunigungselektrode wurde auf 10 kV eingestellt [Elo13b].

Um die Funktionalität des winkelselektiven Photoelektrodensystems zu überprüfen, wurden vor den ersten Hochspannungsmessungen Tests mit Elektrodenspannungen unter 100 V durch die Offset-Netzgeräte bzw. teilweise auch ohne Spannung auf dem Elektrodensystem durchgeführt. Abbildung 3.8 zeigt eine Aufnahme des Detektors, bei der einzelne Pixel gezielt mit der Photoelektronenquelle angefahren wurden. Die unterschiedlichen Farben stellen verschiedene Elektronenraten dar, die mit dem Detektor bei den jeweiligen Pixeln gemessen wurden. Je nach Eintrittsort und Winkel der Elektronen ins Hauptspektrometer werden diese auf unterschiedlichen magnetischen Feldlinien zum Detektor geführt.

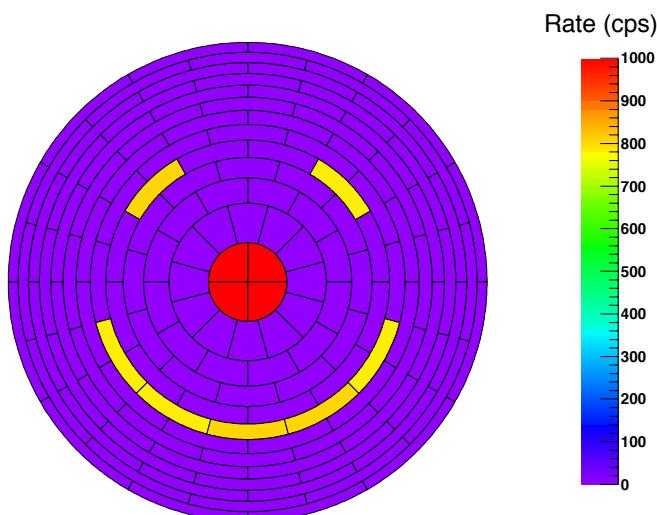


Abbildung 3.8: **Detektormessung von Elektronen der Photoelektronenquelle.** Mit der Quelle wurden einzelne Pixel des Detektors gezielt angefahren und die Messung der Zählrate wurde für kurze Zeit gestartet. Während die Position der Quelle verändert wurde, wurde die Messung am Detektor gestoppt, sodass nur Daten bei der gewünschten Position bzw. den entsprechenden Pixeln aufgenommen wurden. Das Hauptspektrometer und das Elektrodensystem besaßen während der Messung ein Potential von 0 V. Das Startpotential der Elektronen betrug -83 V [Elo13a].

Das Hochspannungssystem des Hauptspektrometers wurde zu Beginn der Inbetriebnahme des Spektrometer-Detektor-Systems erfolgreich in Betrieb genommen und während der Mesphase verwendet, wodurch wesentliche Eigenschaften des Systems untersucht werden und ein wichtiger Teil des Aufbau des KATRIN-Experiments getestet werden konnte. Tiefergehende Messungen und Analysen des Systems sind bereits für den Sommer 2014 geplant und befinden sich in Vorbereitung.

KAPITEL 4

KAPAZITÄTSMESSUNG DES DRAHTELEKTRODENSYSTEMS

4.1 Motivation

Das Drahtelektrodensystem des Hauptspektrometers stellt für KATRIN eine wichtige Komponente dar, deren intakte Beschaffenheit für den Betrieb essenziell ist. Um die Integrität des Systems zu überwachen, gibt es mehrere Vorgehensweisen. Durch Spannungs- bzw. Widerstandsmessungen lässt sich das System beispielsweise auf Kurzschlüsse untersuchen. Mit Hilfe der winkelselektiven Photoelektronenquelle können gerissene Drähte und fehlerhafte Geometrien des Systems ausgemacht werden. In Zusammenarbeit mit [Bau13a] wurden im Rahmen dieser Arbeit Kapazitätsmessungen des Drahtelektrodensystems durchgeführt, die neben den beiden oben genannten eine weitere Methode zur Überwachung der Integrität darstellen. Mit Hilfe dieser Überwachungssysteme wurde untersucht, ob die Drahtelektrode durch äußere experimentelle Einflüsse, wie beispielsweise das Ausheizen des Sepktrometers über mehrere Wochen bei Temperaturen bis 300° C, beeinträchtigt wird.

Der Aufbau des Drahtelektrodensystems führt prinzipiell zu drei messbaren Ersatzkapazitäten (vgl. Abbildung 4.1): eine für die innere Drahtlage eines Rings, eine für die äußere Drahtlage und eine, bei der die Kapazität zwischen den beiden Drahtlagen bestimmt wird. Für das Hauptspektrometer ergibt sich eine Gesamtzahl von 66 messbaren Kapazitäten, die sich aus elf der insgesamt 16 Ringe (die fünf Ringe des Zentralteils sind wie in Kapitel 3.2 beschrieben elektrisch verbunden) für beide Dipole mit jeweils drei Kapazitäten pro Ring zusammensetzt. Um das Prinzip der Integritätsüberwachung mit Hilfe einer Kapazitätsmessung zu testen, wurden zunächst manuelle Messungen mit einem LCR-Meter¹ des Typs Agilent U1732C durchgeführt. Dabei wurde die Kapazität sowohl direkt am Spektrometertank an den HV-Zuführungen, als auch im HV-Schalschrank gemessen, um die Möglichkeit eines dort fest installierten automatisierten Messsystems zu untersuchen (siehe Kapitel 4.3).

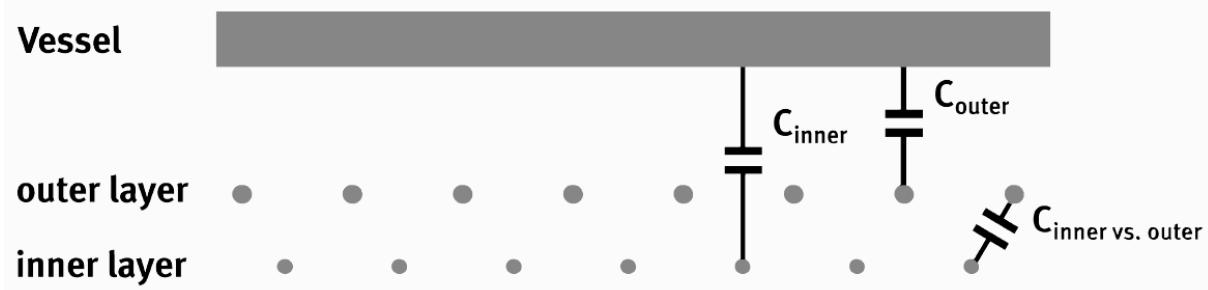


Abbildung 4.1: **Ersatzkapazitäten des Drahtelektrodensystems.** Gezeigt sind die drei Ersatzkapazitäten, die zwischen den beiden Drahtlagen und jeweils zwischen dem Tank und einer Drahtlage gemessen werden können [Bau13a].

¹Handgerät zur Messung von Induktivität, Kapazität und Widerstand

4.2 Manuelle Kapazitätsmessung

Um die Kapazität der einzelnen Ringe manuell messen zu können, musste das bestehende HV-System modifiziert werden. Für die Messungen einer bestimmten Kapazität werden bis auf die zu messende Drahtlage alle Ringe sowie das Spektrometer selbst mit dem Erdpotential verbunden, um elektrische Störungen zu vermeiden und ein definiertes Bezugspotential für jede Messung zu erhalten. Da die einzelnen Kanäle der Drahtelektrode über entsprechende Schaltungen fest mit den Netzgeräten im Schaltschrank verbunden sind, musste diese Verbindung vor Beginn der Messungen getrennt werden.

Mit Hilfe des LCR-Meters kann die Kapazität in den drei Frequenzeinstellungen 100 Hz, 1 kHz und 10 kHz bestimmt werden. Da Messungen der selben Kapazität, durchgeführt mit verschiedenen Frequenzen, im Rahmen der Messunsicherheit gleiche Ergebnisse lieferten, werden hier lediglich die mit 1 kHz aufgenommenen Daten präsentiert. Mit dem Messgerät wurde außerdem die Phase zwischen Strom und Spannung bei den einzelnen Kapazitäten gemessen. Diese lag in allen Fällen zwischen $-89,8^\circ$ und $-90,0^\circ$, was bei einem kapazitiven System erwartet wird. Vor jeder Messung wurde das Gerät außerdem intern durch eine Offsetmessung korrigiert, sodass die Kapazitäten der Messleitungen abgezogen wurden.

Bei den Messungen im Schaltschrank muss berücksichtigt werden, dass die gemessene Kapazität die Summe der Drahtelektrodenkapazität und der Kabelkapazität zwischen dem Schaltschrank und der HV-Zuführung am Spektrometer darstellt. Um dies zu überprüfen wurde bei den Messungen direkt am Tank zusätzlich die Kapazität des Kabels zum Schaltschrank gemessen. Die relative Abweichung²

$$\Delta C_{rel} = \frac{C_1 - C_2}{C_1}. \quad (4.1)$$

der beiden Messpositionen ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die Unsicherheit der relativen Abweichungen ΔC_{rel} ergibt sich nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu

$$U(\Delta C_{rel}) = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial C_1} \frac{C_1 - C_2}{C_1} \Delta C_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial C_2} \frac{C_1 - C_2}{C_1} \Delta C_2 \right)^2} \quad (4.2)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1^2} \Delta C_1 \right)^2 + \left(\frac{1}{C_1} \Delta C_2 \right)^2} \quad (4.3)$$

$$= \frac{1}{C_1} \sqrt{\left(\frac{C_2}{C_1} \Delta C_1 \right)^2 + (\Delta C_2)^2} \quad (4.4)$$

mit den jeweils am Spektrometer bzw. im Schaltschrank gemessenen Kapazitäten C_1 und C_2 . Die Unsicherheit der Messung liegt laut Hersteller des LCR-Meters bei $\Delta C = 0,2\% + 3$ auf der letzten Stelle. Dies führt im Mittel zu einer Unsicherheit von $U(\Delta C_{rel}) \approx 0,4\%$. Die bestimmten relativen Abweichungen liegen überwiegend unter 0,1%, sodass im Rahmen

²Die relative Abweichung von Messungen wird in Kapitel 4 und 5 dieser Arbeit häufig analysiert. Die Berechnung bzw. die Bestimmung der Unsicherheit erfolgt, wenn nicht anders angegeben, nach den Gleichungen 4.1 und 4.2.

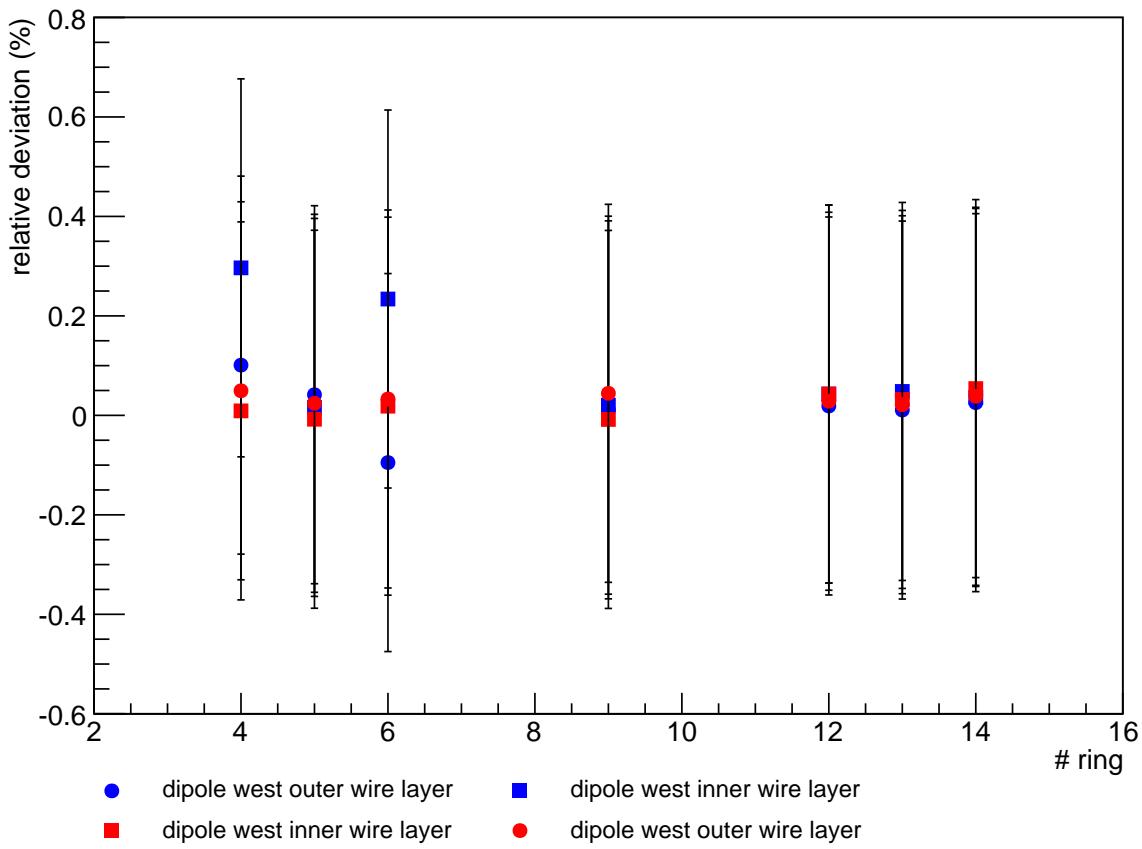


Abbildung 4.2: Vergleich der Messungen am Spektrometer und am HV-Schrank.

Gezeigt sind die relativen Abweichungen der jeweils am Spektrometer (unter Berücksichtigung der Kabelkapazität zum HV-Schrank) und im HV-Schalschrank gemessenen Kapazitäten für die einzelnen Ringe. Da die Ringe 7 bis 11 verbunden sind, wurde der entsprechende Wert bei Ring 9 eingetragen. Die Messungen wurden für beide Dipole sowohl für die innere, als auch für die äußere Drahtlage durchgeführt. Die Ringe 2, 3, 15 und 16 konnten nicht am Spektrometer vermessen werden.

der Messunsicherheit die an beiden Positionen bestimmten Werte übereinstimmen, was in diesem Fall erwartet wurde, da lediglich die Messposition innerhalb der Verschaltung geändert wurde. Weiterhin ist die relative Genauigkeit beider Messungen besser als 0,4%, was die absolute Unsicherheit des Messgeräts angibt.

Im Folgenden sollen die wesentlichen Ergebnisse der Messungen gezeigt werden, wobei für eine vollständige Aufführung aller Messwerte auf [Bau13b] verwiesen sei. Die Kapazität aller Ringe und Drahtlagen wurde mehrfach gemessen, um die Reproduzierbarkeit der Methode zu testen. Die Absolutwerte einer Messung aller drei Ersatzkapazitäten, durchgeführt im HV-Schalschrank an Dipol 2 (Ost), sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Die einzelnen Kapazitäten liegen in der Größenordnung einiger nF, wobei sich die größte Kapazität jeweils für die äußere Drahtlage ergibt. Diese ist etwa 50% größer als der Wert für die innere Drahtlage bzw. der Drahtlagen zueinander, was aufgrund der größeren Fläche

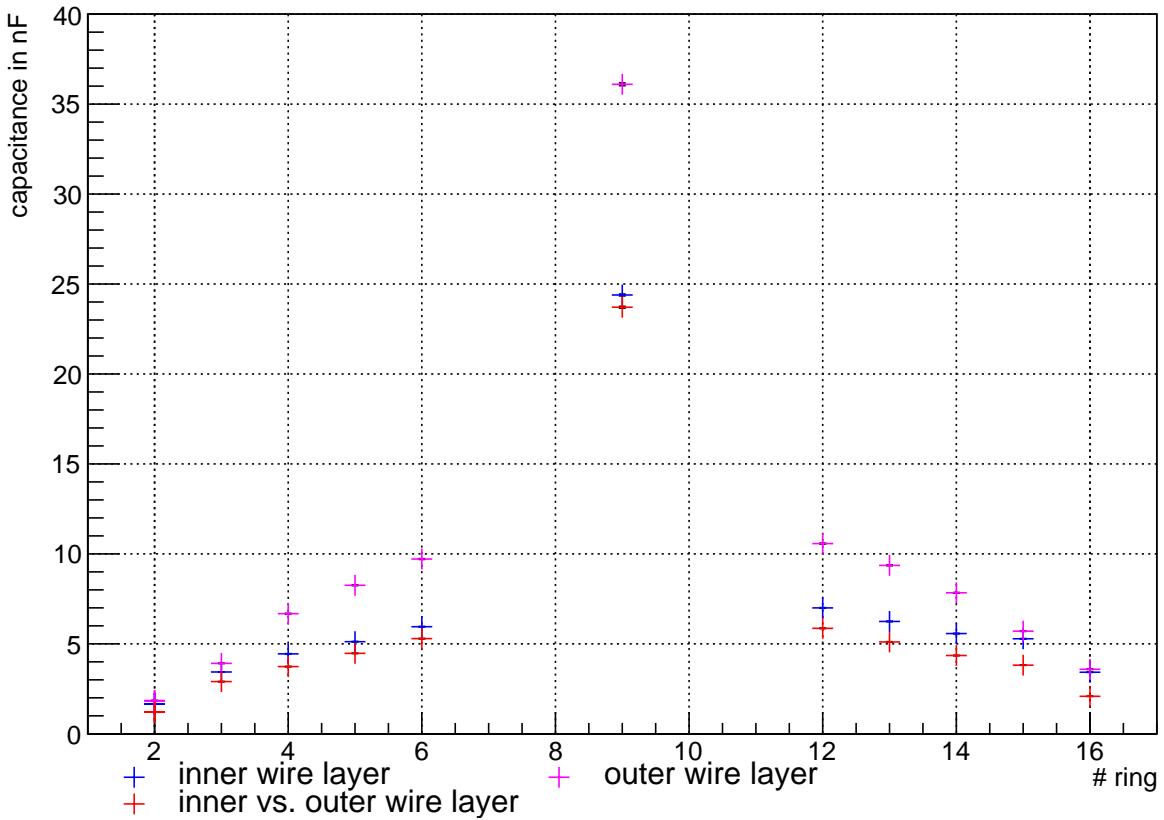


Abbildung 4.3: **Manuell gemessene Kapazität der Drahtelektrode.** Dargestellt sind die Messungen aller Ringe an Dipol 2 (Ost) für die innere, die äußere sowie die innere gegen die äußere Drahtlage. Die Kapazität der verbundenen Ringe 7 bis 11 ist bei Ring 9 eingetragen. Die Messung wurde am HV-Schalschrank durchgeführt und beinhaltet somit auch die Kapazität der Zuleitungskabel. Die einzelnen Messwerte sind in Tabelle 6 im Anhang aufgeführt.

und aufgrund der Tatsache, dass die äußere Drahtlage mit der Modulhalterung elektrisch verbunden ist, erwartet wird. Außerdem ist die innere Drahtlage während der Messung der Kapazität der äußeren Drahtlage elektrisch mit dem Tank verbunden, sodass die Kapazität gewissermaßen beidseitig gegen das Tankpotential gemessen wird. Die bestimmten Kapazitäten werden von Ring 2 ausgehen zunehmend größer bis zu einem deutlich höheren Wert im Zentralteil mit den zusammenhängenden Elektrodenringen 7 bis 11. Dies entspricht ebenfalls den Erwartungen, da die Größe der Ringe in Richtung des Zentralteils zunimmt. Dadurch wird die Drahtelektrodenfläche pro Ring größer, was eine höhere Kapazität zur Folge hat. Der Zentralteil zeigt mit etwa

$$C_{7-11}^{inner} = (24,39 \pm 0,05) nF \quad (4.5)$$

$$C_{7-11}^{inner \text{ vs. } outer} = (23,71 \pm 0,05) nF \quad (4.6)$$

$$C_{7-11}^{outer} = (36,10 \pm 0,08) nF \quad (4.7)$$

die größte Kapazität, da dort die Ringgröße maximal ist und fünf Ringe zusammengeschaltet sind. Von Ring 12 bis Ring 16 nimmt die Kapazität wieder ab, da die Ringgröße analog zur

anderen Spektrometerseite abnimmt. Verglichen mit den Ringen 2 bis 6 ist die Kapazität leicht erhöht, was durch längere Kabel vom HV-Schalschrank zu den HV-Zuführungen erklärt werden kann. Der Unterschied zwischen Ring 2 und Ring 16 liegt für die äußere und für die innere Drahtlage bei etwa 1,8 nF. Für das verwendete RG58-Kabel ist laut Hersteller eine Kapazität von etwa 100 pF/m zu erwarten, sodass die Differenz der Kapazität einem 18 m langen Kabel entspricht, was aufgrund der Spektrometerlänge (ca. 20 m) realistisch erscheint.

Die in Abbildung 4.3 gezeigten Kapazitäten wurden an Dipol 2 (Ost) gemessen. Grundsätzlich werden für beide Dipolhälften die gleichen Kapazitätswerte erwartet, da der Aufbau des Elektrodensystems symmetrisch ist. Der Vergleich der Messung beider Dipole ist in Abbildung 4.4 gezeigt. Um den Einfluss unterschiedlicher Kabellängen vom HV-Schalschrank zu den HV-Zuführungen am Spektrometer auf die Messung zu verhindern, wurde die Kapazität in diesem Fall direkt an den HV-Ports gemessen. Die bestimmten Kapazitäten stimmen bis auf eine Ausnahme im Rahmen der Messunsicherheit für beide Dipole gut überein. Für Ring 16 ergibt sich eine Abweichung von etwa 1%, was möglicherweise auf eine unterschiedliche Verkabelung innerhalb des Spektrometers zurückzuführen ist. Da die Kapazitäten für diesen Ring zusammen mit Ring 2 am geringsten sind, führt eine mit den anderen Ringen vergleichbare absolute Abweichung dennoch zu einer größeren relativen Abweichung.

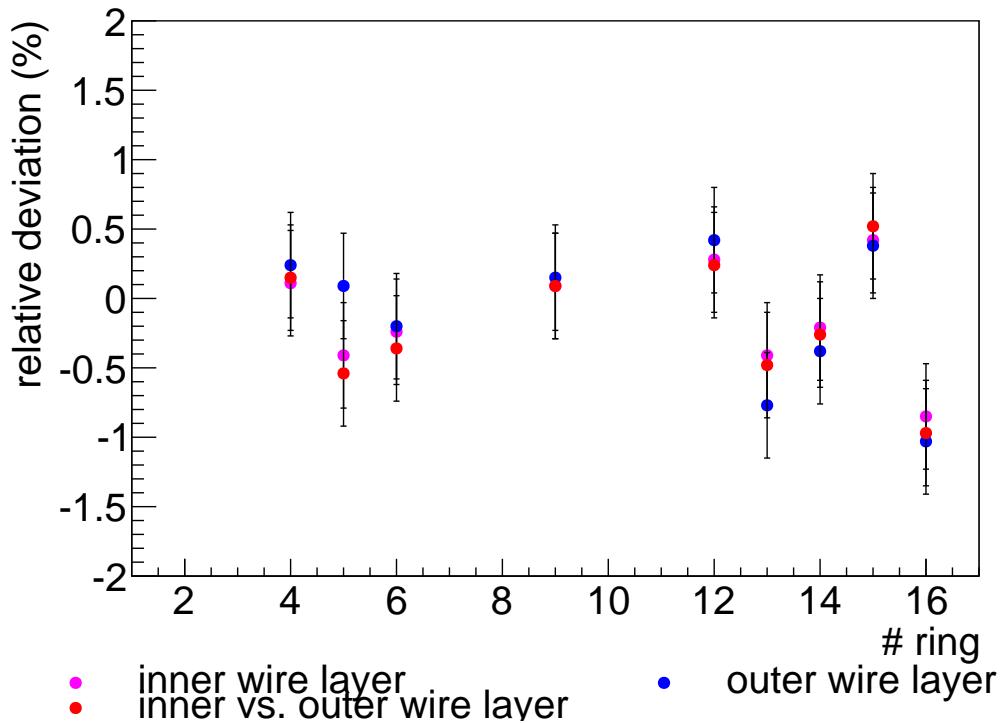


Abbildung 4.4: **Vergleich beider Dipole.** Vergleich der gemessenen Kapazitäten an beiden Dipolhälften für alle drei gemessenen Kapazitäten. Die Messung vom Zentralteil (Ring 7 bis 11) ist bei Ring 9 eingetragen. Die Messungen wurden direkt an den HV-Zuführungen am Spektometertank durchgeführt, wobei die Ringe 2 und 3 nicht am Tank vermessen werden konnten.

Um als zuverlässiges System zur Überwachung der Drahtelektrode geeignet zu sein, muss die Kapazitätsmessung der einzelnen Ringe zu reproduzierbaren Ergebnissen führen. Dies wurde untersucht, indem alle Kapazitäten an verschiedenen Tagen innerhalb einer Woche mehrfach gemessen wurden. Das Ergebnis ist als Histogramm der relativen Abweichungen der Messungen untereinander in Abbildung 4.5 dargestellt. Darin ist erkennbar, dass der größte Teil der relativen Abweichungen kleiner gleich $\pm 0,2\%$ ist. Damit liegen die Abweichungen innerhalb der systematischen Unsicherheit des Messgeräts.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Kapazitätsmessung zur Überwachung des Drahtelektrodensystems geeignet ist. Die Messungen der beiden Dipolhälften offenbarten wie erwartet keine signifikanten Unterschiede. Ebenso konnte die Kapazität innerhalb des HV-Schalschranken gemessen werden, was für eine Automatisierung der Messung erforderlich ist. Außerdem zeigen die an mehreren Tagen gemessenen Werte eine gute Reproduzierbarkeit im Rahmen der Unsicherheit des Messgerätes.

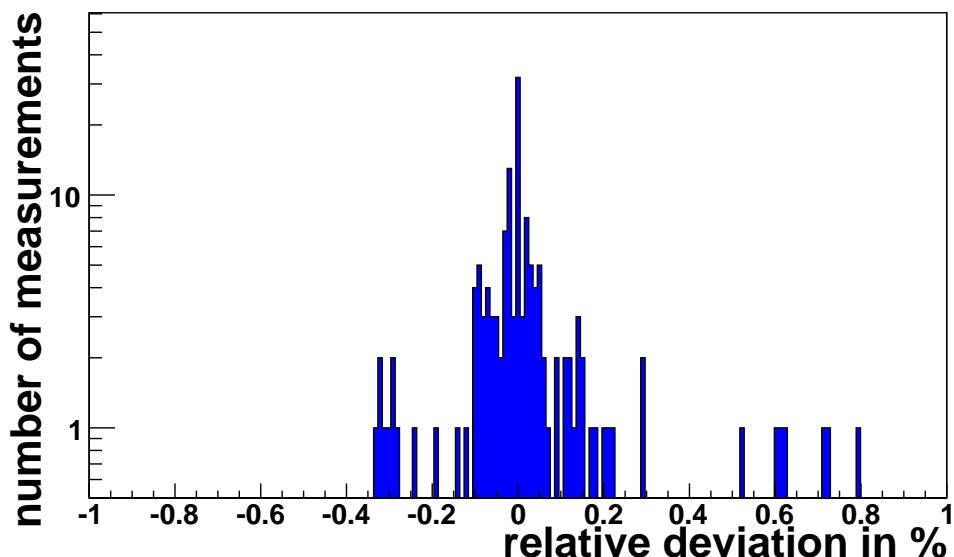


Abbildung 4.5: **Reproduzierbarkeit der Kapazitätsmessung.** Histogramm zur Analyse der Reproduzierbarkeit der manuellen Kapazitätsmessung. Dargestellt sind die relativen Abweichungen der mehrfach durchgeführten Messungen aller Kapazitäten für jede Drahtlage und an beiden Dipolen.

Während der SDS-Inbetriebnahme wurde das Hauptspektrometer ausgeheizt. Dabei wurde die Temperatur über mehrere Wochen auf etwa 300°C erhöht, dort ca. 8 Stunden gehalten und wieder über mehrere Wochen gesenkt. Bei der Größe des Spektrometers beträgt die thermische Ausdehnung Tanks etwa 12 cm Zentimeter, was nur dann den gleichen Wärmeausdehnungsverlauf hat, wenn überall thermisches Gleichgewicht herrscht und was einen kritischen Vorgang für das Drahtelektrodensystem darstellt. Um die Integrität der Drahtelektrode nach dem Ausheizen zu überprüfen, wurden die Kapazitäten nach dem Ausheizvorgang erneut gemessen und die Messwerte wurden mit den vor dem Ausheizen aufgenommenen Daten verglichen. Die relativen Abweichungen der Daten sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass es während des Ausheizens zu einigen anhaltenden Kurzschlüssen innerhalb des Drahtelektrodensystems gekommen ist. Dabei wurden sowohl

in einigen Fällen die innere und äußere Drahtlage verbunden (Ring 7 - 11 beider Dipole, Ring 14 Dipol West, Ring 5 und 6 Dipol Ost), wie auch benachbarte Ringe (Ring 5 und 6 beider Dipole). Ein Kurzschluss zum Tank ist nicht vorhanden. Die betroffenen Drahtlagen können nicht mit vorherigen Werten verglichen werden, da die entsprechenden Ersatzkapazitäten in diesem Zustand nicht messbar sind.

Die übrigen Kapazitäten weisen eine Tendenz zu niedrigeren Kapazitäten auf, was durch Änderungen der Verkabelung im HV-Schalschrank erklärt werden kann, die für die Vorbereitung der Installation des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung (siehe nächstes Kapitel) erforderlich waren. Die relativen Änderungen liegen in allen Fällen unter 1%, sodass abgesehen von den Kurzschlüssen einzelner Elektrodenlagen keine signifikante Veränderung des Drahtelektrodensystems durch das Ausheizen festgestellt werden kann. Dies deutet darauf hin, dass abgesehen von den Kurzschlüssen keine Schäden am Drahtelektrodensystem vorliegen.

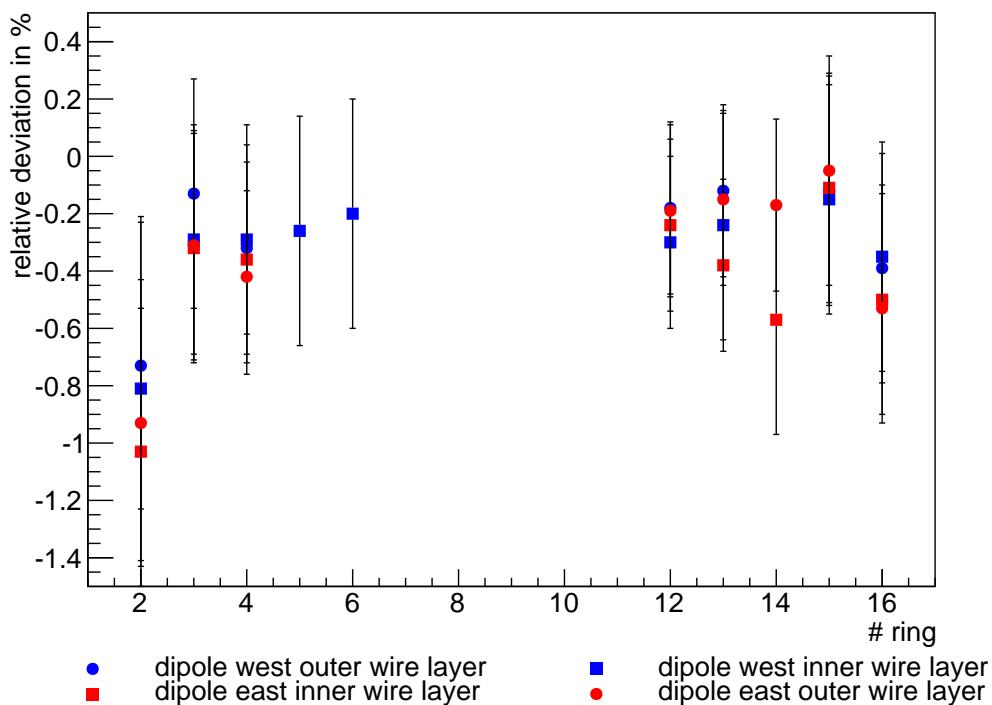


Abbildung 4.6: **Vergleich der Kapazitäten vor und nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers.** Aufgeführt sind die relativen Abweichungen der Kapazitäten, gemessen am HV-Schalschrank nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers (14.02.13), verglichen mit den Messungen vor dem Ausheizvorgang (08.11.12). Aufgrund von Kurzschlüssen der Drahtelektrode konnten nicht alle Kapazitäten gemessen werden.

