

Präzisionshochspannung für das KATRIN-Experiment

Diplomarbeit in Physik

von Stephan Rosendahl

angefertigt im Institut für Kernphysik

vorgelegt der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Westfälischen Wilhelms-Universität
Münster

27. Januar 2011

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Referent: Prof. Dr. C. Weinheimer
Koreferent: Prof. Dr. A. Khoukaz

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
1.1. Neutrinophysik	8
1.2. Neutrinooszillation	10
1.2.1. Neutrinoquellen	10
1.2.2. Nachweis von Neutrinooszillation	11
1.2.3. Theoretische Beschreibung der Neutrinooszillation	12
1.2.4. Neutrinomassenbestimmung aus Reaktionskinematik	14
1.3. Das KATRIN Experiment	16
1.3.1. Der experimentelle Aufbau	16
1.4. Das Hauptspektrometer und die Drahtelektrode	18
1.4.1. Das MAC-E-Filter-Prinzip	19
1.4.2. Die Drahtelektrode	20
1.5. Qualität der Hochspannungsüberwachung	22
1.6. Der erste KATRIN Hochspannungsteiler	24
1.6.1. Aufbau eines Spannungsteilers	24
1.6.2. Elektrisches und Mechanisches Design des KATRIN-Teilers I	25
1.7. Inhalt der folgenden Kapitel	29
2. Wartung und Verbesserung des KATRIN Hochspannungsteilers I	31
2.1. Veränderungen außerhalb des Kessels	32
2.1.1. Der Transportrahmen	32
2.1.2. Veränderungen an der Peripherie	34
2.2. Veränderungen im Tankinnenraum	35
2.2.1. Der Lüfter	35
2.2.2. Feuchtigkeitssensor und Temperatursensoren	36
2.2.3. Die Hochspannungszuführung	38
2.2.4. Der 100:1 Abgriff	40
2.3. Vorbereitung für Testmessung und letzte Modifikationen	43
3. Kalibrierung des KATRIN Hochspannungsteilers I	47
3.1. Kalibrierungsgeschichte des KATRIN Hochspannungsteilers I	48
3.2. Kalibrierung eines Hochspannungsteilers	49
3.3. Kalibrierung des KATRIN Hochspannungsteilers I	50
3.3.1. Erste Kalibrierungsphase 2009 an der PTB	50
3.3.2. Niederspannungskalibrierung im Hochspannungslabor in Münster	51
3.3.3. Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung in Münster	55
3.3.4. Zweite Kalibrierungsphase 2009 an der PTB	56

4. Einsatz des KATRIN Hochspannungsteilers II am CERN	63
5. Die Hochspannungsversorgung der Drahtelektrode	73
5.1. Das Grundkonzept der Hochspannungsverteilung zu der Drahtelektrode	74
5.2. Der Hochspannungsschrank	76
5.3. Die isolierte Box	77
5.4. Die Hochspannungsquellen	78
5.4.1. Spannungsquellen für die Drahtelektrode	78
5.4.2. Spannungsquellen für die Antipenningelektroden	81
5.4.3. Spannungsquellen für den Dipolmodus	82
5.5. Kontroll- und Messelektronik	82
5.5.1. Gehäuse und Controller	83
5.5.2. Das Digital-Multimeter	83
5.5.3. Der Multiplexer	84
5.5.4. Das Oszilloskop	85
5.5.5. Die CAN-Schnittstelle	86
5.6. Das Patchpanel	86
5.6.1. Elektrisches und Mechanisches Design	87
5.7. Energieversorgung der elektronischen Komponenten	89
6. Testmessungen am Hochspannungsschrank	93
6.1. Testmessungen mit dem Digitalmultimeter und dem Multiplexer	94
6.1.1. Testmessungen mit dem Multimeter	94
6.1.2. Testmessungen mit dem Multimeter und dem Multiplexer	100
6.2. Testaufbau der Komponenten für die Versorgungsspannung	104
6.2.1. Spannungsfestigkeit der isolierenden Box	104
6.2.2. Test der elektronischen Komponenten auf Hochspannung	105
7. Zusammenfassung und Ausblick	109
A. Der Hochspannungsteiler - Verbesserung und Kalibrierungsergebnisse	113
A.1. Aufbau der primären Widerstandskette nach der Modifikation	114
A.2. Ergebnisse der Kalibrierung an der PTB 2009.	116
B. Technische Zeichnungen	121
Literaturverzeichnis	125
Danksagung	128

1. Einleitung

Das Neutrino wird im Standardmodell der Teilchenphysik bisher als masseloses Teilchen betrachtet. Allerdings haben Entdeckungen in jüngster Zeit gezeigt, das Neutrinos eine Masse besitzen müssen.

In den vergangenen Jahren gab es eine Reihe von Experimenten zur Bestimmung der Masse des Neutrinos. Dazu gibt es verschiedenen Ansätze sowohl aus der Kosmologie und der Astrophysik als auch Experimente mit Teilchenzerfällen wie den neutrinolesen, doppelten β -Zerfall oder die kinematische Betrachtung des einfachen β -Zerfalls.

Beim KATRIN-Experiment wird die Endpunktsenergie des Tritium- β -Zerfalls untersucht, um daraus die Neutrinomasse bestimmen zu können. Das Ziel ist es, die Sensitivität der Messung im Vergleich zu ihren Vorgängerexperimenten in Troisk und Mainz um eine Größenordnung auf $0,2\text{ eV}/c^2$ zu verbessern. Zur Analyse der Endpunktsenergie des Tritium- β -Spektrums wird ein sogenannter MAC-E Filter verwendet. Dabei handelt es sich um ein elektrostatisches Spektrometer mit magnetischer Teilchenführung, bei dem Elektronen die über zu geringe Energie verfügen im Potenzial retardiert werden. Für eine hohe Sensitivität sind die Güte des elektrostatischen Feldes und der Untergrund von entscheidender Bedeutung.

Die genaue Kenntnis des elektrischen Feldes hängt mit der angelegten Hochspannung zusammen. Um diese Hochspannung präzise überwachen zu können wurden zwei hochstabile Spannungsteiler entwickelt, welche die angelegte Hochspannung (bis zu 32 kV) in den kleineren Messbereich eines hochpräzisen Messinstruments herunter teilen können.

Der zweite wichtige Aspekt beschäftigt sich mit dem Untergrund. Wie im Folgenden noch deutlich wird, ist es von enormer Bedeutung den Untergrund zu reduzieren um nur Elektronen die aus dem Tritium-Zerfall stammen nachzuweisen. Elektronen die aus anderen Quellen emittiert werden würden die Ergebnisse verfälschen.

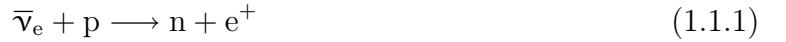
Diese Arbeit beschreibt die durchgeführten Modifikation am Hochspannungsteiler I um ihn für den Einsatz am KATRIN-Experiment vorzubereiten. Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Spannungsversorgung der Drahtelektrode für das Hauptspektrometer zur Minimierung des Untergrundes.

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über die Neutrino-physik gegeben um danach den experimentellen Aufbau des KATRIN-Experimentes zu erläutert. Im Besonderen wird dabei auf die Drahtelektrode des Hauptspektrometers und den Hochpräzisionsspannungsteiler eingegangen.

1.1. Neutrino-physik

Seit der Postulation des Neutrinos im Jahre 1930 durch Wolfgang Pauli und der theoretischen Beschreibung des β -Zerfalls durch E. Fermi im Jahre 1934 sind Versuche unternommen worden die Eigenschaften dieses Teilchens experimentell zu erkunden. Aus der Theorie folgt, dass die Neutrinos einen Spin von $\frac{1}{2}$ tragen müssen und somit zu den Fermionen gehören. Außerdem sind es ladungsfreie Teilchen und ihre Masse muss deutlich kleiner als die des Elektrons sein.

Die Tatsache, dass es lediglich über die schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen interagiert¹ machen sowohl den Nachweis seiner Existenz als auch die Untersuchungen seiner Eigenschaften enorm schwierig. Der Nachweis des Neutrinos gelang erst 22 Jahre nach der theoretischen Arbeit von E.Fermi im Jahre 1956 durch F. Reines und C.L. Cowan unter der Verwendung des inversen β -Zerfalls als Nachweisreaktion:



Dazu wurde ein mit wässriger Cadmiumchloridlösung gefüllter Behälter mit $\bar{\nu}_e$, die im Savannah River Reactor in den USA produziert wurden, bestrahlt. Das Ziel war es in einer Koinzidenzmessung die 511 keV-Photonen aus der e^-e^+ -Annihilation und das um einige μs verzögerte Photon aus der Neutroneinfangreaktion am Cadmium in der Lösung mit Szintillationsdetektoren nachzuweisen. Dadurch konnte die durch Neutrinos verursachten Signale vom Untergrund unterschieden werden. Diese Experimente an verschiedenen Reaktoren führten zum Beweis der Existenz des Neutrinos und brachte 1995 den Nobelpreis für Physik.

In den 1960er Jahren wurde damit begonnen das Standardmodell der Elementarteilchenphysik aufzubauen. Jegliche Materie und die Wechselwirkung zwischen ihnen wird darin durch einige wenige elementare Teilchen und Austauschteilchen beschrieben. Die Elementarteilchen werden in zwei Gruppen eingeteilt die als Quarks und Leptonen bezeichnet werden. Diese werden dann in den sogenannten Familien oder Generationen entsprechend ihrer Masse gruppiert.

Familie	1	2	3	Wechselwirkung	Austauschteilchen	Symbol
Leptonen	ν_e e^-	ν_μ μ^-	ν_τ τ^-	Elektromagnetisch Schwach	Photon Z-Boson W-Bosonen	γ Z^0 W^+, W^-
Quarks	u d	c s	t b	Stark	Gluon	g

Tabelle 1.1.: **Die fundamentalen Teilchen des Standardmodels.** In dieser Tabelle sind auf der linken Seite die Elementarteilchen zusammengefasst wobei es zu jedem Teilchen noch das zugehörige Antiteilchen gibt. Auf der rechten Seite sind die fundamentalen Wechselwirkungen wie sie im Standardmodell beschrieben werden mit den zugehörigen Austauschteilchen dargestellt. Die gravitative Wechselwirkung ist nicht mit einbezogen worden, da es bisher keine anerkannte Theorie gibt, welche die Gravitation über ein Austauschteilchen im Rahmen des Standardmodells beschreibt.

Zu jedem der drei geladenen Leptonen (e^- , μ^- , τ^-) gibt es ein zugehöriges neutrales Neutrino (ν_e , ν_μ , ν_τ) mit dem gleichen Flavour. Bei den Quarks existieren sechs Arten von Quarks die in drei unterschiedlichen Farbladungen auftreten können. Alle Quarks tragen eine Ladung, für u, c und t-Quarks beträgt die Ladung $+\frac{2}{3}e$ und für die d-, s- und b-Quarks beträgt sie $-\frac{1}{3}e$. Bisher existiert zu jedem Teilchen ein zugehöriges Antiteilchen, bei dem die additiven Quantenzahlen wie Ladung, Baryonenanzahl oder Leptonenzahl entgegengesetzt sind. Nicht-additive Quantenzahlen wie z.B. der Spin bleiben unverändert (wobei die 3. Komponente des

¹Dabei wird die gravitative Wechselwirkung zunächst vernachlässigt.

Spins eine additive Quantenzahl ist). Bei den Neutrinos besteht die Möglichkeit das sie ihre eigenen Antiteilchen sind, man spricht in diesem Zusammenhang von sogenannten Majorana-Teilchen. Nach dieser Eigenschaft wird z.B. in Experimenten zum neutrinolosen, doppelten β -Zerfall gesucht.

Im Standardmodell der Teilchenphysik werden Neutrinos als masselose Teilchen betrachtet. Dies folgt aus der mathematischen Beschreibung der schwachen Wechselwirkung nichtgelandeter Fermionen, bei denen es keine Masseterme für Neutrinos gibt. Es gibt einige Theorien jenseits des Standardmodells in denen die Neutrinos eine Masse besitzen, allerdings wird keine Aussage über die Größe der Masse macht.

Es gibt jedoch einen Effekt der es erfordert, das zumindest eine Neutrinomasse von Null verschieden sein muss, was zu Mechanismen jenseits des Standardmodels führt. Dies ist der Effekt der Neutrinooszillation der im Folgenden erläutert wird.

1.2. Neutrinooszillation

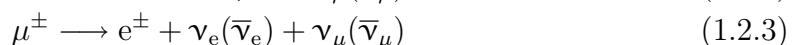
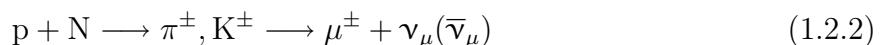
Es gibt verschiedene Neutrinoquellen die für experimentelle Forschung gut geeignet sind. Aus der Theorie und den Experimenten von Cowan und Raines konnte ein Wirkungsquerschnitt von

$$\sigma = (11 \pm 2,6) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad (1.2.1)$$

für Einfangreaktionen von Elektronantineutrinos mit Neutrinoenergien von $E_\nu \leq 8$ MeV angegeben werden. Da dieser Wirkungsquerschnitt äußerst gering ist würden Detektoren von enormen Ausmaßen benötigt um einzelne Neutrinos nachweisen zu können. Um nun Experimente in realistischer Dimensionierung aufzubauen, wird ein großer Neutrinostrahl benötigt um eine ausreichende Zählrate in einem begrenzten Detektorvolumen zu erhalten. Zunächst sollen kurz die zur Verfügung stehenden Quellen erläutert werden, die für Neutrinoexperimente in Frage kommen. Dabei werden zunächst natürliche und künstliche Quellen unterschieden.