4.3 Automatische Kapazitätsmessung

Da die im vorigen Kapitel vorgestellten Kapazitätsmessungen Hardware-Änderungen am HV-System erfordern und sehr zeitaufwändig sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit und in Zusammenarbeit mit [Bau13a] ein System zur Automatisierung entwickelt und im HV-Schaltschrank installiert, sowie erste Testmessungen durchgeführt. Das grundlegende Prinzip besteht darin, eine Rechteckspannung an die Drahtelektrode anzulegen und das Lade- bzw. Entladeverhalten aufzunehmen. Die Zeitkonstante τ des exponentiellen Spannungsanstiegs bzw. -abfalls ist unter anderem abhängig von der Kapazität, sodass diese durch die Analyse der Daten bestimmt werden kann. Dieses Konzept bietet signifikante Vorteile gegenüber der manuellen Kapazitätsmessung. Nach dem einmaligen Einbau in den Drahtelektrodenschaltkreis sind vor den Messungen keine weiteren Umbaumaßnahmen mehr erforderlich, was bei allen Messungen zu den gleichen und reproduzierbaren Messbedingungen führt. Außerdem bietet die automatische Kapazitätsmessung eine große Zeittersparnis, da das komplette Drahtelektrodensystem in wenigen Minuten vermessen werden kann. Die manuelle Kapazitätsmessung nahm inklusive Hardwareänderungen mehrere Stunden in Anspruch, die beispielsweise während zukünftiger Messphasen nicht zur Verfügung stehen.

Zunächst soll eine genauere Beschreibung des physikalischen Hintergrunds sowie der technischen Realisierung erfolgen, bevor die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kontrollsoftware und die Kalibrierung des Systems vorgestellt werden. Abschließend werden die ersten Messreihen mit dem System gezeigt und mit der manuellen Kapazitätsmessung verglichen.

4.3.1 Theoretische Beschreibung

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben ergibt sich für jeden Ring des Drahtelektrodensystems eine messbare Kapazität C_W für die einzelnen Drahtlagen. Durch das Anlegen einer Rechteckspannung an diese Kapazität folgt die Spannung für den Lade- bzw. Entladevorgang eines Kondensators einem typischen exponentiellen Verlauf

$$U_{charge}(t) = a \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (4.8)$$

$$U_{discharge}(t) = a \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.9)$$

mit der Zeit t , einem konstanten Vorfaktor a und der Zeitkonstanten τ , nach der die Spannung über der Kapazität 63,2% der Ladespannung erreicht hat. Die Zeitkonstante ist dabei abhängig von einem Ladewiderstand R und der Kapazität C : $\tau = R \cdot C$. Der Spannungsverlauf wird mit Hilfe eines Oszilloskops aufgenommen, welches parallel zur Elektrodenkapazität geschaltet wird. Dadurch kommen als weitere Parameter der Innenwiderstand und die Kapazität des Oszilloskops hinzu, die bei der Analyse der Daten berücksichtigt werden müssen. In Abbildung 4.7 ist ein Ersatzschaltbild dieser Schaltung dargestellt.

Die nach diesem Prinzip experimentell bestimmten Daten werden nach der Aufzeichnung mit einem ROOT-Skript³ gefittet, sodass die Kapazität aus der Zeitkonstante bestimmt wer-

³Bei ROOT handelt es sich um eine am CERN entwickelte und in C++ implementierte freie Software, die zur Datenanalyse überwiegend in der Teilchenphysik eingesetzt wird.

<http://root.cern.ch/drupal/>

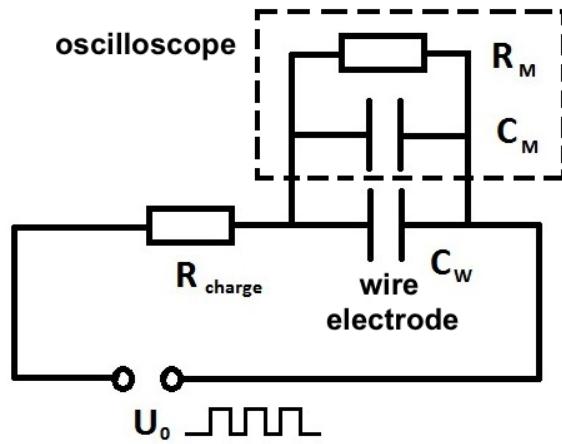


Abbildung 4.7: Schaltkizze der automatischen Kapazitätsmessung. Über den Ladewiderstand R_{charge} wird eine Spannung U_0 mit Rechteckmodulation an die Drahtelektrode mit der Kapazität C_W angelegt. Der Lade- bzw. Entladevorgang wird mit Hilfe eines Oszilloskops, welches im Ersatzschaltbild einer parallel zur Drahtelektrode geschalteten Parallelschaltung aus dem Widerstand R_M und der Kapazität C_M entspricht, aufgezeichnet.

den kann. Diese ergibt sich zunächst für den Ladevorgang folgendermaßen:

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden die beiden Kapazitäten C_W und C_M zu

$$C = C_M + C_W \quad (4.10)$$

zusammengefasst, da parallel geschaltete Kapazitäten zur Gesamtkapazität C addiert werden. Gesucht ist der zeitliche Verlauf der Spannung an der Kapazität U_C . Nach den Kirchhoffsschen Gesetzen ist der Strom $I_{R,charge}$, der durch den Ladewiderstand fließt, gleich der Summe der beiden Teilströme durch den Widerstand des Messgeräts $I_{R,M}$ und der Kapazität I_C :

$$I_{R,charge} = I_{R,M} + I_C, \text{ wobei } I_C = 0 \text{ für } t \rightarrow \infty. \quad (4.11)$$

Nachdem die Kapazität vollständig geladen ist fließt dort kein Strom mehr, wodurch der Gesamtstrom gleich dem durch das Messgerät fließenden Strom ist. Außerdem ist die Summe aller Spannungsabfälle innerhalb einer Masche gleich null:

$$U_0 = U_{R,charge} + U_C. \quad (4.12)$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ist bei ohmschen Leitern die Spannung das Produkt aus Strom und Widerstand, sodass sich

$$U_0 = R_{charge} \cdot I_{R,charge} + U_C = R_{charge}[I_{R,M} + I_C] + U_C \quad (4.13)$$

ergibt. Der Strom an der Kapazität ist

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{dQ}{dt} \text{ mit } Q = C \cdot U_C \\ \Rightarrow I_C &= C \cdot \frac{dU_C}{dt} = C \cdot \dot{U}_C. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Für den Strom durch den Widerstand des Messgerätes folgt

$$I_{R,M} = \frac{U_C}{R_M} \quad (4.15)$$

wobei ausgenutzt wurde, dass die Spannung über der Kapazität gleich dem Spannungsabfall über dem Widerstand des Oszilloskops ist. Insgesamt ergibt sich somit für Gleichung 4.13

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) U_C + R_{charge} \cdot C \cdot \dot{U}_C. \quad (4.16)$$

Die Lösung dieser inhomogenen linearen Differentialgleichung erster Ordnung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die allgemeine Lösung der homogenen Differentialgleichung bestimmt, bevor eine spezielle Lösung der inhomogenen Gleichung gesucht wird. Die Superposition der beiden Teile stellt die Lösung von Gleichung 4.16 dar.

- allgemeine Lösung der homogenen Differentialgleichung:

$$0 = \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) \cdot U_C + R_{charge} \cdot C \cdot \dot{U}_C \quad (4.17)$$

Als Ansatz wird die Funktion

$$\begin{aligned} U_C &= a \cdot e^{-bt} \\ \dot{U}_C &= -a \cdot b \cdot e^{-bt} \end{aligned} \quad (4.18)$$

gewählt, woraus sich ergibt

$$\begin{aligned} 0 &= -R_{charge} \cdot C \cdot a \cdot b \cdot e^{-bt} + \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) a \cdot e^{-bt} \\ &\Leftrightarrow R_{charge} \cdot C \cdot b = \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) \\ &\Leftrightarrow b = \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) \frac{1}{R_{charge} \cdot C} =: \frac{1}{\tau_{charge}} \\ &\Rightarrow \tau_{charge} = \frac{R_{charge} \cdot C}{\left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right)}. \end{aligned} \quad (4.19)$$

- spezielle Lösung der inhomogenen Differentialgleichung:

Als spezielle Lösung der inhomogenen Differentialgleichung kann eine Konstante K angenommen werden, da die Inhomogenität konstant und nicht zeitabhängig ist. Daraus folgt

$$U_C = a \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} + K, \quad (4.20)$$

womit sich durch die Anfangsbedingung $U_C(t=0) = 0$ ergibt

$$\begin{aligned} U_C(0) &= 0 = a \cdot e^{-\frac{0}{\tau_{charge}}} + K = a + K \\ &\Rightarrow a = -K \end{aligned} \quad (4.21)$$

Eingesetzt in die Differentialgleichung folgt

$$\begin{aligned} U_0 &= -R_{charge} \cdot C \cdot a \cdot b \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} + \left(1 + \frac{R_{charge}}{R_M}\right) (a \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} + K) \quad (4.22) \\ &= -R_{charge} \cdot C \cdot a \cdot b \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} + \frac{R_{charge} \cdot C}{\tau_{charge}} a \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} + \frac{R_{charge} \cdot C}{\tau_{charge}} K \\ &= K \frac{R_{charge} \cdot C}{\tau_{charge}} = K \left(\frac{R_{charge}}{R_M} + 1 \right), \end{aligned}$$

wodurch sich für die Konstanten

$$K = U_0 \left(\frac{R_M}{R_{charge} + R_M} \right) \text{ und } a = -U_0 \left(\frac{R_M}{R_{charge} + R_M} \right) \quad (4.23)$$

ergibt. Aus den obigen Überlegungen ergibt sich für die in Abbildung 4.7 dargestellte Schaltung die folgende Fit-Funktion für den Ladevorgang der Kapazität:

$$U_C = U_0 \left(\frac{R_M}{R_{charge} + R_M} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{charge}}} \right) \text{ mit } \tau_{charge} = \frac{R_{charge} \cdot C}{\frac{R_{charge}}{R_M} + 1} \text{ und } C = C_M + C_W. \quad (4.24)$$

Durch eine Kalibrierung des Systems (siehe Kapitel 4.3.4) mit Hilfe bekannter Kapazitäten können die unbekannten Parameter des Messsystems bestimmt werden. Dazu zählen neben der Kapazität C_M und dem Widerstand R_M des Oszilloskops auch der Ladewiderstand R_{charge} .

Für den Entladevorgang ergibt sich durch die zur Erzeugung der Rechteckspannung verwendete Digital I/O-Karte ein anderes Bild für die Zeitkonstante (Details zur technischen Realisierung siehe nächstes Kapitel). In den Fällen, wenn die Digital I/O-Karte auf 0 V Ausgangsspannung schaltet, ist das System hochohmig kurzgeschlossen⁴. Dadurch kann die Ladung nur über den Widerstand des Oszilloskops R_M abfließen, sodass die Zeitkonstante beim Entladen nur von diesem Widerstand und der Kapazität C abhängt:

$$\tau_{discharge} = R_M \cdot (C_M + C_W). \quad (4.25)$$

Der Widerstand des Oszilloskops ist nach Datenblatt etwa $1 M\Omega$ (die genaue Bestimmung wird in Kapitel 4.3.4 beschrieben), was außerdem der Größe des Ladewiderstands entspricht. Betrachtet man die Gleichungen 4.24 und 4.25 ist erkennbar, dass sich in diesem Fall bei gleicher Kapazität für das Entladen eine Zeitkonstante $\tau_{discharge}$ ergibt, die etwa um den Faktor 2 größer ist als τ_{charge} . Dies konnte in den ersten Messungen, die in Kapitel 4.3.4 und 4.3.5 vorgestellt werden, beobachtet werden.

⁴Neben der Aussage, dass der Ausgang der Digital I/O-Karte, der zur Erzeugung der Rechteckspannung genutzt wird, im Fall 0 V hochohmig ist, konnte der Hersteller National Instruments keine genaueren Details geben. Testmessung mit dem System haben bestätigt, dass der Ausgang in diesem Fall nicht mit dem Erdpotential der Karte kurzgeschlossen, sondern hochohmig ist.

4.3.2 Technische Realisierung

Zur technischen Realisierung des Konzepts der automatischen Kapazitätsmessung werden mehrere Komponenten benötigt. Einerseits muss eine Rechteckspannung erzeugt und auf das Elektrodensystem geleitet werden. Der Spannungsverlauf über der Kapazität muss außerdem aufgezeichnet und gespeichert werden. Andererseits muss das Elektrodensystem, welches insgesamt 44⁵ Kanäle der Kapazitätsmessung bietet, so geschaltet werden, dass jeweils nur eine Drahtlage eines Rings pro Dipol gemessen wird. Die Messung der Kapazität zweier Drahtlagen gegeneinander ist mit dem Aufbau nicht möglich, sodass im Gegensatz zu den manuellen Messungen mit dem LCR-Meter nur die 44 Kapazitäten der einzelnen Drahtlagen gegen den Spektrometertank bestimmt werden können.

Das Messprinzip ist in Abbildung 4.8 schematisch dargestellt. Da zwei identische Systeme für beide Dipole vorliegen werden Aufbau und Funktionen im Folgenden für einen Dipol erläutert. Falls nicht anders erwähnt, gelten alle folgenden Beschreibungen für beide Dipol-hälften:

Über den Experten-PC wird das PXI-System innerhalb des HV-Schalschrank gesteuert. Mit Hilfe einer dort eingebauten Digital I/O-Karte wird die zur Messung erforderliche Rechteckspannung erzeugt. Außerdem wird mit Hilfe der Digital I/O-Karte die Schaltung zur Messung einer einzelnen Kapazität durchgeführt. Die Verteilung der durch die Digital I/O-Karte erzeugten Signale erfolgt über einen I/O-Anschlussblock, der durch einen der im HV-Schalschrank installierten DC/DC-Wandler mit Spannung versorgt wird. Die Rechteckspannung wird über den $1 M\Omega$ Ladewiderstand auf die jeweilige Drahtlage geleitet, wobei von dieser Leitung außerdem die Messleitung zum ebenfalls im PXI-System installierten Oszilloskop (dargestellt in rot) geführt wird.

Die Auswahl der zu messenden Kapazität erfolgt mit Hilfe von sechs installierten Relais-Platinen, die über eine Steuerplatine gesteuert werden (dargestellt in grün). Die Ansteuerung dieser Platine erfolgt mit Hilfe der Digital I/O-Karte über den I/O-Anschlussblock. Über die Digitalausgänge kann jeder einzelne Kanal, das heißt jede einzelne Kapazität des Draht-elektrodensystems mit der Rechteckspannung und dem Oszilloskop verbunden werden.

Die Relais-Platinen werden außerdem genutzt, um das System zwischen dem Hochspannungsmodus und dem Kapazitätsmessungsmodus zu schalten. Für den Hochspannungsbetrieb sind die Platinen auf den Zustand "normally closed" (NC) geschaltet, wodurch eine Verbindung zur Dipol- U_{dipole} bzw. Offset-Spannung $U_{dipole} + U_{offset}$ besteht. Für die Kapazitätsmessung werden bei allen Platinen die Schalter K2 auf den Zustand "normally open" (NO) geschaltet, wodurch die Drahtlagen aller Ringe mit dem Tankpotential verbunden sind. Zusätzlich wird der K1-Schalter einer ausgewählten Kapazität auf NO eingestellt, wodurch diese mit der Rechteckspannung bzw. mit der Messleitung verbunden ist.

Einer der wesentlichen Vorteile des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung ist, dass für die Messung keine Hardware-Änderungen vorgenommen werden müssen. Das HV-System kann zwischen dem normalen Betriebsmodus, in dem Hochspannung auf die Elektroden und den Spektrometertank gegeben wird, und dem Modus zur Kapazitätsmessung, in dem alle Ringe auf Tankpotential sind und der Tank geerdet ist, per Software umgeschaltet werden. Dazu wurden sechs Relais-Platinen pro Dipol gebaut und installiert, mit denen die einzel-

⁵2 Dipole mit je zwei Drahtlagen und den Ringen 2, 3, 4, 5, 6, 7-11, 12, 13, 14, 15, 16

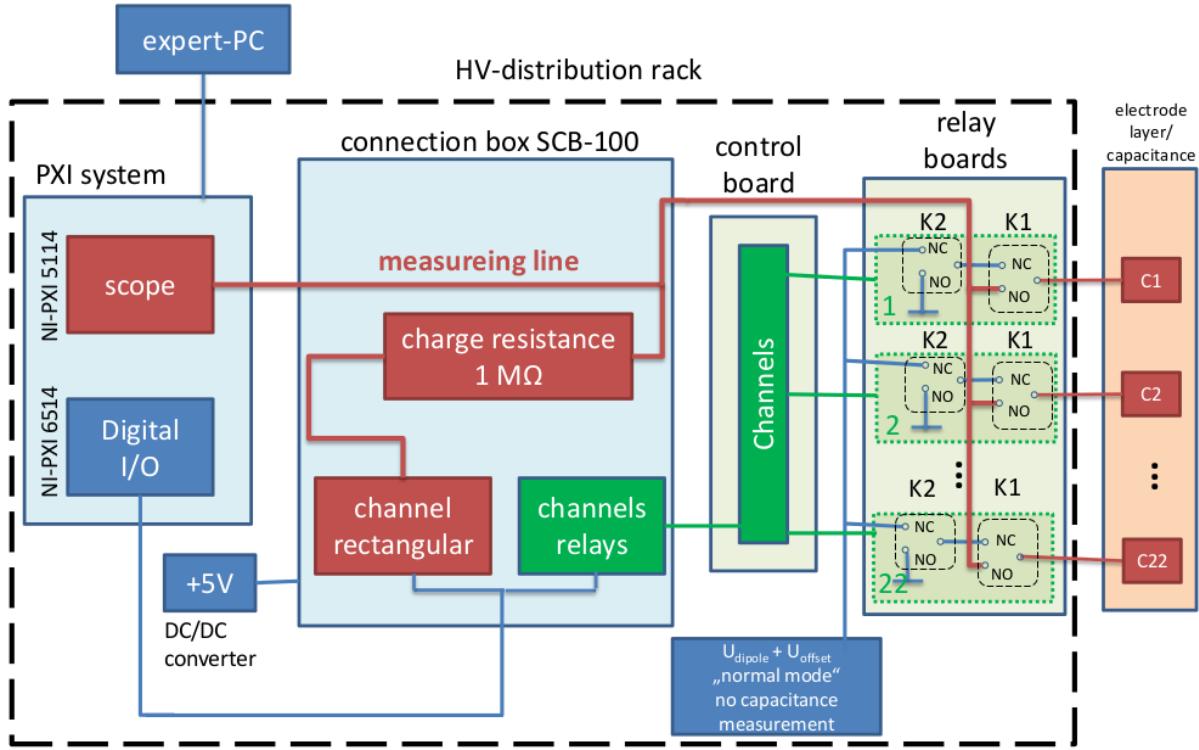


Abbildung 4.8: **Konzept der automatischen Kapazitätsmessung:** Mit Hilfe einer im HV-Schalschrank installierten Digital I/O-Karte wird eine Rechteckspannung mit 5 V Amplitude erzeugt, die auf jeden einzelnen der 22 Kanäle eines Drahtelektrodensystems pro Dipol geleitet werden kann. Die Auswahl einer einzelnen Kapazität erfolgt über Steuersignale, die ebenfalls mit der Digital I/O-Karte erzeugt werden. Die Verteilung der einzelnen Signale erfolgt über einen speziellen Anschlussblock, der von einem der im HV-Schrank installierten DC/DC-Wandler erzeugt wird. Der Spannungsverlauf über einer einzelnen Kapazität wird mit einem Oszilloskop aufgezeichnet.

nen Elektrodenkanäle zwischen Kapazitätsmessung und Hochspannungsbetrieb umgeschaltet werden können (vgl. Abbildung 4.9 links). Pro Platine werden vier⁶ Kanäle geschaltet.

Die Steuerung der Relais-Platinen erfolgt mit Hilfe einer installierten Steuerplatine (vgl. Abbildung 4.9 rechts), die mit den einzelnen Relais-Platinen verbunden ist. Die Schaltpläne und Layouts der jeweiligen Platinen sind im Anhang in den Abbildungen 6.2 bis 6.5 zu finden.

Die Digital I/O-Karte wird wie bereits beschrieben zur Erzeugung der Rechteckspannung verwendet. Dazu wird ein Digitalausgang der Karte verwendet, sodass im I/O-Anschlussblock ein Kanal periodisch zwischen den Zuständen "High" (+5 V) und "Low" (0 V) geschaltet wird. Die so erzeugte 5 V-Rechteckspannung wird über den Ladewiderstand auf das Elektrodensystem geleitet.

Auf die vom Oszilloskop gespeicherten Daten der Messung kann vom sogenannten Experten-

⁶bzw. bei zwei Platinen drei Kanäle

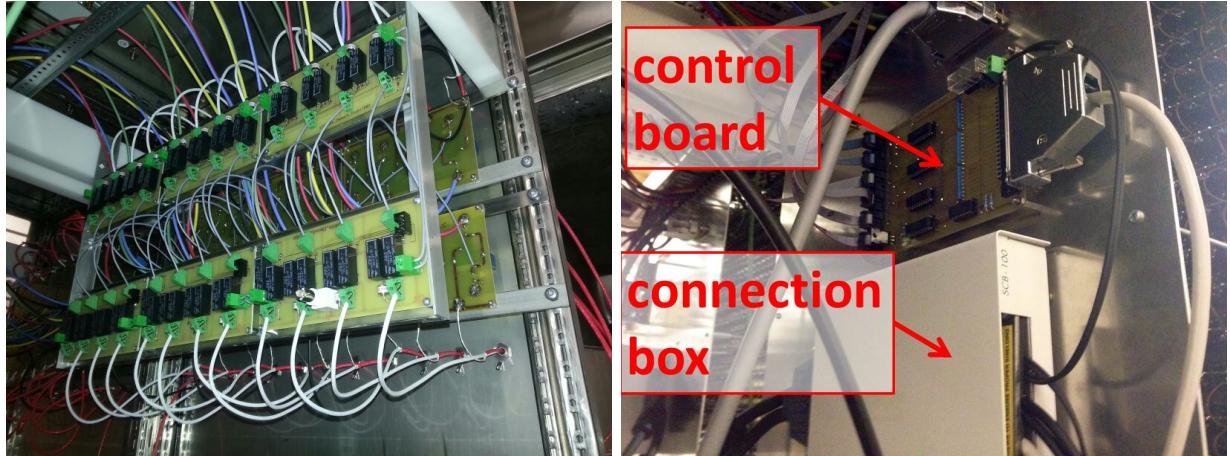


Abbildung 4.9: Foto der installierten Komponenten des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung. Links: Gezeigt sind die sechs installierten Relais-Platinen zur Umschaltung zwischen dem Hochspannungs- und dem Kapazitätsmessungsmodus. Rechts: Zu sehen ist die Steuerplatine, mit der die Relais-Platinen angesteuert werden, sowie der I/O-Anschlussblock zur Verteilung der Signale der Digital I/O-Karte.

PC außerhalb des HV-Schalschrank zugegriffen werden.

Die Relais-Platinen des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung wurden derartig installiert, dass die Kapazität direkt an den Anschlusskabeln vom HV-Schalschrank zum Drahtelektrodensystem gemessen werden kann. Dabei wird im Kapazitätsmessungsmodus ein Teil der Elektrodenschutzschaltung umgangen (vgl. Abbildung 4.10). Das Schutzsystem besteht aus zwei Stufen: Der erste Teil besteht aus einem $50\ \Omega$ -Widerstand, der durch ein Gasentladungsröhrchen geschützt wird. Dadurch wird der Strom eines möglichen Transienten reduziert.

Die zweite Stufe besteht aus einem spannungsabhängigen Widerstand, der das Elektrodensystem vor einer zu hohen Spannungsdifferenz gegenüber dem Tank schützt. Dazu parallel ist eine Kapazität geschaltet, um eine mögliche Wechselspannungskomponente der Elektrodenspannung zu reduzieren. Zuletzt folgt in dieser Stufe ein $50\ \Omega$ -Widerstand.

Um sicherzustellen, dass der zweite Teil der Schutzschaltung, der im Wesentlichen eine nicht zu große Spannungsdifferenz zwischen Tank und Drahtelektrode sichert, nicht im normalen Hochspannungsmodus umgangen wird, kann die Spannungsversorgung der Relais-Platinen, wenn keine Kapazitätsmessung stattfindet, deaktiviert werden. In diesem Fall befinden sich alle Relais im Zustand "normally closed", in dem der gesamte Teil der automatischen Kapazitätsmessung vom HV-System der Drahtelektrode getrennt ist. Dazu wurden zwischen den Platinen und dem DC/DC-Wandler Sicherungen eingebaut, mit denen die Spannungsversorgung der Relais-Platinen ggf. unterbrochen werden kann, sodass ein Schaltvorgang verhindert wird. Indem durch diese Sicherungen die Spannungsversorgung der Relais-Platinen im normalen Hochspannungsmodus mechanisch getrennt ist, wird sichergestellt, dass in diesem Modus kein Kanal mit dem Tank kurzgeschlossen werden kann.

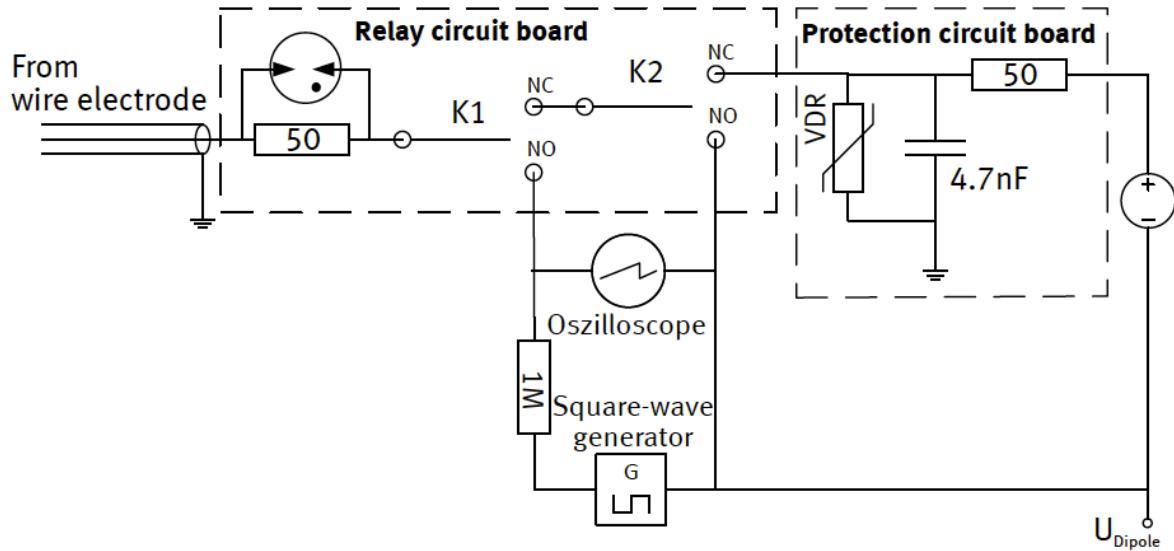


Abbildung 4.10: **Schaltbild der Verbindung zwischen Drahtelekrode und HV-Schalschränk**. Jeder Kanal des Drahtelektrodensystems gelangt über die erste Stufe der Schutzschaltung auf die Relais-Platinen, mit denen zwischen Hochspannungsmodus und Kapazitätsmessungsmodus geschaltet werden kann. Im HV-Modus sind die Relais K1 und K2 im Zustand "normally closed" (NC), sodass die Dipol- und die Offsetspannung $U_{dipole} + U_{Offset}$ über die zweite Stufe der Schutzschaltung auf das Elektrodensystem geleitet wird. Im Kapazitätsmessungsmodus sind die K2-Relais aller Kanäle im Zustand "normally open" (NO). Außerdem ist das Relais K1 für den zur Kapazitätsmessung ausgewählten Kanal ebenfalls im Zustand NO, sodass über den Ladewiderstand $1 \text{ M}\Omega$ eine Rechteckspannung auf die entsprechende Drahtlage gegeben wird, wobei der Spannungsverlauf mit Hilfe eines Oszilloskops aufgezeichnet wird [Bau13a].

4.3.3 Kontrollsoftware

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kontrollsoftware zur Steuerung des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung muss im Wesentlichen zwei Aufgaben erfüllen: Zunächst muss das System vom Hochspannungsmodus in den Kapazitätsmessungsmodus umgeschaltet werden. Dazu werden alle Ringe mit dem Tankpotential kurzgeschlossen. Die zweite Aufgabe besteht darin, den Kanal der ausgewählten Kapazität mit der Rechteckspannung zu verbinden, sodass der Spannungsverlauf beim Laden und Entladen aufgezeichnet werden kann. Insgesamt müssen jeweils über 20 Kanäle der Digital I/O-Karte pro Dipol geschaltet werden, wobei immer nur ein Kanal mit der Rechteckspannung und dem Oszilloskop verbunden ist.

Das System wird über das im HV-Schalschrank installierte PXI-System gesteuert, wobei die Kontrollsoftware im grafischen Programmiersystem LabView geschrieben ist. Da die zwei Dipolhälften separate PXI-Systeme besitzen, besteht das Programm aus insgesamt drei Teilen: jeweils eine Komponente auf den beiden PXI-Systemen und ein Kontrollelement auf dem Experten-PC, von welchem die grundlegende Ansteuerung erfolgt. Das Frontpanel des Kontroll-VIs auf dem Experten-PC ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Im Programm kann zwischen einzelnen Messungen und einem automatischen Messdurchlauf gewählt werden.

Für den Fall einer Einzelmessung können die entsprechenden Kanäle ausgewählt werden. Die Benennung erfolgt automatisch nach Dipol, Datum und aktivierten Kanälen. Da das Programm für beide Dipole bestimmt ist und sich die Kanalbelegung der Dipole unterscheidet, ist keine direkte Zuordnung der Kanäle zu den entsprechenden Ringen und Drahtlagen im Frontpanel eingetragen⁷.

Das Programm bietet außerdem die Möglichkeit, eine Reihe automatischer Messungen mehrerer Kanäle durchzuführen, die nacheinander ausgeführt werden. Dazu muss eine Konfigurationsdatei auf dem jeweiligen PXI-System gespeichert sein, in der eine beliebige Messreihe der einzelnen Kapazitäten pro Dipol definiert werden kann.

Je nach Größe der zu messenden Kapazität ändert sich die Dauer des Lade bzw. Entladevorgangs. Entsprechend muss auch die Pulsdauer der Rechteckspannung angepasst werden. Für kleinere Kapazitäten ist die Frequenz der Rechteckspannung größer, wohingegen bei großen Kapazitäten eine kleinere Frequenz eingestellt werden muss, damit die Kapazität innerhalb eines Pulses geladen werden kann. Innerhalb des Programms lässt sich die Pulslänge der Rechteckspannung auswählen, die außerdem gleichzeitig die Abtastrate des Oszilloskops bestimmt. Bei kleinen Kapazitäten ist die Pulslänge der Rechteckspannung gering und die Abtastfrequenz des Oszilloskops groß, bei großen Kapazitäten verhält es sich entsprechend umgekehrt. So ist sichergestellt, dass bei allen Kapazitäten für jede Lade- bzw. Entladekurve die Anzahl an Messpunkten gleich ist.

⁷die entsprechende Zuordnung findet sich in Abbildung 6.1 im Anhang dieser Arbeit

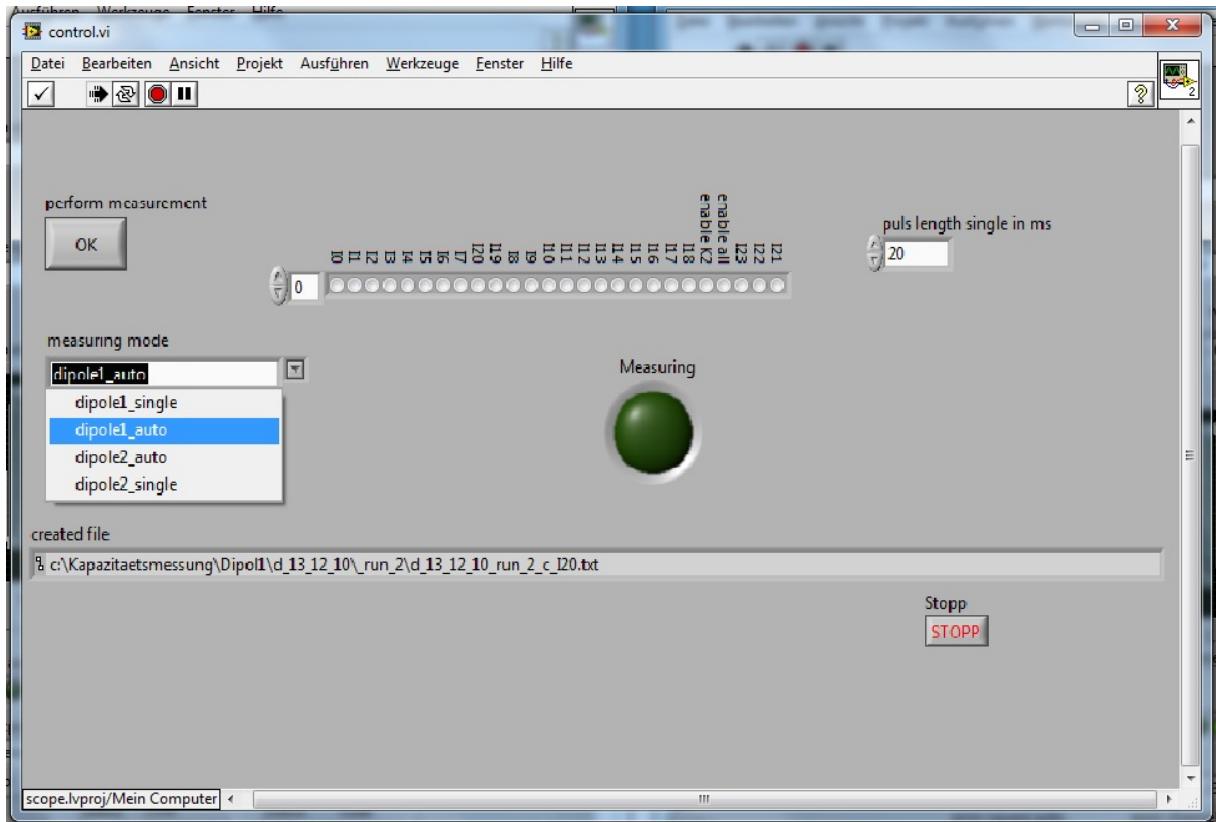


Abbildung 4.11: **LabView-Programm zur Steuerung der automatischen Kapazitätsmessung.** Im VI kann zwischen Einzelmessungen und einem automatischen Durchlauf vorher festgelegter Kanäle gewählt werden.

4.3.4 Kalibrierung des Systems

Um mit dem System zur automatischen Kapazitätsmessung die Kapazitäten der Drahtelektrode zu bestimmen, wird das Lade- bzw. Entladeverhalten beim Anlegen einer Rechteckspannung aufgezeichnet. Der Spannungsverlauf an der Kapazität folgt wie in Kapitel 4.3.1 beschrieben einem exponentiellen Verlauf, der sowohl von der entsprechenden Kapazität, als auch von mehreren konstanten Faktoren abhängt. Dazu zählen die Kapazität und der Widerstand des Oszilloskops und der Ladewiderstand. Um durch die Analyse der Ladekurven die Kapazität bestimmen zu können, müssen diese Parameter durch Kalibrationsmessungen des Systems vorher ausgemacht werden. Dazu wurden, nachdem das System am Hauptspektrometer installiert wurde, Kondensatoren mit vorher durch ein LCR-Meter gemessener Kapazität, vermessen. Die verwendeten Kondensatoren sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die Kapazität wurde jeweils mit einer Präzisionsmessbrücke (*LCR 400*, TTi) gemessen, wobei teilweise mehrere Kondensatoren parallel verwendet wurden, um den Bereich zwischen 0 und 40 nF, in dem nach Kapitel 4.2 die Kapazitäten der Drahtelektrode liegen, möglichst großflächig abzudecken.

Die Unsicherheiten der Kalibrationskapazitäten wurden zu den ebenfalls in der Tabelle angegebenen Werten abgeschätzt. Aufgrund der kleinen Größenordnung der Kapazitäten (10^{-9} F) kann es durch geringe Änderungen der Messbedingungen (z.B. eine andere Stellung der An-

Tabelle 4.1: Zur Kalibrierung des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung verwendete Kondensatoren.

#	C in nF	Bemerkung
1	1,44 ± 0,1	
2	2,26 ± 0,1	
3	4,86 ± 0,1	
4	9,12 ± 0,1	
5	9,85 ± 0,1	nicht einzeln verwendet
6	9,95 ± 0,1	nicht einzeln verwendet
7	9,73 ± 0,1	nicht einzeln verwendet
8	9,67 ± 0,1	nicht einzeln verwendet
9	6,3 ± 0,2	# 1 + # 3
10	7,1 ± 0,2	# 2 + # 3
11	19,7 ± 0,2	# 6 + # 7
12	29,5 ± 0,2	# 6 + # 7 + # 5
13	39,2 ± 0,2	# 6 + # 7 + # 5 + # 8

schlussdrähte, eine andere Position des Messgeräts an den Anschlussdrähten usw.) zu Abweichungen in der abgeschätzten Größenordnung kommen. Bei der Verwendung von mehreren Kapazitäten wird außerdem eine größere Unsicherheit angenommen als bei den jeweils einzelnen, da durch die parallele Verwendung weitere Unsicherheiten (z.B. Positionierung der Kapazitäten zueinander) entstehen. Die Abschätzung der Unsicherheit der Kapazitäten wird am Ende dieses Unterkapitels noch einmal aufgegriffen.

Für diese bekannten Kondensatoren wurden entsprechend Lade- bzw. Entladekurven aufgenommen und mit den folgenden Funktionen gefittet:

- Laden:

$$U_{charge}(t) = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t + \phi}{\tau_{charge}} \right)} \right) + U_{offset} \quad (4.26)$$

- Entladen:

$$U_{discharge}(t) = U_0 \cdot e^{-\left(\frac{t + \phi}{\tau_{discharge}} \right)} + U_{offset}. \quad (4.27)$$

Der Parameter U_0 ist ein von der Ladespannung abhängiger Faktor und U_{offset} die Offsetspannung. ϕ stellt einen Phasenfaktor dar, der aufgrund der Tatsache, dass viele Lade- und Entladevorgänge nacheinander aufgezeichnet werden, berücksichtigt werden muss. Die zur Analyse wesentlichen Faktoren stellen die Größen τ_{charge} und $\tau_{discharge}$ dar, aus denen anschließend die Parameter des Messsystems bestimmt werden.

Das prinzipielle Vorgehen zur Durchführung der Kalibrierung soll im Folgenden anhand eines

Beispiele skizzieren werden. Der mit Hilfe des Oszilloskops aufgenommene Spannungsverlauf über der Kalibrationskapazität (in diesem Fall $(7,1 \pm 0,2)$ nF) ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Zu sehen ist der komplette Verlauf der Messung über 5 s, in dem 50 Lade- bzw. Entladekurven aufgenommen wurden. Für je einen Lade- bzw. Entladevorgang ergibt sich somit ein Zeitfenster von 50 ms, was ebenfalls in der Abbildung dargestellt ist. Die einzelnen Spannungsverläufe wurden für jede Kurve mit den entsprechenden Funktionen 4.26 bzw. 4.27 gefittet und die jeweiligen Zeitkonstanten τ wurden bestimmt. Die Unsicherheit der Spannung ist durch die Auflösung des Oszilloskops (8 bit auf einem Spannungsbereich von 4 V) gegeben und die zeitliche Unsicherheit wurde entsprechend des internen Timers des Oszilloskops mit $5 \cdot 10^{-9}$ s angenommen.

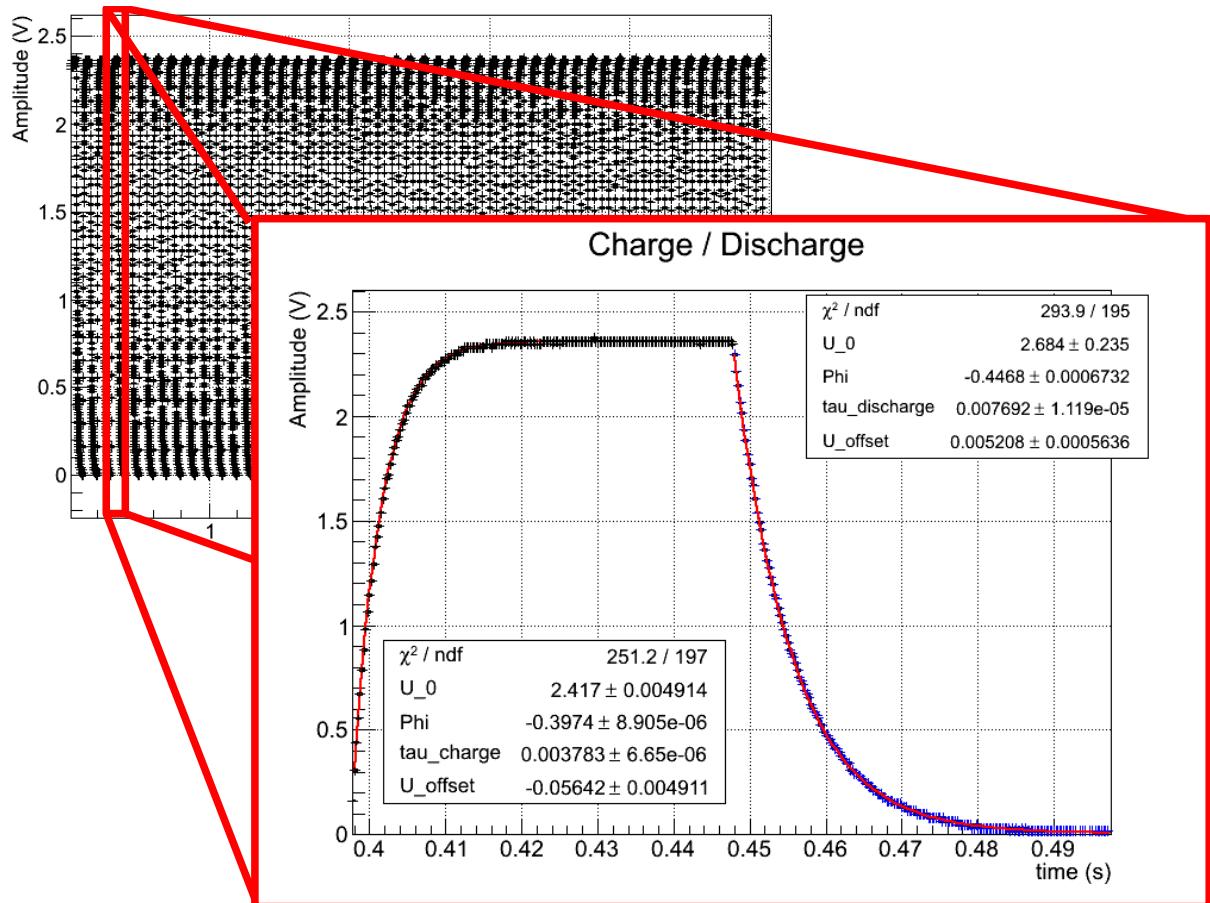


Abbildung 4.12: **Zeitlicher Spannungsverlauf über einer Kalibrationskapazität.** Im Hintergrund ist der komplette Spannungsverlauf über je 50 Lade- bzw. Entladekurven eines Kondensators zur Kalibrierung des Messsystems zu sehen. Im Vordergrund ist ein kompletter Lade- und Entladevorgang vergrößert dargestellt. Außerdem sind die Fitparameter des Ladevorgangs (unten links) und des Entladevorgangs (oben rechts) abgebildet.

Mit Hilfe eines weiteren Fits wurde anschließend der Mittelwert aller Zeitkonstanten bestimmt. In Abbildung 4.13 sind die für die einzelnen Ladevorgänge bestimmten Zeitkonstanten τ_{charge} mit dem Fit zur Mittelwertbestimmung dargestellt. Auffällig ist dabei, dass das reduzierte $\chi^2 =: \chi_r^2$ einen Wert von etwa 4,4 annimmt. Dieser Parameter ist ein Maß für die normierte Abweichung der Messwerte vom Fit und lässt sich in diesem Fall folgendermaßen vereinfacht darstellen:

$$\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{\text{Anzahl Freiheitsgrade}} = \frac{\chi^2}{n - 1} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2 / \sigma_i^2}{n - 1}. \quad (4.28)$$

Für eine optimale Übereinstimmung eines Fits mit den Messwerten ergibt sich $\chi_r^2 \approx 1$. Die Unsicherheiten der einzelnen Messwerte müssen außerdem berücksichtigt werden. Die Tatsache, dass in diesem Fall der Fit $\chi_r^2 \approx 4,4$ liefert, lässt vermuten, dass die angenommenen Unsicherheiten σ_i zu klein sind. Dies bedeutet wiederum, dass entweder die Unsicherheiten der einzelnen Messungen zu gering sind, oder dass eine unbekannte Systematik eine größere Unsicherheit verursacht. Die erste Möglichkeit lässt sich überprüfen, indem die einzelnen Fits der 50 Lade- bzw. Entlademessungen näher betrachtet werden. In Abbildung 4.12 sind die Fitparameter einer Lade- bzw. Entladekurve dargestellt. Für das Laden ergibt sich $\chi_r^2 \approx 1,3$, sodass die entsprechenden Unsicherheiten der einzelnen Parameter angemessen erscheinen. Die χ_r^2 aller Kurven wurden entsprechend untersucht und es ergibt sich für alle Fälle ein ähnliches χ_r^2 .

Die zweite Möglichkeit einer systematischen Unsicherheit lässt sich dagegen nur schwer eindeutig zuordnen. In diesem Fall ist es üblich, die Unsicherheiten der Fitparameter mit $\sqrt{\chi_r^2}$ zu gewichten und somit die Fehlerintervalle um eine unbekannte Systematik zu vergrößern. Dies wurde für alle Kalibrationsmessungen (es ergab sich für alle Messungen eine ähnliche Problematik, was die These eines systematischen Effektes stützt) mit den verschiedenen Kondensatoren durchgeführt.

Anschließend wurden die bestimmten Zeitkonstanten gegen die jeweilige Kapazität geplottet und mit Hilfe eines Fits wurden die Parameter des Messsystems bestimmt (siehe Abbildung 4.14).

Nach Kapitel 4.3.1 gilt für die Zeitkonstanten τ :

- Laden:

$$\tau_{charge} = \frac{R_{charge}(C_M + C_W)}{\frac{R_{charge}}{R_M} + 1} \quad (4.29)$$

- Entladen:

$$\tau_{discharge} = R_M(C_M + C_W) \quad (4.30)$$

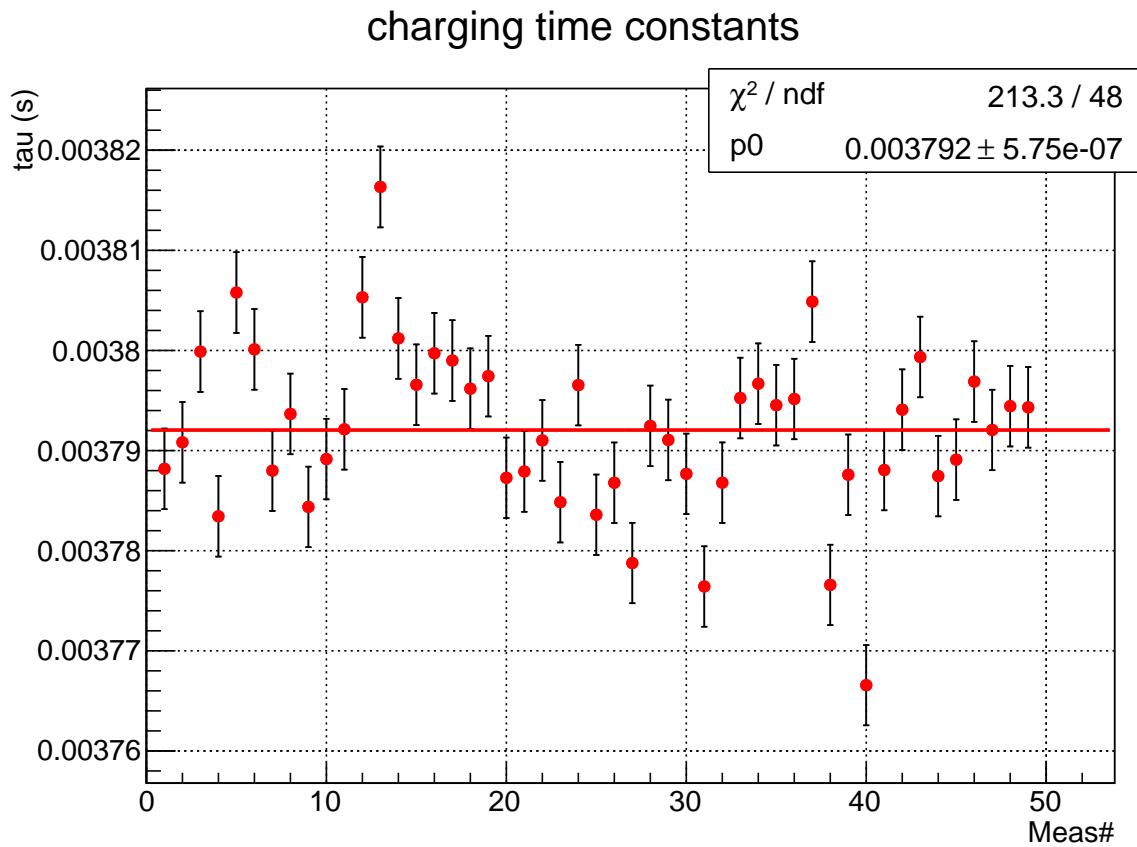


Abbildung 4.13: **Ladezeitkonstanten von 48 Ladevorgänge innerhalb der Messung einer Kalibrationskapazität.** Aufgetragen sind die jeweiligen Zeitkonstanten für die einzelnen Messungen und der Fit zur Bestimmung des Mittelwerts mit $\chi_r^2 = \frac{\chi^2}{\text{ndf}} = \frac{\chi^2}{n-1} = 4,4$.

Die Parameter des Oszilloskops sind der Widerstand R_M und die Kapazität C_M und der Ladewiderstand ist als R_{charge} berücksichtigt. Letzterer wurde vor dem Einbau mit einem Präzisionsmessgerät bestimmt:

- Dipol 1 (West): $R_{charge} = (1,00025 \pm 0,00001) \text{ M}\Omega$
- Dipol 2 (Ost): $R_{charge} = (1,00062 \pm 0,00001) \text{ M}\Omega$

Im Fit der Kalibrierung wurde der Ladewiderstand entsprechend im Rahmen und Unsicherheiten als konstanter Parameter definiert, sodass die anderen Größen zu

- Dipol 1 (West):
 $R_M^{charge} = (1,13 \pm 0,03) \text{ M}\Omega$
 $C_M^{charge} = (321 \pm 54) \text{ pF}$
- Dipol 2 (Ost):
 $R_M^{charge} = (1,12 \pm 0,01) \text{ M}\Omega$
 $C_M^{charge} = (322 \pm 50) \text{ pF}$

bestimmt wurden. Im Rahmen der Unsicherheiten stimmen die Parameter für beide Dipole überein, was aufgrund des gleichen Aufbaus auch erwartet wird. Zur besseren Beurteilung der Aussagekraft des Fits sind in Abbildung 4.14 außerdem die normalisierten Residuen der Messwerte von der Fitfunktion dargestellt. Dabei handelt es sich ähnlich dem χ^2_r um eine Methode zur Einordnung der Qualität des Fits. Die normalisierten Residuen r_i sind dabei folgendermaßen definiert:

$$r_i = \frac{\tau_i - \tau_{fit}}{\Delta\tau_{sum,i}}. \quad (4.31)$$

Der Divisor $\Delta\tau_{sum,i}$ bewirkt hierbei die Normierung der Abweichung des Fits vom Messwert auf die jeweilige Unsicherheit. Diese ergibt sich für den Fall unkorrelierter Unsicherheiten in τ - und in C -Richtung zu

$$\Delta\tau_{sum} = \sqrt{(\Delta\tau)^2 + (m\Delta C_W)^2}, \quad (4.32)$$

wobei $m = \frac{R_{charge}}{\frac{R_{charge}}{R_M} + 1}$ die Steigung der Fitfunktion darstellt. Anhand der normalisierten Residuen lässt sich erkennen, dass diese etwa gleichverteilt um null liegen. Die Abweichungen liegen in einem Bereich von etwa ± 2 um null. Um die Abschätzung der Unsicherheiten der zur Kalibrierung verwendeten Kapazitäten zu überprüfen wurde zusätzlich zu den in Tabelle 4.1 angegebenen Werten ein Fit mit einer Unsicherheit von 0,01 nF für alle Kondensatoren angenommen. Diese ist einerseits um eine Größenordnung geringer und andererseits für alle Kapazitäten gleich. Betrachtet man die entsprechenden Residuen fällt auf, dass die Abweichungen von 0 im Vergleich zu den in Tabelle 4.1 angegebenen Werten um etwa eine Größenordnung größer sind. Außerdem sind die Abweichungen für kleine Kapazitäten höher als für große Kapazitäten. Daher scheint die für die Kalibrierung gewählte Abschätzung der Unsicherheit der Kalibrationskapazitäten sinnvoll.

Analog zum vorigen Vorgehen wurden mit Hilfe der entsprechenden Fitfunktionen die Parameter des Systems beim Entladen bestimmt:

- Dipol 1 (West):
 $R_M^{discharge} = (1,048 \pm 0,006) \text{ M}\Omega$
 $C_M^{discharge} = (526 \pm 55) \text{ pF}$
- Dipol 2 (Ost):
 $R_M^{discharge} = (1,047 \pm 0,005) \text{ M}\Omega$
 $C_M^{discharge} = (529 \pm 51) \text{ pF}$

Auch hier ergeben sich im Rahmen der Unsicherheiten für beide Dipole die gleichen Werte. Vergleicht man jedoch die durch das Laden und das Entladen bestimmten Fitparameter untereinander ist ersichtlich, dass diese Werte innerhalb ihrer Unsicherheiten nicht übereinstimmen. Insbesondere bei der Kapazität C_M des Oszilloskops ergibt sich ein Unterschied von etwa 200 pF bei einer Unsicherheit von ca. 50 pF. Die Ursache dieser Diskrepanz konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt werden. Vermutlich ist dies auf das Verhalten der Digital I/O-Karte zurückzuführen, deren Verhalten bei 0 V nur unvollständig beschrieben wird.

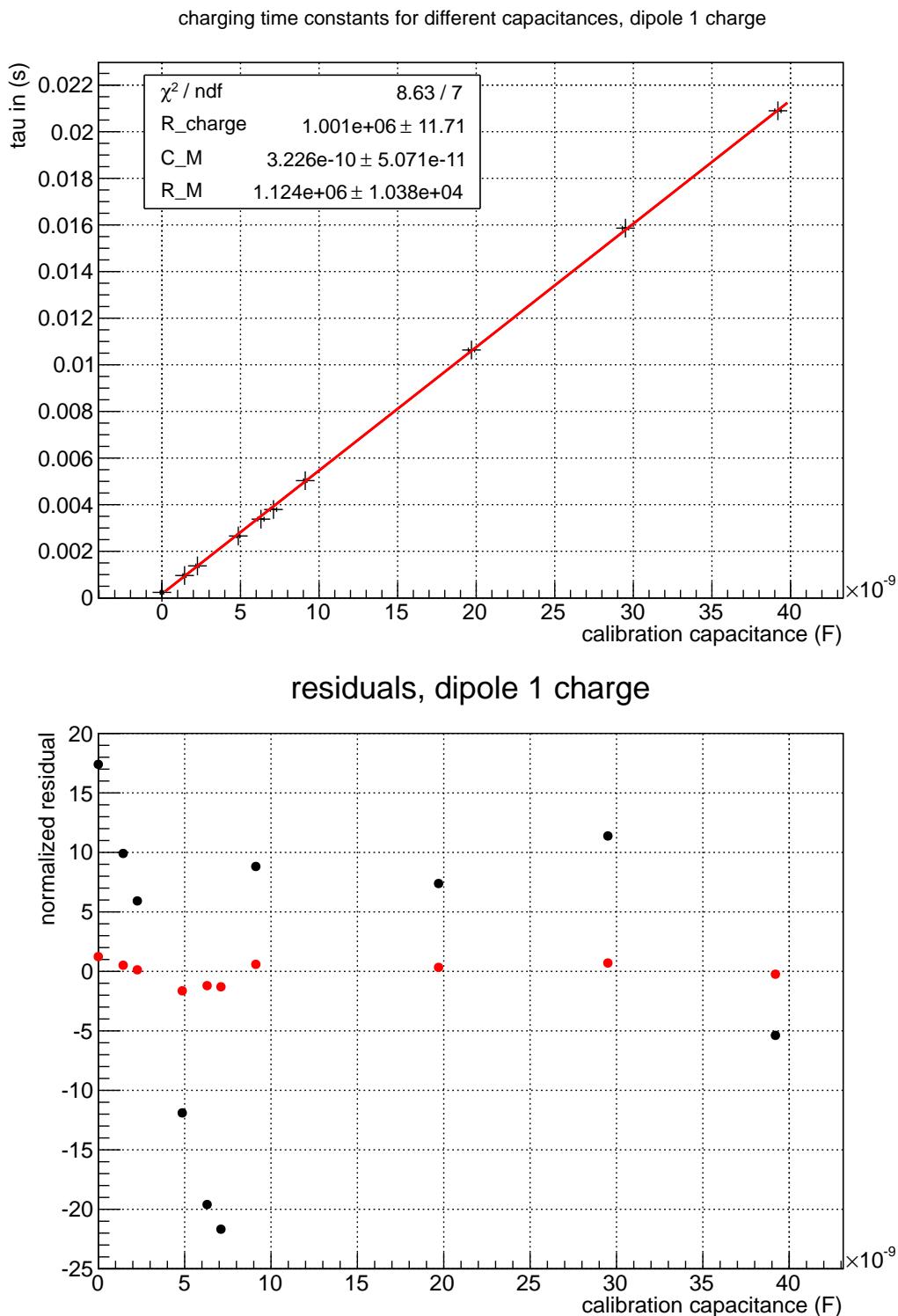


Abbildung 4.14: **Kalibrierung des Messsystems.** Oberer Teil: Ermittelte Zeitkonstanten zu den einzelnen Kalibrationskapazitäten und Fit der Daten. Unterer Teil: Normalisierte Residuen des Fits. Die in rot dargestellten Punkte entsprechen den Fitparametern im oberen Teil der Abbildung mit den in Tabelle 4.1 angegebenen Unsicherheiten. Die schwarzen Punkte entsprechen den Residuen, wenn für alle Kondensatoren eine Unsicherheit von 0,01 nF angenommen wird.

4.3.5 Erste Testmessungen am Hauptspektrometer

Nachdem das System erfolgreich am Hauptspektrometer installiert werden konnte, wurden nach den Kalibrationsmessungen die ersten Kapazitätsmessungen der Drahtelektrode durchgeführt. Während der SDS-Inbetriebnahme konnten zweimal im Abstand von 3 Wochen erstmals mehrere Messungen durchgeführt werden, die in diesem Kapitel gezeigt werden sollen. Die Auswertung der Daten erfolgte analog zu dem in Kapitel 4.3.4 erläuterten Verfahren mit dem Unterschied, dass in diesem Fall die Kapazität C_W aus der Zeitkonstante bestimmt wird, wobei die im vorigen Kapitel bestimmten Größen innerhalb ihrer Unsicherheiten für den Fit fixiert werden.

Aufgrund der beim Ausheizen des Spektrometers aufgetretenen Kurzschlüsse einiger Ringe bzw. Drahtlagen des Drahtelektrodensystems konnten diese entsprechenden Kanäle nicht gemessen werden. Eine Übersicht aller messbaren Kapazitäten ist in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der automatischen Kapazitätsmessung, durchgeführt am 28.08.2013, für alle nicht kurzgeschlossenen Kanäle beider Dipole. Die Kapazitäten wurden sowohl durch die Lade-, wie auch durch die Entladekurven mit den im vorigen Kapitel beschriebenen Fitparametern (R_M^{charge} , C_M^{charge} , $R_M^{discharge}$ und $C_M^{discharge}$) bestimmt und beinhalten die Kapazität der Zuleitungskabel zwischen HV-Schrank und Spektrometer.

		dipole east	dipole east	dipole west	dipole west
ring	wire layer	$C_{W,charge}$ in nF	$C_{W,discharge}$ in nF	$C_{W,charge}$ in nF	$C_{W,discharge}$ in nF
2	outer	$1,97 \pm 0,06$	$1,95 \pm 0,06$	$1,93 \pm 0,08$	$1,92 \pm 0,07$
3	outer	$3,97 \pm 0,07$	$3,94 \pm 0,07$	$4,0 \pm 0,1$	$3,98 \pm 0,08$
4	outer	$6,61 \pm 0,08$	$6,57 \pm 0,08$	$6,6 \pm 0,1$	$6,6 \pm 0,1$
5	outer	-	-	-	-
6	outer	-	-	-	-
7-11	outer	-	-	-	-
12	outer	$10,3 \pm 0,1$	$10,3 \pm 0,1$	$10,4 \pm 0,1$	$10,3 \pm 0,1$
13	outer	$9,19 \pm 0,09$	$9,1 \pm 0,1$	$9,2 \pm 0,2$	$9,1 \pm 0,1$
14	outer	$7,75 \pm 0,08$	$7,70 \pm 0,09$	-	-
15	outer	$5,70 \pm 0,08$	$5,65 \pm 0,08$	$5,7 \pm 0,1$	$5,69 \pm 0,09$
16	outer	$3,64 \pm 0,07$	$3,61 \pm 0,07$	$3,7 \pm 0,1$	$3,68 \pm 0,08$
2	inner	$1,80 \pm 0,06$	$1,78 \pm 0,06$	$1,76 \pm 0,08$	$1,74 \pm 0,07$
3	inner	$3,50 \pm 0,07$	$3,47 \pm 0,07$	$3,6 \pm 0,1$	$3,53 \pm 0,08$
4	inner	$4,47 \pm 0,07$	$4,43 \pm 0,07$	$4,5 \pm 0,1$	$4,45 \pm 0,08$
5	inner	-	-	$5,1 \pm 0,1$	$5,02 \pm 0,09$
6	inner	-	-	$5,8 \pm 0,1$	$5,82 \pm 0,09$
7-11	inner	-	-	-	-
12	inner	$6,91 \pm 0,08$	$6,86 \pm 0,09$	$6,9 \pm 0,2$	$6,9 \pm 0,1$
13	inner	$6,19 \pm 0,08$	$6,14 \pm 0,08$	$6,2 \pm 0,1$	$6,19 \pm 0,09$
14	inner	$5,54 \pm 0,07$	$5,50 \pm 0,08$	-	-
15	inner	$5,28 \pm 0,07$	$5,24 \pm 0,08$	$5,3 \pm 0,1$	$5,23 \pm 0,09$
16	inner	$3,49 \pm 0,07$	$3,45 \pm 0,07$	$3,6 \pm 0,1$	$3,54 \pm 0,08$

Innerhalb der Unsicherheiten stimmen die bestimmten Kapazitäten für das Laden und das Entladen überein. Die angegebenen Werte entsprechen jeweils dem Mittelwert, der aus 50 Lade- bzw. Entladekurven bestimmt wurde. Die Unsicherheiten wurden mit Hilfe der im vorigen Kapitel angegebenen Unsicherheiten für R_M und C_M bestimmt, wobei von unkorrelierten Fehlern ausgegangen wurde. Dazu wurden die aufgenommenen Daten jeweils mit dem Mittel-, dem Minimal- und Maximalwert von R_M und C_M gefittet, sodass sich das entsprechende Unsicherheitsintervall um den Mittelwert ergibt. Dies führt zu Unsicherheiten zwischen 60 und 200 pF für die Bestimmung des Absolutwertes der Kapazität.

In den Abbildungen 4.15 bis 4.18 wurden die in Tabelle 4.2 aufgeführten Werte mit den jeweils aktuellsten Werten der manuellen Kapazitätsmessung verglichen, die nach dem Ausheizen und vor der Installation des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung aufgenommen wurden. Betrachtet man die relativen Abweichungen für beide Dipole und sowohl innere, als auch äußere Drahtlage ist auffällig, dass die Abweichung bei den Ringen mit geringeren Kapazitäten am größten ist. Dies ist vor allem bei Ring 2, der von allen Ringen die geringste Kapazität aufweist, mit bis zu 15 % am deutlichsten zu sehen. Hier konnten die manuell gemessenen Werte im Rahmen der Unsicherheit nicht reproduziert werden. Da die Vergleichswerte der manuellen Kapazitätsmessung nach dem Ausheizen aufgenommen wurden, ist die beobachtete Diskrepanz nicht auf den Ausheizvorgang zurückzuführen.