1.2.1. Neutrinoquellen

Als natürliche Quelle kommen atmosphärische Neutrinos in Frage. Sie entstehen wenn hochenergetische Protonen der kosmischen Strahlung auf die Gasmoleküle der Atmosphäre treffen. Aufgrund der hohen Energie (im Pierre-Auger Observatorium werden Luftschauder aus Protonen mit Energien im Bereich von bis zu 10^{19} eV beobachtet) werden bei den Kollisionen Sekundärteilchen produziert die dann in einer Kaskade weitere Teilchen produzieren.



In diesem sogenannten Luftschauder werden Elektron- und Myonneutrinos sowie deren Antiteilchen produziert.

Eine zweite natürliche Quelle sind die solaren Neutrinos. Sie entstehen in der Sonne bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium.



Bei der Fusionsreaktion werden zunächst nur Elektronen Neutrinos produziert. Sie sind gut geeignet für Neutrinooszillationsexperimente im Vakuum und im Medium.

Eine dritte Quelle ergibt sich aus Supernova-Explosionen. Bei sehr massereichen Sternen kommt es am Ende ihres Lebenszyklus zu einem Gravitationskollaps im inneren Kern. Die äußeren Schichten des Sternes werden explosionsartig durch eine Schockwelle weggesprengt. Es kommt zur Bildung eines Neutronensternes indem sich Elektronen und Protonen zu Neutronen und Elektronen Neutrinos umwandeln. Der Hauptanteil an Neutrinos entsteht allerdings bei der Abkühlung des Neutronensterns, bei dem alle drei Neutrinoflavours gleichermaßen produziert werden. Dieser Ablauf wird auch als Supernova Typ II bezeichnet und ist relativ selten. Bisher konnten erst von einer Supernova (1987A) Neutrinos nachgewiesen werden.

Eine weitere Quelle sind die kosmologischen Neutrinos, die in der Frühzeit des Universums entstanden. Mit der Expansion des Universums kühlten die Neutrinos, die sich im thermodynamischen Gleichgewicht kurz nach dem Urknall befanden, soweit ab, dass sie entkoppeln. Ähnlich der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung nahm die Energie mit der Expansion des Universums weiter ab. Diese sogenannten Relic Neutrinos spielen bei der primordialen Nukleosynthese eine wesentliche Rolle und sind aufgrund ihrer Anzahl (336 Neutrinos/cm³) ein Kandidat für die nicht-baryonische, heiße Dunkle Materie. Allerdings ist der Wirkungsquerschnitt so gering ($\sigma \sim 10^{-54} \text{ cm}^2$) das sie experimentell bisher nicht nachgewiesen werden konnten.

Eine letzte Quelle stellen die sogenannten Geoneutrinos dar, die aus radioaktiven Zerfällen, die im Inneren des Planeten ablaufen, entstehen.

Zu den künstlichen Quellen zählen die Reaktorneutrinos die im β^- -Zerfall aus neutronenreiche Spaltprodukte produziert werden. Eine weitere künstliche Quelle sind Beschleunigerneutrinos. Bei einer Kollision von Protonen mit einem Target entstehen unter anderem Pionen und Kaonen die letztendlich in Neutrinos weiterzerfallen. Durch geeignete Wahl von Target und Anwendung von bestimmten Techniken lässt sich ein gebündelter Neutrinostrahl erzeugen.

1.2.2. Nachweis von Neutrinooszillation

In den vergangenen Jahren gab es einige Experimente die sich mit dem Phänomen der sogenannten Neutrinooszillation beschäftigen. Dabei ist Oszillation zunächst die Umwandlung eines Neutrino-Flavours in einen anderen während es im Raum propagiert. Der erste Hinweis auf diesen Effekt stammt aus Experimenten mit solaren Neutrinos: In den 1970er Jahren führte R.Davis et al. ein Experiment zum Einfang solarer Neutrinos mit ^{37}Cl durch.



Das ^{37}Ar konnte ausgespült und der Rückzerfall des Argons zu Chlor nachgewiesen werden. Von der errechneten Argonmenge von 1,5 Ar-Atomen pro Tag konnten nur 0,5 Atome/Tag nachgewiesen werden. Der Neutrinostrahlung war also nur ein drittel so stark wie von dem Standard-Sonnenmodell vorhergesagt. Folglich war entweder das Standardsonnenmodell nicht korrekt, das Experiment fehlerhaft oder es gab unbekannte Effekte. Erst im Jahre 2001 konnte die SNO-Kollaboration nachweisen, dass jenes Defizit aufgrund der Neutrinooszillation entsteht, da der Fluss von Elektronneutrinos nur ein drittel des Gesamtneutrinostrahles ausmacht. Das Experiment von R. Davis war jedoch nur auf Elektronneutrinos sensitiv sodass die anderen Neutrinoflavours nicht nachgewiesen werden konnten.

Eine zweiter Nachweis für Neutrinooszillation gelang mit atmosphärischen Neutrinos. Dies konnte mit dem, 1998 in Betrieb genommenen, Super-Kamiokande-Detektor gezeigt werden. Dabei handelt es sich um ein Wasser-Tscherenkov-Detektor, welcher mit 50 kt ultrareinem Wasser gefüllt ist. Die zylindrische Oberfläche ist mit 11200 Photomultipliern ausgekleidet. Wechselwirken die atmosphärischen Neutrinos mit dem Wasser im Tankvolumen erzeugen sie geladene Leptonen. Aufgrund der hohen Energie des geladenen Leptons ist seine Geschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit in dem Medium, sodass es zur Emission von Tscherenkov-Strahlung kommt. Diese kann dann mit den Photomultipliern registriert werden. Dieser Detektor ist sensitiv auf Myon- und Elektronneutrinos, da aufgrund der Form des Lichtkegels zwischen Elektron und Myon unterschieden werden kann. Es konnte nun ein Zenitwinkelabhängiges Defizit zwischen Myonneutrinos und Elektronneutrinos beobachtet werden, die mit den theoretischen Vorhersagen eines Neutrino-Oszillations-Szenarios übereinstimmt.

1.2.3. Theoretische Beschreibung der Neutrinooszillation

Zunächst soll nun verdeutlicht werden, wieso die Neutrinooszillation zu einer nichtverschwindenden Neutrinomasse bei zumindest einer Neutrinosorte führt. Betrachtet man einen Prozess der schwachen Wechselwirkung indem ein geladenes Lepton l_α (mit $\alpha = e, \mu, \tau$) und das zugehörige Neutrino ν mit dem Flavour-Eigenzustand $|\nu_\alpha\rangle$ entsteht, so ist dieser nicht automatisch Eigenzustand des Masseoperators M . Es lassen sich jedoch die Masse-eigenzustände $|\nu_i\rangle$ (mit $m_i, i = 1, 2, 3$ als Eigenwerte) durch eine unitäre Mischungsmatrix mit den Flavour-Eigenzuständen durch eine lineare Superposition in einen Zusammenhang bringen:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.2.6)$$

Nach der Erzeugung propagiert es im Raum und lässt sich durch die Schrödingergleichung beschreiben (im Folgenden sind $\hbar = c = 1$)

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \quad (1.2.7)$$

Würde dieses Teilchen nach einer gewissen Zeit nachgewiesen, geschieht dies wiederum über einen Prozess der schwachen Wechselwirkung. Bezeichnet man den Flavour-Eigenzustand

des Endpunktes mit β so lässt sich die Wahrscheinlichkeit P für den Nachweis wie folgt berechnen:

$$P_{\alpha \rightarrow \beta}(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \quad (1.2.8)$$

$$(1.2.9)$$

Das Ersetzen der Flavoureigenzustände durch Einführung der Masseigenzustände gemäß (1.2.6) führt zu folgender Gleichung:

$$= \left| \left\langle \nu_i | \sum_i U_{\beta i}^* e^{-E_i t} U_{\alpha i} | \nu_i \right\rangle \right|^2 \quad (1.2.10)$$

$$= \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-i E_i t} \right|^2 \quad (1.2.11)$$

$$= \sum_i |U_{\alpha i} U_{\beta i}^*|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{j > i} U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* U_{\beta j} e^{-i(E_i - E_j)t} \quad (1.2.12)$$

Wie man erkennt hängt die Übergangswahrscheinlichkeit von der Energie der beiden Massezustände ab. Die Einführung der Energie-Impulsbeziehung nach Einstein ergibt für die Energie eines Zustandes:

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2E} \approx E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.2.13)$$

$$(1.2.14)$$

Die Näherung ist gültig für $p \gg m_i$ und damit erhält man für die Energiedifferenz zwischen den zwei Massezuständen

$$(E_i - E_j) t \approx \frac{m_i^2 - m_j^2}{2} \frac{L}{E} = \frac{\Delta m_{ij}^2}{2} \frac{L}{E} \quad \text{für } L = t \quad (1.2.15)$$

Damit ergibt sich eine Abhängigkeit der Übergangswahrscheinlichkeit von der Massendifferenz zwischen zwei Masse-Eigenzuständen:

$$P_{\alpha \rightarrow \beta}(L) \sim \operatorname{Re} \sum_{j > i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2}{2} \frac{L}{E}}. \quad (1.2.16)$$

Wäre nun die Massendifferenz gleich null, wie es der Fall ist wenn alle Neutrinos masselos wären, würde die Übergangswahrscheinlichkeit $P_{\alpha \rightarrow \beta} = 0$ sein. Folglich würde man keine Neutrinooszillation beobachten. Da sie jedoch nachgewiesen wurde, muss $\Delta m_{ij}^2 \neq 0$ sein und es folgt, dass zumindest ein Neutrinomasseeigenzustand von Null verschieden ist.

Neutrinooszillationsexperimente sind generell nur auf Massenquadratsdifferenzen und Mischungswinkel sensitiv. Aus den Experimenten mit solaren und atmosphärischen Neutrinos lassen sich die jeweiligen Massenquadrate ermitteln. Die folgenden Werte stellen eine Kombination aus allen experimentellen Ergebnissen der jeweiligen Kategorie dar [PDG08]:

Aus den Experimenten mit solaren Neutrinos ergibt sich eine Massendifferenz Δm_{12} von:

$$\Delta m_{\text{solar}}^2 = \Delta m_{12}^2 = (8,0 \pm 0,3) \times 10^{-5} \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.2.17)$$

Aus den Experimenten mit atmosphärischen Neutrinos lässt sich der Parameter Δm_{32} bestimmen zu:

$$\Delta m_{\text{atm}}^2 = \Delta m_{23}^2 = (1,9 - 3,0) \times 10^{-3} \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.2.18)$$

Bei diesen Überlegungen wurde stets die Propagation im Vakuum behandelt. Bei der Neutrinooszillation im Medium treten noch weitere Effekte auf (z.B. der MSW-Effekt) die hier jedoch nicht erläutert werden. Da bisher nur Differenzen zwischen Massenquadrate bekannt sind, kann keine Aussage über die Absolutwerte der Neutrinomasse gemacht werden. Dazu bedarf es anderer experimenteller Ansätze. Eine Möglichkeit liegt in der Betrachtung der Reaktionskinematik des β^- -Zerfalls.

1.2.4. Neutrinomassenbestimmung aus Reaktionskinematik

Ein Absolutwert für die Neutrinomasse ist sowohl für die Erweiterung des Standardmodells als auch für die Kosmologie interessant. Es gibt bisher verschiedene Ansätze um das Standardmodell zu erweitern. Allerdings liefern diese Theorien keinen konsistenten Wert für die Größe der Neutrinomasse, sodass dessen Bestimmung für die Unterscheidung zwischen verschiedenen Theorien notwendig ist.

Aufgrund der großen Anzahl an Neutrinos im Universum ($336/\text{cm}^2$) bleibt außerdem die Frage offen, inwieweit die Neutrinos zur Strukturbildung im Universum beitragen. Aus den Oszillationsexperimenten und den Messungen in Mainz konnten bereits obere und untere Grenzen für die Neutrinomasse angegeben werden, die bereits für kosmologische Berechnungen angewendet werden. Allerdings ist die Neutrinomasse in den kosmologischen Modellen bisher als freier Parameter benutzt wurde, der durch eine direkte Messung eliminiert würde.

Es gibt nun verschiedene Ansätze um Absolutwerte für die Neutrinomasse zu bestimmen.

In der kosmologischen Betrachtung wird die Mikrowellenhintergrundstrahlung vermessen. Aus diesen Messdaten, kombiniert mit den kosmologischen Modellen zur Entwicklung des Universums kann der Anteil an heißer dunkler Materie, zu denen die Neutrinos gehören, ermittelt und daraus die Neutrinomasse abgeschätzt werden.