Die hier gezeigten Vergleichskapazitäten der automatischen Kapazitätsmessung wurden mehrmals innerhalb einiger Stunden gemessen, wobei es bei Ring 2 immer zu dieser Abweichung kam. Da allerdings zwei unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Kapazität verwendet wurden und außerdem zwischen beiden Messungen der Einbau des zweiten Messsystems erfolgte, ist ein direkter Vergleich der Werte nur bedingt möglich. Diese Diskrepanz sollte deshalb in Zukunft weiter untersucht werden, beispielsweise durch eine erneute Kalibrierung mit einer größeren Zahl bekannter Referenzkapazitäten und weiteren Messungen, um eine größere Statistik zu erhalten. Außerdem könnten dadurch noch unbekannte systematische Unsicherheiten der automatischen Kapazitätsmessung untersucht werden. Auch die erneute Messung mit dem in Kapitel 4.2 beschriebenen LCR-Handmessgerät ist sinnvoll, um einen Vergleich mit den vor der Installation des neuen Messsystems aufgenommenen Werten durchführen zu können.

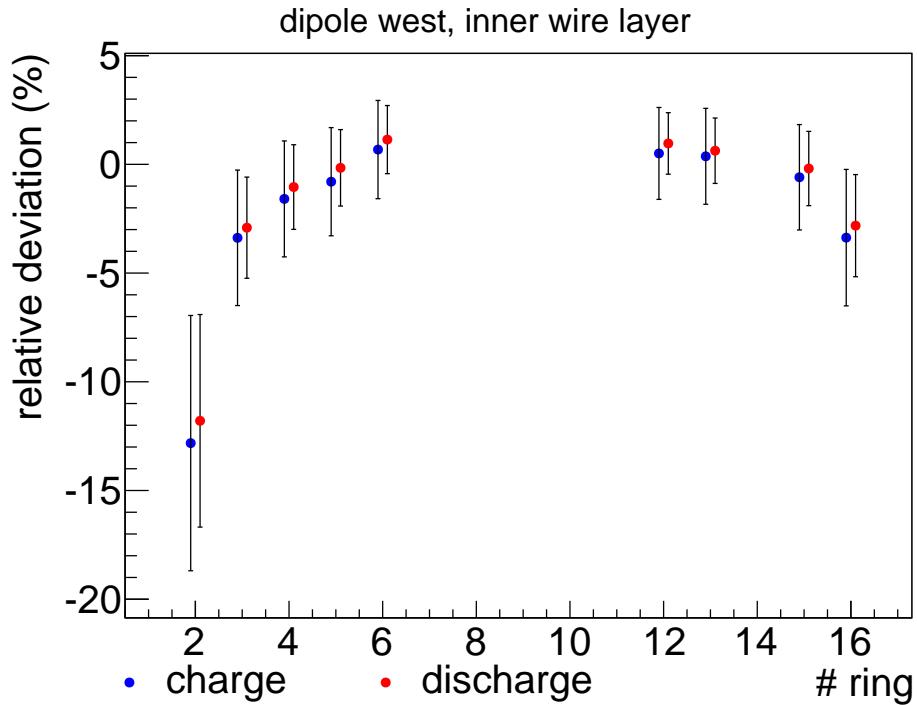


Abbildung 4.15: Relative Abweichung der inneren Drahtlage von Dipol 1 (West).

Verglichen werden die manuell und mit der automatisierten Methode bestimmten Kapazitäten. Alle Kapazitäten (manuell und automatisch) wurden nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers gemessen. Eine Ausnahme stellt Ring 5 dar, für den kein manuell gemessener Wert nach dem Ausheizen bestimmt wurde, sodass der Vergleichswert vor dem Ausheizen aufgenommen wurde.

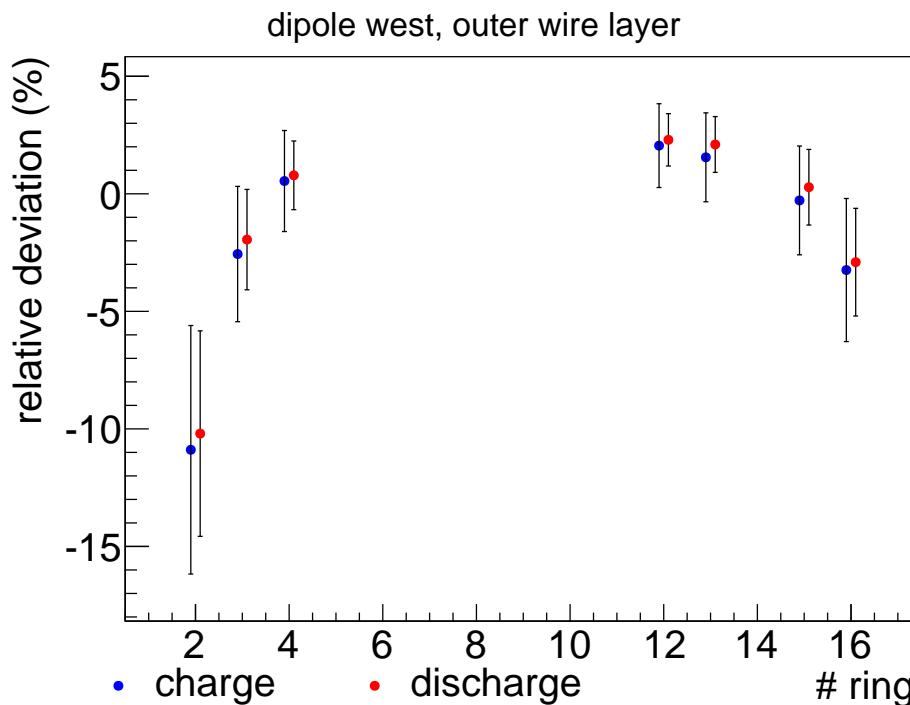


Abbildung 4.16: Relative Abweichung der äußeren Drahtlage von Dipol 1 (West).

Verglichen werden die manuell und mit der automatisierten Methode bestimmten Kapazitäten. Alle Kapazitäten (manuell und automatisch) wurden nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers gemessen.

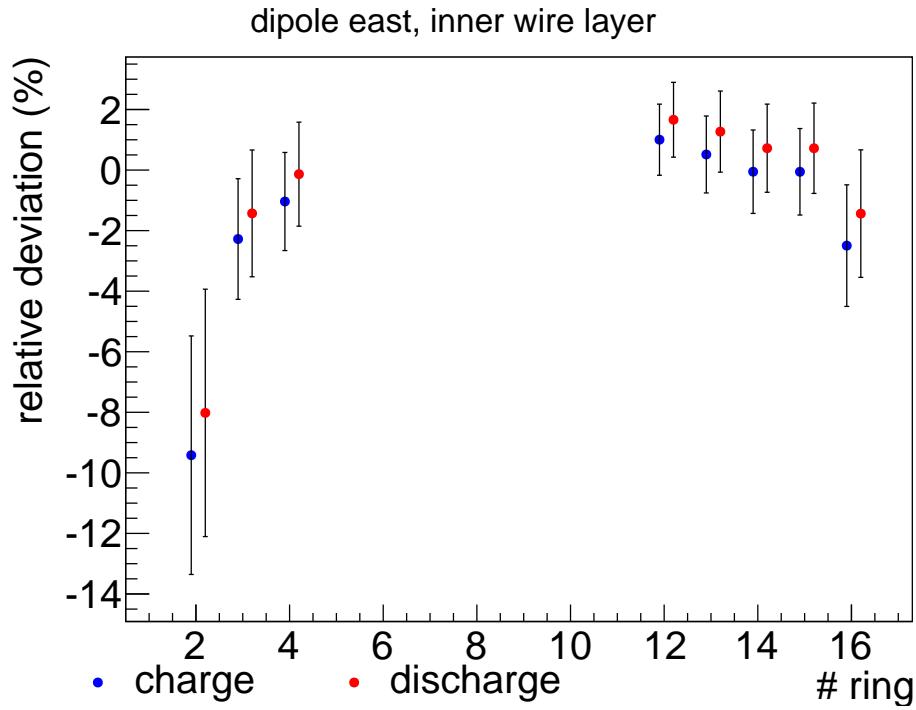


Abbildung 4.17: **Relative Abweichung der inneren Drahtlage von Dipol 2 (Ost).**
Verglichen werden die manuell und mit der automatisierten Methode bestimmten Kapazitäten. Alle Kapazitäten (manuell und automatisch) wurden nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers gemessen.

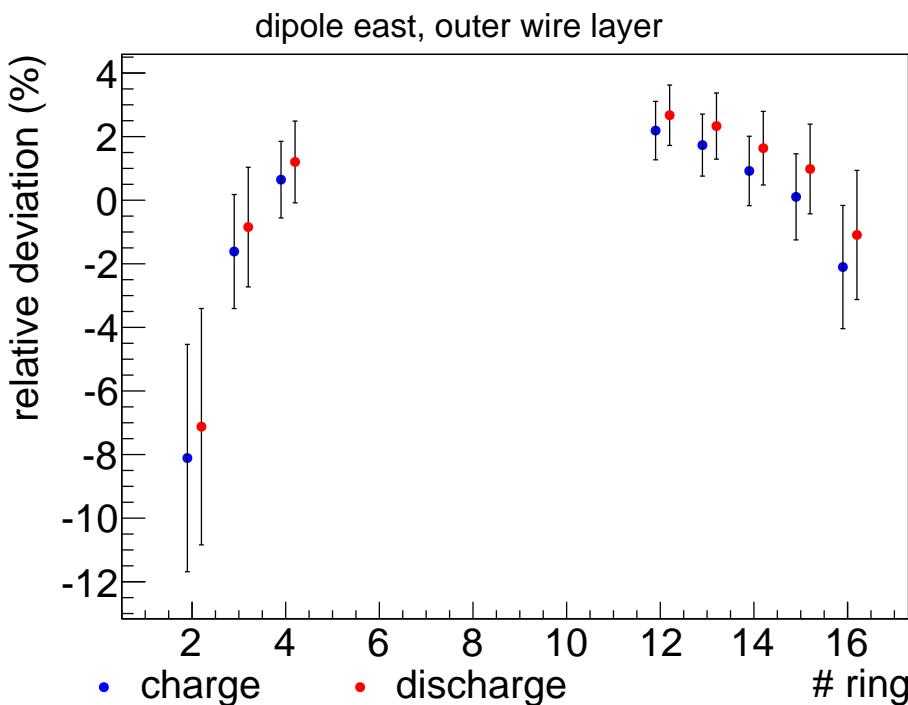


Abbildung 4.18: **Relative Abweichung der äußeren Drahtlage von Dipol 2 (Ost).**
Verglichen werden die manuell und mit der automatisierten Methode bestimmten Kapazitäten. Alle Kapazitäten (manuell und automatisch) wurden nach dem Ausheizen des Hauptspektrometers gemessen.

Zur Überwachung der Integrität des Drahtelektrodensystems ist gegenüber der Bestimmung von Absolutwerten die Reproduzierbarkeit der Messungen von wesentlicher Bedeutung. Unter der Annahme, dass die systematischen Fehler bei allen Messungen gleich sind, lässt sich die Unsicherheit für eine Kapazität jeweils aus dem Fit über die 50 Lade- bzw. Entladekurven bei festem R_M und C_M bestimmen. Dies ergibt Unsicherheiten der Größenordnung 0,1 bis 0,2%, was je nach Kapazität einer absoluten Unsicherheit von 10 bis 20 pF entspricht. Um die Reproduzierbarkeit und mögliche Abweichungen des Systems zu untersuchen, wurden die bereits geschilderten Messungen nach drei Wochen wiederholt. Die relativen Abweichungen der Messungen sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

Hier ist zu erkennen, dass die Werte der ersten Messungen im Rahmen der Unsicherheiten bis auf den sub-Prozent-Bereich reproduziert werden konnten. Die größten Abweichungen sind auch in diesem Fall bei den Ringen mit der geringsten Kapazität zu beobachten. Die absoluten Differenzen beider Messungen sind in allen Fällen kleiner gleich 10 pF, was allerdings beispielsweise bei der inneren Drahtlage von Ring 2 (Dipol 2) mit einer Kapazität von $\approx 1,8$ nF zu einer relativen Abweichung von etwa 0,35% führt bei einer Unsicherheit von 0,2%.

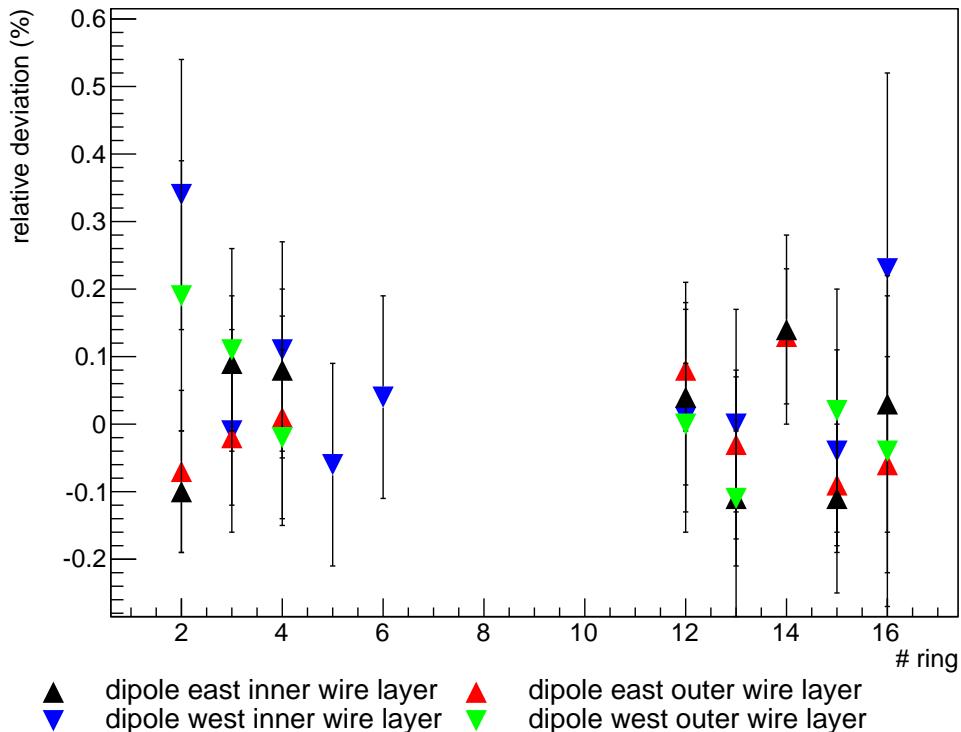


Abbildung 4.19: Vergleich zweier Messungen die in einem Abstand von drei Wochen durchgeführt wurden. Zu sehen sind die relativen Abweichungen der beiden Messungen für beiden Dipole und alle verfügbaren Kanäle. Da kein signifikanter Unterschied zwischen den mit Hilfe der Lade- und der Entladekurven bestimmten Kapazitäten festgestellt werden konnte, sind zur besseren Übersicht lediglich die durch den Ladevorgang ermittelten Kapazitäten zu sehen.

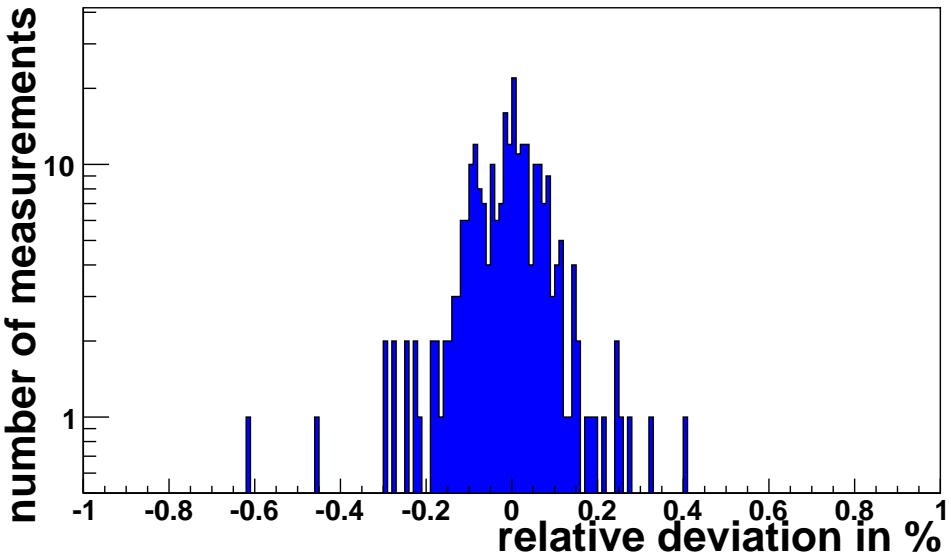


Abbildung 4.20: **Reproduzierbarkeit der automatischen Kapazitätsmessung.** Dargestellt ist die Häufigkeit der relativen Abweichung identischer Messungen aller Drahtlagen an beiden Dipolen jeweils für den Lade- und Entladevorgang.

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit identischer Messungen sind in Abbildung 4.20 die relativen Abweichungen als Histogramm dargestellt. Dabei wurde über alle Messungen der Mittelwert gebildet und die Differenz der Einzelmessungen vom Mittelwert betrachtet. Die Verteilung der Werte ist symmetrisch um den Nullpunkt mit einer Breite von etwa $\pm 0,2\%$. Dies wurde ebenso bei der manuellen Kapazitätsmessung beobachtet (vgl. Abbildung 4.5 Kapitel 4.2), wobei für die automatische Kapazitätsmessung eine größere Statistik vorliegt.

Insgesamt konnte das System zur automatischen Kapazitätsmessung erfolgreich am Hauptspektrometer installiert und getestet werden. Der Großteil der manuell gemessenen Kapazitäten konnte mit dieser Methode reproduziert und bestätigt werden, wobei es hingegen vor allem bei den Ringen mit kleinerer Kapazität Abweichungen der Größenordnung 10% gibt. Diese sollten im weiteren Verlauf der Kapazitätsmessung in den nächsten Monaten näher untersucht werden.

Betrachtet man die zur Überwachung der Integrität des Drahtelektrodensystems wesentlichere Abweichung einzelner Messungen der automatischen Kapazitätsmessung untereinander, konnte in den ersten Tests eine gute Reproduzierbarkeit im Rahmen der Unsicherheiten festgestellt werden. Die relativen Abweichungen liegen größtenteils im Bereich von $\pm 0,2\%$, was einer Kapazität im Bereich von 10 pF entspricht.

Um die Funktionalität des Systems und dessen Zuverlässigkeit jedoch besser beurteilen zu können, sollten in den nächsten Monaten regelmäßig Kapazitätsmessungen durchgeführt werden. Die generelle Möglichkeit der Überwachung der Integrität des Drahtelektrodensystems konnte mit diesen ersten Tests erfolgreich gezeigt werden.

KAPITEL 5

KALIBRIERUNG DER KOMPONENTEN DES PRÄZISIONSHOCHSPANNUNGSSYSTEMS

5.1 Motivation

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben muss die Spannungsüberwachung des Hauptspektrometers mit einer relativen Unsicherheit kleiner als 3,3 ppm erfolgen. Das Retardierungspotential von -18,6 kV muss mit einer Genauigkeit von ca. 60 mV überwacht werden. Um die erforderliche Genauigkeit und Stabilität gewährleisten zu können, müssen die Komponenten des Spannungsüberwachungssystems regelmäßig kalibriert werden. Dazu zählen neben dem Präzisionsnetzgerät zur Spannungsversorgung des Drahtelektrodensystems vor allem die beiden für KATRIN entwickelten Spannungsteiler. Da Kalibrationsmessungen der Teiler einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen, soll im nächsten Unterkapitel ein kurzer Überblick über das Konzept und den Aufbau beider Teiler gegeben werden.

Einen wichtigen Aspekt stellen in diesem Zusammenhang außerdem die Multimeter, mit denen die Ausgangsspannungen der KATRIN-Spannungsteiler bestimmt werden, dar. Die Kalibrierung dieser Multimeter wird in Kapitel 5.3 beschrieben und die Kalibrierung der dafür benötigten 10 V-Referenzquellen im darauf folgenden Unterkapitel. Anschließend folgt eine Beschreibung der Kalibriermethoden der Spannungsteiler, sowie die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Kalibrationsmessungen. Kapitel 5.6 handelt von der Diagnose und Reparatur des K65-Spannungsteiler, der während der letzten Kalibrationsphase im Oktober 2013 an der PTB Instabilitäten aufwies. Im letzten Unterkapitel werden schließlich Kalibrationsmessungen des Präzisionsnetzgeräts beschrieben, welches zur Erzeugung des Retardierungspotentials des Hauptspektrometers genutzt werden soll.

5.2 Konzept und Aufbau der HV-Teiler K35 und K65

Zur direkten Messung des Retardierungspotentials von -18,6 kV wird ein Präzisionshochspannungsteiler verwendet, der die Spannung auf etwa 10 V herunter teilt, sodass sie mit einem kommerziellen Präzisionsmultimeter gemessen werden kann. Da für diesen Grad an Präzision kein kommerzieller Spannungsteiler zur Verfügung steht, wurden in Zusammenarbeit mit der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig zwei Spannungsteiler entwickelt.

Der erste Teiler mit der Bezeichnung K35 ist für Spannungen bis zu 35000 V ausgelegt und wurde im Rahmen der Dissertation von [Thu08] gebaut. Der zweite Teiler K65, der in [Bau10] entwickelt und gebaut wurde, ist eine Weiterentwicklung des K35 und für Spannungen bis zu 65000 V ausgelegt. Beide Teiler bauen auf dem Prinzip des MT100-Spannungsteilers der PTB auf [Mar01]. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über den Aufbau und wesentliche Komponenten der Spannungsteiler gegeben werden, wobei für eine detailliertere Ausführung auf die jeweiligen Arbeiten verwiesen sei.

Das grundlegende Prinzip eines Spannungsteilers ist die Reihenschaltung mehrerer ohmscher Widerstände R_i , wobei der Spannungsabfall über einem oder mehreren Abgriffwiderständen R_{meas} der Teilerkette gemessen wird. Der Maßstabsfaktor M ist als Verhältnis von Eingangsspannung U_{in} zur Ausgangsspannung U_{out} folgendermaßen definiert:

$$M := \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_{meas}}{\sum R_i + R_{meas}}. \quad (5.1)$$

Bei Hochspannungsteilern besteht die Teilerkette aus vielen hochohmigen (in der Regel $M\Omega$ bis $G\Omega$) in Reihe geschalteten Widerständen, wobei die Spannung über einem Niederspannungswiderstand abgegriffen wird, der sich im hinteren Teil der Kette befindet. Die beiden Teiler K35 und K65 sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut, wobei der K65 eine größere Teilerkette mit mehr Widerständen besitzt. Die grundlegende Schaltung soll anhand des K65 gezeigt werden, dessen Schaltskizze in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt ist.

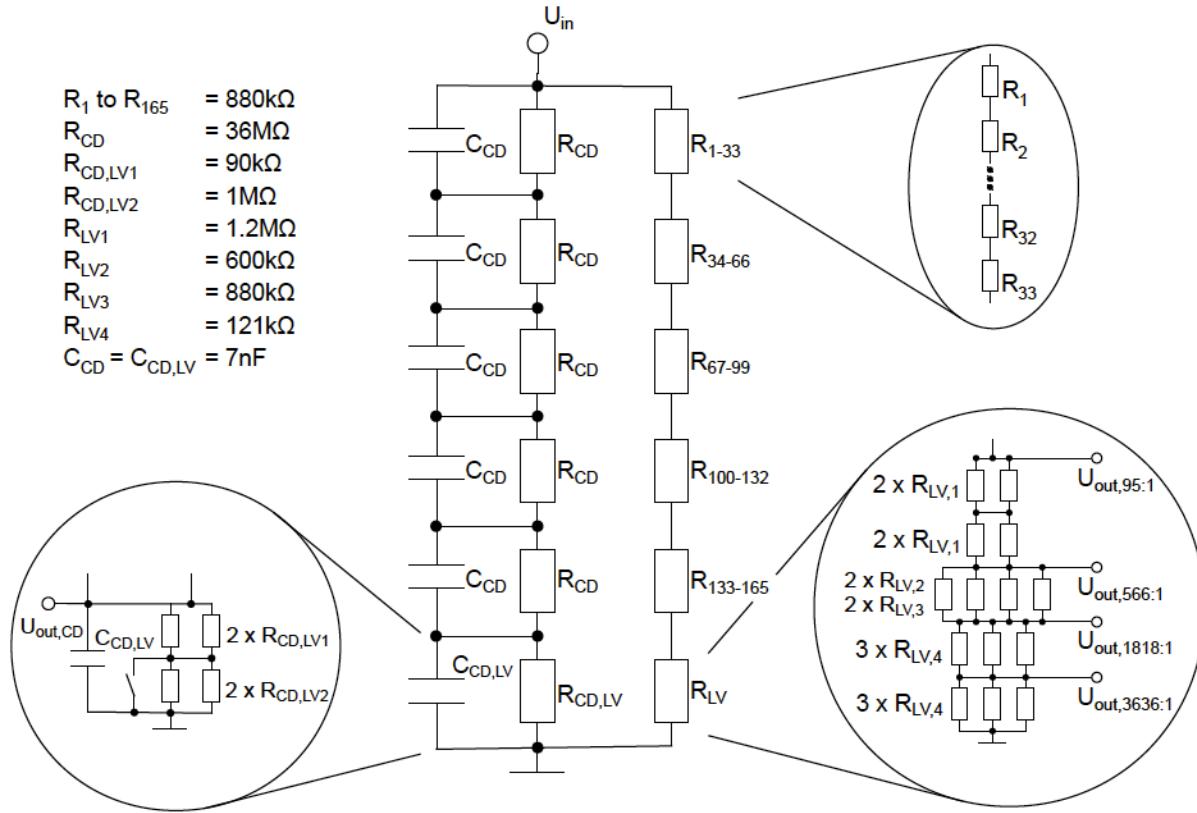


Abbildung 5.1: **Schaltskizze des K65.** Der Kontrollteiler besteht aus den Kondensatoren C_{CD} parallel zu den Widerständen R_{CD} geschaltet. Die Widerstände $R_{1\dots 165}$ bilden die Präzisionsteilerkette, wobei die Spannung an den Widerständen R_{LV} abgegriffen wird [Bau13a].

Der K65 besitzt zwei Teilerketten: den Primär- und den Kontrollteiler.

Der Primärteiler besteht aus 165 in Reihe geschalteten 880 k Ω Präzisions- und zusätzlich den jeweiligen Abgriffwiderständen. Die Spannungsabgriffe der einzelnen Maßstabsfaktoren befinden sich am Ende der Teilerkette im Niederspannungsbereich.

Die technische Realisierung dieses Konzepts ist schematisch in Abbildung 5.2 dargestellt. Zur Formung eines homogenen elektrischen Feldes ist der Aufbau in sechs Ebenen unterteilt, die jeweils durch eine Kupferelektrode getrennt sind. In den oberen fünf Ebenen befinden sich die 165 Präzisionswiderstände und in der untersten Ebene die Abgriffwiderstände.

Die einzelnen Widerstände sind über Nickel-beschichtete Messinghalterungen verbunden, wobei die Halterungen mit Madenschrauben fixiert sind. Um die größtmögliche Stabilität und eine vollständige Kontaktierung innerhalb der Teilerkette zu gewährleisten, müssen

diese Verbindungen mit besonderer Sorgfalt festgezogen werden. Nicht intakte bzw. lose Verbindungen können Unsicherheitsquellen der Präzisionsmessungen darstellen, was in Kapitel 5.6 anhand von Auffälligkeiten während einiger Präzisionsmessungen näher diskutiert wird.

Der Kontrollteiler besteht aus sechs in Reihe geschalteten Kondensatoren, die mit einem ohmschen Widerstand parallel geschaltet sind. Dies dient einerseits als Schutz der primären Teilerkette vor Hochspannungstransienten und kann außerdem zur Analyse von Wechselspannungsanteilen der Eingangsspannung genutzt werden.

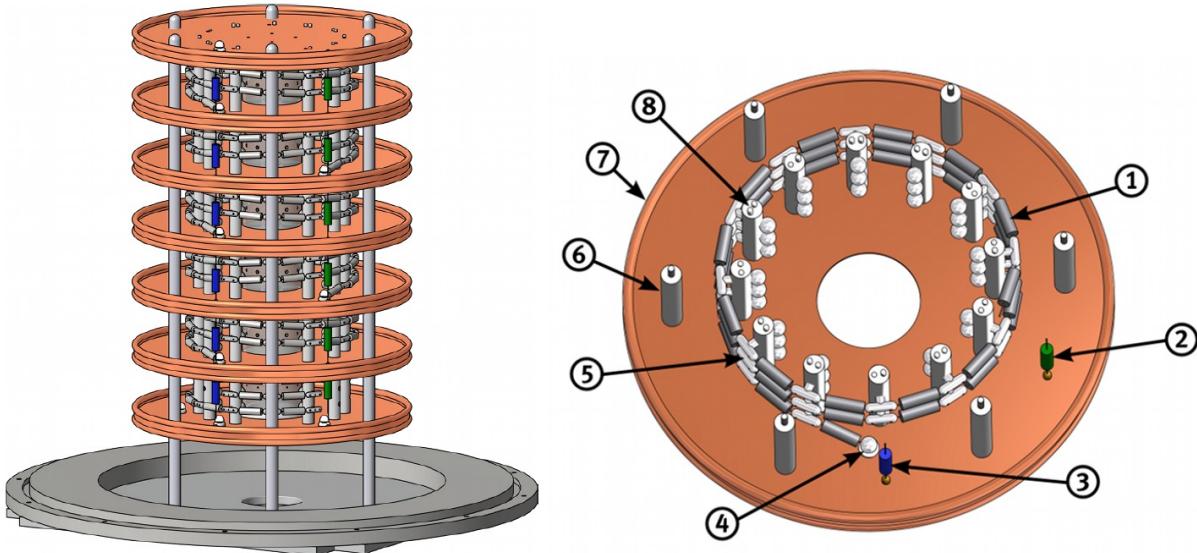


Abbildung 5.2: **CAD-Modell des K65.** Zu sehen sind die 6 Ebenen, in denen sich die Präzisions- und die Abgriffwiderstände befinden, sowie die Widerstände (blau) und Kondensatoren (grün) des Kontrollteilers. In der vergrößerten Darstellung lassen sich die einzelnen Komponenten erkennen: 1) 33 Präzisionswiderstände, 2) Hochspannungskondensator des Kontrollteilers, 3) Hochspannungswiderstand des Kontrollteilers, 4) isolierte Durchführung der Präzisionsteilerkette, 5) Nickel-beschichtete Messing Halterung der Präzisionswiderstandskette, 6) Polyoxymethylen Stützen der Kupferelektroden, 7) Kupferelektrode, 8) Polytetrafluorethylen Stützen [Bau13a].

Die wesentlichen Merkmale beider Spannungsteiler sind eine niedrige Spannungsabhängigkeit von

$$\frac{\Delta M}{\Delta U} < 10^{-7}/kV, \quad (5.2)$$

eine große Langzeitstabilität besser als 2 ppm pro Jahr und eine Temperaturabhängigkeit von

$$\frac{\Delta M}{\Delta T} < 10^{-7}/K. \quad (5.3)$$

Zur Temperaturabhängigkeit ist anzumerken, dass die Widerstände der Präzisionsteilerkette durch zahlreiche Messungen so ausgewählt wurden, dass Widerstände mit einem negativen und einem positiven Temperaturkoeffizienten derartig verbaut wurden, dass eine bestmögliche Kompensierung von Temperaturänderungen auftritt. Außerdem sind beide Teiler auf $\pm 0,1$ K temperaturstabilisiert, sodass thermische Einflüsse minimiert werden.

5.3 Kalibrierung der Präzisionsmultimeter

Die durch die Spannungsteiler auf etwa 10 V reduzierte Spannung wird mit einem Präzisionsmultimeter (Fluke 8508A) gemessen. Um mit Hilfe des Multimeters Spannungen zwischen 0 und 20 V ppm-genau messen zu können, müssen regelmäßige Kalibrierungen durchgeführt werden. Dazu wird eine kommerzielle 10 V Referenzquelle (Fluke 732A) (siehe Kapitel 5.4) verwendet, um durch eine definierte Quelle die Spannungsverstärkung des Multimeters zu bestimmen. Neben der Verstärkung des Multimeters muss außerdem die Offsetspannung bei kurzgeschlossenen Eingängen berücksichtigt werden. Diese beiden Effekte sind in der Regel sehr klein, können bei der erforderlichen Präzision im ppm-Bereich jedoch nicht vernachlässigt werden. Aus diesem Grund soll im Folgenden eine kurze Abschätzung des Einflusses dieser beiden Größen, sowie ein Vergleich mit entsprechenden Messwerten, durchgeführt werden, bevor die Kalibrationsmessungen diskutiert werden.

Zur Bestimmung des Einflusses von Offset und Verstärkung des Multimeters soll hier die Messung mehrerer Hochspannungen mit den beiden Spannungsteilern K35 und K65 betrachtet werden. Dazu wurden Spannungen von 0 bis -20 kV stufenweise auf beide Teiler gegeben, wobei die Ausgangsspannung der Teiler am 2000:1-Abgriff mit zwei Multimetern des Typs Fluke 8508A gemessen wurde. Als Observable des Experiments soll das Verhältnis der Ausgangsspannungen V betrachtet werden. Dieses ergibt sich aus dem Quotienten der von Multimetern angezeigten Spannungen $U_{multimeter}$:

$$V = \frac{U_{multimeter,K35}}{U_{multimeter,K65}}. \quad (5.4)$$

Die Spannung $U_{multimeter}$ hängt von der Eingangsspannung U_{input} , dem Maßstabsfaktor des jeweiligen Teilers M , sowie einem unbekannten Offset U_0 und der Verstärkung G des Multimeters ab:

$$U_{input} = (U_{multimeter} - U_0) \cdot G \cdot M \quad (5.5)$$

$$\Leftrightarrow U_{multimeter} = \frac{U_{input}}{G \cdot M} + U_0. \quad (5.6)$$

Damit folgt für das Verhältnis der Ausgangsspannungen

$$V = \frac{U_{input} \cdot G_{K65} \cdot M_{K65} + U_{0,K35} \cdot G_{K35} M_{K35} \cdot G_{K65} \cdot M_{K65}}{U_{input} \cdot G_{K35} \cdot M_{K35} + U_{0,K65} \cdot G_{K65} M_{K65} \cdot G_{K35} \cdot M_{K35}}. \quad (5.7)$$

Anhand der Gleichung 5.7 ist erkennbar, dass das Verhältnis V bei verschwindendem Offset konstant ist¹, wohingegen für $U_0 \neq 0$ ein Korrekturterm zu beachten ist. Diese Korrektur

¹Hier wird angenommen, dass sich der Maßstabsfaktor, der Offset und die Verstärkung während einer Messung nicht ändern.

hat etwa die Größenordnung 1 V: der Offset liegt in der Regel im μV -Bereich, das Produkt der Maßstabsfaktoren beträgt $\mathcal{O}(10^6)$ und der Verstärkungsfaktor der Multimeter ist ungefähr 1. Der erste Term im Zähler bzw. Nenner von Gleichung 5.7 liegt je nach angelegter Spannung im Bereich von 10^6 V bis 10^7 V für Spannungen von 1 bis 20 kV. Je größer die anliegende Spannung ist, desto geringer wird der Einfluss des Korrekturfaktors. Dabei ist der Unterschied zwischen den Offsets der beiden Multimeter zur Spannungsmessung von großer Bedeutung. Für kleine Unterschiede des Offsets ist der Einfluss auf das Verhältnis der Ausgangsspannungen geringer.

Wenn vor einer Messung Offset und Verstärkung nicht bestimmt und daher bei der Auswertung der Daten nicht berücksichtigt werden, ist das gleichbedeutend damit, dass ein Offset von 0 V und eine Verstärkung von 1 angenommen wird. Dies bedeutet für Gleichung 5.7, dass der hintere Term in Zähler und Nenner wegfällt. Das Verhältnis der Ausgangsspannungen wäre in diesem Fall konstant für alle Eingangsspannungen.

In Abbildung 5.3 sind die experimentell ermittelten Werte gezeigt, die einem konstanten Verhältnis der Ausgangsspannung widersprechen. Füttet man Gleichung 5.7 an die Messwerte, erhält man eine gute Übereinstimmung. Die durch den Fit ermittelten Parameter entsprechen mit Ausnahme der Verstärkung im Rahmen der Unsicherheiten den Werten, die experimentell bestimmt wurden (vgl. Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Maßstabsfaktoren, Verstärkung und Offset für beide KATRIN-Spannungsteiler bestimmt im Rahmen von Niederspannungskalibrierungsmessungen am 5.10.2013, sowie die selben Parameter bestimmt durch einen Fit über Messdaten, die ohne vorherige Offset- und Verstärkungsbestimmung durchgeführt wurden.

Größe	Messung	Messung	Fit	Fit
Teiler	K35	K65	K35	K65
M	$1972,461 \pm 0,002$	$1818,109 \pm 0,002$	$1972,459 \pm 0,001$	$1818,111 \pm 0,001$
U_0	$-(0,5 \pm 0,1) \mu\text{V}$	$-(4,6 \pm 0,1) \mu\text{V}$	$(-1,1 \pm 2,7) \mu\text{V}$	$(-4,8 \pm 2,9) \mu\text{V}$
G	$1,0000011 \pm 1 \cdot 10^{-7}$	$0,9999996 \pm 1 \cdot 10^{-7}$	$0,9999981 \pm 6 \cdot 10^{-7}$	$0,9999945 \pm 6 \cdot 10^{-7}$

Abweichungen in der Größenordnung 10^{-6} der Verstärkung können möglicherweise durch die geringe Anzahl an Messwerten erklärt werden. Da diese Messungen lediglich als Beispiel für die Wichtigkeit einer regelmäßigen Offset- und Verstärkungsmessung dienen, wurden nur wenige Messwerte bei recht großen Spannungsschritten betrachtet. Dabei gilt es außerdem zwei wichtige Aspekte zu beachten. Beide Spannungsteiler weisen eine Spannungsabhängigkeit von etwa $1-5 \cdot 10^{-8}/\text{kV}$ auf, die nicht berücksichtigt wurde. Außerdem ist die Bestimmung des Verhältnisses bei kleineren Spannungen in der Größenordnung von 1 kV nicht mit ppm-Genauigkeit möglich, da die am Multimeter anliegende Spannung in diesem Fall kleiner 1 V ist, wodurch die Auflösung um eine Größenordnung kleiner ist.

Dieses Beispiel zeigt, dass der Einfluss der Verstärkung und vor allem des Offsets durchaus zu ppm-Abweichungen führen kann, wenn er bei der Datenanalyse nicht berücksichtigt wird. Aus diesem Grund müssen die beiden Größen entsprechend vor jeder Präzisionsmessung, wie bereits beschrieben, experimentell bestimmt werden.

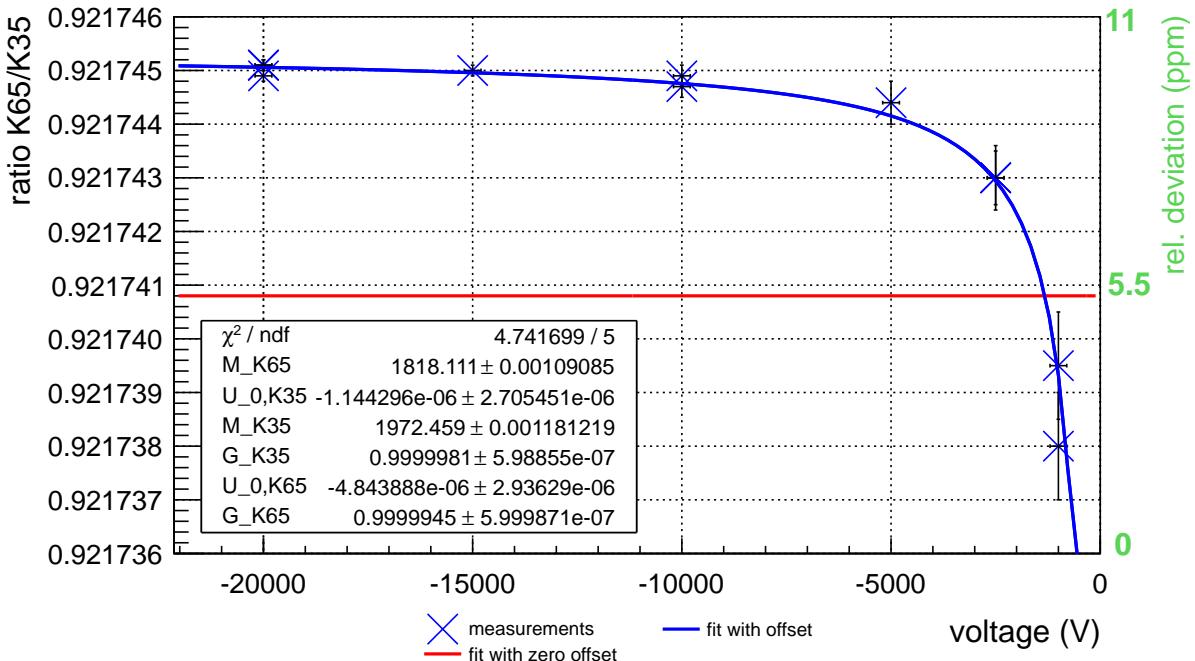


Abbildung 5.3: **Einfluss von Offset und Verstärkung auf Spannungsmessung.** Dargestellt ist das Verhältnis der Ausgangsspannungen des K35 und K65 ohne (rot) und mit (blau) Berücksichtigung des Offsets der Multimeter. Die experimentell bestimmte Werte wurden mit den entsprechenden Funktionen gefittet, wobei als Startparameter des Fits die durch die Niederspannungskalibrierung bekannten Parameter verwendet wurden.

5.4 Kalibrierung der 10 V-Referenzquellen

Zur Bestimmung der Verstärkung der Multimeter werden Referenzquellen (Fluke 732A) verwendet, die als Standard für eine Ausgangsspannung von 10 V mit einer Stabilität von 1,2 ppm/Jahr dienen. Zur absoluten Bestimmung der Ausgangsspannung werden die Quellen regelmäßig an der PTB gegen das Spannungsnormalskalimeter kalibriert. Insgesamt stehen bei KATRIN vier 10 V-Referenzen zur Kalibrierung der Multimeter zur Verfügung: Referenz A, B, C und D. Eine dieser Quellen (Referenz D), die im November 2013 an der PTB kalibriert wurde, wurde im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um zwei Quellen, die in Karlsruhe am KIT genutzt werden, zu kalibrieren.

Dazu wurde mit den beiden Multimetern, die zur Spannungsmessung der beiden KATRIN HV-Teiler verwendet werden, zunächst vor jeder Messung der Offset U_0 durch Kurzschließen der Eingänge bestimmt. Dann wurden die Multimeter an die von der PTB kalibrierten Referenz angeschlossen und die angezeigte Spannung wurde um den Offset korrigiert. Die Verstärkung G ergibt sich dann aus dem Quotienten des Referenzwerts R zur tatsächlich gemessenen Spannung U :

$$G = \frac{R}{U - U_0}. \quad (5.8)$$

Der von der PTB bestimmte Wert für die Referenzspannung U_{ref} (Referenz D) lautet

$$U_{ref} = 10,0001530 \text{ V} \quad (5.9)$$

$$\sigma = 0,9\mu \text{ V}$$

mit der Standardabweichung σ . Nach der Bestimmung von Offset und Verstärkung der Multimeter wurden diese mit den zu kalibrierenden Quellen verbunden und die gemessenen Spannungen wurden entsprechend korrigiert, sodass neue Referenzwerte für die 10 V Quellen B und C bestimmt werden konnten. Die Messungen wurden über eine Woche täglich mehrmals mit jeweils 30 Messwerten pro Messung durchgeführt, um eine ausreichende Statistik zu erhalten. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Als Unsicherheit wurde die Standardabweichung angenommen. Die gemessenen Spannungen weisen über den gesamten Messzeitraum eine hohe Stabilität und Reproduzierbarkeit auf. Es wurden folgende Mittelwerte bestimmt:

- Referenz B

$$U_{ref} = 10,0000471 \text{ V} \quad (5.10)$$

$$\sigma = 0,6\mu \text{ V}$$

- Referenz C

$$U_{ref} = 9,999860 \text{ V} \quad (5.11)$$

$$\sigma = 2,5\mu \text{ V.}$$

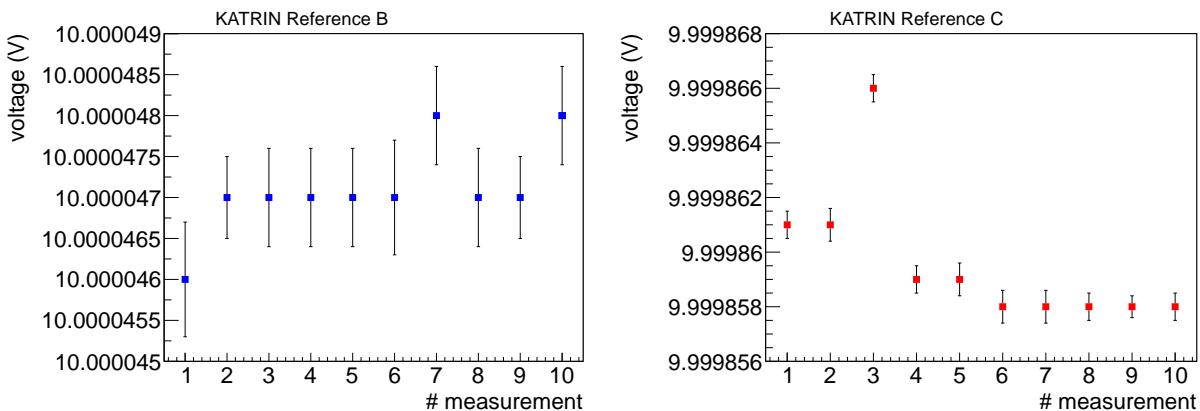


Abbildung 5.4: **Kalibrationsdaten der KATRIN 10V-Referenzen.** Aufgetragen ist die bestimmte Spannung über den Verlauf einer Woche, wobei zwei Messungen pro Tag durchgeführt wurden. Als Unsicherheiten wurden Links: Referenz B. Rechts: Referenz C.

Auffällig ist, dass Referenz B eine höhere Stabilität aufweist als Referenz C, was nach [Bau13a] über die letzten Jahren durch Kalibrierungen an der PTB bestätigt werden kann. Vergleichen mit den letzten Kalibrationsmessungen der PTB dieser Referenzen

$$\text{Referenz B: } U_{ref} = 10,000038 \text{ V (November 2012)} \quad (5.12)$$

$$\text{Referenz C: } U_{ref} = 9,999850 \text{ V (Oktober 2011)}$$

ergibt sich eine Stabilität von etwa 0,7 ppm/Jahr für Referenz B und 0,4 ppm/Jahr für Referenz C, was innerhalb der Herstellerangaben von 1,2 ppm/Jahr liegt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Kalibrierung der Quellen nicht direkt am Spannungsnormal der PTB, sondern anhand einer von der PTB kalibrierten Quelle in Münster vorgenommen wurde.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass die Kalibrierung der Referenzquellen untereinander reproduzierbare und mit den Herstellerangaben verträgliche Ergebnisse liefert, falls mindestens eine extern an der PTB kalibrierte Quelle verwendet wird. Dieses Verfahren eignet sich somit, auch in Zukunft zuverlässige und wichtige Kalibrierungen der 10 V-Referenzen durchzuführen, die für die Kalibrierung der Multimeter unerlässlich sind. Präzise kalibrierte Multimeter ermöglichen wiederum eine hinreichend sensitive Kalibrierung der Spannungsteiler, die im nächsten Kapitel erläutert wird.

5.5 Kalibrierung der Spannungsteiler

Um die erforderliche Genauigkeit und Stabilität der Spannungsüberwachung durch die Präzisions-Hochspannungsteiler gewährleisten zu können, müssen diese regelmäßig kalibriert werden. Die in diesem Zusammenhang wesentlichen Größen stellen die Maßstabsfaktoren der Spannungsteiler dar, die, wie bereits beschrieben, als das Verhältnis von eingehender zu ausgehender Spannung definiert sind. Die Ausgangsspannung wird mit Präzisionsmultimetern gemessen, sodass zur Kalibrierung des Systems eine gut bekannte und stabile Eingangsspannung erforderlich ist. Um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen, muss die Kalibrierung außerdem bei stabilen äußeren Bedingungen stattfinden. Dazu gehört neben einer Temperaturstabilisierung außerdem ein abgeschirmter Bereich, wie zum Beispiel ein Schaltschrank, sodass die Geräte vor elektromagnetischen Störquellen geschützt sind.

Das erste der in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren ist die Niederspannungskalibrierung. Dabei wird über eine stabile Spannungsquelle bis zu 1 kV auf den zu kalibrierenden Teiler gegeben, wobei der genaue Spannungswert mit Hilfe des kommerziellen Referenzteilers Fluke 752A bestimmt wird. Diese in [Bau10] eingeführte Methode wurde im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und wird in Kapitel 5.5.1 näher erläutert.

Die zweite Möglichkeit ist die Hochspannungskalibrierung mit Spannungen bis 35 kV bzw. 65 kV. Da für dieses Verfahren ein Referenzteiler mit ähnlicher Präzision wie der K35 bzw. der K65 benötigt wird und diese Geräte nicht kommerziell zur Verfügung stehen, wurde die Hochspannungskalibrierung in den letzten Jahren an der PTB in Braunschweig durchgeführt. Dies wird in Kapitel 5.5.2 erläutert.

Um eine umfangreiche Kalibrierungshistorie über einen langen Zeitraum zu erhalten, wurden in den letzten Jahren beide Verfahren regelmäßig mit beiden Teilern durchgeführt.

5.5.1 Niederspannungskalibrierung

Mit Hilfe der Niederspannungskalibrierung können die beiden KATRIN-Spannungsteiler mit Spannungen bis zu 1 kV kalibriert werden. Dabei unterscheidet sich das Verfahren für den 100:1 und den 2000:1 bzw. 4000:1 Abgriff. Das Prinzip der Niederspannungskalibrierung für den Maßstabsfaktor 100:1 ist in Abbildung 5.5 schematisch dargestellt.

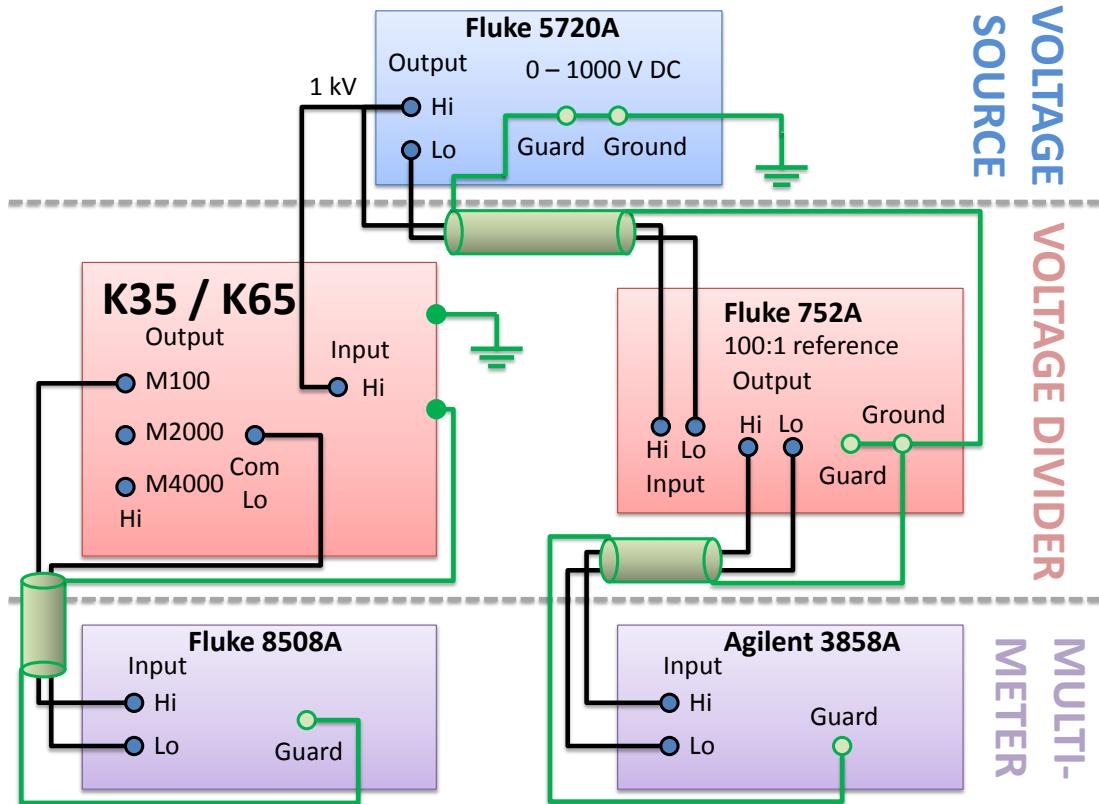


Abbildung 5.5: Schematische Übersicht der M100 Niederspannungskalibrierung.

Mit Hilfe eines Referenz-Teilers und eines Präzisionsmultimeters wird die durch den *Calibrator* erzeugte Spannung gemessen, um einen absoluten Spannungswert für die Bestimmung des 100:1 Maßstabsfaktors des K35 bzw. K65 zu erhalten. Letzterer wird mit der gleichen Spannungsquelle verbunden und mit einem zweiten Präzisionsmultimeter wird die Ausgangsspannung des K35 bzw. K65 bestimmt, sodass das Teilverhältnis mit ppm-Genauigkeit bestimmt werden kann.

Als Spannungsquelle wird ein Multifunktionskalibrator (Fluke 5720A) (weiterhin bezeichnet als *Calibrator*) verwendet, mit dem bipolare Spannungen von 0 bis 1 kV mit einer Stabilität auf ppm-Niveau erzeugt werden können. Die Spannungsquelle wird mit dem bzw. beiden KATRIN-Teilern und einem Referenz-Teiler (Fluke 752A) verbunden, wobei der Referenz-Teiler zur Bestimmung der tatsächlichen Ausgangsspannung des *Calibrators* bis auf eine rel. Genauigkeit von 10^{-7} verwendet wird. Bei beiden Teilern wird die Spannung am 100:1 Abgriff gemessen, sodass die zur Messung verwendeten Präzisionsmultimeter in einem Bereich

von etwa 10 V arbeiten. Um Abweichungen aufgrund von Erdschleifen zu vermeiden ist das komplette System auf das Schutzleiterpotential des HV-Labors bezogen.

Vor jeder Kalibrationsmessung wird der Referenz-Teiler einer Selbstkalibrierung unterzogen, wodurch gewährleistet ist, dass die relative Unsicherheit des Teilverhältnisses kleiner als 0,5 ppm ist. Die Ausgangsspannung des Referenz-Teilers wird mit Hilfe eines Präzisionsmultimeters der Firma Agilent (3858A) bestimmt. Mit einem zweiten Multimeters (Fluke 8508A) wird die durch den K35 bzw. K65 geteilte Spannung gemessen. Durch die ppm-genaue Kenntnis der Eingangs- und Ausgangsspannung des Teilers kann der 100:1 Maßstabsfaktor mit einer Unsicherheit von $\pm 0,6$ ppm bestimmt werden, wobei sich diese nach [Bau13a] aus den Einzelunsicherheiten beider Multimeter und des Referenz-Teilers zusammensetzt.

Die Ergebnisse der 100:1 Niederspannungskalibrierungen der letzten Jahre für beide Teiler sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Der Maßstabsfaktor des K35 weist über die letzten drei-einhalb Jahre eine Drift von etwa $(0,6 \pm 0,1)$ ppm/Jahr zu einem höheren Maßstabsfaktor auf. Diese wurde folgendermaßen bestimmt:

Der Parameter p_1 des Fits gibt die Steigung der Fitfunktion an. Da die Abszissenachse zur besseren Anschauung das jeweilige Datum der Messungen anzeigt, ergibt sich in dieser Darstellung eine Abszisseninkrementierung von 1 s. Die Steigung muss zur Bestimmung der jährlichen Drift demnach zunächst mit der Anzahl der Sekunden pro Jahr multipliziert werden. Anschließend wird der Wert durch den Mittelwert des Maßstabsfaktors geteilt und mit 10^6 (Angabe in ppm) multipliziert, was für den 100:1-Maßstabsfaktor des K35 die oben genannte Drift ergibt. Für alle weiteren Maßstabsfaktoren ist das Vorgehen analog.

Im Rahmen der Messunsicherheit liegen alle Werte innerhalb eines Bereichs von $\pm 1,5$ ppm um den Mittelwert

$$\overline{M100}_{lvc}^{K35} = (95,22093 \pm 0,00001), \quad (5.13)$$

was, wie in Kapitel 2.5 beschrieben ist, die erforderliche Stabilität über eine Messphase des KATRIN-Experiments² darstellt. Die Niederspannungskalibrierung zeigt somit, dass der 100:1-Abgriff des K35 diese Anforderungen übertrifft.

Beim 100:1-Abgriff des K65 lässt sich keine eindeutige Drift feststellen. Die Stabilität liegt bei etwa $(0,04 \pm 0,07)$ ppm/Jahr. Die Unsicherheit ist in diesem Fall größer als die bestimmte Drift, was darauf schließen lässt, dass die systematische Unsicherheit der Messgeräte zu groß ist, um eine gerichtete Drift zu messen bzw. dass keine signifikante Drift vorhanden ist. Die im November 2013 durchgeföhrten Messungen weichen um bis zu 5 ppm vom Mittelwert

$$\overline{M100}_{lvc}^{K65} = (100,51485 \pm 0,00001) \quad (5.14)$$

der letzten Jahre ab. Diese Messungen wurden durchgeführt, nachdem an der PTB bereits Stabilitätsschwankungen im ppm-Bereich des K65 festgestellt wurden. Diese Auffälligkeiten ließen sich, nachdem der K65 zur Diagnose wieder nach Münster transportiert wurde, mit Hilfe der Niederspannungskalibrierung bestätigen. Dies zeigt, dass diese Kalibrationsmethode und eine ausführliche Kalibrationshistorie zur Überwachung der Spannungsteiler von großer Bedeutung sind. Die nach der Reparatur durchgeföhrten Kalibrationsmessungen liegen wieder im erwarteten Bereich von 3 ppm um den Mittelwert der letzten Jahre.

²eine Messphase des Experiments erstreckt sich über mehrere Monate

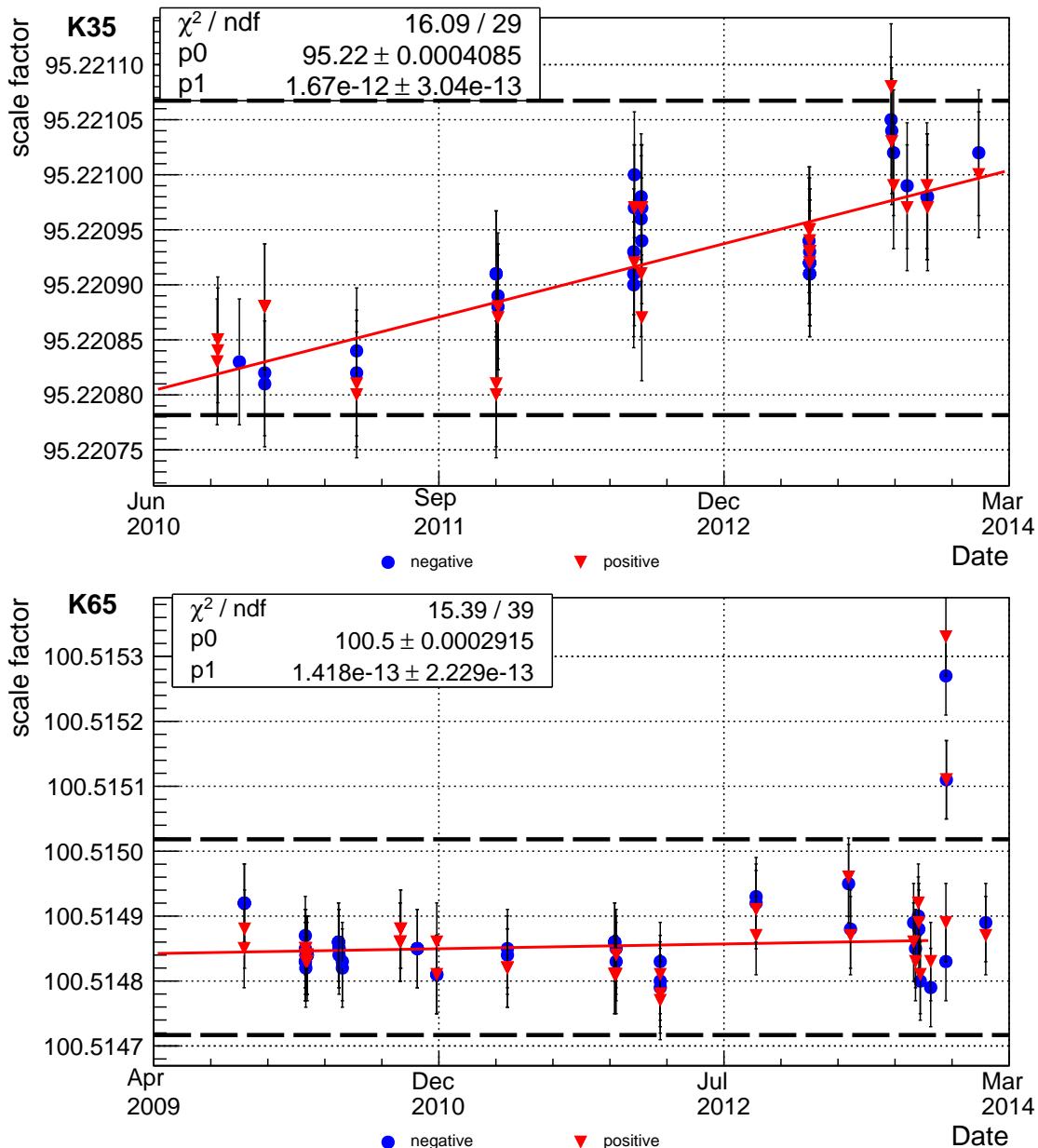


Abbildung 5.6: Niederspannungskalibrierung des 100:1 Abgriffs des K35 und K65 der letzten Jahre. Der Maßstabsfaktor wurde jeweils mit einer Spannung von ± 1 kV bestimmt. Die gestrichelte Linie zeigt einen Bereich von $\pm 1,5$ ppm um den Mittelwert an. Oberer Teil: K35, wobei über die letzten Jahre eine Drift (siehe Fitfunktion in rot) zu höheren Maßstabsfaktoren erkennbar ist. Unterer Teil: K65. Im November 2013 weichen die Daten signifikant vom Mittelwert der letzten Jahre ab. Diese Messungen wurden durchgeführt, nachdem bereits bei Kalibrationsmessungen an der PTB Stabilitätschwankungen des K65 beobachtet wurden. Nach der Reparatur des Teilers liegt der Maßstabsfaktor wieder im erwarteten Bereich. Der Diagnose- und Reparaturverlauf ist in Kapitel 5.6 beschrieben. Der zur Bestimmung der Drift verwendete Fit wurde nur bis zu den Messungen vor den Abweichungen durchgeführt.

Die Maßstabsfaktoren des 2000:1 bzw. 4000:1 Abgriffs lassen sich nicht auf diese Weise bestimmen. Würde bei einer Eingangsspannung von 1 kV die Ausgangsspannung dieser Abgriffe gemessen, verliert man eine Größenordnung der Auflösung des Multimeters, da die Spannungen unter 1 V liegen würden. Da der *Calibrator* nur Spannungen bis 1 kV erzeugen kann und dies außerdem die zulässige Maximalspannung des Referenz-Teilers darstellt, können die beiden Maßstabsfaktoren mit dieser Methode nicht mit der erforderlichen Präzision bestimmt werden.

Um nichtsdestotrotz eine Niederspannungskalibrierung dieser Abgriffe durchführen zu können, muss das Verfahren modifiziert werden. Das angepasste Prinzip ist in Abbildung 5.7 schematisch dargestellt.