Die astrophysikalische Lösung macht sich den Neutrinostrahlung einer Supernova zunutze. Hierbei wird der Flugzeitunterschied zwischen verschiedenen schweren Neutrinos betrachtet und daraus die Masse errechnet. Ein Problem dabei ist, dass bisher nur die Neutrinos einer einzigen Supernova nachgewiesen wurden. Außerdem werden hier wiederum Annahmen über den Mechanismus einer Supernova verwendet, die das Ergebnis beeinflussen.

Bei den Versuchen mit neutrinolosem, doppeltem β -Zerfall verwendet man die Annahme, dass es sich bei dem Neutrino um sein eigenes Antiteilchen, ein sogenanntes Majorananteilchen, handelt. Bei diesen Experimenten wird die Halbwertszeit dieses Zerfalls bestimmt und daraus die effektive Majorana-Masse errechnet. Diese effektive Masse ist über ein Kernmatrixelement

und einen Phasenraumfaktor mit der Halbwertszeit verknüpft, wobei die genaue Kenntnis des Kernmatrixelements mit großen Unsicherheiten verknüpft sind. Somit ist die ermittelte Neutrinomasse von der Theorie des Kernmatrixelementes abhängig.

Bei β -Zerfalls-Experimenten betrachtet man die reine Kinematik des Zerfalls, sodass keine Modellannahmen gemacht werden müssen. Man betrachtet z.B. einen einfachen β^- -Zerfall und vermisst das Spektrum des emittierten Elektrons. Eine Ruhemasse des Neutrinos die von Null verschieden ist, würde das Energiespektrum verformen, da sie nicht als kinetische Energie für das Elektron zur Verfügung stehen würde. Nach eben dieser Verformung wird in den Experimenten gesucht. Es wurden bereits Experimente an den Spektrometern in Troitsk und Mainz durchgeführt und eine Obergrenze für die Neutrinomasse ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Mainz-Experiment} \quad m_{\bar{\nu}_e} &\leq 2,3 \text{ eV/c}^2 \text{ (95% C.L.)} & [\text{Kra05}] \\ \text{Troitsk-Experiment} \quad m_{\bar{\nu}_e} &\leq 2,1 \text{ eV/c}^2 \text{ (95% C.L.)} & [\text{Lob03}] \end{aligned}$$

Wie schon kurz beschrieben, gibt es mehrere Methoden die Neutrinomasse zu bestimmen, allerdings sind einige davon auf Modellannahmen oder unzureichende Statistik beschränkt (Kosmologie, Supernovaeneutrinos). Bei der Neutrinomassenbestimmung aus dem β -Zerfall wird nur die reine Reaktionskinematik betrachtet um die Neutrinomasse des entstehenden $\bar{\nu}_e$ zu ermitteln. Der Zerfall sieht wie folgt aus:



Betrachtet man die Übergangsrate in einem Zeitintervall dt und einem Energieintervall dE so erhält man aus Fermis Theorie zum β -Zerfall folgenden Zusammenhang [Alt03]:

$$\frac{d^2N}{dt dE} = R(E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\bar{\nu}_e}^2 c^4} \theta(E_0 - E - m_{\bar{\nu}_e}^2 c^4) \quad (1.2.20)$$

mit einem Energieabhängigen faktor $R(E)$

$$R(E) = \frac{G_F^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cos(\theta_C) |M|^2 F(Z + 1, E) p(E + m_e c^2)(E_0 - E) \quad (1.2.21)$$

mit

G_F	die Fermi-Kopplungskonstante,
M	das Kernmatrixelement,
θ_C	der Cabibbo-Winkel,
E	die kinetische Energie des Elektrons,
p	der Impuls des Elektrons,
E_0	der Endpunkt des β -Spektrums,
$m_e c^2, m_{\bar{\nu}_e} c^2$	die Ruheenergie des Elektrons bzw. des Elektronantineutrinos.

Die Information über die Neutrinomasse steckt im Phasenraumfaktor $\sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\bar{\nu}_e}^2 c^4}$ und wirkt sich auf das Spektrum des β^- -Zerfalls aus.

Es stellt sich nun die Frage nach einem geeigneten Isotop, wobei die Endpunktsenergie ein wichtiges Kriterium darstellt. Eine niedrige Endpunktsenergie führt zu einem schmalen Spektrum und zu einer größeren Zahl an emittierten Elektronen am Endpunkt des Spektrums was zu einer hohe Signalrate führt. Die niedrigsten Endpunktsenergie sind bei den Zerfällen von Rhenium ($E_\beta = 2,6\text{keV}$) und Tritium ($E_\beta = 18,6\text{keV}$) zu finden. Die Verwendung von Tritium hat einige Vorteile gegenüber Rhenium. Zunächst mal ist die Halbwertszeit von Tritium mit 12,3 Jahren relativ kurz. Dadurch ist es möglich hohe Intensitäten bei geringen Quelldichten zu erreichen. Außerdem ist Tritium auch gasförmig zu verwenden, sodass Effekte im Festkörper nicht berücksichtigt werden müssen. Mit einer Ladung von ($Z=1$) lässt sich die Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektron und Tochterkern gut berechnen. Hinzu kommt, dass der β -Zerfall von Tritium übererlaubt ist, was zu einem konstanten Matrixelement führt, das von der Energie des Elektrons unabhängig ist.

1.3. Das KATRIN Experiment

Das KATRIN-Experiment ([Karlsruher Tritium Neutrinoexperiment](#)) ist die nächste Generation von Tritium-Zerfalls Experimenten zur Bestimmung der Ruhemasse des Elektronantineutrinos $\bar{\nu}_e$. Nach den Experimenten in Mainz und Troitsk sowie kosmologischen Untersuchungen (WMAP) wurde klar, dass zukünftige Experimente eine Sensitivität im sub-eV Bereich aufweisen müssen. Das KATRIN-Experiment hat sich zum Ziel gesetzt eine Sensitivität von $0,2\text{ eV}/c^2$ erreichen. Im Folgenden werden die Kernkomponenten kurz erläutert [KAT04]:

1.3.1. Der experimentelle Aufbau

Das KATRIN-Experiment befindet sich am KIT ([Karlsruher Institute of Technology](#)) auf dem Gelände des früheren Forschungszentrums. Der Grund für den Standort liegt in der Infrastruktur begründet. Das Tritiumlabor am KIT besitzt einen geschlossenen Tritiumkreislauf und die einzige zivile Lizenz zur Handhabung der Menge an Tritium die für das KATRIN Experiment benötigt wird. Im Grunde lässt sich der gesamte Aufbau in einige wenige Hauptkomponente aufteilen. In Abbildung 1.1 ist der experimentelle Aufbau nach 2006 gezeigt. Ganz links ist die Tritiumquelle zusehen, gefolgt von einer Pumpstrecke an die sich das Vorspektrometer anschließt. Nach dem Vorspektrometer ist das Hauptspektrometer angesetzt das von einem System aus Luftspulen umschlossen ist. Der Aufbau endet mit dem Detektor.

(a) Die Tritiumquelle

Am KATRIN Experiment wird eine fensterlose, gasförmige Tritiumquelle verwendet (WGTS, [windowless gaseous tritium source](#)). In der molekularen Tritium in ein 10 m langes Rohr von 90 mm Durchmesser eingeleitet wird. Die Temperatur von 27 K, der Einlassdruck und die

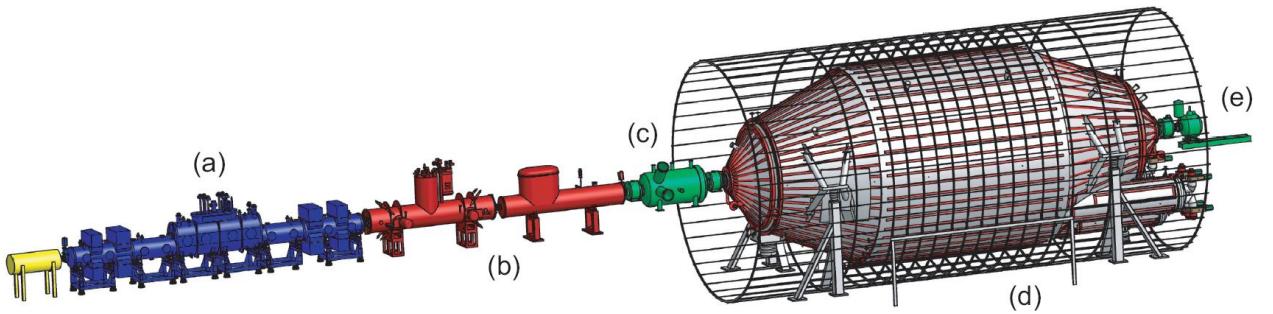


Abbildung 1.1.: **Das KATRIN-Setup.** In dieser Abbildung ist der experimentelle Aufbau schematisch gezeigt. Ganz links ist die fensterlose Tritiumquelle (a) aufgebaut gefolgt von der Transportstrecke (b). Es schließt sich das Vorspektrometer (c) und das Hauptspektrometer (d) an wobei letzteres aus einem System von Luftspulen umgeben ist. Das Setup endet mit dem Detektor (e).

Tritiumverteilung im Rohr sind Parameter die sehr genau bekannt sein müssen, da die Tritiumquelle einer Hauptverursacher der systematischen Unsicherheit ist [KAT04]. Die im Zerfall entstehenden Elektronen werden auf magnetischen Führungslien in die Transportsektion geleitet. Der Vorteil an der Fensterlosigkeit ist, dass die entstandenen Elektronen nicht am Fenstermaterial streuen, sodass eine Verfälschung des Energiespektrums vermieden wird. Dabei entstehen natürlich auch Probleme, die es zu lösen gilt. Zum Einen darf das Tritium nicht in die Spektrometersektion gelangen. Würde es in der Nähe der Analysierebene zerfallen würde das entstehende Elektron nicht das volle elektrische Gegenfeld erfahren und zum Untergrund beitragen. Zum Anderen sollen Stöße zwischen Elektronen und Gasmolekülen weitestgehend vermieden werden. Aus diesem Grund werden die Gasmoleküle über verschiedene Prozesse abgepumpt.

(b) Die Transportstrecke

Um die Kontamination des Spektrometers zu vermeiden, ist eine Transportstrecke geplant um den Tritiumfluss auf $< 10^{-14}$ mbar l/s zu reduzieren. Diese Transportstrecke gliedert sich in zwei Teilbereich die differentielle Pumpstrecke (DPS) und die kryogene Pumpstrecke (CPS). Aus der WGTS tritt ein Tritiumfluss von 2 mbar l/s in die Transportsektion ein. Es gilt also den Fluss um einen Faktor 10^{14} zu reduzieren. In der DPS wird mittels einer Kombination aus Turbomolekularpumpen der Tritiumfluss um einen Faktor 10^7 reduziert. In der nachfolgenden CPS sind die Innenwände mit Argonschnee beschichtet. Es kommt zu einer Absorption der Tritiummoleküle. Die einzelnen Module der CPS stehen nicht gerade aufeinander. Die geladenen Elektronen werden über die magnetischen Führungslien durch die Strecke transportiert, während ungeladene Teilchen auf die Wände treffen.

(c) Die Spektrometer

Nachdem die Elektronen die Transportstrecke durchquert haben werden sie in das Vorspektrometer geführt. Dieses Spektrometer hat eine Länge von 3,38 m und einen Durchmesser von 1,7 m. Es arbeitet ebenso wie das Hauptsektrometer nach dem MAC-E Filter Prinzip. Dabei handelt es sich um einen Hochpassfilter. Im KATRIN Aufbau ist es dazu gedacht den niederenergetischen Teil des Tritium- β -Spektrums heraus zu filtern. Die Information der Neutrinomasse steckt im hochenergetischen Ende des Spektrums, sodass es nur den Untergrund erhöhen würde, wenn das Hauptspektrometer mit niederenergetischen Elektronen gefüllt würde. Das Vorspektrometer reduziert den Fluss von 10^{10} Elektronen/s auf 10^3 Elektronen/s. Bis jetzt dient das Vorspektrometer als Modellspektrometer um die Vakuumerzeugung sowie die Kühl- und Heizkomponenten zu testen. Außerdem dient es zur Analyse von Penningfällen die im KATRIN Experiment ein nicht unwesentlicher Teil des Untergrundes darstellen. Durch die Versuche am Vorspektrometer konnte das Design verschiedener Elektroden optimiert werden um viele Penningfälle zu schließen [Zac09].

Nach der Reduktion des Elektronenflusses werden die verbliebenen Elektronen in das Hauptspektrometer geführt. An dieser Stelle wird auf die Beschreibung der Eigenschaften des Hauptspektrometers verzichtet, da es im nachfolgenden Abschnitt separat behandelt wird.

(d) Der Detektor

Die Elektronen, welche die Analysierebene im Hauptspektrometer passieren konnten, werden wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt und mit den magnetischen Führungslien auf den Detektor geführt. Als Detektor dient ein 9 cm großer, in 148 Pixel segmentierter Silizium-Halbleiter Detektor. Für das KATRIN-Experiment muss die Nachweiseffizienz für Elektronen ausreichend hoch sein. Außerdem sollte die Untergrundzählrate niedrig sein und die Energieauflösung für Untergrunduntersuchungen ausreichend hoch sein. Die Segmentierung bringt den Vorteil, dass die Feldverteilung im Spektrometer untersucht werden kann. Zur Reduktion des Untergrundes wird ein aktiver Myon-Veto-Schild aus Plastiksintillatoren sowie eine passive Abschirmung aus Lagen von Kupfer und Blei verwendet.

1.4. Das Hauptspektrometer und die Drahtelektrode

Das Hauptspektrometer hat eine Länge von 23,3 m bei einem Durchmesser von 10 m. Die Geometrie und die Abmessungen sind durch die Funktionsweise vorgegeben. Beide Spektrometer arbeiten nach dem sogenannten MAC-E-Filter Prinzip (siehe Abschnitt 1.4.1). Das Vorspektrometer erreicht aufgrund der geringeren Größe nur eine Energieauflösung von etwa 70 eV, während das Hauptspektrometer eine Auflösung von 0,93 eV besitzen wird. Der Gasdruck im Experiment soll durch Turbomolekular- und Getterpumpen auf $p < 10^{-11}$ mbar gebracht werden. Somit wird ein Material benötigt das eine niedrige Ausgasrate aufweist. Beide Spektrometer wurden aus Edelstahl hergestellt. Bei beiden Spektrometern liegt das Retardierungspotenzial an der Tankwand an, wobei es zur Feineinstellung und zur Minimierung von Untergrund ein System aus Drahtelektroden in beiden Spektrometern gibt.

1.4.1. Das MAC-E-Filter-Prinzip

Der sogenannte MAC-E-Filter („Magnetic Adiabatic Collimation with Elektrostatic Filtering“) besteht, wie der Name schon sagt, aus einem magnetischen Führungsfeld und einem elektrostatischen Filter. In Abbildung 1.2 ist der schematische Aufbau eines Mac-E-Filters gezeigt. Der Mac-E Filter besteht im wesentlichen aus zwei Solenoiden und einer Elektrode. Zwischen

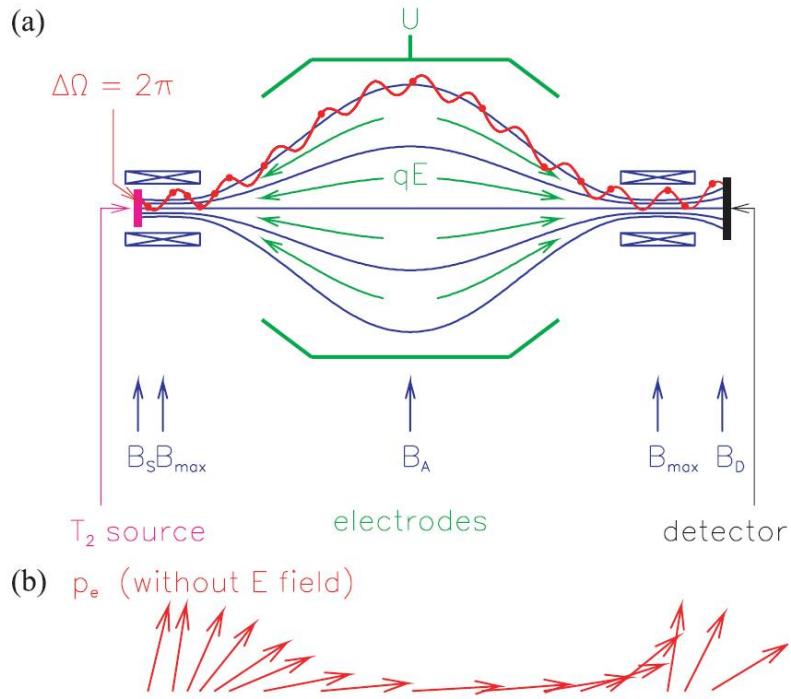


Abbildung 1.2.: **Das MAC-E-Filter Prinzip.** Zwischen zwei Solenoiden wird ein magnetisches Führungsgebiet aufgespannt in dem sich die geladenen Teilchen auf Zyklotronbahnen um die Feldlinien bewegen. Die Stärke des Magnetfeldes nimmt zum Zentrum hin ab, was eine sogenannte adiabatische Führung der geladenen Teilchen erlaubt und zu einer Konvertierung der transversalen Energiekomponente in eine reine Longitudinalbewegung (b) führt. Das elektrische Gegenfeld ist nur durchlässig für Elektronen dessen Energie größer ist als das angelegte Potenzial. Nachdem die Teilchen die Analysierebene passiert haben werden sie auf den Detektor beschleunigt.

den Magneten wird ein Führungsgebiet erzeugt, in dem sich die Elektronen auf Zyklotronbahnen um die Feldlinien durch das Spektrometer bewegen. Die Energie der Elektronen lässt sich nun aufteilen in eine longitudinale- und eine transversale Komponente. Es wäre jetzt von Vorteil, die gesamte Energie in eine Komponente umwandeln zu können, sodass die Gesamtenergie des Teilchens in eine Richtung gerichtet mit einem Gegenfeld untersucht werden kann. Diese Umwandlung wird mit dem magnetischen Führungsgebiet vorgenommen. Die Magnetfeldstärke des Führungsgebietes wird sehr langsam von $B_{max} = 6,0\text{T}$ auf $B_A = 3 \cdot 10^{-4}\text{T}$ verringert. Das Minimum des magnetischen Feldes stellt die Analysierebene dar. Aufgrund

der langsamsten Veränderung des Magnetfeldes gilt auch weiterhin die Energieerhaltung zusätzlich bleibt aber auch das Bahnmoment erhalten:

$$\mu = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const} \quad (1.4.1)$$

$$\Delta E = E_e \cdot \frac{B_{min}}{B_{max}} \approx 1 \text{ eV} \quad (1.4.2)$$

Daraus folgt, dass bei abfallendem Magnetfeld auch die transversale Komponente der Energie sich verringern muss damit μ erhalten bleibt. Da jedoch die Energie ebenfalls eine Erhaltungsgröße ist, wird die gesamte Energie der transversalen Bewegung in die longitudinale Komponente der Bewegung transformiert.

Legt man jetzt an die Elektrode eine beliebige Hochspannung an wird ein elektrisches Feld erzeugt das, im Falle gleicher Polartität der Teilchenladung und des elektrischen Feldes, als Filter dient. Nur Elektronen mit ausreichend hoher kinetischer Energie können das Potenzial überwinden und auf den Detektor abgebildet werden. Dieser Aufbau entspricht einem Hochpassfilter. Die Anzahl der detektierten Elektronen sind dann abhängig von der Stärke des Gegenfeldes die sich über die Einstellung der Hochspannung beeinflussen lässt.

1.4.2. Die Drahtelektrode

Da nur vergleichsweise wenig Elektronen im Endpunkt des Spektrums emittiert werden, ist es erforderlich den Untergrund im Messbetrieb weitestgehend zu unterdrücken. Im Allgemeinen unterscheidet man drei Arten von Untergrund die für das KATRIN-Experiment maßgeblich sind.

- Ionisation von Restgas
- Gespeicherte Elektronen
- Elektronenemission aus der Spektrometerwand verursacht durch Zerfälle und der Einstrahlung kosmischer Myonen.

Die ersten beiden Punkte werden durch Vakuumherstellung und elektromagnetische Design Studien behandelt. Die dritte Komponente des Untergrundes betrifft Elektronen die aus der Tankwand emittiert werden. Ein Großteil der Elektronen, die aus dem Material emittiert werden, gelangen nicht zum Detektor da es keine Feldlinien gibt die sie dahin führen könnten. Allerdings gibt es dennoch einige Elektronen die es in den Flussschlauch schaffen und zum Detektor beschleunigt oder gespeichert werden bzw. Streuung mit anderen Elektronen vollziehen. Dass es einige Elektronen in den Flussschlauch schaffen liegt an Komponenten des magnetischen und elektrischen Feldes die nicht axialsymmetrisch sind. Es gilt also den Flussschlauch gegen diese Elektronen abzuschirmen.

Dazu wird eine zweilagige Drahtelektrode im Innern des Spektrometers aufgebaut um den Flussschlauch gegen den Elektronenfluss aus der Tankwand abzuschirmen. Das Prinzip ist in

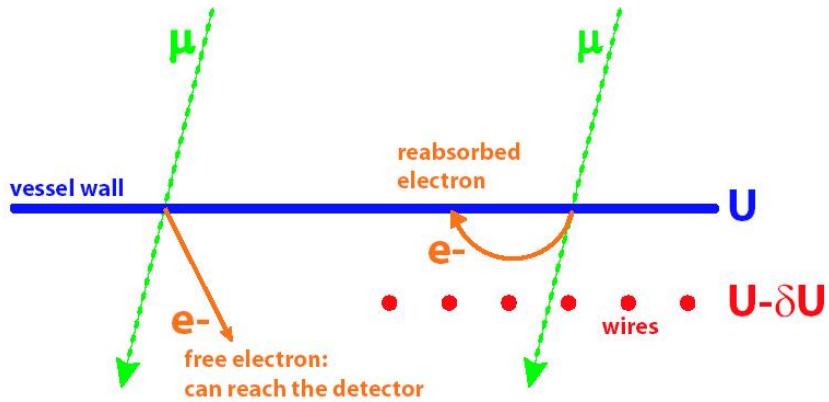


Abbildung 1.3.: **Das Prinzip der Drahtelektrode.** In dieser Abbildung ist das Prinzip für die Drahtelektrode gezeigt. Es werden Drähte gespannt, die auf einem negativeren Potenzial als das der Tankwand gehalten werden. Dies führt zu einer Ablenkung der Elektronen und verhindert ihr eindringen in den Flusschlauch [Hug08]

Abbildung 1.3 gezeigt. In der Nähe der Tankwand werden Drähte gespannt, die gegenüber der Hülle auf einem leicht negativeren Potenzial liegen. Die Elektronen aus der Spekrometerhülle werden nach ihrer Emission durch das negativeren elektrische Feld abgelenkt und von der Tankwand reabsorbiert. Als Ursache für die Emission ist in der Abbildung die Wechselwirkung mit einem Myon der kosmischen Strahlung angeben. Aber es entstehen außerdem noch Elektronen aus radioaktiver Zerfälle die von Verunreinigungen im Edelstahl herrühren. Die Drahtelektrode kann als quasimasselos angesehen werden, sodass die Emission von Elektronen aus diesen Komponenten vernachlässigt werden kann.

Um den Innenraum des Spektrometers mit einer zweilagigen Drahtelektrode auszukleiden ist ein modulares System entwickelt worden. Es gibt unterschiedliche Typen von Modulen, je nachdem im welchen Teil des Spektrometers sie installiert werden. Ein Beispiel für ein Modul ist in Abbildung 1.4 gezeigt. Ein Modul besteht aus zwei sogenannten Kämmen, die über C-förmige Profilstangen miteinander verbunden sind. Im Gegensatz zu Abbildung 1.3 werden in den meisten Modulen zwei Drahtlagen aufgespannt, wobei jeweils ein Draht von einem Zahn zu dem gegenüberliegenden Zahn gespannt wird. Die zweite Lage wird durch Bohrungen an der Basis des Kamms aufgespannt. Die beiden Lagen sind durch Keramikhülsen elektrisch voneinander isoliert, wobei sich die Drahtlage an der Basis auf dem gleichen Potenzial befindet wie der Kamm selbst. Der geplante Potenzialunterschied zwischen den Drahtlagen liegt bei etwa $\Delta U = 100$ V. Die einzelnen Module sind in Ringsegmente angeordnet und zum Teil elektrisch miteinander verbunden.

Die Drahtelektrode ist jetzt der Länge nach aufgeteilt, sodass das Hauptspektrometer elektrisch in zwei Halbzylinder unterteilt ist. Die eine Hälfte der Elektrode ist von der anderen elektrisch isoliert. Dies wird für den sogenannten Dipolmodus benötigt. Dabei wird eine Hälfte der Drahtelektrode gegenüber der anderen um eine Spannung von $\Delta U_{Dipol} = 1000$ V verschoben. Mit dem Dipolmodus lassen sich die in Penningfallen gespeicherte Elektronen aus dem Flusschlauch durch eine $E \times B$ -Drift entfernen.

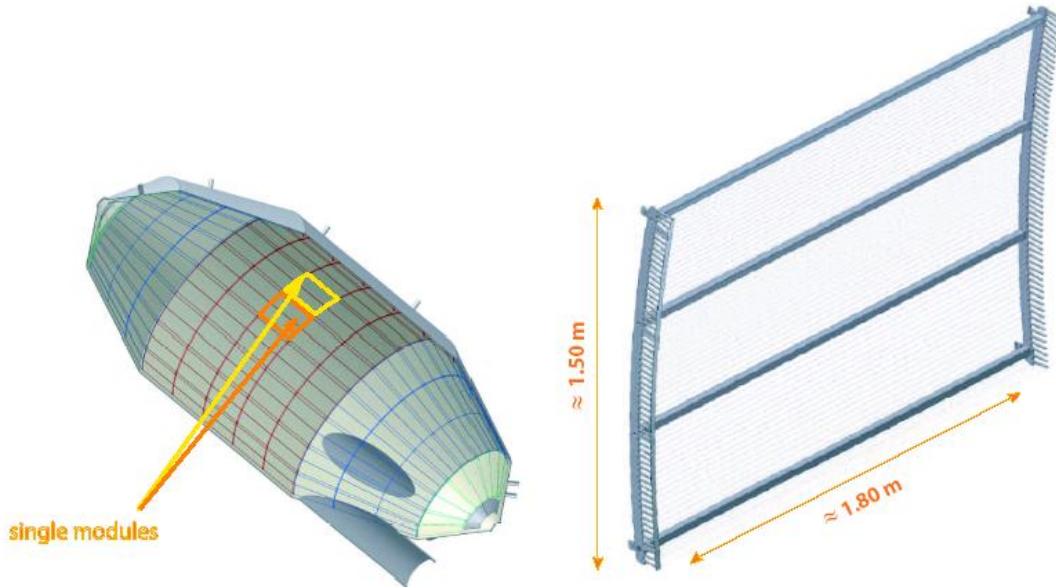


Abbildung 1.4.: **Die modulare Drahtelektrode** Diese Abbildung zeigt auf der linken Seite das Hauptspektrometer eingeteilt in verschiedene Ringe und Segmente. Auf der rechten Seite ist ein Beispiel für ein Modul der Drahtelektrode aus den zylindrischen Teil des Spektrometers.