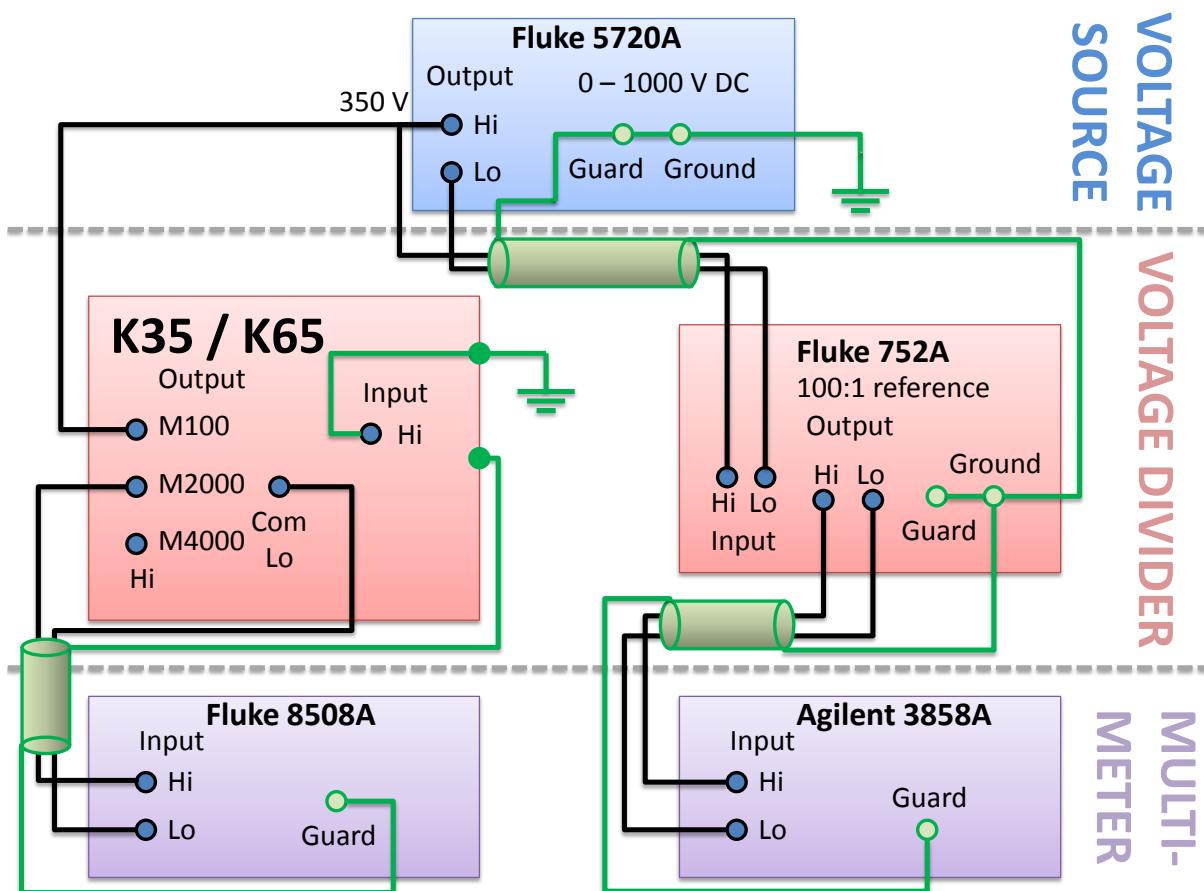


Abbildung 5.7: Schematische Übersicht der M2000 Niederspannungskalibrierung.

Die Messkette zur Bestimmung des absoluten Spannungswertes ist verglichen mit der Kalibrierung des 100:1-Abgriffs unverändert. Beim K35 bzw. K65 wird die Ausgangsspannung jedoch nicht zum Eingang des Teilers geführt, sondern zum Ausgang des 100:1-Abgriffs. Die Spannung des 2000:1 bzw. 4000:1-Abgriffs wird wiederum mit einem Präzisionsmultimeter gemessen.

Für die Kalibrierung werden die gleichen Geräte wie bei der Kalibrierung des 100:1-Abgriffs verwendet. Die Messkette des Referenz-Teilers zur Bestimmung der Absolutspannung des *Calibrators* ist zu diesem Verfahren ebenfalls identisch. Der Unterschied besteht darin, dass die Spannungsquelle nicht mit dem Eingang des K35 bzw. K65 verbunden ist, sondern mit dem Ausgang des 100:1-Abgriffs. Außerdem wird für die Kalibrierung eine Spannung von 350 V verwendet. Dadurch fällt über die Abgriffwiderstände die gleiche Spannung ab, die bei einer Spannung von 35 kV am regulären Eingang des Teilers abfallen würde. Wichtig ist bei dieser Methode jedoch, dass keine Hochspannung an der Präzisionswiderstandskette des Teilers anliegt. Der obere Teil des Spannungsteilers wird gewissermaßen überbrückt, sodass wichtige Eigenschaften, die in diesem Teil während einer Hochspannungsmessung auftreten, nicht berücksichtigt werden. Dazu zählen hauptsächlich Erwärmungseffekte und Leckströme.

Mit diesem Verfahren ist es möglich, sogenannte Untermaßstabsfaktoren der 2000:1- und 4000:1-Abgriffe zu bestimmen. Wenn man diese mit dem Maßstabsfaktor des 100:1-Abgriffs multipliziert, können die tatsächlichen Maßstabsfaktoren des 2000:1 und 4000:1-Abgriffs berechnet werden. Da dies jedoch eine indirekte Messung darstellt und außerdem zwei Messungen für die Bestimmung der Maßstabsfaktoren erforderlich sind (die Messung des 100:1-Abgriffs und die zweite Messung zur Bestimmung des Untermaßstabsfaktors), ist die systematische Unsicherheit mit $\pm 0,8$ ppm etwas höher als bei der Kalibrierung des 100:1-Abgriffs. Die auf diese Weise bestimmten Daten sind in den Abbildungen 5.8 (K35) und 5.9 (K65) dargestellt.

Beim K35 liegen der 2000:1 und 4000:1 Maßstabsfaktor im Rahmen der Messunsicherheit innerhalb eines Bereichs von $\pm 1,5$ ppm um den Mittelwert der letzten Jahre, der mittels konstantem Fit³ jeweils zu

$$\begin{aligned}\overline{M}_{2000}^{K35}_{lvc} &= 1972,4612 \pm 0,0004 \\ \overline{M}_{4000}^{K35}_{lvc} &= 3944,9211 \pm 0,0007\end{aligned}\quad (5.15)$$

bestimmt wurde. Die ermittelte Drift liegt für den 2000:1-Abgriff bei $(-0,1 \pm 0,3)$ ppm/Jahr und für den 4000:1-Abgriff bei $(-0,2 \pm 0,3)$ ppm/Jahr. Es lässt sich im Rahmen der systematischen Unsicherheit somit keine Drift erkennen.

Beim K65 liegen die Maßstabsfaktoren ebenfalls in einem Bereich von 3 ppm um die per konstantem Fit bestimmten Mittelwerte

$$\begin{aligned}\overline{M}_{2000}^{K65}_{lvc} &= 1818,1100 \pm 0,0003 \\ \overline{M}_{4000}^{K65}_{lvc} &= 3636,2725 \pm 0,0007.\end{aligned}\quad (5.16)$$

Die im Oktober 2009 bestimmten Maßstabsfaktoren liegen etwa 2 bis 3 ppm über dem Mittelwert. Nach [Res14] wurden diese Messungen im Gegensatz zu den Übrigen in einem anderen Labor ohne geschirmten Bereich und Temperaturstabilisierung des Raums durchgeführt. Aufgrund dieser unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wurden die Messungen vom Oktober 2009 nicht in die Bestimmung der Drift mit einbezogen.

Diese wurde für den 2000:1-Abgriff zu $(0,1 \pm 0,1)$ ppm/Jahr und für den 4000:1-Abgriff zu $(-0,1 \pm 0,1)$ ppm/Jahr bestimmt. Damit ergibt sich auch in diesem Fall für die letzten Jahre im Rahmen der Unsicherheiten keine gerichtete Drift.

³nicht der in Abbildung 5.8 dargestellte Fit

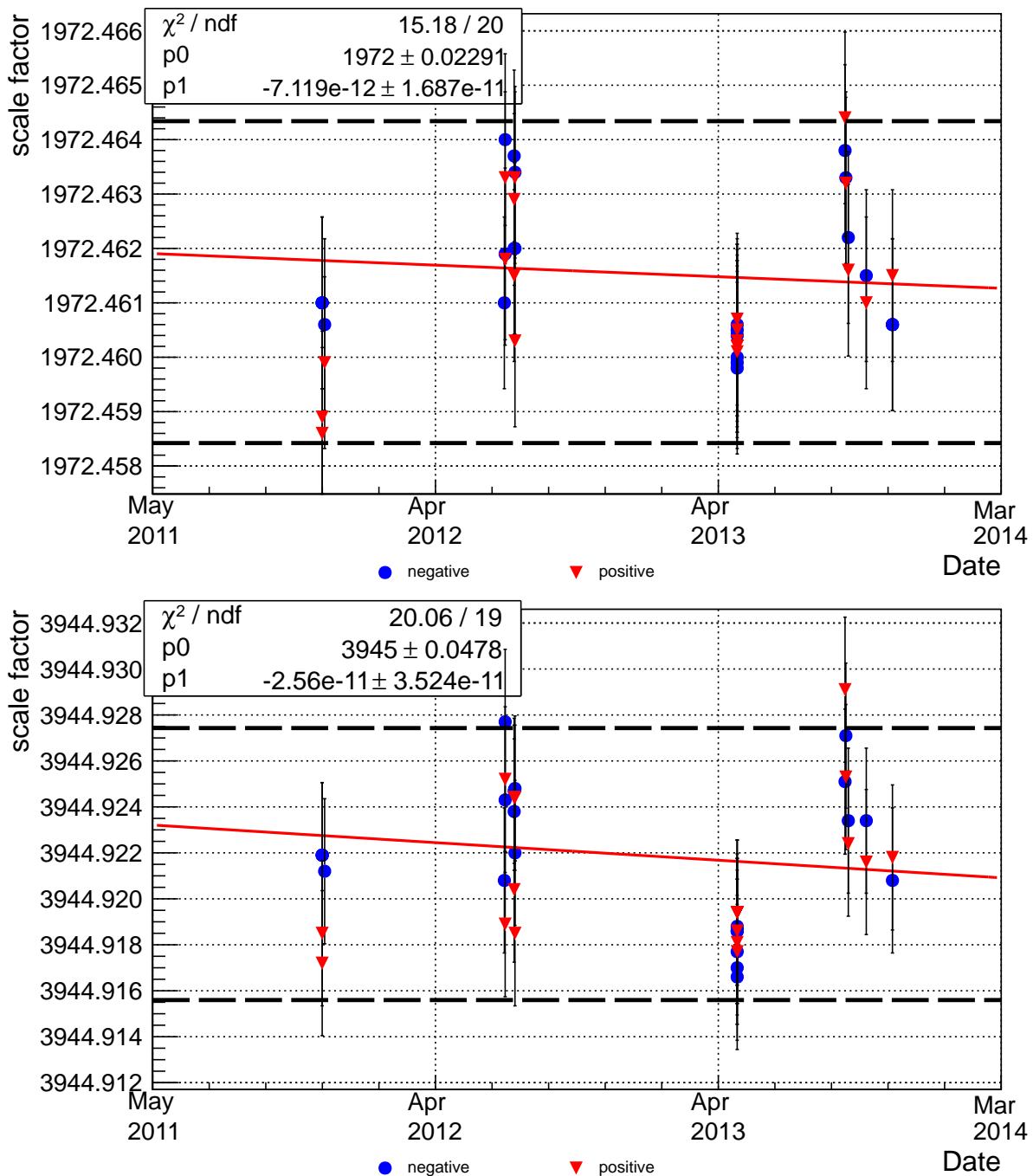


Abbildung 5.8: **Niederspannungskalibrierung des 2000:1- (oben) und 4000:1-Abgriffs (unten) des K35 der letzten Jahre.** Die Untermaßstabsfaktoren wurden mit einer Spannung von ± 350 V bestimmt und anschließend mit dem jeweiligen 100:1-Maßstabsfaktor multipliziert. Für beide Abgriffe liegen die Messwerte im Rahmen der systematischen Unsicherheit innerhalb eines $\pm 1,5$ ppm-Bereichs um den Mittelwert, der durch die gestrichelten Linien gezeigt ist. Eine gerichtete Drift ist nicht zu erkennen.

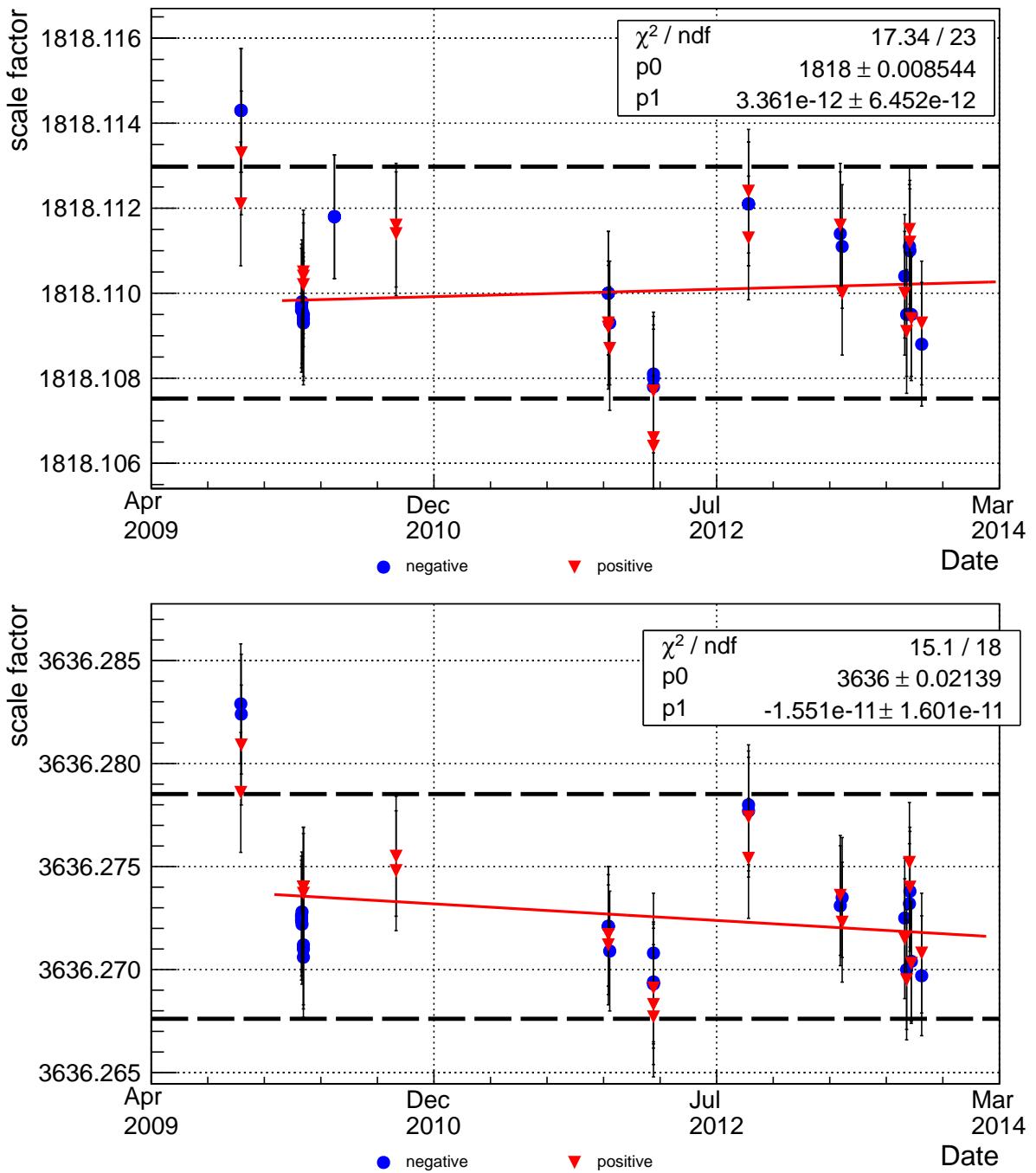


Abbildung 5.9: Niederspannungskalibrierung des 2000:1- (oben) und 4000:1-Abgriffs (unten) des K65 der letzten Jahre. Die Untermaßstabsfaktoren wurden mit einer Spannung ± 350 V bestimmt. Die Messdaten der letzten Jahre liegen innerhalb des durch die gestrichelten Linien markierten Bereichs, der $\pm 1,5$ ppm um den Mittelwert darstellt. Aufgrund nicht optimaler Umgebungsbedingungen wurden die Messungen vom Oktober 2009 nicht für die Bestimmung der Drift berücksichtigt.

Bei der oben beschriebenen Methode zur Kalibrierung des 2000:1- bzw. 4000:1-Abgriffs der KATRIN-Spannungsteiler wurde eine Spannung von 350 V mit dem 100:1-Abgriff der Teiler verbunden. Der Spannungsabfall über die Abgriffwiderstände ist in diesem Fall genau so groß wie bei einer Spannung von 35 kV am regulären Eingang. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen zur Spannungsabhängigkeit dieser Kalibrationsart durchgeführt, die im Folgenden vorgestellt werden.

Da der K35 für Messungen am Monitorspektrometer verwendet wurde, konnten die Messungen nur mit dem K65 durchgeführt werden. Dabei wurde sowohl am 2000:1-, als auch am 4000:1-Abgriff gemessen. Mit Hilfe des *Calibrators* wurde die Eingangsspannung am 100:1-Abgriff im Bereich von -50 V bis -650 V in 50 bzw. 100 V-Schritten variiert, wobei die Maximalspannung für den 2000:1-Abgriff -350 V beträgt, da bei höheren Spannungen der Messbereich des Multimeters (0 - 20 V) überschritten wird. Die bei den einzelnen Spannungen bestimmten relativen Abweichungen vom über alle Messungen bestimmten Mittelwert sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Als Unsicherheiten wurden die Standardfehler σ_s mit

$$\sigma_s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.17)$$

angenommen (mit der Standardabweichung σ), da die einzelnen Messungen Mittelwerte über mindestens 30 Einzelmessungen n darstellen. Da die Werte für das Hoch- und Runterfahren der Spannung im Rahmen der Unsicherheiten nicht übereinstimmen und das durch die entsprechenden Fits bestimmte $\chi^2_r=7,73$ (2000:1) bzw. $\chi^2_r=3,81$ (4000:1) größer eins ist, wurden die Unsicherheiten mit $\sqrt{\chi^2_r}=2,78$ (2000:1) bzw. $\sqrt{\chi^2_r}=1,95$ (4000:1) gewichtet, um eine unbekannte systematische Unsicherheit zu berücksichtigen.

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass es mit steigender Spannung sowohl für den 2000:1, wie auch für den 4000:1-Abgriff zu einer Änderung von etwa 0,5-1 ppm zu niedrigeren Maßstabsfaktoren kommt. Anhand der durchgeführten Fits lässt sich die Steigung p_1 für beide Maßstabsfaktoren ablesen:

$$\begin{aligned} M_{2000} &: (-1,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-9}/V \\ M_{4000} &: (-1,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-9}/V. \end{aligned} \quad (5.18)$$

Da eine Eingangsspannung von 1 V am 100:1-Abgriff mit einer Spannung von etwa 100 V am regulären Eingang des Teilers bezüglich des Spannungsabfalls über den Abgriffwiderständen vergleichbar ist, ergibt sich insgesamt eine mittlere Spannungsabhängigkeit von $(-1,6 \pm 1,1) \cdot 10^{-8}/kV$. In [Bau13a] wurde durch Messungen der PTB (nicht nach der hier gezeigten Methode) ein Anstieg der Spannungsabhängigkeit von $-1,9 \cdot 10^{-8}/kV$ auf $-4,9 \cdot 10^{-8}/kV$ (2000:1) bzw. $-3,5 \cdot 10^{-8}/kV$ (4000:1) von 2009 bis 2011 festgestellt. Die hier bestimmte Spannungsabhängigkeit lässt sich mit diesen Werten jedoch nur eingeschränkt vergleichen, da erstens keine aktuelleren Daten vorliegen und andererseits bei den Messungen der PTB Hochspannungsmessungen am regulären Eingang des Spannungsteilers durchgeführt werden. Allerdings erscheinen die bestimmten Werte verglichen mit der von der PTB bestimmten Spannungsabhängigkeit realistisch.

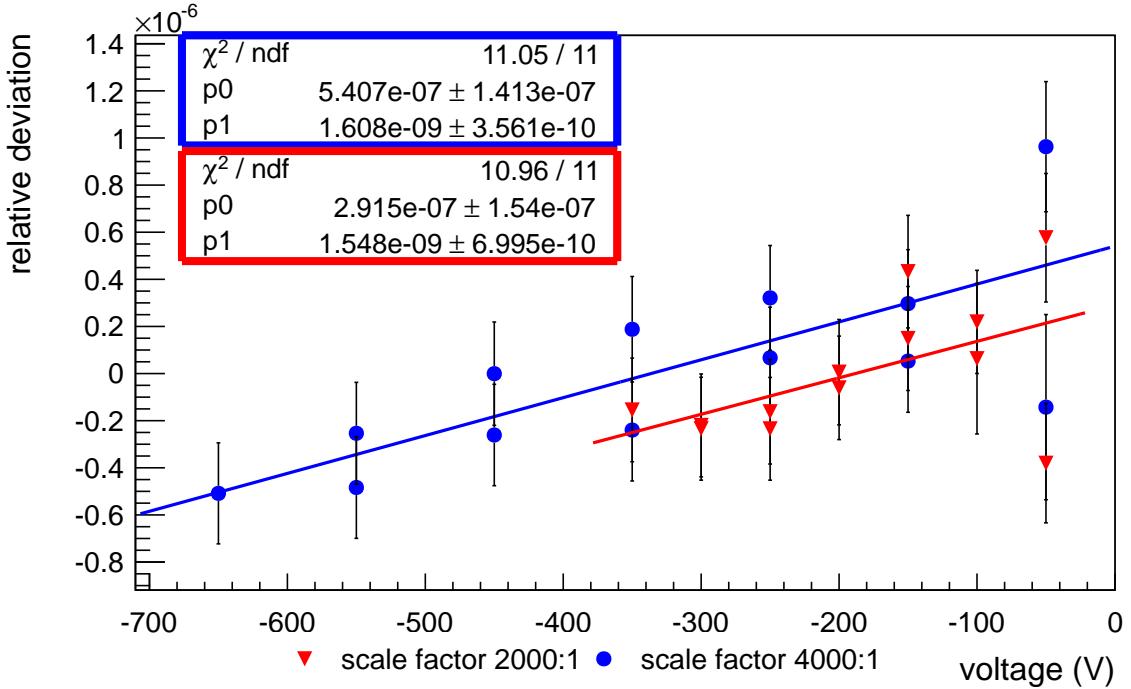


Abbildung 5.10: Spannungsabhängigkeit des 2000:1 und 4000:1-Maßstabsfaktors der Niederspannungskalibrierung. Für den 2000:1-Abgriff wurden nur Messungen bis -350 V durchgeführt, da die Spannung andernfalls den Messbereich des Multimeters (20 V) überschritten hätte. Die Messungen wurden mit dem K65 durchgeführt. Die Unsicherheiten der einzelnen Messwerte wurden mit $\sqrt{\chi^2_r}$ gewichtet.

5.5.2 Hochspannungskalibrierung an der PTB

Um die Absolutwerte aller Maßstabsfaktoren mit Spannungen bis 35 kV bzw. 65 kV zu bestimmen wurden mit beiden Teilern in den letzten Jahren mehrfach Kalibrationsmessungen in Braunschweig an der PTB durchgeführt. Dort steht mit dem MT100 ein Präzisions-Hochspannungsteiler mit vergleichbarer Genauigkeit und Stabilität zur Verfügung, sodass Hochspannungskalibrierungen nach dem in Abbildung 5.11 dargestellten Prinzip durchgeführt werden können. Ähnlich dem Prinzip der Niederspannungskalibrierung werden alle Teiler mit der gleichen stabilen Spannungsquelle verbunden, wobei der MT100 zur Bestimmung der Referenzspannung dient. Die Ausgangsspannung aller Teiler wird mit Fluke 8508A Präzisionsmultimetern bestimmt, deren Offset und Verstärkung vor jeder Messung gemessen werden. Außerdem ist es wichtig, dass sich alle Spannungsmessungen auf das selbe Referenzpotential beziehen.

Eine ausführliche Übersicht über die Ergebnisse der Kalibrierungen der vergangenen Jahre wird in [Bau13a] gegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die beiden KATRIN-Teiler zur Kalibrierung im Oktober 2013 zur PTB gebracht. Neben der Bestimmung der Absolutwerte der Maßstabsfaktoren wurde außerdem deren Spannungsabhängigkeit durch die PTB untersucht. Während dieser Messungen zeigte der K65 ein auffälliges Verhalten: Der Maßstabsfaktor wisch innerhalb einzelner Messungen sowohl beim Ändern der Spannung als auch spontan

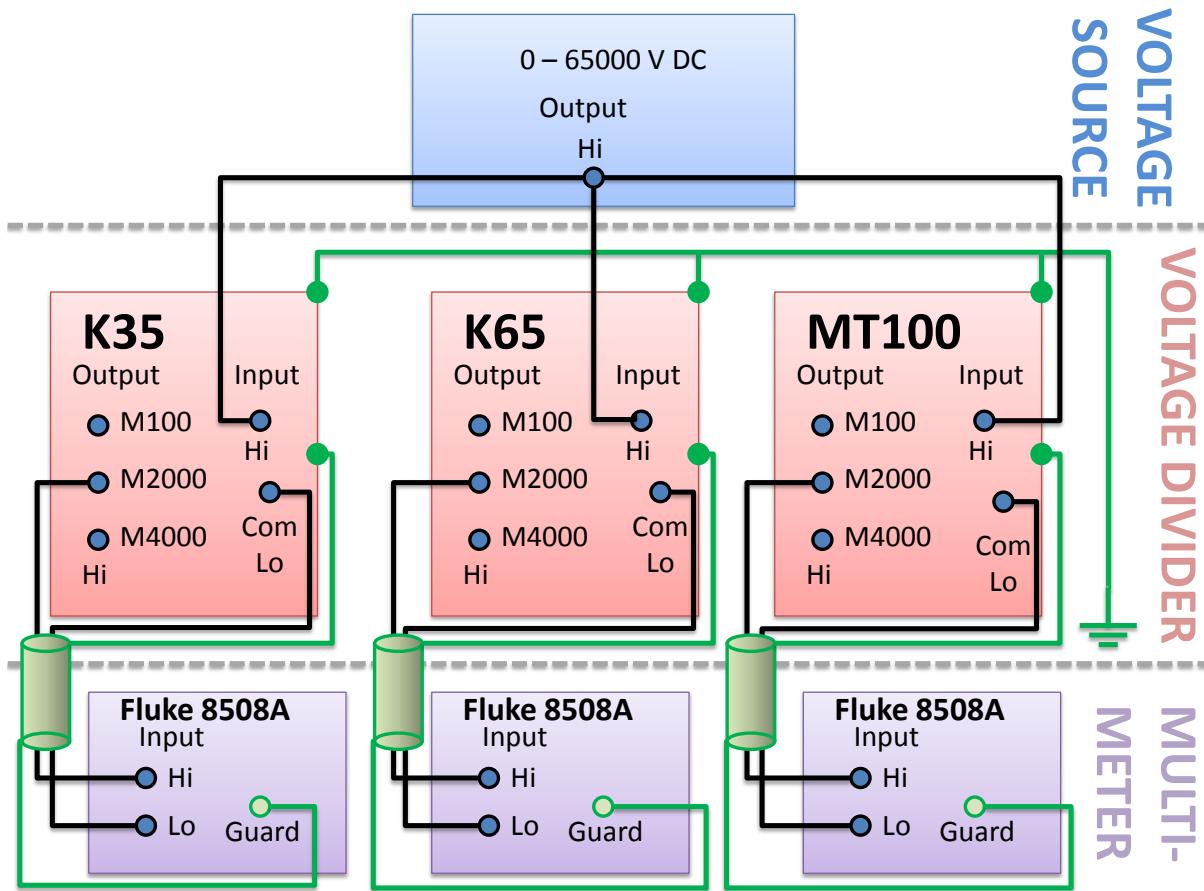


Abbildung 5.11: Schematische Übersicht der Hochspannungskalibrierung an der PTB. Die zwei zu kalibrierenden KATRIN-Teiler und der als Referenz verwendete MT100 der PTB werden mit einer präzisen Spannungsquelle verbunden. Die Ausgangsspannung der Teiler wird jeweils mit Fluke Präzisionsmultimetern gemessen, sodass die Maßstabsfaktoren mit ppm-Gneauigkeit bestimmt werden können.

ohne Spannungsänderung um bis zu 20 ppm vom Erwartungswert ab. Diese Abweichungen wurden sowohl beim 2000:1, wie auch beim 4000:1 Abgriff beobachtet. Der K35 zeigte keine solche Auffälligkeit, wodurch der MT100 als Ursache der Probleme ausgeschlossen werden kann. Nachdem die Multimeter des K35 und K65 getauscht wurden, zeigte sich weiterhin das instabile Verhalten am K65, sodass auch ein Fehler der Multimeter ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund dieses Verhaltens konnte keine Kalibrierung des K65 durchgeführt werden, da die Messungen der Maßstabsfaktoren keine reproduzierbaren Ergebnisse ergeben haben. Der K35 konnte außerdem nur in eingeschränktem Umfang kalibriert werden, da die Temperaturstabilisierung einen Defekt aufwies und somit die Operationstemperatur von 25°C im Innern des Teilers nicht gewährleistet werden konnte.

Da die Kalibrierung beider Teiler nicht bzw. nur eingeschränkt möglich war, wurde die Kalibrationsphase an der PTB abgebrochen und beide Teiler zu Diagnose- und Reparaturmaßnahmen zurück nach Münster gebracht. Details dazu werden im nächsten Unterkapitel

Tabelle 5.2: Maßstabsfaktoren des K35 bestimmt in den Jahren 2011 und 2013 an der PTB, sowie die daraus berechnete Stabilität in ppm pro Monat. Die Werte von 2011 wurden aus [Bau13a] entnommen.

Maßstabsfaktor	2011	2013	Stabilität
2000:1	$1972,4566 \pm 0,0039$	$1972,4531 \pm 0,0059$	< 0,1 ppm/Monat
4000:1	$3944,9119 \pm 0,0079$	$3944,9030 \pm 0,0394$	< 0,1 ppm/Monat

beschrieben. Die von der PTB bestimmten Maßstabsfaktoren für den K35 sind in Tabelle 5.5.2 dargestellt.

Die relativen Abweichungen zu den 2011 von der PTB bestimmten Werten betragen für den 2000:1-Maßstabsfaktor 1,8 ppm und für den 4000:1-Maßstabsfaktor 2,3 ppm, was eine Stabilität von etwa 0,1 ppm/Monat bedeutet. Dies unterscheidet sich von der mit Hilfe der Niederspannungskalibrierung bestimmten Drift (0,1 ppm/Jahr). Allerdings stehen im Gegensatz zur Niederspannungskalibrierung für die Hochspannungskalibrierung lediglich Daten aus zwei Messphasen (2011 und 2013) zur Verfügung, die innerhalb eines 3 ppm-Bereichs liegen. Diesbezüglich müssten in den nächsten Jahren weitere Messungen durchgeführt werden, um eine bessere Statistik zu erhalten, was genauere Aussagen über die Langzeitstabilität ermöglicht.

5.6 Diagnose und Reparatur des K65

Der K65 zeigte während der Kalibrationsphase im Oktober 2013 an der PTB ein auffälliges Verhalten: um die Spannungsabhängigkeit der Maßstabsfaktoren zu bestimmen, wurde bei verschiedenen Eingangsspannungen jeweils die Ausgangsspannung am 2000:1-Abgriff gemessen. Das Verhältnis beider Spannungen sollte, wie bei Messungen in den vergangenen Jahren bestimmt, bis auf die Größenordnung 10^{-7} konstant sein [Bau13a]. In dieser Messphase wurden dagegen Abweichungen des Maßstabsfaktors bis zu 20 ppm bei unterschiedlichen Eingangsspannungen beobachtet. Diese Schwankungen traten außerdem unregelmäßig und in unterschiedlichem Ausmaß auf.

Um die Anomalien des K65 bei den Spannungsabhängigkeitsmessungen zu untersuchen, wurden beide Teiler nach Münster transportiert. Da die Abweichungen des Maßstabsfaktors im niedrigen ppm-Bereich lagen, wurde zur Diagnose des K65 ein zweiter Spannungsteiler benötigt, der im Spannungsbereich bis etwa 30 kV eine vergleichbare Stabilität aufweist. Während der Diagnosemessungen wurde dazu der K35 genutzt, bei dem im Verlauf der Kalibrierung an der PTB keine Auffälligkeiten aufgetreten sind.

Zunächst wurde eine Niederspannungskalibrationsmessung beider Teiler durchgeführt, um festzustellen, ob ein Unterschied zu den Niederspannungskalibrationsmessungen vor dem Transport zur PTB festgestellt werden kann.