Insgesamt ist die Drahtelektrode so konstruiert, dass pro Dipolhälfte 22 Spannungen angelegt werden müssen.

Hinzu kommt noch die Versorgung der Antipenningelektrode. Diese Elektrode ist zweimal vorhanden, einmal an der Detektorseite und einmal auf der Quellenseite. Sie dient dazu Penningfallen im Flussschlauch durch Formung eines Ausgleichsfeldes zu vermeiden. Dadurch wird die Speicherung von geladenen Teilchen in diesen Potenzialsenken vermieden.

Insgesamt müssen 46 verschiedenen Spannungen erzeugt werden.

Die Spannungsversorgung der einzelnen Segmente ist Teil dieser Arbeit und wird in den Kapiteln 5 und 6 im Detail behandelt.

1.5. Qualität der Hochspannungsüberwachung

Das Ziel des KATRIN-Experimentes ist eine Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/\text{c}^2$ in der Bestimmung der Neutrinomasse zu erreichen. Daraus ergeben sich Obergrenzen der systematischen und statistischen Unsicherheiten die es einzuhalten gilt. Diese teilen sich wie folgt auf:

$$\Delta m_{stat}^2 = 0,018 \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.5.1)$$

und daraus folgt für die systematischen Fehler:

$$\Delta m_{sys}^2 \leq 0,017 \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.5.2)$$

Aus dem KATRIN Design Report wird die Hochspannungsversorgung als eine der fünf Kernkomponenten der systematischen Fehler eingestuft. Daraus ergibt sich nun für jede Hauptkomponente eine maximale, zulässige systematische Unsicherheit von

$$\Delta m_{sys,U}^2 \leq 0,0075 \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.5.3)$$

Nach [Thu07] ist für die systematische Unsicherheit der Hochspannung hauptsächlich eine Fluktuation der Retardierungsspannung verantwortlich. Betrachtet man eine gaußförmige Fluktuation der Retardierungsenergie (die mit der Spannung verbunden ist) mit der Breite σ und dem Erwartungswert $\mu = 0$:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1.5.4)$$

Betrachtet man weiterhin ein vereinfachtes β -Spektrum

$$g(E) = \frac{d^2N}{dt dE} = a \cdot (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \quad (1.5.5)$$

und führt eine Tylorentwickelung mit der Annahme einer kleinen Neutrinomasse $m_{\nu_e} = 0$ durch

$$g(E) \approx a \cdot (E_0 - E)^2 - a \frac{1}{2} m_{\nu_e}^2 = a \cdot (E_0 - E)^2 \quad (1.5.6)$$

So lässt sich die Störung in das vereinfachte Spektrum durch eine Faltung integrieren:

$$f(x) \otimes g(E) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot g(E - x) dx = a \cdot (E_0 - E)^2 + a\sigma^2 \quad (1.5.7)$$

Nach einem Koeffizientenvergleich mit Gleichung 1.5.6 erhält man:

$$m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2 \Rightarrow \Delta m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2 \quad (1.5.8)$$

Aus der theoretischen Zählrate heraus lässt sich ein Vergleich ziehen zu einer simulierten Zählrate bei der eine Fluktuation der Hochspannung mit einbezogen wurde. Die exakte Rechnung ist unter anderem in [Thu07] zu finden. Als Ergebnis erhält man

$$\Delta m_{sys,U}^2 \leq 0,0075 \text{ eV}^2/\text{c}^4 \Rightarrow \sigma \leq 0,061 \text{ eV.} \quad (1.5.9)$$

bzw. für die Hochspannung

$$\Delta U \leq 61 \text{ mV} \quad (1.5.10)$$

Durch Gleichung 1.5.9 wird deutlich, dass eine geringfügige Fluktuation im elektrostatischen Feld zu einer Reduzierung der Neutrinomasse führt. Daher ist eine genaue Kontrolle des Feldes und damit der Hochspannung für das Experiment unerlässlich.

Die angelegte Hochspannung muss also im Bereich von weniger als 61 mV stabil über die gesamte Dauer des Experiments gemessen werden. Dies entspricht bei einer Retardierungsspannung $U_{ret} = 18,6 \text{ kV}$ einer Genauigkeit von 3,3 ppm über drei Jahre Messzeit.

1.6. Der erste KATRIN Hochspannungsteiler

Die Retardierungsspannung am Hauptspektrometer wird durch verschiedene Maßnahmen überwacht. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von atomaren Standards. Es werden Quellen entwickelt, die Elektronen aus Zerfallsprozessen mit scharf definierten Linien emittieren. Der Zerfall von ^{83m}Kr emittiert unter anderem Konversionselektronen mit einer Energie von 17,8 keV und 30 keV. Die Messung der Transmissionsfunktion erlaubt es eine Aussage über die Qualität der anliegenden Hochspannung zu machen.

Die zweite Möglichkeit liegt in der direkten Messung der angelegten Hochspannung.

Das Hauptproblem bei der direkten Messung der Hochspannung bis 35 kV ist, dass es kein Messgerät gibt, welches so hohe Spannungen in der Genauigkeit, wie sie für das KATRIN Experiment benötigt wird, messen kann. Daher wird ein Spannungsteiler verwendet, der die Hochspannung auf den Messbereich eines hochpräzisen Voltmeters herunter teilt. Für das KATRIN Experiment müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt werden, die sich aus den systematischen Unsicherheiten ergeben [Thu07]:

- Permanente Messung von Spannung von $U = 18,6\text{kV}$ mit einer Stabilität $\Delta U/U < 3,3\text{ ppm}$ über eine Messzeit von drei Jahren.
- Passende Teilverhältnisse um die angelegte Hochspannung in den 10 V- bzw. 20 V-Messbereich eines hochpräzisen, $8\frac{1}{2}$ -Stellen Voltmeters abzubilden.
- Geringe Temperaturabhängigkeit im sub-pmm/K-Bereich.
- Geschirmter Aufbau und galvanische Trennung für alle Steuer- und Statussignale.

Da es keine kommerzielle Lösung gibt, welche die Anforderungen erfüllt, wurde ein Hochspannungsteiler in Zusammenarbeit mit dem Gleichspannungslabor der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig entwickelt [Thu07].

Da dieser Spannungsteiler die Kernkomponente der Spannungsmessung darstellt, ist im Rahmen zweier Diplomarbeiten [Hoc08] und [Bau09] ein zweiter Spannungsteiler entwickelt und aufgebaut worden. Mit diesen beiden Spannungsteilern ist gewährleistet, dass auch bei einem Ausfall oder einer Wartung bzw. Kalibrierung eines Spannungsteiler der Messbetrieb nicht unterbrochen werden muss.

1.6.1. Aufbau eines Spannungsteilers

Ein Spannungsteiler besteht im wesentlichen aus zwei, in Reihe geschaltete Widerstände, wobei der Spannungsabfall über dem zweiten Widerstand gemessen wird (siehe Abbildung 1.5). Dieser Widerstand wird auch als Abgriffwiderstand bezeichnet.

Aus dem Spannungsabfall an den Widerständen lässt sich der so genannte Maßstabsfaktor definieren:

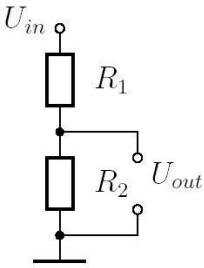


Abbildung 1.5.: **Grundprinzip eines Spannungsteilers.** Der einfachste Spannungsteiler lässt sich mit zwei in Reihe geschaltete Widerständen realisieren. Die Ausgangsspannung U_{out} wird über dem Widerstand R_2 gemessen. Man bezeichnet diesen auch als Abgriffwiderstand, wobei der Widerstand R_1 als Teilerwiderstand, bezeichnet wird.

$$\frac{1}{M} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.6.1)$$

Der KATRIN Hochspannungsteiler besteht nicht nur aus zwei Widerständen, sondern aus einem Netzwerk von zwei Teilerketten, die eine Vielzahl unterschiedlicher Widerstandstypen und Hochspannungskondensatoren umfasst. Im Folgenden wird der elektrische Aufbau erläutert.

1.6.2. Elektrisches und Mechanisches Design des KATRIN-Teilers

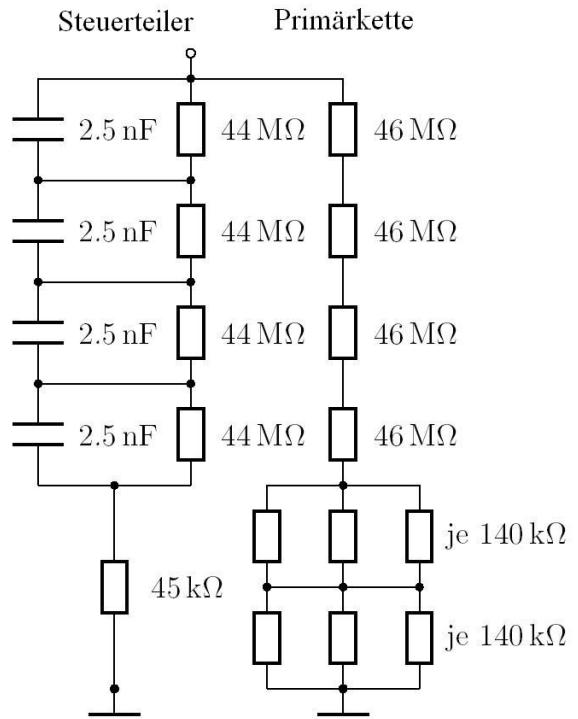
I

Die Primärkette im Spannungsteiler I besteht aus 100 Widerständen mit einem Widerstandswert von $1,84 \text{ M}\Omega$ pro Widerstand. Bei diesen Widerständen handelt es sich um Folienwiderstände der Firma Vishay, Typ VHA 518-11. Das Besondere an diesen Widerständen ist ihre geringe Temperaturabhängigkeit.

Im allgemeinen ist der Widerstandswert von der Temperatur abhängig. Die Temperaturabhängigkeit setzt sich aus zwei Hauptbeiträgen zusammen. Zum Einen wäre da die Joulscher Wärme die frei wird, sobald eine Spannung an dem Widerstand anliegt und zum Anderen ist der Widerstandswert von der Umgebungstemperatur abhängig. Als Kenngröße für die Änderung des Widerstandswertes in Abhängigkeit von seiner Temperatur dient der Temperaturkoeffizient des Widerstandes, kurz TCR (zu englisch „temperature coefficient of resistance“). Eine zweite Messgröße zur Bestimmung des Temperaturverhaltens ist der sogenannte Aufwärmabweichung. Dabei wird hauptsächlich die Widerstandsveränderung aufgrund von Joulscher Wärme betrachtet.

Die Widerstände der Firma Vishay weisen laut Datenblatt einen TCR von $\Delta R/R < 2 \text{ ppm/K}$ in einem Temperaturbereich von -50°C bis $+125^\circ\text{C}$ auf. An ihrem Arbeitspunkt um 25°C soll der TCR sogar $\Delta R/R < 0,2 \text{ ppm/K}$ betragen. Trotz dieses geringen Wertes addieren sich für 100, in Reihe geschaltete Widerstände die Werte der Aufwärmabweichung, sodass diese Gesamtaufwärmabweichung nicht mehr vernachlässigt werden kann. Jetzt ist es allerdings so, dass es Widerstände mit positiver und negativer Drift gibt. Dies entspricht einer Abnahme bzw. einem Anstieg des Widerstandswertes bei wechselnder Temperatur. Würde man zwei Widerstände mit gleichem Betrag aber unterschiedlichem Vorzeichen in der Drift in Reihe

Abbildung 1.6.: **Ersatzschaltbild des Katrin Hochspannungssteilers I.** Hier sind die beiden Teilerketten, zum Teil vereinfacht, dargestellt. Die Widerstände der primären Teilerkette sind für jede Ebene zusammengefasst. Jede Ebene besteht aus 25 Folienwiderständen mit je $1,84 \text{ M}\Omega$ was zu einem Gesamtwiderrstand pro Ebene von $46 \text{ M}\Omega$ führt. Die $140 \text{ k}\Omega$ Widerstände sind die Abgriffwiderstände und ergeben in dieser Kombination einen Abgriff mit einem Maßstabsfaktor von etwa 2000:1 bzw. 4000:1.



schalten, addieren sich die Driften zu Null. Aus diesem Grund wurden statt 100 Widerstände etwa 200 Stück bestellt und für jeden Widerstand die Aufwärmabweichung vermessen. Die Einzelheiten zu diesen Messungen sind in [Thu07] beschrieben und ebenso für den zweiten Spannungsteiler in [Hoc08] und [Bau09]. Mit den verwendeten Messmethoden war jedoch die Vermessung der Aufwärmabweichung besser durchführbar. Bei dem Verfahren war es möglich mehr als 12 Widerstände pro Tag zu untersuchen, während bei der Bestimmung des TCRs eine Messzeit von einem Tag pro Widerstand benötigt wurde. Um also in einem angemessenen Zeitrahmen alle Widerstände (über 200 Stück) mehrmals auszumessen sind nur die Aufwärmabweichung für alle Widerstände bestimmt worden.