Wie bereits in Kapitel 5.5.1 beschrieben, weichen die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung des K65 um bis zu 5 ppm vom Mittelwert über die letzten Jahre ab. Es wurden außerdem in dem Zeitraum mehrere Messungen durchgeführt, die sich jeweils um mehrere

ppm unterscheiden. Diese Abweichungen sind ausschließlich bei der Kalibrierung des 100:1-Abgriffs aufgetreten; bei den Messungen des 2000:1 bzw. 4000:1-Abgriffs konnte keine Aufälligkeit festgestellt werden. Bei der Niederspannungskalibrierung des 2000:1-Abgriffs wird dabei lediglich der Spannungsabfall über den Abgriffwiderständen gemessen, ohne dass der obere Teil der Teilerkette belastet wird, wohingegen bei den Messungen an der PTB die gesamte Widerstandskette Teil des Messsystems war. Dies deutet darauf hin, dass die zugrunde liegende Ursache der Schwankungen nicht in der Ebene der Abgriffwiderstände, sondern in einer der fünf oberen Ebenen der Primärteilerkette liegt.

Um die Spannungsabhängigkeit des Maßstabsfaktors weitergehend zu untersuchen, wurden anschließend Messungen nach dem an der PTB verwendeten Prinzip durchgeführt. Als Spannungsquelle dienten dabei verschiedene Hochspannungsnetzgeräte bis 35 kV und neben dem K65 wurde der K35 als stabiler Referenzteiler verwendet. Als Observable bietet sich in diesem Zusammenhang das Verhältnis der Ausgangsspannungen beider Teiler an. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben ergibt dieses sich zu

$$V = \frac{U_{input} \cdot G_{K65} \cdot M_{K65} + U_{0,K35} \cdot G_{K35} M_{K35} \cdot G_{K65} \cdot M_{K65}}{U_{input} \cdot G_{K35} \cdot M_{K35} + U_{0,K65} \cdot G_{K65} M_{K65} \cdot G_{K35} \cdot M_{K35}} \quad (5.19)$$

$$= \frac{a \cdot U_{input} + b}{c \cdot U_{input} + d} \quad (5.20)$$

wobei die Verstärkung und der Offset der Multimeter und die Maßstabsfaktoren als konstante Faktoren angenommen werden, die in den Größen a, b, c und d zusammengefasst wurden. Wenn die Messdaten entsprechend um Offset und Verstärkung korrigiert werden ist dieses Verhältnis für Spannungen im kV-Bereich konstant unter der Voraussetzung, dass a, b, c und d konstant sind, was für die Spannungsabhängigkeitsmessungen gelten sollte. Ändert sich der Maßstabsfaktor während der Messung, ändert sich das ebenso Verhältnis der Ausgangsspannungen, was zeigt, dass diese Größe als Observable während der Diagnosemessungen zur Überwachung der Stabilität des K65 geeignet ist⁴.

Abbildung 5.12 zeigt eine Messung, bei der das Verhältnis der Ausgangsspannungen und somit der Maßstabsfaktor des K65 nicht konstant ist. Dabei wurde die Spannung in 5 kV-Schritten für jeweils etwa 15 Minuten bis -30 kV erhöht und in 5 bzw. 10 kV-Schritten wieder herunter gefahren. Die Spannungen wurden manuell am Netzgerät geändert und die Messung wurde währenddessen nicht gestoppt, sodass jeweils zu den Potentialänderungen entsprechende Abweichungen im Verhältnis der Ausgangsspannungen zu beobachten sind.

Ausgehend von den hier beschriebenen Hochspannungsmessungen, bei denen eine Änderung von 2 ppm des Teilverhältnisses beobachtet werden konnte, sowie von den Stabilitätschwankungen an der PTB und den Abweichungen der Niederspannungskalibrierung des K65 wurde die Entscheidung getroffen, den K65 zu öffnen, um eine weitergehende Problemanalyse zu betreiben. Aufgrund der während der Diagnose aufgezeichneten Daten wurde zunächst eine Sichtprüfung am geöffneten Teiler durchgeführt, um den K65 auf eventuell beschädigte Widerstände oder fehlerhafte bzw. lose Verbindungen zu untersuchen. Ein Bild, das während der Reparaturarbeiten des K65 aufgenommen wurde, ist in Abbildung 5.13 zu sehen.

⁴Ein Spezialfall ergibt sich, wenn sich die Maßstabsfaktoren beider Teiler gleichzeitig um den selben Betrag ändern. Das Verhältnis der Ausgangsspannungen würde in dem Fall konstant bleiben. Diese Möglichkeit ist jedoch äußerst unwahrscheinlich und wird deshalb nicht betrachtet.

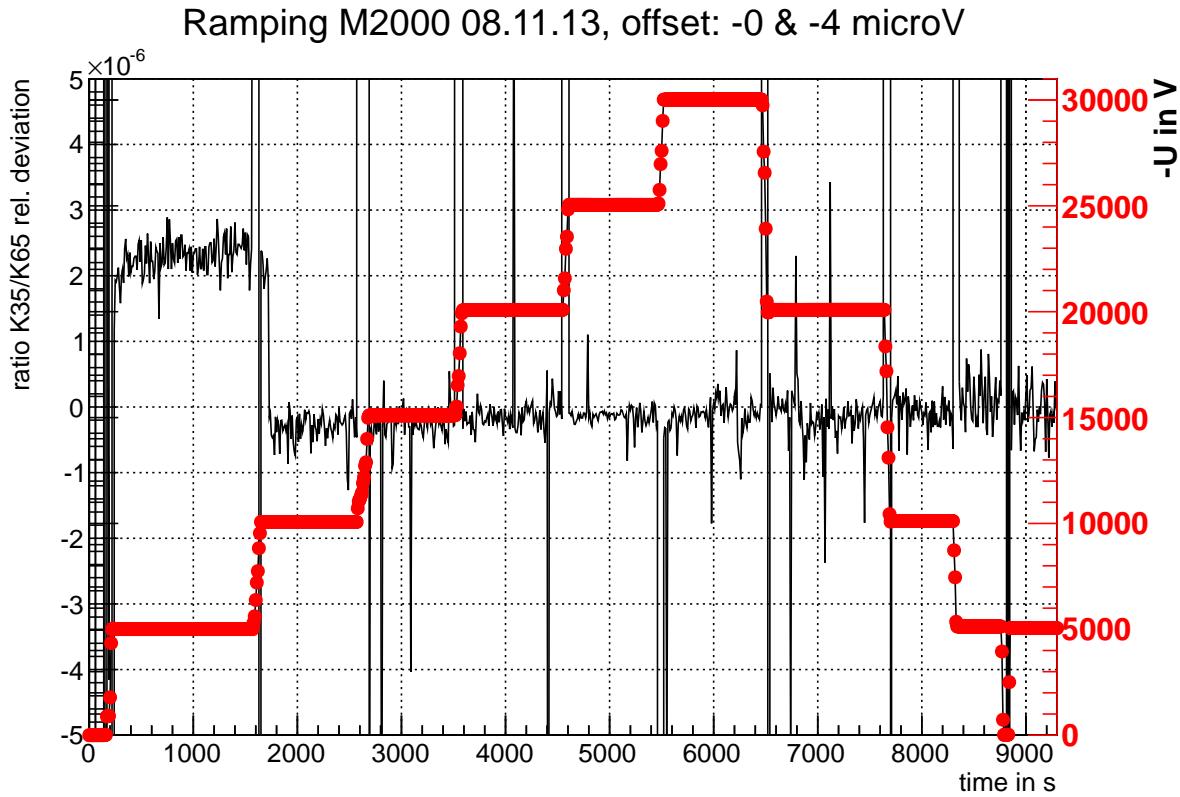


Abbildung 5.12: Spannungsabhängigkeit des Maßstabsfaktors 2000:1 vor der Reparatur. Aufgetragen ist die relative Abweichung der Ausgangsspannungen (schwarz), während über eine Zeit von etwa 2,5 Stunden die Spannung von -5 bis -30 kV und wieder herunter gefahren wurde (rot). Die Messungen wurden am 2000:1-Abgriff beider Teiler durchgeführt und der Offset beider Multimeter wurde mit 0 bzw. $4\mu\text{V}$ eingerechnet.

Eine visuelle Überprüfung des K65 ergab keine Auffälligkeiten, sodass die Diagnosemessungen am offenen Teiler fortgesetzt wurden. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurden an den vier Seiten des Teilergestells und an der oberen Öffnung geerdete metallene Lochplatten angebracht, die einen direkten Kontakt mit dem Teiler während der Hochspannungsmessungen verhindern.

Zunächst wurden die Verbindungen zwischen allen 165 Präzisionswiderständen kontrolliert. Zwei Widerstände sind über ein Verbindungselement aus Messing verbunden, wobei die Befestigung der Widerstände über jeweils zwei Madschrauben erfolgt. Einige dieser Schraubverbindungen konnten bei der Überprüfung bis zu einer Umdrehung nachgezogen werden. Nach dem Nachziehen der Schraubverbindungen wurden zahlreiche Diagnosemessungen durchgeführt, in denen keine weiteren Instabilitäten des K65 festgestellt werden konnten. Zur Überprüfung wurden dabei sowohl Langzeitmessungen bei konstanter Spannung, als auch Messungen mit Spannungsstufen vorgenommen.

In Abbildung 5.14 ist exemplarisch eine Messung nach dem Festziehen der Schrauben gezeigt, bei der die Spannung mehrmals zwischen -5, -10 und -20 kV variiert wurde. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass das Verhältnis der Ausgangsspannungen im sub-ppm Bereich stabil ist.

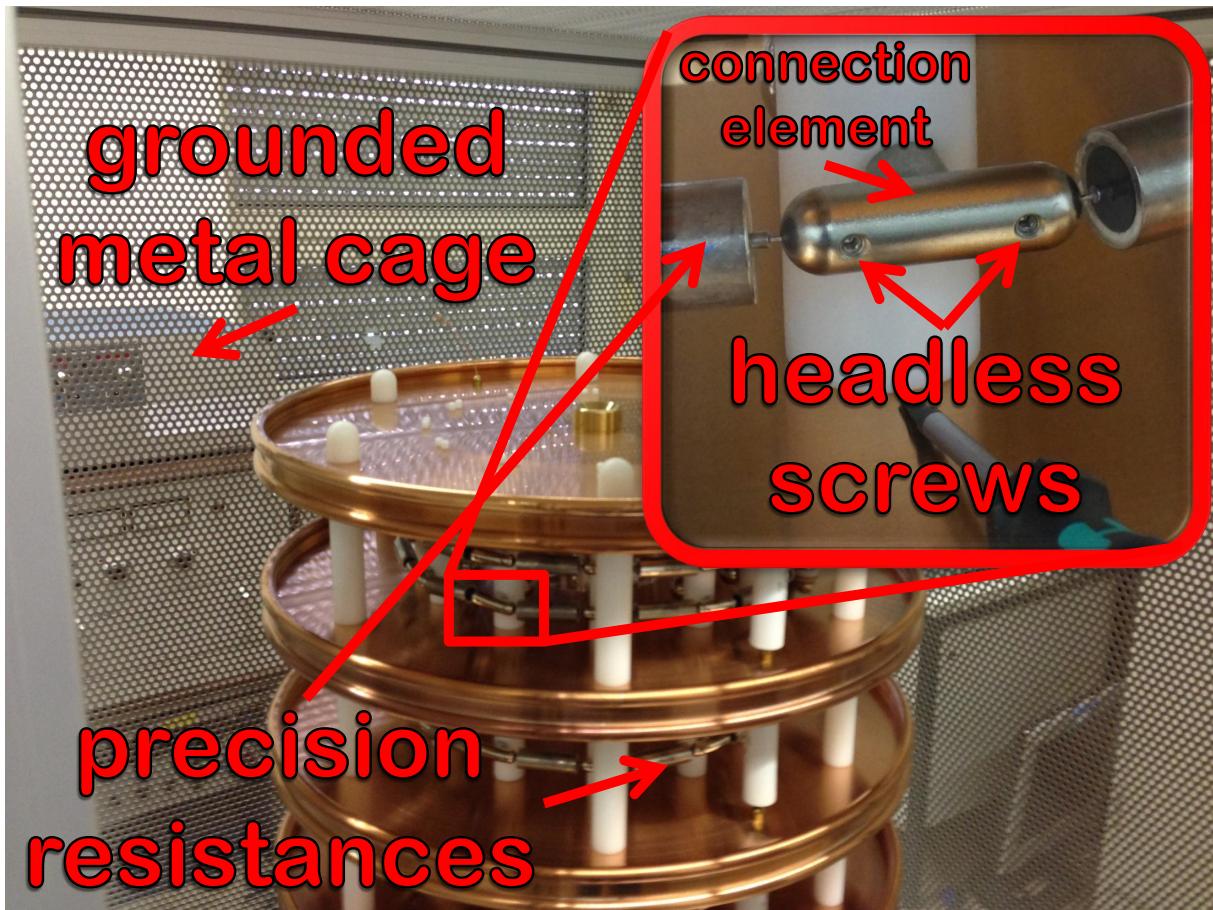


Abbildung 5.13: Foto des offenen Spannungsteilers K65 während der Diagnose und Reparatur. Aus Sicherheitsgründen wurde zum Schutz vor Hochspannung ein geerdeter Metallkäfig um den offenen Teiler installiert, sodass ein direkter Kontakt zu Hochspannungskomponenten während der Messungen verhindert wird. Zu sehen sind außerdem die Präzisionswiderstände sowie die Verbindungselemente zwischen den Widerständen (siehe Vergrößerung). Die Widerstände sind mit Hilfe von Madenschrauben in den Verbindungs-elementen befestigt.

Außerdem ist zu erkennen, dass die Streuung der Messwerte bei niedrigerer Spannung größer ist. Die ist dadurch zu erklären, dass beispielsweise bei 5 kV Eingangsspannung am 2000:1-Ausgang eine Spannung von etwa 2,5 V gemessen wird, wohingegen die Ausgangsspannung bei 20 kV Eingangsspannung etwa 10 V beträgt. Einerseits besitzen die zur Spannungsmessung verwendeten Multimeter ihre größte Genauigkeit im Bereich um 10 V, andererseits ist die relative Unsicherheit bei niedrigeren Spannungen bei der gleichen Anzahl an Stellen größer.

Nach dem Festziehen der Schrauben wurden zahlreiche Langzeitmessungen mit verschiedenen Spannungen durchgeführt, bei denen sich ausnahmslos ein normales Verhalten der Spannungsteiler zeigte. Bevor der K65 wieder geschlossen wurde, wurden die Schraubverbindungen nochmals komplett überprüft. Außerdem wurden weitere Messungen mit dem geschlossenen K65 durchgeführt, bei denen keine Anomalien mehr beobachtet werden konn-

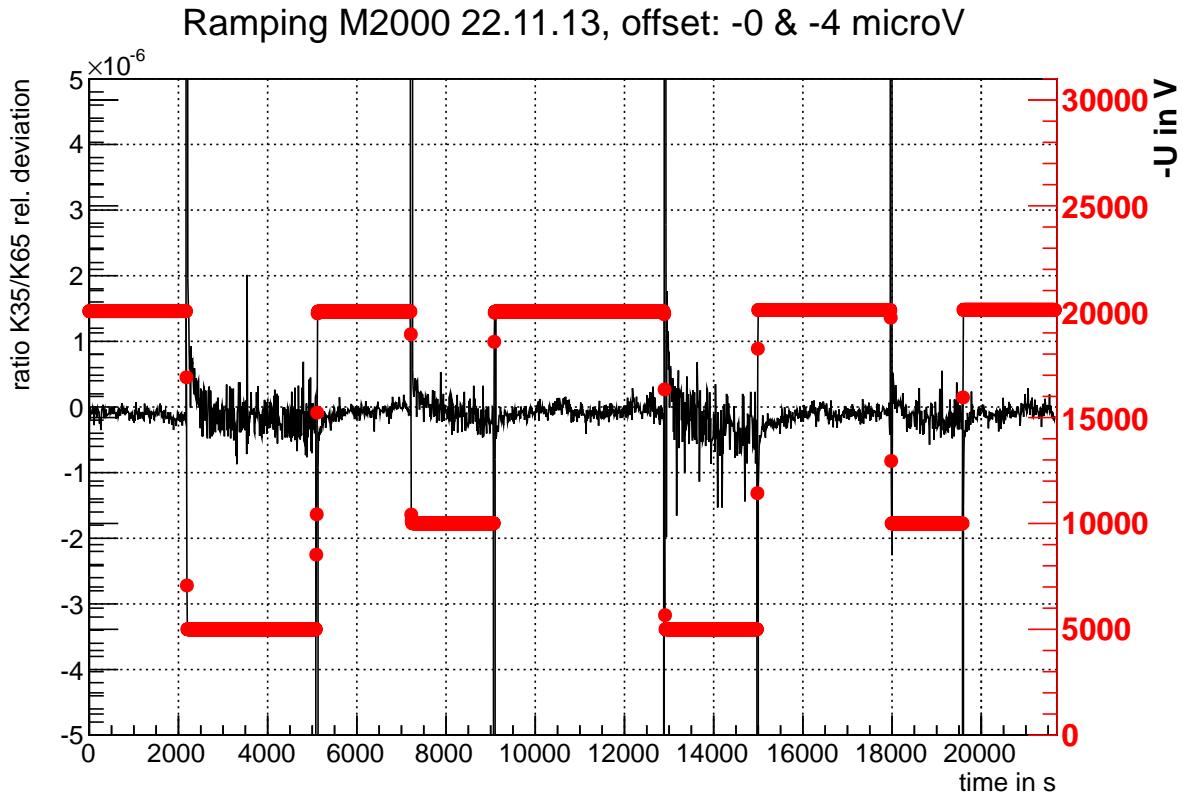


Abbildung 5.14: Spannungsabhängigkeit des Maßstabsfaktors 2000:1 nach der Reparatur. Aufgetragen ist die relative Abweichung der Ausgangsspannungen beider Teiler (schwarz) über etwa 6 h bei unterschiedlichen Spannungen (rot). Die Messung wurde am 2000:1-Abgriff durchgeführt und ein Offset beider Multimeter von 0 bzw. $4 \mu\text{V}$ wurde vor der Messung bestimmt und eingerechnet.

ten. Die anschließend durchgeführte Niederspannungskalibrierung (siehe Kapitel 5.5.1) zeigt außerdem, dass der 100:1-Maßstabsfaktor nach der Reparatur wieder im erwarteten Bereich innerhalb des 3 ppm-Bereichs um den Mittelwert der letzten Jahre liegt.

Als Ursache der Instabilitäten des K65 konnten somit lose Schraubverbindungen innerhalb der Präzisionswiderstandskette ausgemacht werden. Die wahrscheinlichste Ursache dieser Lockerungen stellen Transporte des Teilers in den letzten Jahren dar. Dazu zählen hauptsächliche Transporte zur PTB nach Braunschweig. Langfristig sollen beide KATRIN-Teiler permanent am KIT stationiert sein, was dieser Problematik entgegenwirkt. Insgesamt zeigt diese Thematik die Wichtigkeit regelmäßiger Kalibrierungen beider Teiler durch Niederspannungskalibrations- und Hochspannungskalibrationsmessungen, die auch in Zukunft regelmäßig durchgeführt werden sollten.

5.7 Kalibrierung des Präzisions-Hochspannungsnetzgeräts

Nach der Reparatur des K65 bot sich erstmals die Gelegenheit das zur Erzeugung des Retardierungspotentials der Drahtelektrode des Hauptspektrometers vorgesehene Präzisions-Hochspannungsnetzgerät mit beiden KATRIN-Spannungsteilern zu vermessen. Dabei handelt es sich um eine von der Firma FuG hergestellte Sonderanfertigung der Modellreihe HCP 70M-35000 mit einer Maximalspannung von -35 kV bei einem Strom von maximal 2 mA (siehe Abbildung 5.15). Der Hersteller gibt eine Stabilität von 2 ppm in 8 Stunden bei einer Ausgangsspannung von -18,6 kV an, was einer Spannung von etwa 37 mV entspricht.



Abbildung 5.15: **Foto des FuG HCP 70M-35000.** Mit diesem Netzgerät wird das Retardierungspotential des Drahtelektrodensystems des Hauptspektrometers erzeugt. Das Netzgerät liefert eine maximale Ausgangsspannung von -35000 V bei einem Strom von bis zu 2 mA.

Das Hochspannungsnetzgerät selbst muss nicht die für KATRIN erforderliche Stabilität von 3 ppm über mehrere Monate aufweisen. Da die Spannungsteiler, wie bereits in den vorigen Kapiteln gezeigt, diese Anforderung erfüllen, kann die Ausgangsspannung des Netzgeräts ppm-genau bestimmt werden. Zur Kalibrierung des HCP 70M-35000 wurden zwei Langzeitmessungen durchgeführt, bei denen das Netzgerät über einen Verteiler mit beiden Spannungsteilern verbunden war. Bei diesen wurde jeweils die Spannung am 2000:1-Abgriff gemessen und für die Bestimmung der Absolutspannung wurde die jeweilige Ausgangsspannung mit dem Maßstabsfaktor, der bei der letzten Niederspannungskalibrierung für den 2000:1-Abgriff bestimmt wurde, multipliziert.

Während der ersten Langzeitmessung, gezeigt in Abbildung 5.16, verfügte der K35 nicht über eine Temperaturstabilisierung. Generell ist zu erkennen, dass die Ausgangsspannung über den gesamten Zeitraum von etwa 70 Stunden bis auf den niedrigen ppm-Bereich stabil ist. Mit beiden Spannungsteilern wurde außerdem bis auf sub-ppm-Niveau die gleiche Ausgangsspannung bestimmt, was ein Indiz für die Zuverlässigkeit der durch die Niederspannungskalibrierung bestimmten Maßstabsfaktoren ist. Bei dieser Messung wurde außerdem der Einfluss der Umgebungstemperatur auf das Netzgerät untersucht. Dazu wurde die Messung bei ausgeschalteter Klimatisierung des Labors gestartet, wobei die Temperatur etwa bei

28°C lag. Nach 24 Stunden wurde die Klimaanlage eingeschaltet, wodurch die Temperatur auf etwa 23°C gesunken ist.

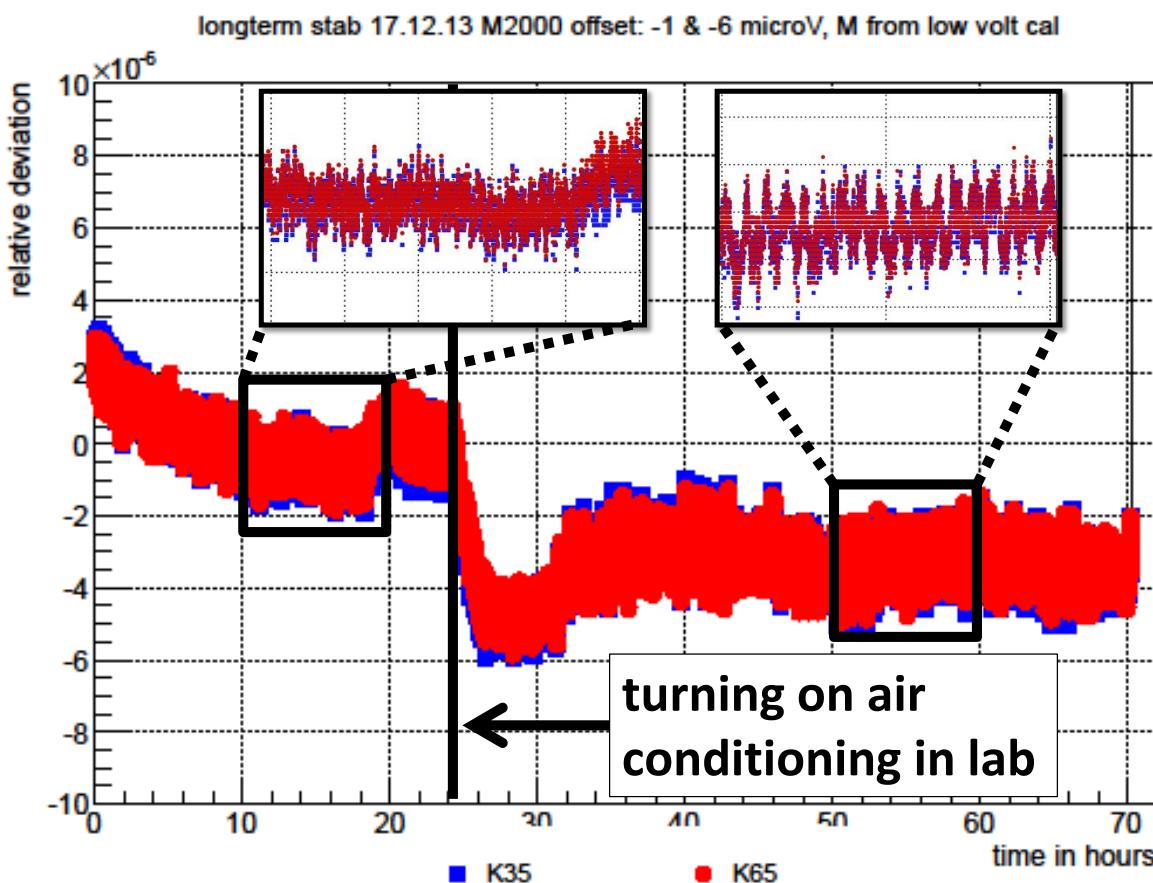


Abbildung 5.16: **Erste Langzeitmessung mit beiden Spannungsteilern über etwa 70 Stunden.** Gezeigt ist die relative Abweichung von der mittleren Spannung 18567,84 V. Die Messung wurde ohne Temperaturstabilisierung des K35 durchgeführt. Außerdem wurde die Messung ohne Temperaturstabilisierung des Labors gestartet, bevor diese nach etwa 24 Stunden eingeschaltet wurde. Für beide Bereiche ist zusätzlich eine vergrößerte Darstellung der Messwerte zu sehen.

Mit ausgeschalteter Temperaturstabilisierung des Labors ist eine Änderung der Ausgangsspannung von etwa 2 ppm in ca. 20 Stunden zu erkennen, wobei die Streuung der Messwerte um den Mittelwert etwa ± 1 ppm groß ist. Nachdem die Klimatisierung des Raumes eingeschaltet wurde, ist in den ersten Stunden eine relative Änderung von etwa 4 ppm zu erkennen, bis nach 8 - 10 Stunden eine Stabilisierung ohne erkennbare Drift eintritt. Die Streuung der Messwerte ist dabei minimal größer als vorher und liegt etwas über ± 1 ppm. Betrachtet man den vergrößerten Teil der Darstellung (Abbildung 5.16 oben rechts) ist eine periodische Fluktuation mit einer Periodendauer von ungefähr 30 Minuten zu erkennen, die höchstwahrscheinlich auf die Klimaanlage zurückzuführen ist, da diese ebenfalls in diesen Intervallen arbeitet. Die Raumtemperatur ist lediglich auf 1 bis 2°C stabilisiert.

Bei ausgeschalteter Klimaanlage ist die periodische Fluktuation nicht zu erkennen. Hier ist

davon auszugehen, dass sich das Netzgerät während des Betriebs bis zu einer Sättigung stetig erwärmt hat. Um detailliertere Aussagen bezüglich der Temperaturabhängigkeit des HCP 70M-35000 machen zu können, sind weitere Tests erforderlich, bei denen die Temperatur an einer geeigneten Stelle gemessen und aufgezeichnet wird. Für den Betrieb bei KATRIN befinden sich die Geräte des HV-Systems in einem temperaturstabilisierten Schaltschrank innerhalb einer temperaturstabilisierten Halle, sodass diesbezüglich bessere Umgebungsbedingungen zu erwarten sind als während der hier gezeigten Messungen, was sich beispielsweise in einer Reduzierung der Streuung der Messwerte um den Mittelwert deutlich machen könnte.

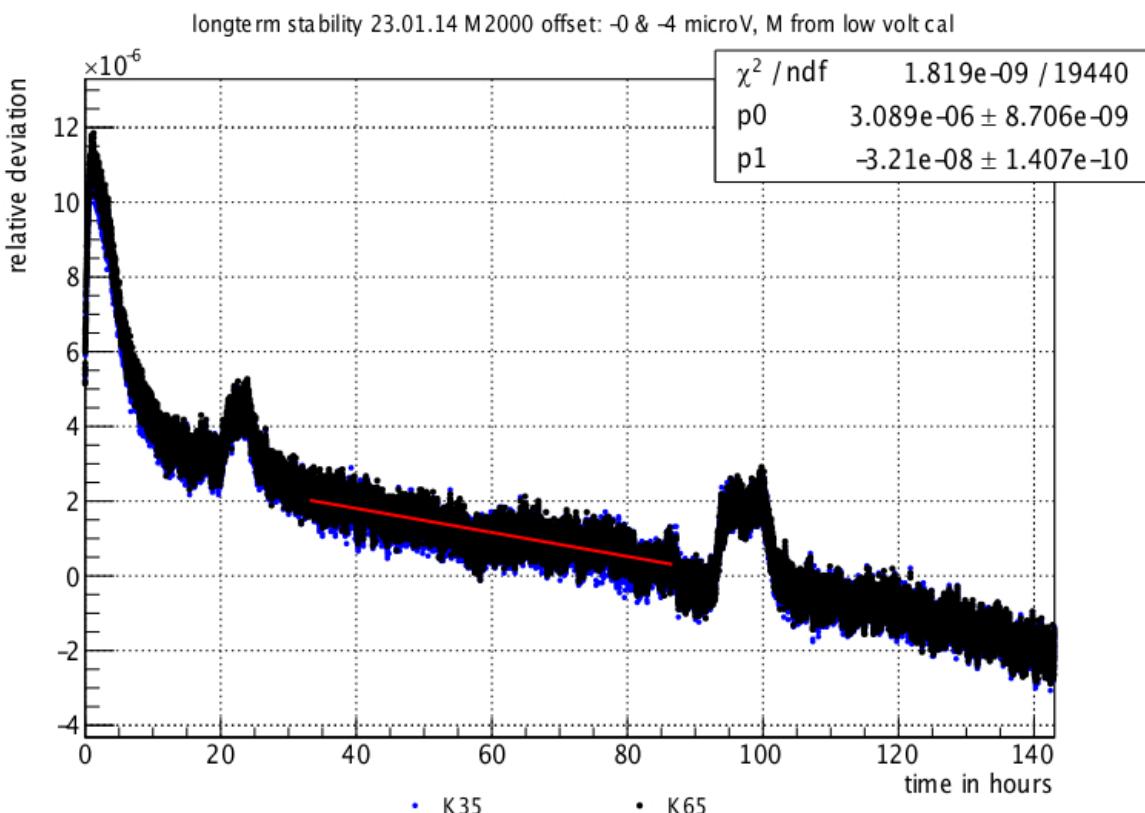


Abbildung 5.17: **Zweite Langzeitmessung mit beiden Spannungsteilern temperaturstabilisiert über etwa 144 Stunden.** Gezeigt ist die relative Abweichung von der mittleren Spannung 30106,80 V. Außerdem ist ein Fit der Daten, beginnend bei etwa 35 Stunden nach dem Start der Messung, eingezeichnet, mit dem die Drift bestimmt wird.

Nach der Reparatur der Temperaturregelung des K35 wurde eine weitere Langzeitmessung des HCP 70M-35000 mit beiden Spannungsteilern und eingeschalteter Temperaturstabilisierung des Labors durchgeführt. Abbildung 5.17 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Zu sehen ist, dass auch in diesem Fall eine im ppm-Bereich stabile Ausgangsspannung über 144 Stunden erreicht wurde und dass die Ergebnisse beider Teiler gleichermaßen übereinstimmen. Die Messdaten weisen drei Besonderheiten auf: Nach dem Beginn der Messung steigt die relative Abweichung der Ausgangsspannung von 5 ppm um etwa 7 ppm auf 12 ppm über dem Mittelwert von 30106,80 V, bevor die Abweichung auf ca. 4 ppm fällt. Dieser Vorgang dauert

ungefähr 10 Stunden, und stellt nach [Res14] ein typisches Einlaufverhalten von Hochspannungsnetzgeräten dar.

Innerhalb der nächsten 130 Stunden kommt es zu einer relativen Abweichung von -6 ppm, wobei bei etwa 20 h und 90 h nach Beginn der Messung jeweils kleine Abweichungen von der Drift zu erkennen sind. Die relative Abweichung steigt innerhalb von 10 Stunden um etwa 2 ppm und fällt wieder ab, woraufhin die ursprüngliche Drift fortgesetzt wird. Die Ursache liegt möglicherweise in einer Temperaturänderung innerhalb des Labors, was nicht genau bestimmt werden kann, da die Temperatur nicht aufgezeichnet wurde. Da innerhalb der ersten Langzeitmessung jedoch eine Temperaturabhängigkeit des Netzgeräts im ppm-Bereich festgestellt werden konnte, erscheint diese Erklärung schlüssig.