So war es möglich Widerstände zu selektieren, die vom Betrag her das gleiche Driftverhalten aufweisen sich aber im Vorzeichen unterscheiden. Somit konnte die Aufwärmabweichung der ganzen Kette auf 0,0031 ppm errechnet werden. Allerdings betrug die Unsicherheit bei dieser Kalkulation 0,0157 ppm, sodass eine Abschätzung von 0,02 als Obergrenze vorgenommen wurde. Die Messungen zur Temperaturabhängigkeit an der PTB im Jahr 2005 zeigen einen Wert von -0,081(6) ppm/K für den 2000:1 Abgriff und einen Wert von 0,171(3) ppm/K für den 1:4000 Abgriff.

Die Stabilität eines Spannungsteilers wird verbessert, wenn sich die Widerstände der Teilerkette in einem homogenen elektrischen Feld befinden, dessen Potential den Spannungsabfall entspricht den sie verursachen. Ein solches Feld verhindert die Ausbildung von Kriechströmen und Entladungen. Um dieses elektrische Feld zu formen wurden Kupferelektroden hergestellt. Dabei handelt es sich um runde Platten mit einem Durchmesser von 460 mm (siehe Abbildung 1.7), dessen Form mit Computersimulationen optimiert wurde um ein möglichst homogenes Feld zwischen zwei Elektroden zu formen. Die einzelnen Platten sind durch Hochspannungswiderstände der Firma Caddock, Typ MX480 elektrisch miteinander verbunden.

Durch den Spannungsabfall wird eine Potenzialdifferenz erzeugt, die zur Formung des elektrischen Feldes führt. Die Widerstände haben einen Widerstandswert von jeweils $44\text{ M}\Omega$. Dies entspricht ungefähr dem Widerstands aller, in Reihe geschalteter, Widerstände in einer Ebene.

Zusätzlich zu den Hochspannungswiderständen sind auch Kondensatoren der Firma Vishay, Typ MKT 1816-225/117-2 mit einer Kapazität von $2,5\text{ nF}$ und einer Spannungsfestigkeit von 10 kV pro Stück eingesetzt worden. Sie sind elektrisch mit den Kupferelektroden verbunden und dienen dazu, die Spannungsschwankungen oder -spitzen abzumildern. Wird eine Hochspannung angelegt, sind die ersten Widerstände in der Teilerkette hohen Belastungen ausgesetzt. Die Kondensatoren sorgen dafür das nicht die volle Spannung beim Einschalten am ersten Widerstand anliegt. Sie dienen also dem Schutz der Primärkette vor Beschädigung.

Das Netzwerk aus Hochspannungswiderständen und -kondensatoren wird auch als Kontroll- und Steuerteiler bezeichnet.

Der mechanische Aufbau des KATRIN Hochspannungsteilers I besteht aus den Kupferelektroden, die durch 105 mm lange Stäbe aus Polyoxymethylen (POM) getragen werden und den gesamten Aufbau in vier Ebenen unterteilen.

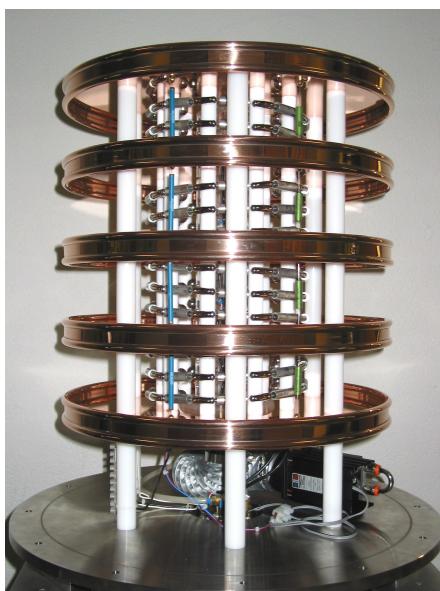


Abbildung 1.7.: **Aufbau des Spannungsteilers.** In dieser Abbildung ist der interne Aufbau des Spannungsteilers gezeigt. Die Kupferelektroden spannen die vier Ebenen auf in denen sich die Teilerketten befinden.

In diesen Ebenen verlaufen die Teilerketten, die den eigentlichen Spannungsabfall verursachen.

Die Widerstände der Primärketten verlaufen helixförmig zwischen den Kupferelektroden und werden von Stützen aus PTFE (Teflon) getragen. Der elektrische Kontakt und die Stabilisierung an den Stützen wird durch vernickelte T-förmige Messingteile realisiert, die sich über eine Gegenmutter an dem PTFE-Stab befestigen lassen. Mit jeder Ebene ändert sich die Laufrichtung der Widerstandskette um Induktion zwischen den Ebenen zu minimieren. Die Widerstände und Kondensatoren des Steuerteilers stehen senkrecht auf den Kupferelektroden und sind mit kleinen Messingbauteilen fixiert.

Die Abgriffwiderstände, über denen die Ausgangsspannungen abgegriffen werden, sind in einer kleinen Plastikbox auf der Grundplatte untergebracht. Der ganze Aufbau ist in einem Edelstahlbehälter unter Stickstoffatmosphäre gehalten. Es gibt eine aktive Temperaturstreuereung bei dem das Innere des Edelstahltankes auf 25°C gehalten wird. Die Temperaturstabilisierung soll auf 0,1 K genau arbeiten.



Abbildung 1.8.: **Peripherie des Spannungsteilers.** In dieser Abbildung sind die Komponenten der Peripherie zu sehen.

Zur Stabilisierung der Temperatur werden Heizwiderstände und ein Peltierelement verwendet. Diese heizen bzw. kühlen den Inhalt eines Wasserreservoirs. Das temperierte Wasser gelangt über eine Schlauchstrecke in das Innere des Edelstahltankes. Dort wird über einen Wärmetauscher das N₂-Gas im Kessel erwärmt oder abgekühlt. Ein Lüfter sorgt für den nötigen Luftstrom der durch ein Verteilerrohr gleichmäßig auf alle Ebenen verteilt wird. Die notwendige Heiz- oder Kühlleistung wird von einem WEST-PID Regler, Typ 4100 ermittelt, der einen Temperatursensor im Inneren des Kessels ausliest und somit auf Temperaturschwankungen reagieren kann. Die Notwendigkeit einer aktiven Temperaturregelung liegt in der Abhängigkeit des Widerstandswertes von der Außentemperatur begründet und dem Arbeitspunkt der Vishay Widerstände die bei 25°C ihre kleinste Temperaturabhängigkeit aufweisen. Außerdem ist eine konstante Temperatur von Vorteil um Thermospannungen, die beim Kontakt unterschiedlicher Materialien entstehen, zu reduzieren.

Die Messleitungen für die Abgriffe und die Sensoren sowie die Zuführungen des Wasserkreislaufes sind in einem Flansch mit einem Durchmesser von 100 mm untergebracht. In einem

zweiten Flansch an der Unterseite ist ein Überdruckventil eingebaut um im Kessel einen Druck von etwa 70 mbar zu erzeugen. Die Gaszuführung ist an der Oberseite des Kessels montiert. Der Grund für die Verwendung einer Stickstoffatmosphäre wird in den Kapiteln 2.2.2 und 2.3 verdeutlicht.

In der Peripherie befinden sich die übrigen Komponenten der Temperatursteuerung, wie die Heizwiderstände und das Peltierelement mit den zugehörigen Versorgungsnetzteile sowie die Pumpe und das Wasserreservoir. Außerdem sind der Compact Fieldpoint mit den Messkarten und der West-PID Regler, Typ 4100 eingebaut, sowie zwei Netzteile für die Versorgung der elektronischen Komponenten mit 12 V und 24 V Gleichspannung.

Der Compact Fieldpoint, Typ CFP 2020 der Firma National Instruments, dient der Auslese der Sensoren und der Abspeicherung der Messwerte. Das System enthält eine Messkarte zur Auslese von Temperatursensoren (Typ RTD 124) sowie eine Analog Eingangskarte (AI 110) um Spannungen vom Kontrollteiler einzulesen. Außerdem gibt es eine Relaiskarte (Typ RLY 421) zur Steuerung von Lüfter und Pumpe. Die Messdaten werden auf einer 2 GB Compact Flash Speicherplatine gespeichert und können auch über ein Netzwerkinterface ausgelesen werden. Um den Teiler galvanisch vom Netzwerk trennen zu können, wird ein optischer Umsetzer, ein Moxa Mediaconverter (Typ IMC-101-M-SC), verwendet. In Abbildung 1.8 ist der gesamte Aufbau dargestellt.

1.7. Inhalt der folgenden Kapitel

Diese Arbeit gliedert sich in zwei große Teilbereiche. Sie befasst sich zum Einen mit Hochspannungserzeugung und -verteilung und zum Anderen mit der Hochspannungsüberwachung.

Der ersten Teil dieser Arbeit befasst sich mit den Wartungsarbeiten, die am Präzisionshochspannungsteiler I des KATRIN Experiments durchgeführt wurden. Seit der Spannungsteiler I im Messbetrieb verwendet wurde sind einige Aspekte aufgetreten, die verbessert werden mussten, bevor der Teiler für den Messbetrieb am KATRIN-Experiment einzusetzen ist. Im Folgenden wird dann noch die Kalibrierung des Spannungsteilers an der PTB und die Niederspannungskalibrationen im Institut für Kernphysik in Münster beschrieben. Zum Abschluss wird noch eine Messung mit dem Spannungsteiler II am Collaps-Experiment am CERN vorgestellt.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Erzeugung und der Zuführung von Hochspannung zu den einzelnen Segmenten der Drahtelektrode. Dabei wird die Planung und der Aufbau eines Schaltschrankes dargestellt, indem alle Komponenten, die zur Erzeugung und Verteilung der Hochspannung zu der Drahtelektroden benötigt werden, enthalten sind. Außerdem soll ein Mess- und Steuerungssystem aufgebaut werden, das die Fernkontrolle der Geräte über ein Netzwerkinterface erlaubt.

- Kapitel 2 - Wartung und Modifikation des KATRIN Spannungsteilers 1
In diesem Kapitel werden im Detail alle Arbeiten erläutert die am KATRIN-Spannungs-

teiler I durchgeführt wurden. Es soll dabei jeweils eine Motivation für die einzelnen Arbeiten gegeben, sowie deren Folgen diskutiert werden.

- Kapitel 3 - Kalibrierung des KATRIN Hochspannungsteilers I

Dieses Kapitel beschreibt die Kalibrierung des Spannungsteilers nach den Modifikationen. Es werden die Kalibrierungsphasen von 2009 an der PTB erläutert und mit den Ergebnissen der Niederspannungskalibrierung, die in Münster durchgeführt wurde, verglichen.

- Kapitel 4 - Einsatz des KATRIN Hochspannungsteilers II am CERN

In diesem Kapitel wird die Kalibrierung von Hochspannungsquellen an der ISOLDE-Anlage am CERN beschreiben. Der Ablauf dieser Messungen und die vorläufigen Ergebnisse werden hier präsentiert für

- Kapitel 5 - Hochspannungsversorgung der Drahtelektrode

Hier beginnt der zweite Teil der Arbeit in dem es um der Versorgung der Drahtelektrode mit Hochspannung geht. Es wird das Konzept vorgestellt sowie die einzelnen Komponenten detailliert erläutert.

- Kapitel 6 - Testmessungen am Hochspannungsschrank

In diesem Kapitel werden die Testmessungen an der Komponenten der Messelektronik beschreiben. Dazu zählen die Bestimmung der Stabilität und der Temperaturabhängigkeit der verwendeten Geräte.

- Kapitel 7 - Zusammenfassung und Ausblick

Zum Abschluss werden die durchgeführten Arbeiten und die Ergebnisse nochmal zusammengefasst. Außerdem wird aufgezeigt welche Notwendigen Schritte sich aus diesen Ergebnissen ergeben.

2. Wartung und Verbesserung des KATRIN Hochspannungsteilers I

Nach der Montage und den Kalibrierungen an der PTB ist der Spannungsteiler bei Messungen am Spektrometer in Mainz und zur Kalibration von Hochspannungsquellen am Betina-Experiment am CERN verwendet worden [Hoc08]. Die Benutzung und die Transporte führten zum einen zu Abnutzungerscheinungen und Beschädigungen und zum Anderen gab es zahlreiche Ideen für Verbesserungen. Deshalb wurden eine Reihe von Wartungs- und Umbauarbeiten beschlossen, die vom Mai bis Juni 2009 im Institut für Kernphysik in Münster durchgeführt wurden. Die Arbeiten lassen sich in folgende Punkte untergliedern:

- Veränderungen außerhalb des Kessels
 - Neuer Transportrahmen
 - Verbesserungen am Wasserkreislauf
 - Neuverkabelung
- Veränderungen innerhalb des Kessels
 - Modifikation der Temperaturregulierung
 - Veränderung der inneren Sensoren
 - Neue Hochspannungszuführung
 - Einbau eines neuen Niederspannungsabgriffes mit einem Teilverhältnis von 100:1

Die Gesamtheit der Veränderungen werden im Folgenden detailliert dargestellt.

2.1. Veränderungen außerhalb des Kessels

Dieser Abschnitt befasst sich mit allen Veränderungen die am äußeren Aufbau des Spannungsteilers durchgeführt wurden. Diese dienen in erster Linie dazu die Handhabung zu Verbessern um einen reibunglosen Einsatz am KATRIN-Experiment zu gewährleisten. Die elektrischen Eigenschaften des Hochspannungsteilers sollten dabei nicht beeinträchtigt werden.

2.1.1. Der Transportrahmen

Im ursprünglichen Aufbau war der Kessel auf ein fahrbares 19-Zoll Rack aufgeschraubt, so dass es im Labor komfortabel zu bewegen war. In diesem Rack waren alle peripheren Geräte untergebracht. Dazu gehören der Compact Fieldpoint, der West PID-Regler, die Netzteile für die Temperatursteuerung sowie die Versorgungsnetzteile für sämtlich elektronischen Komponenten. Die übrigen Bauteile für der Temperatursteuerung sind auf einer Platte als Rückwand des Racks montiert worden. Aufgrund des Durchmessers von dem Kessel, stand immer ein kleines Stück davon über den Rand des 19-Zoll Racks über. Dies führte beim Transport des Spannungsteilers mit einem LKW zu Problemen, da der Spannungsteiler nicht ausreichend

gesichert werden konnte. Aus diesem Grund ist der gesamte Aufbau auf eine Palette mit einem Holzrahmen fixiert worden. So verblieb er dann bis zum Umbau 2009.



Abbildung 2.1.: **Spannungsteiler vor den Umbauarbeiten.** Hier ist der Aufbau des KATRIN Spannungsteiler vor den Modifikationen gezeigt. Der Holzrahmen und dar Unterbau wurden komplett entfernt und ein neues Gehäuse aufgebaut.

Die Holzkonstruktion machte den Transport zu anderen Standorten relativ sicher, aber der Umgang im Labor wurde erheblich erschwert, da die Rollen auf der Unterseite des Racks nicht mehr benutzt werden konnten. Die schlechte Mobilität ist ein Nachteil für den Einsatz am KATRIN-Experiment.

Im Zuge der Entwicklung des zweiten KATRIN Spannungsteilers wurde ein Aluminiumgestell entworfen, welches den gesamten Aufbau deutlich stabiler macht. Der neue Rahmen besteht aus einem Aluminiumprofil der Firma Kanya.

Der Aufbau erreicht eine Gesamthöhe von 1760 mm. Auf der Unterseite wurde Rollen montiert, sodass er problemlos bewegt werden kann.

Die rechteckige Grundform sorgt dafür, dass sich der Spannungsteiler in einem LKW sehr gut mit Spanngurten fixieren lässt. Gleichzeitig bleibt durch die Montage der Rollen auf der Unterseite die Mobilität des ersten Rahmens erhalten. Wie man in Abbildung 2.2 erkennt, ist der Kessel auf Plastikstützen montiert, die dann über zwei Aluminiumplatten mit dem Kanya-Rahmen verbunden sind. Die Plastikstützen und die Aluminiumplatten stammen noch vom ursprünglichen Aufbau und wurden übernommen, da sie einen idealen Übergang auf den neuen Rahmen gewährleisten. Die Plastikstützen dienen der elektrischen Isolierung

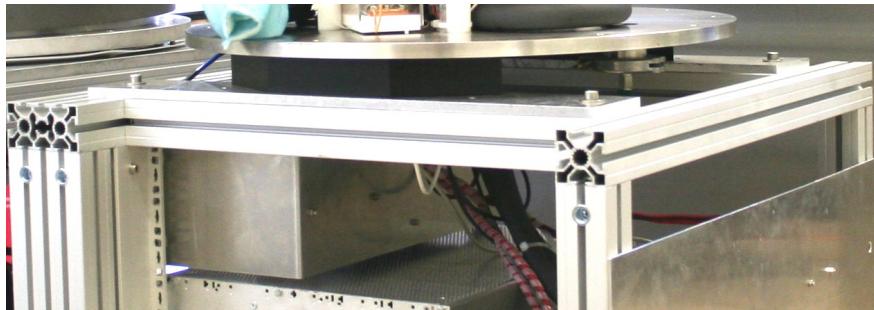


Abbildung 2.2.: **Übergang von der Grundplatte zum Aluminiumrahmen.** Hier ist der Übergang von der Grundplatte über die Plastikstützen auf das Aluminiumprofil deutlich zusehen. Die Aufnahme stammt aus der zweiten Bauphase, nachdem der Kessel belüftet wurde (vgl. Kapitel 2.2.3).

vom übrigen Rahmen. Dadurch soll die Einstrahlung von elektro-magnetischen Störungen minimiert werden. Im unteren Teil befinden sich die peripheren Geräte. Auch hierbei gab es einige Veränderungen die im Folgenden kurz beschrieben werden.

2.1.2. Veränderungen an der Peripherie

Die wesentlichen Änderungen in der Peripherie wurden an der Temperatursteuerung vorgenommen. Dabei ist das grundlegende Design, wie es in der Einleitung beschrieben wurde, erhalten geblieben.

Während der letzten Betriebszeit ist eines der Netzteile, welche die Heizwiderstände bzw. das Peltierelement versorgt, beschädigt worden. Bei diesen Netzteilen handelt es sich um linear geregelte Spannungsquellen mit einer Leistung von 160 W bei einer Maximalspannung von 32 V der Firma Elektro-Automatik, Typ „EA PS 3032-05“. Da im zweiten Spannungsteiler bereits das Nachfolgemodel („EA PS 3032-05 B“) verbaut wurde, ist entschieden worden im Teiler I ebenfalls diese modernen Geräte zu verwenden. Die neue Generation von Netzgeräten haben die gleichen Funktionen wie diejenigen der Vorgängergeneration. Der Vorteil ist, dass für beide Hochspannungsteiler zukünftig nur ein einziges Ersatzteil benötigt wird, während vorher zwei Ersatzteile benötigt wurden.

Eine wesentliche Veränderung liegt in der Umgestaltung des Wasserkreislaufes. Die vorige Positionierung an der Außenwand hatte den Vorteil, dass keine Wärme oder Kälte von den Heizwiderständen oder dem Peltierelement an die Grundplatte und den Abgriffanschluss geführt wird. Somit werden Temperaturschwankungen an dieser sensible Stelle vermieden. Außerdem ist die Wartung sehr einfach, da die Geräte leicht zugänglich sind.

Aber in diesem Vorteil steckt auch der große Nachteil, denn so leicht wie die Wartung ist, so einfach ist es auch die Komponenten zu beschädigen. Besonders die Steckverbindungen an den wasserführenden Leitungen sind besonders anfällig auf Zugkräfte, was die Gefahr der Bildung von Leckstellen erhöht. Ein zweiter Nachteil sind unnötig lange Schlauchleitungen zum Flansch um das Wasser durch den Wärmetauscher im Kessel zirkulieren zu lassen. Hinzu kommt, dass die Leitungen nicht thermisch isoliert sind, sodass ein Teil der Wärmemenge

über die Oberfläche der Zuleitung abgestrahlt wird und verloren geht.

Für den neuen Rahmen wurde schließlich eine neue Platte konstruiert, sodass die Komponenten der Temperatursteuerung nicht mehr nach Außen wegziegen. Die Schlauchstrecke wurde

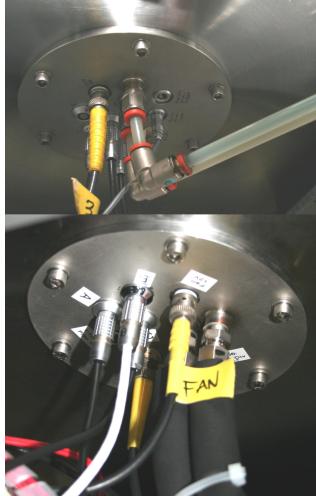


Abbildung 2.3.: **Veränderung am Wasserkreislauf.** Die obere Abbildung zeigt die Wasserführung in den Flansch wie sie vor der Modifikation aussah, die untere Abbildung zeigt die Veränderungen. Wie man hier sieht wurden die alten Steckverbindungen ausgetauscht und die Schlauchstrecke umgelegt. Außerdem wurde ein Isolierung aus Schaumstoff angebracht um die Wassertemperatur stabil zu halten.

erheblich verkürzt und zusätzlich mit einer Isolierung aus Armaflex versehen. Ganz wesentlich bei der Verbesserung des Wasserkreislaufes war der Austausch der alten Steckverbindungen zwischen den Schläuchen und den übrigen Komponenten. Die alten Verbindungen waren mit der Zeit teilweise Undicht geworden, nicht zuletzt durch die bereits erwähnten Zugbelastungen. Somit sind alle alten Verbindungen durch neue Schraubverbindungen ausgetauscht worden. Diese Verbinder sind von der Firma Swagelok genau für diese Art Wasserkreisläufe entwickelt worden, sodass an diesen Punkten die Gefahr von Leckstellen deutlich reduziert wurde.

2.2. Veränderungen im Tankinnenraum

Während die bisherigen Veränderungen am Aufbau in erster Linie dazu dienten kleinere Probleme zu beheben und den Spannungsteiler für den Einsatz am KATRIN Experiment Bedienungsfreundlicher zu gestalten, sind allerdings noch weitere Modifikationen beschlossen worden, für die es nötig wurde Arbeiten im Inneren des Tankes durchzuführen.

Alle Arbeiten an der Peripherie sollten die elektrischen Eigenschaften der Teilerketten nicht beeinflussen. Bei den folgenden Modifikationen werden die hochspannungsführenden Komponenten massiv verändert, wobei die Gefahr besteht die bisherige Kalibrierungsgeschichte zu verlieren.

2.2.1. Der Lüfter

Wie schon beschrieben, wird im Tankinnern ein Lüfter verwendet um die im Wärmetauscher temperierte Luft durch ein Tunnelrohr zu blasen und sie so gleichmäßig auf alle Ebenen

zu verteilen. Dazu wurde ein 24 V Lüfter der Firma WALLAIR (Typ 20.100.308) mit einem Durchmesser von 60 mm und einem Luftdurchsatz von $39,1 \text{ m}^3/\text{h}$ verwendet. Bereits im Jahr 2006 versagte der Lüfter und musste ausgetauscht werden. Grundsätzlich besteht die Gefahr, dass bei einem durchgebrannten Schaltkreis kleinste Partikel in das Innere des Tankes emittiert werden. Diese Partikel legen sich dann auf die Oberflächen ab und verursachen Kriechströme.

Aus diesem Grund wurde ein neuer Lüfter der Firma EBM-Papst eingesetzt, Typ 8412NU, Versorgungsspannung 12 Vdc, dessen elektrischer Schaltkreis in einem speziellen Harz versiegelt wurde. Dadurch wird die Gefahr von Teilchenemission in das Tankinnere verhindert, selbst wenn der Schaltkreis durchbrennt.

Ein Problem dabei ist, dass der neue Lüfter mit 80 mm Durchmesser deutlich größer ist als der Vorige. In der ursprünglichen Konstruktion war der Lüfter vor dem Wärmetauscher montiert. Die Luft wurde dann vom Lüfter durch den Wärmetauscher geblasen und im Anschluss über einen Schlauch und ein trichterförmiges Adapterstück in das Tunnelrohr gelenkt. Beim Umbau konnte der Lüfter aufgrund seiner Größe nicht wieder vor den Wärmetauscher geschraubt werden. Allerdings passte er genau vor das trichterförmige Adapterstück, wo er schlussendlich auch befestigt wurde (Im ersten Design gab es zwei Lüfter, einer am Wärmetauscher und einer am Tunnelrohr. Der Letztere wurde im Zuge der Optimierung der Belüftung verworfen, daher passt der neue Lüfter perfekt an diese Stelle). Dies bedeutet jetzt, dass die Luft nicht durch den Wärmetauscher geblasen, sondern angesaugt wird. Allerdings ist die Förderleistung mit $79,1 \text{ m}^3/\text{h}$ etwa doppelt so groß.