Die generelle Drift nach dem Einlaufverhalten wurde zu $(-3,21 \pm 0,01) \cdot 10^{-8}/\text{h}$ bzw. ca. 0,3ppm/8h bestimmt, was verglichen mit der Herstellerangabe von 2ppm/8h eine niedrigere Drift darstellt. Die Streuung der Messwerte um den Mittelwert beträgt etwa ± 1 ppm. Insgesamt wird durch diese ersten Testmessungen gezeigt, dass die Herstellerangabe bezüglich der Stabilität übertroffen wird. Ungeachtet dessen sollten in Zukunft noch weitere Kalibrationsmessungen erfolgen, um beispielsweise die Temperaturabhängigkeit und das Einlaufverhalten, auch und insbesondere bei Spannungsänderungen, zu untersuchen.

KAPITEL 6

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Neutrinos wurden nach ihrer Entdeckung lange Zeit als masselose Teilchen angesehen. Durch den experimentellen Nachweis der Neutrinooszillation wurde in den letzten Jahren und Jahrzehnten jedoch nachgewiesen, dass die Neutrinomasse ungleich null ist. Bisherige Versuche die Masse zu messen waren aufgrund zu geringer Sensitivität nicht erfolgreich, sodass lediglich die aktuelle Obergrenze von etwa $m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}/c^2$ bestimmt werden konnte. Mit Hilfe des KATRIN-Experiments soll die Neutrinomasse aus dem Endpunktsbereich des Tritium- β -Spektrums ermittelt werden. Dazu wird die Energie der Zerfallselektronen mit Hilfe eines MAC-E-Filters mit bisher unerreichter Präzision gemessen. Um dies zu erreichen, muss die zur Erzeugung des Retardierungspotentials des Hauptspektrometers verwendete Hochspannung mit einer Unsicherheit kleiner als 3 ppm über eine Messphase (etwa 2-3 Monate) von KATRIN bekannt sein.

Das Hochspannungssystem wurde für die erste Messphase der Spektrometer-Detektor-Sektion (SDS) im Sommer 2013 durch den HV-Task in Betrieb genommen. Dabei wurde an das Hauptspektrometer erstmals erfolgreich das Analysierpotential von -18,6 kV angelegt. Außerdem wurde die Spannungsversorgung einer winkelselektiven Photoelektronenquelle, mit welcher die Transmissionseigenschaften des Hauptspektrometers untersucht wurden, durch den HV-Schalschrank im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut. Insgesamt konnten alle für diese Messphase vorgesehenen Komponenten des HV-Systems erfolgreich in Betrieb genommen und während der Messungen verwendet werden.

Das Drahtelektrodensystem des Hauptspektrometers ist für den Betrieb von KATRIN von großer Bedeutung. Ein wesentlicher Anteil dieser Arbeit sind Kapazitätsmessungen der Drahtelektrode, die eine Möglichkeit zur Überwachung der Integrität des Systems darstellen. Dabei wurden die Kapazitäten zunächst manuell mit einem LCR-Meter bestimmt, bevor ein System zur automatischen Kapazitätsmessung über Lade- bzw. Entladezeitmessungen am Hauptspektrometer installiert wurde, dessen Konzeptionierung, hardware- und softwarseitige Realisierung und Inbetriebnahme einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellen. Die manuellen Kapazitätsmessungen wurden hauptsächlich dazu genutzt, um die Beeinflussung der Drahtelektrode durch das Ausheizen des Spektrometers auf 300°C zu untersuchen. Dazu wurden die Kapazitäten in Zusammenarbeit mit [Bau13a] vor und nach dem Ausheizen gemessen und auf Abweichungen untersucht. Im Rahmen der Unsicherheiten konnten keine signifikanten Änderungen der Kapazitäten durch den Ausheizvorgang beobachtet werden. Allerdings wurde das Messsystem zwischen beiden Messungen leicht modifiziert, sodass eine erwartete systematische Abweichung von etwa 0,2% zu niedrigeren Kapazitäten bestimmt wurde. Aufgrund andauernder Kurzschlüsse einiger Drahtlagen mehrerer Ringe durch das Ausheizen konnten anschließend jedoch nicht alle Kapazitäten gemessen werden. Insgesamt deuten die Messungen der nicht kurzgeschlossenen Kanäle darauf hin, dass es durch das Ausheizen des Spektrometers zu keinen beobachtbaren Beeinträchtigungen des Drahtelektrodensystems gekommen ist.

Nachdem das System zur automatischen Kapazitätsmessung erfolgreich am Hauptspektrometer installiert und kalibriert wurde, sind im Rahmen dieser Arbeit erste Testmessungen an der Drahtelektrode durchgeführt worden. Die nicht kurzgeschlossenen Kanäle wurden vermessen und die Werte wurden mit den manuell gemessenen Kapazitäten nach dem Ausheizen verglichen. Dabei zeigte sich für den Großteil der Messungen eine Übereinstimmung im Rahmen der Unsicherheiten. Bei einigen Kapazitäten, vor allem bei den kleineren

Ringen mit niedriger Kapazität, wurden relative Abweichungen von bis zu 15% beobachtet. Die Ursache für diese Abweichungen konnte in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Hier ist es sinnvoll, in den nächsten Monaten weitere Messungen, sowohl mit dem LCR-Messgerät, wie auch mit dem automatisierten System durchzuführen, um die Diskrepanz zu untersuchen und eine größere Statistik zu erhalten.

Neben der Bestimmung der Absolutwerte der Kapazitäten ist die Reproduzierbarkeit der Messungen bzw. eine zeitliche Veränderung von wesentlicherer Bedeutung. Dazu wurden Messungen im Abstand von mehrere Wochen durchgeführt und die relativen Abweichungen bestimmt. Diese Abweichungen liegen im sub-Prozent-Bereich, was einer absoluten Abweichung der Größenordnung einiger pF bei einer Kapazität im nF-Bereich entspricht. Generell zeigt sich für die Reproduzierbarkeit aller Kanäle, dass diese etwa 0,2% beträgt, was auch mit Hilfe des LCR-Meters der manuellen Kapazitätsmessung erreicht wurde.

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen zeigen, dass das System zur automatischen Kapazitätsmessung zur Überwachung der Integrität der Drahtelektrode geeignet ist. Zwar gibt es bei den Absolutwerten einiger Ringe leichte Abweichungen zu den manuell bestimmten Kapazitäten, jedoch konnten nach einigen Wochen durch mehrfach wiederholte Messungen reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden.

Der dritte Teil dieser Arbeit besteht aus Kalibrationsmessungen der Präzisionskomponenten des Hochspannungssystems. Hierbei handelt es sich vor allem um die beiden für KATRIN entwickelten Spannungsteiler K35 und K65, mit denen zahlreiche Niederspannungskalibrierungen durchgeführt wurden. Diese zeigen, dass die Spannungsteiler über die letzten Jahre eine Stabilität der Maßstabsfaktoren im sub-ppm-Bereich besitzen, was die Anforderungen von KATRIN an die Spannungsüberwachung um etwa eine Größenordnung übertrifft. Eine ausführliche Kalibrationshistorie über Jahre ist für die Beurteilung des Teilerstatus unerlässlich und wird auch in den nächsten Jahren in regelmäßigen Intervallen fortgeführt werden.

In Zukunft ist eine weitergehende Untersuchung des Prinzips Niederspannungskalibrierung geplant, um Leckströme und thermische Einflüsse zu bestimmen. Erste Untersuchungen der Spannungsabhängigkeit des K65 mittels der Niederspannungskalibrierung zeigen mit den Ergebnissen aus Hochspannungsmessungen der PTB vergleichbare Werte. Diese vorläufigen Ergebnisse müssen aber durch wiederholte und weiterführende Messungen bestätigt werden, bevor eine sichere Aussage getroffen werden kann.

Außerdem wurde eine Kalibrierung beider Teiler an der PTB im Rahmen dieser Arbeit begleitet, bei welcher der K65 während Spannungsabhängigkeitsmessungen des Maßstabsfaktors ein auffälliges Verhalten in Form von ppm-Schwankungen zeigte. Der Teiler wurde in Münster mit Hilfe des K35 untersucht und als Ursache konnten gelockerte Schraubverbindungen innerhalb der Präzisionswiderstandskette ausgemacht werden, was daraufhin behoben wurde. In den folgenden Hochspannungsmessungen und Niederspannungskalibrierungen, die sich im Verlauf der Diagnose und Reparatur des K65 als eine wichtige Methode zur Überprüfung des Teilerstatus darstellten, zeigte der K65 wieder ein stabiles Verhalten.

Zuletzt wurden für diese Arbeit mit beiden Teilern Kalibrationsmessungen des Präzisionsnetzgeräts für die Erzeugung des Retardierungspotentials durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Netzgerät eine etwa sieben mal bessere Stabilität als die Herstellerangabe von 2 ppm/8h besitzt. Dies muss jedoch in Zukunft durch weitere Messungen, bei denen auch Temperatureinflüsse und das Einlaufverhalten berücksichtigt werden, untersucht

werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Hochspannungssystem am Hauptspektrometer und die einzelnen Präzisionsgeräte erfolgreich in Betrieb genommen bzw. kalibriert werden konnten und dass in den nächsten Jahren regelmäßig Messungen zur Überwachung durchgeführt werden müssen, um den einwandfreien Betrieb des HV-Systems sicherstellen zu können.

ANHANG

37 Pol-Konnektor und PIN-Belegung in Verteilerbox SCB-100 für automatische Kapazitätsmessung

Ader/Pin Connector	Kabelfarbe	Channel autom. Kap.	Port/Line SCB-100	Pin SCB-100	channel LabView	Dipol 1	Dipol 2
						Ring	Drahtlage
1	weiß	10	P4.0	26	0	2	äußere
2	braun	11	P4.1	27	1	2	äußere
3	grün	12	P4.2	28	2	3	äußere
4	gelb	13	P4.3	29	3	4	äußere
5	grau	14	P4.4	30	4	5	äußere
6	rosa	15	P4.5	31	5	6	äußere
7	blau	16	P4.6	32	6	7 bis 11	äußere
8	rot	17	P4.7	33	7	12	äußere
9	schwarz	18	P6.0	38	10	13	äußere
10	violett	19	P6.1	39	11	14	äußere
11	Braun-blau	110	P6.2	40	12	15	äußere
12	Weiß-rot	111	P6.3	41	13	16	äußere
13	Weiß-grün	112	P6.4	42	14	4	innere
14	Braun-grün	113	P6.5	43	15	3	innere
15	Weiß-gelb	114	P6.6	44	16	2	innere
16	Gelb-braun	115	P6.7	45	17	2	innere
17	Weiß-grau	116	P7.0	88	18	12	innere
18	Grau-braun	117	P7.1	89	19	7 bis 11	innere
19	Weiß-rosa	118	P7.2	90	20	6	innere
20	Rosa-braun	enable K2	P7.3	91	21	7 bis 11	innere
21	Weiß-blau	enable all	P7.4	92	22		
22	Braun-rot						
23	Weiß-schwarz						
24	Braun-schwarz						
25	Grau-grün						
26	Rot-schwarz						
27	Grün-rosa						
28	Blau-gelb						
29	Weiß-braun						
30	Gelb-grau						
31							
32	Gelb-rosa						
33	Grün-rot	123	P7.5	93	23	13	innere
34	Gelb-rot	122	P7.6	94	24	14	innere
35	Grün-schwarz	121	P7.7	95	25	15	innere
36	Gelb-schwarz	120	P5.0	76	8	16	innere
37	Grün-blau	119	P5.1	77	9	5	innere
					6	6	innere

Abbildung 6.1: Zuordnung der einzelnen Kanäle zu den entsprechenden Drahtlagen und Ringen bei der automatischen Kapazitätsmessung.

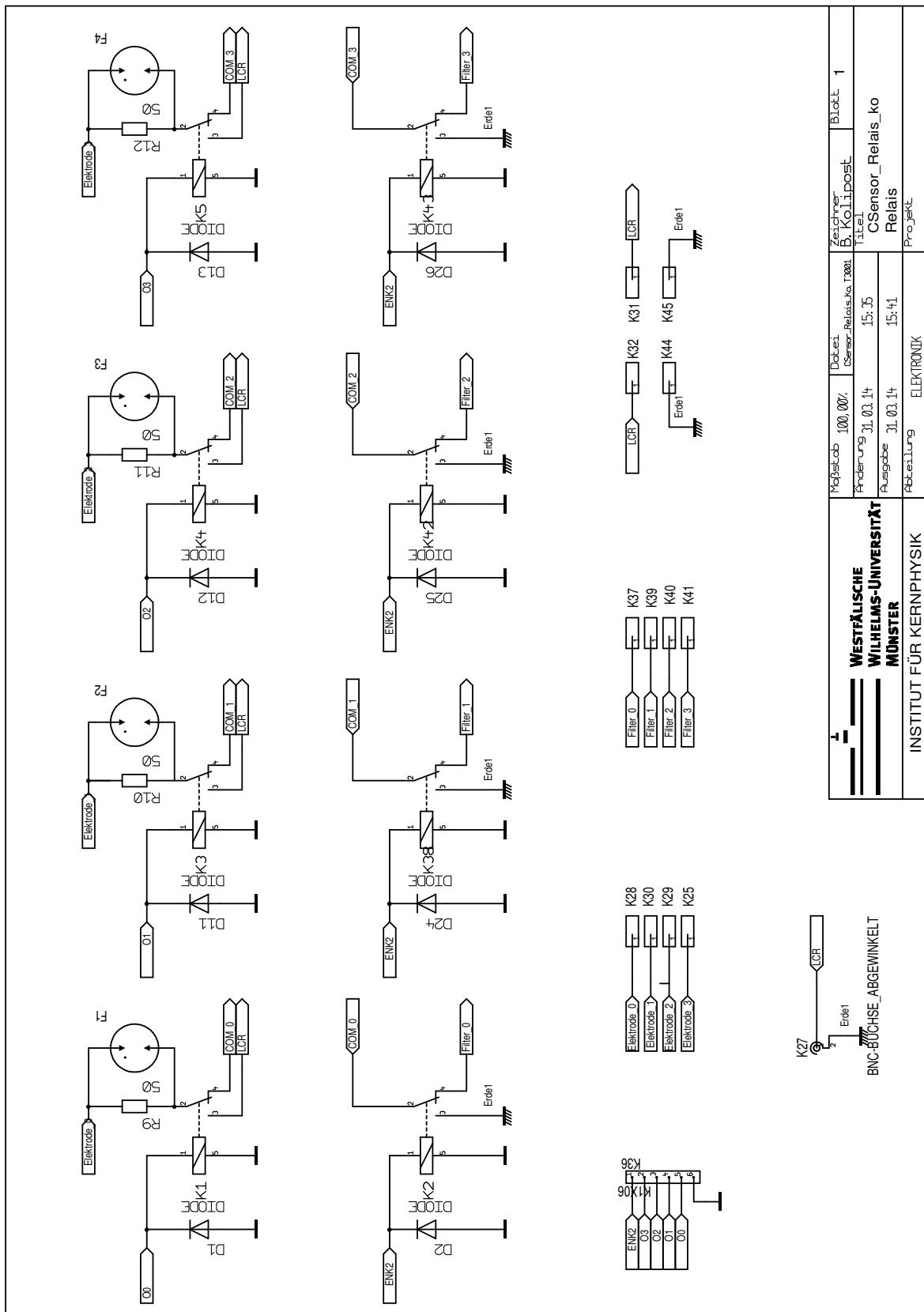


Abbildung 6.2: Schaltplan der Relais-Platinen des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung (erstellt von der Elektronikwerkstatt des IKP Münster).

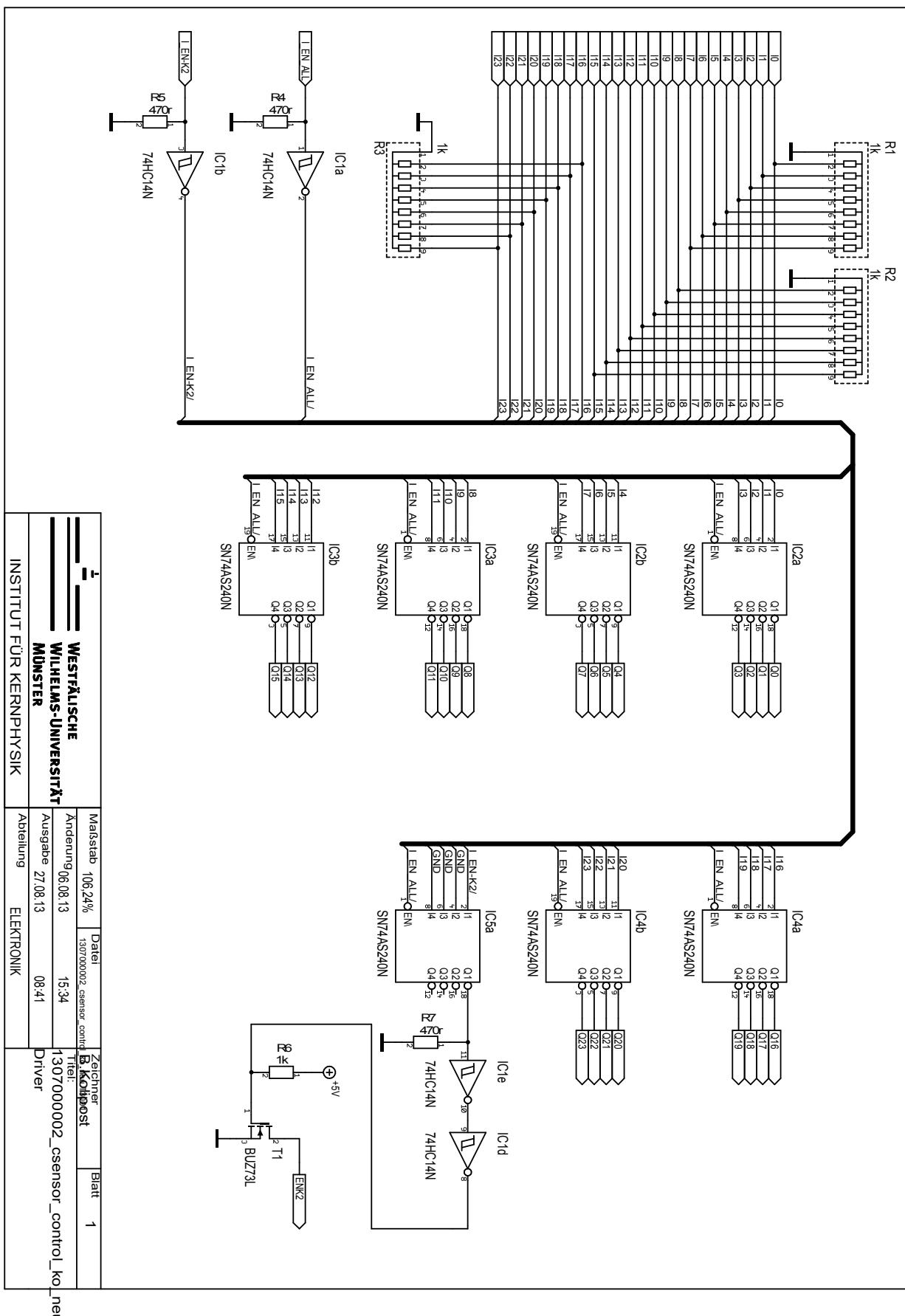


Abbildung 6.3: Schaltplan der Steuerplatten des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung (erstellt von der Elektronikwerkstatt des IKP Münster).

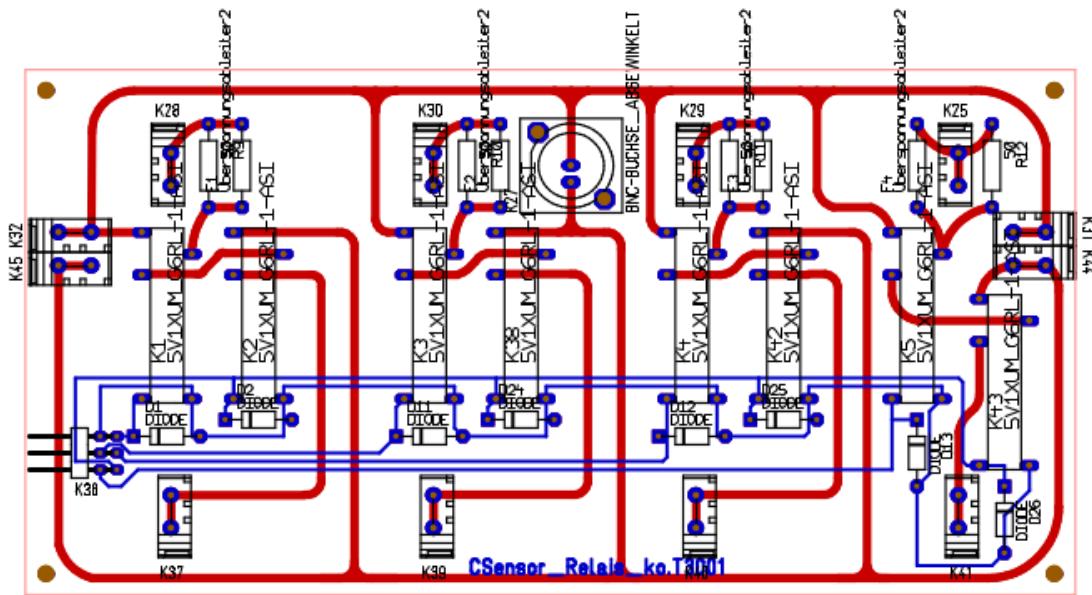


Abbildung 6.4: Layout der Relais-Platinen des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung (erstellt von der Elektronikwerkstatt des IKP Münster).

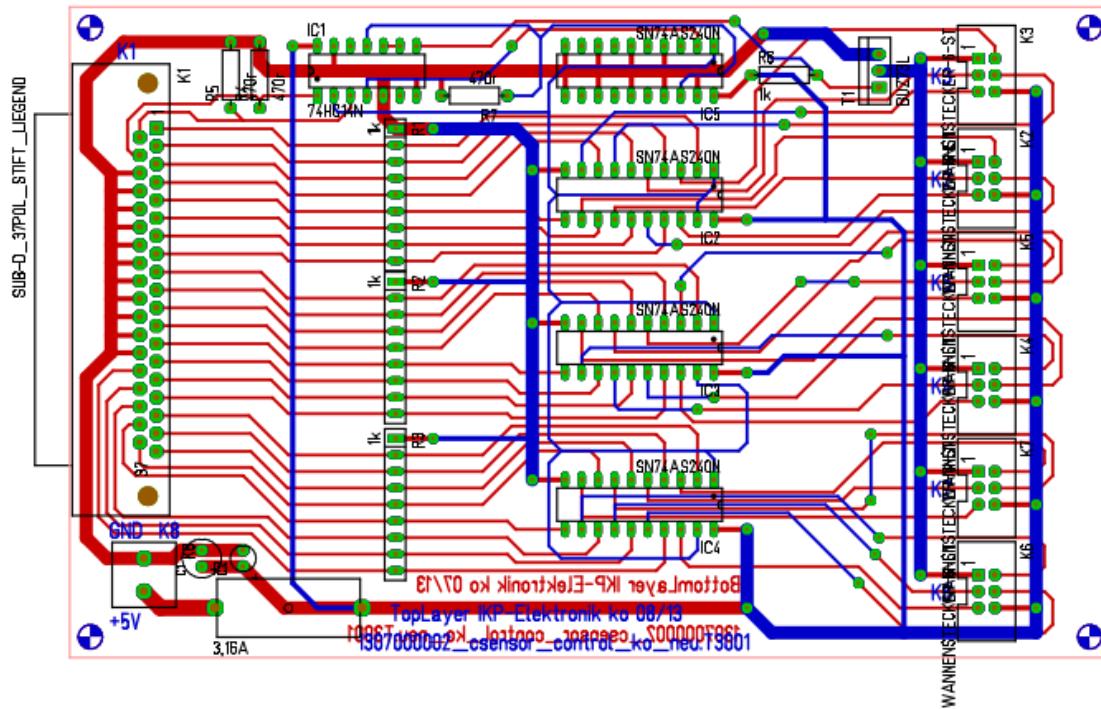


Abbildung 6.5: Layout der Steuerplatten des Systems zur automatischen Kapazitätsmessung (erstellt von der Elektronikwerkstatt des IKP Münster).

Tabelle 6.1: Manuell gemessene Kapazitäten von Dipol 2 (Ost) gemessen am 8.11.2012 (vor dem Ausheizen des Hauptspektrometers) am HV-Schrank (die Kapazitäten der Zuleitungen von HV-Schrank zum Spektrometer sind enthalten).

Ring	C inner wire layer (nF)	C outer wire layer (nF)	C inner vs. outer wire layer (nF)
2	$1,663 \pm 0,006$	$1,842 \pm 0,007$	$1,206 \pm 0,005$
3	$3,44 \pm 0,01$	$3,92 \pm 0,01$	$2,902 \pm 0,009$
4	$4,44 \pm 0,01$	$6,68 \pm 0,02$	$3,74 \pm 0,001$
5	$5,12 \pm 0,01$	$8,26 \pm 0,02$	$4,47 \pm 0,01$
6	$5,95 \pm 0,01$	$9,71 \pm 0,02$	$5,29 \pm 0,01$
7-11	$24,39 \pm 0,05$	$36,10 \pm 0,08$	$23,71 \pm 0,05$
12	$7,00 \pm 0,02$	$10,57 \pm 0,02$	$5,86 \pm 0,01$
13	$6,25 \pm 0,02$	$9,36 \pm 0,02$	$5,11 \pm 0,01$
14	$5,57 \pm 0,01$	$7,84 \pm 0,02$	$4,35 \pm 0,01$
15	$5,28 \pm 0,01$	$5,71 \pm 0,01$	$3,82 \pm 0,01$
16	$3,42 \pm 0,01$	$3,59 \pm 0,01$	$2,084 \pm 0,007$

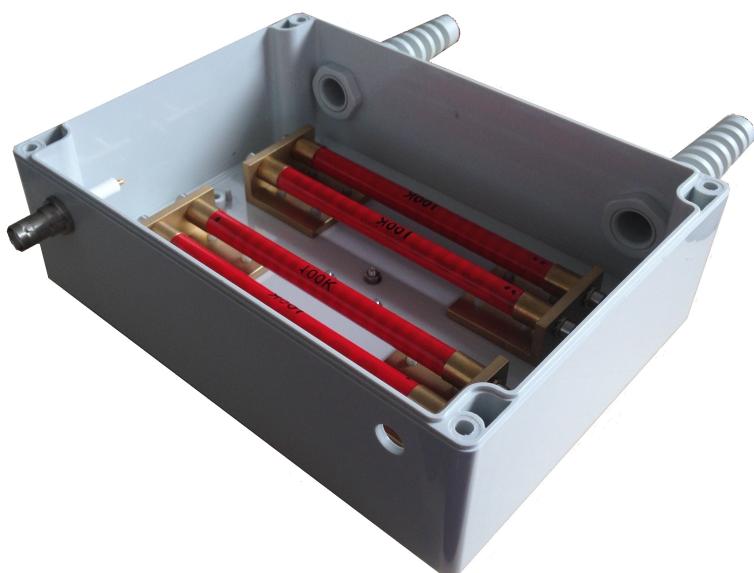


Abbildung 6.6: Widerstandsbox der winkelselektriven Photoelektronenquelle mit je zwei parallel geschalteten $100\text{ k}\Omega$ -Widerständen.



Abbildung 6.7: Im HV-Schrank installierte Batteriebox zur Erzeugung der -83 V Offsetspannung der winkelselektriven Photoelektronenquelle.



Abbildung 6.8: *Plugbox* zur elektrischen Entkopplung der winkelselektriven Photoelektro-nenquelle vom Hauptspektrometer.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Aha13] B. Aharmim et al. (SNO Collaboration), Measurement of the ν_e and total B-8 solar neutrino fluxes with the Sudbury Neutrino Observatory phase-III data set, Phys. Rev. C 87, 015502 (2013)
- [Ahm01] Q. R. Ahmad et al, Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e$ Interactions Produced by B-8 Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory, (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett. 87, 071301 (2001)
- [Alt03] C. Weinheimer in: G. Altarelli and K. Winder (Eds.), Laboratory Limits on Neutrino Masses, Neutrino Mass, Springer, 2003.
- [Aps05] American Physical Society, The Sudbury Neutrino Observatory and the Solution of the Solar Neutrino Problem, 2005 <http://dnp-old.nscl.msu.edu/current/sno.html>, 03.01.2014
- [Bau10] S. Bauer, Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisions-Hochspannungsteilers bis 65 kV für das KATRIN-Experiment, Diplomarbeit 2010
- [Bau13a] S. Bauer, Energy calibration and stability monitoring of the KATRIN experiment, Dissertation 2013
- [Bau13b] S. Bauer und O. Rest. Capacitance of the wire electrode. KATRIN-internes Dokument, 2013
- [Bea80] G. Beamson et al. , J. Phys. Sci. Instrum. Vol. 13 (1980) 64
- [Ben10] S. Benning, Entwicklung eines Lasersensors und Feldemissionsuntersuchungen für die Drahtelektrode im KATRIN-Hauptspektrometer, Diplomarbeit 2010
- [Cha14] J. Chadwick, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 16 (1914) 383
- [Cer12] CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson, CERN press office, press release, PR17.12 04.07.2012
- [Dav98] Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector. Astrophysical Journal 496: 505–526

- [Dre13] G. Drexlin, V. Hannen, S. Mertens et al, Current Direct Neutrino Mass Experiments, Advances in High Energy Physics, 2013, (2013), p. 39
- [Elo13a] KATRIN Kollaboration, E-Log, SDS-Measurements 93: Investigation of detector response through egun, 09.07.2013
- [Elo13b] KATRIN Kollaboration, E-Log, SDS-Measurements 219: Ramping Main Spectrometer vessel voltage with detector monitoring 14.08.2013
- [Elo13c] KATRIN Kollaboration, E-Log, SDS-Measurements 219: Ramping Main Spectrometer vessel voltage with detector monitoring 14.08.2013
- [Fra14] F. Fraenkle et al, Results of the first KATRIN SDS measurement phase, KATRIN-internes Dokument, 21. Februar 2014
- [Gru05] C. Grupen, Astroparticle Physics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [Goo06] A. Goobar, S. Hannestad, E. Mörtsell, H. Tu, The neutrino mass bound from WMAP-3, the baryon acoustic peak, the SNLS supernovae and the Lyman-alpha forest, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 606 (6) (2006).
- [Hab06] F. Eichelhardt, F. Habermehl, Seminar des Graduiertenkollegs Hochenergiephysik
- [Han13a] V. Hannen et al, M3 Report - E-gun Characteristics, KATRIN-internes Dokument, 23. Oktober 2013
- [Han13b] V. Hannen et al, Main Spectrometer Electron-Gun Specification, KATRIN-internes Dokument, 22. April 2013
- [Kat04] KATRIN Kollaboration, KATRIN Design-Report 2004
- [Kat14] KATRIN Homepage, <http://www.katrin.kit.edu/>, 03.01.2014
- [Kra05] C. Kraus, B. Bornschein, L. Bornschein et al, Final Results from phase II of the Mainz Neutrino Mass Search in Tritium β Decay. Eur. Phys. J., 40, (2005), pp. 447–468.
- [Lob03] V. Lobashev, The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN. Nuclear Physics A, 719, (2003), pp. 153–160
- [Mar01] R. Marx, New concept of PTBs standard divider for direct voltages of up to 100 kV, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50 (2001), S. 426 - 430
- [Ost09] B. Ostrick, Eine kondensierte ^{83}mKr Kalibrationsquelle für das KATRIN-Experiment, Dissertation 2009
- [Pra11] M. Prall. Background Reduction of the KATRIN Spectrometers: Transmission Function of the Pre-Spectrometer and Systematic Test of the Main-Spectrometer Wire Electrode. Ph.D. thesis, University of Muenster, 2011.
- [Rei59] R. Reines und C. L. Cowan, Phys. Rev. 113 (1959) 273
- [Rei95] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/, 03.01.2014

- [Res14] O. Rest und S. Bauer, priv. Kommunikation 2014
- [Ros11] S. Rosendahl, S. Bauer et al. Hochspannungsverteilung für die Drahtelektrode des Hauptspektrometers, KATRIN-internes Dokument 2011
- [Sis11] <http://www.scienceinschool.org/2011/issue19/neutrinos/german>,
03.01.2014
- [Ste07] M. Steidel, KATRIN internes Dokument, 2006
- [Thu08] T. Thuemmler, Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment, Dissertation, 2007
- [Zac09] M. Zacher, Electromagnetic design and field emission studies for the inner electrode system of the KATRIN main spectrometer, Diplomarbeit 2009