2.2.2. Feuchtigkeitssensor und Temperatursensoren

Zur Temperatursteuerung werden Sensoren benötigt, um die Temperaturen im Kessel zu überwachen. Da die Kupferelektroden im Messbetrieb auf Hochspannung liegen kann man keinen geerdeten Sensor in die Nähe bringen ohne Überschläge von der Elektrode in den Sensor auszulösen. Deshalb befinden sich alle Temperatursensoren in der Nähe der Grundplatte. Bei den Temperatursensoren handelt es sich um PT100 (Im Grunde sind es Widerstände aus Platin mit einem Wert von 100Ω , die ihren Widerstandswert je nach Außentemperatur ändern. Durch Messung des Widerstandes hat man also ein Maß für die Temperatur). Der Sensor wird als Vierdrahtmessung ausgelesen und die Leitungen über einen vierpolige Buchse der Firma LEMO zu der Messkarte am Compact Fieldpoint geführt. Insgesamt werden vier Temperatursensoren an folgenden Orten ausgelesen:

1. Abgriffbox
2. Luftschauch
3. Wärmetauscher
4. Kanya-Rahmen (Außerhalb des Tanks)

Mit den ersten drei Sensoren werden die Gegebenheiten im Innern des Tankes aufgezeichnet, wobei auf den Sensor, der die Temperatur im Luftstrom bestimmt, geregelt wird. Der Sensor

wurde während der Umbauarbeiten dort eingebaut indem an dem trichterförmigen Adapterstück eine Bohrung gemacht und der Sensor mit Epoxidharz fixiert wurde. Der vierte Sensor befindet sich Außen am Rahmen und zeichnet die Umgebungstemperatur auf.

Neben der Temperatur ist die Feuchtigkeit eine ganz wesentliche Kenngröße. Mit steigender Luftfeuchtigkeit nimmt die Spannungsfestigkeit des Schutzgases ab und zusätzlich besteht die Gefahr, dass sich Kondensat auf die Widerstände niederschlägt und Kriechströme über die Oberfläche verursachen.

Um die Feuchtigkeit im Tank möglichst gering zu halten, wird der ganze Kessel mit trockenem Stickstoff für mehrere Stunden gespült und mit einem Überdruckventil ein leichter Überdruck von etwa 70 mbar erzeugt. Dadurch wird das Eindringen feuchter Luft von Außen verhindert.

Bisher gab es allerdings keine Möglichkeit zu überprüfen ob die Atmosphäre nach dem Spülen auch wirklich trocken ist, bzw. ob sie auch trocken bleibt.

Aus diesem Grund sollte ein Feuchtigkeitssensor eingebaut werden, um ein quantitatives Maß für die Qualität des Schutzgases zu erhalten. Außerdem ist es hilfreich um Leckstellen im Wasserkreislauf im Tankinneren nachzuweisen.

Der Einbau des Feuchtigkeitssensors gestaltete sich jedoch als schwierig. Bei dem Sensor handelt es sich um ein Honeywell HIH-4000-001. Der Feuchtigkeitssensor benötigt eine Eingangsspannung zwischen 4,0 Vdc und 5,8 Vdc und gibt je nach prozentualer Luftfeuchtigkeit eine Spannung bis 5 Vdc aus [Hon06].



Abbildung 2.4.: **Feuchtigkeitssensor.** Hier ist eine Abbildung des verwendeten Feuchtigkeitssensors mit den drei Anschlüssen zu sehen [Hon06].

Es gibt insgesamt drei Anschlüsse für Eingangs- und Ausgangsspannung sowie eine gemeinsame Erde. Es mussten also insgesamt drei Kontakte hergestellt werden. Leider stand an dem Abgriffflansch keine freie Bohrung mehr zur Verfügung. Darum musste eine Buchse für einen Temperatursensor umgebaut werden.

Der Sensor welcher am Wärmetauscher befestigt ist wurde durch Veränderung der Verkabelung von einer Vierpol- auf eine Zweipolmessung umgestellt. Dadurch wurden an der Vierpoligen Buchse zwei Anschlüsse frei, welche dann als Versorgungs- und Messleitung für den Feuchtigkeitssensor benutzt werden. Die Masse wird über das Gehäuse der Buchse übertragen und ist Identisch mit der des PT100. Im Anhang ist die Konfiguration der Buchse aufgezeichnet.

Diese Vorgehensweise macht die Temperaturmessung an dem Wärmetauscher zwar etwas weniger genau, allerdings muss an dieser Stelle die Genauigkeit nicht so hoch bewertet werden, da nicht auf diesen Sensor geregelt wird. Auf der anderen Seite hat man jetzt eine Kenngröße für Schwankungen der Feuchtigkeit innerhalb des Kessels.

Die Bereitstellung der 5 V-Versorgungsspannung erfolgt über eine Analog-Eingangs- und Ausgangskarte, Typ AIO-610 von national Instruments. Diese ersetzt die alte Analog-Eingangskarte Typ AI-110 die nur in der Lage ist Spannungen auszulesen aber nicht zu erzeugen.

2.2.3. Die Hochspannungszuführung

Viele Arbeiten konnten durchgeführt werden ohne den Kessel vollständig anzuheben. Er wurde mit einem Kran kurzzeitig angehoben, mit Führungsstangen stabilisiert und dann auf Platzhalter aus Aluminium abgestellt und fixiert. Der Platz war völlig ausreichend um die Arbeiten auf der Grundplatte zu verrichten. Schließlich sollte ein weiterer Abgriff installiert werden (siehe nachfolgendes Kapitel 2.3). Dafür war es nötig den kompletten Deckel abzunehmen.

Nachdem der Deckel abgehoben war, konnte man an der obersten Kupferelektrode deutliche Spuren von Überschlägen entdecken. Die bisherige Hochspannungszuführung war anscheinend nicht in der Lage einen sicheren Kontakt zwischen der Hochspannungsbuchse und der Kupferelektrode herzustellen.



Abbildung 2.5.: **Überschlagsspuren auf der obersten Kupferelektrode.** In diesem Bild erkennt man deutlich die Spuren aus Überschlägen von der Hochspannungszuführung auf die Kupferelektrode.

Das bisherige Konzept der Hochspannungszuführung sah wie folgt aus: Es wurde ein Stecker der Firma FUG für 35 kV zugelassener Maximalspannung verwendet um die Hochspannung von der Quelle über ein Hochspannungskabel zum Hochspannungsteiler zu führen. Die zu dem Stecker passende Buchse ist in den Kessel eingeschraubt worden. Der elektrische Kontakt zwischen der Hochspannungsbuchse und der obersten Kupferelektrode wurde über eine Bronzefeder hergestellt die auf die Buchse aufgeschraubt war. Ein halbkugelförmige Schale aus Plastik war zwischen Buchse und Feder montiert und sollte Überschläge von der Feder auf die Tankwand verhindern. Wird nun der Deckel aufgesetzt presst sich die Feder auf die Kupferelektrode und stellt den Kontakt her.

Der Hauptvorteil dieser Konstruktion liegt in der elastischen Verbindung zwischen Buchse und Elektrode. Gelegentliche Erschütterungen beim Transport sollte der Verbindung keinen Schaden zufügen.

Das Problem an dieser Stelle war nun, dass die Feder mit der Zeit ihre Elastizität verloren hat. Beim erstmaligen Öffnen um den beschädigten Lüfter auszutauschen (siehe oben) war die Feder möglicherweise schon soweit verformt, das ein vollständiger Kontakt, nach dem Aufsetzen des Kessels, nicht mehr möglich war.



Abbildung 2.6.: **Hochspannungszuführung der ersten Generation.** Hier ist das alte Konzept der Hochspannungszuführung gezeigt. Die Bronzefeder stellt den Kontakt zwischen der Hochspannungsbuchse und der Kupferelektrode her.

Die Hochspannungszuführung musste also komplett erneuert werden. Für die neue Hochspannungszuführung wird das gleiche Prinzip verwendet wie es beim KATRIN Hochspannungsteiler II zum Einsatz kommt [Hoc08].



Abbildung 2.7.: **Hochspannungszuführung der zweiten Generation.** Hier ist das neue Konzept der Hochspannungszuführung gezeigt. Die vergoldete Halbkugel wird über eine Spiralfeder mit der Hochspannungsbuchse verbunden. Das konische Gegenstück wird auf der Kupferelektrode montiert. Beim Aufsetzen des Deckels pressen beide Teile ineinander und stellen den Kontakt her.

Der Kontakt zwischen Buchse und Elektrode wird über eine Kugelförmige Spitze realisiert die in ein konisches Gegenstück passt, welches auf die oberste Elektrode aufgeschraubt ist. Die Halbkugel ist über eine Spiralfeder mit der HV-Buchse verbunden, wobei ein kleines Kupfergeflecht zwischen der Spitze der Buchse und der Kugellinnenseite eine gute elektrische Verbindung sicherstellt.

Für diese Modifikation war es notwendig die oberste Kupferelektrode zu entfernen und ein Loch hinein zu bohren. Dazu mussten die Teflonmuttern, welche die Elektrode fixieren, sowie die elektrischen Kontakte zwischen der Kupferelektrode und den Teilverketten gelöst werden. Die Elektrode ist dann in der mechanischen Werkstatt des IKP bearbeitet und im Anschluss mit Alkohol gereinigt worden.



Abbildung 2.8.: **Modifikation der obersten Kupferelektrode.** Diese Abbildung zeigt die oberste Kupferelektrode nachdem das konische Gegenstück für die neue HV-Zuführung montiert wurde.

Der Vorteil an diesem Konzept für die Hochspannungszuführung ist die hohe Elastizität aufgrund der Spiralfeder, weiterhin die große Kontaktfläche aufgrund der Kugelsymmetrie im Vergleich zu der vorher verwendeten Feder. Außerdem gibt es jetzt keine scharfen Kanten mehr, sodass die Gefahr von Überschlägen in diesem Hochspannungsbereich minimiert wird.

2.2.4. Der 100:1 Abgriff

Die Belüftung des Kessels und die eben beschriebenen Verbesserungen innerhalb des Kessels sind nur durchgeführt worden, weil beschlossen wurde den Spannungsteiler mit einem weiteren Abgriff auszurüsten, der einen Maßstabsfaktor von etwa 100:1 haben sollte.

Es stellt sich nun die Frage nach dem Grund für einen derartigen Abgriff. Für das KATRIN Experiment werden Spannung im Bereich von -18 kV bis -35 kV erwartet. Mit den beiden existierenden Abgriffen können diese Werte auf den 10 V-Messbereich eines hochpräzisen Fluke Digitavoltmeters abgebildet werden, der auch mit einer 10 V Gleichspannungsreferenz kalibriert werden kann (siehe Kapitel 3.2). Ein 100:1 Abgriff würde bei 35 kV angelegter Hochspannung eine Ausgangsspannung von 350 V liefern in einem Messbereich der nur bedingt kalibriert werden kann. Der neue Abgriff ist also für den Messbetrieb am KATRIN Experiment wenig hilfreich, jedoch ist er notwendig um eine Niederspannungskalibrierung durchführen zu können.

Die Niederspannungskalibrierung ist von wesentlicher Bedeutung für die Kontrolle der Stabilität des Spannungsteilers und wird im nachfolgenden Kapitel gesondert behandelt.

Der Einbau des neuen Abgriffs stellt einen massiven Eingriff in den elektrischen Aufbau des Spannungsteilers dar und ist mit der Gefahr verbunden die Kalibrierungsgeschichte der vorgegangenen Jahre zu verlieren. Es stellt sich nun die Frage wie ein derartiger Abgriff realisiert werden kann.

Im zweiten Spannungsteiler wurde der Abgriff bereits mit eingeplant und zusammen mit allen anderen Abgriffwiderständen in eine separate Ebene eingebaut. In Teiler I hingegen befinden sich die Abgriffwiderstände für die Maßstabsfaktoren in einer Plastikbox. Das macht eine Erweiterung schwierig. Die Abgriffwiderstände mitsamt ihren Kontaktierungen sollten so wenig wie möglich in Mitleidenschaft gezogen werden um die beiden Teilverhältnisse möglichst nicht zu verändern. Bereits geringfügige Veränderungen an den Widerstandswerten z.B. durch Veränderung einer Schraubverbindung können die Maßstabsfaktoren beeinflussen. Da jedoch die Primärkette aus genau 100 Widerständen zu je 1,84 MΩ besteht, kann man Einfach den Spannungsabfall über dem letzten Widerstand der Teilkette gegenüber der Erde messen und hat somit einen Maßstabsfaktor von 100:1. Dabei muss man natürlich noch die nachfolgenden Abgriffwiderstände mit einberechnen, sodass man folgenden Wert erhält:

$$\frac{1}{M_{100}} = \frac{2 \frac{140 \text{ k}\Omega}{3} + 1,84 \text{ M}\Omega}{2 \frac{140 \text{ k}\Omega}{3} + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{1,93 \text{ M}\Omega}{93 \text{ k}\Omega + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{95} \quad (2.2.1)$$

Aufgrund der Abgriffwiderstände ist der Maßstabsfaktor geringfügig kleiner und erreicht einen Wert von 95:1. Trotzdem wird im Folgenden weiterhin von einem 100:1 Abgriff gesprochen.

Als nächstes geht es an die mechanische Umsetzung. Es ist notwendig eine Messleitung zwischen dem letzten und dem vorletzten Widerstand der primären Teilerkette anzubringen und diese dann auf eine Buchse im Abgriffflansch zu führen. Nun sind die Widerstände mit vernickelten, T-förmigen Messingteilen an die PTFE Stützen befestigt. Um hier eine Messleitung zu legen, wurde dieses Teil gegen ein ähnliches Bauteil ausgetauscht, das an der Unterseite eine zusätzliche Bohrung aufweist, in die das Messkabel eingeführt und von vorne mit einer Madenschraube fixiert wird (siehe Abbildung 2.9).

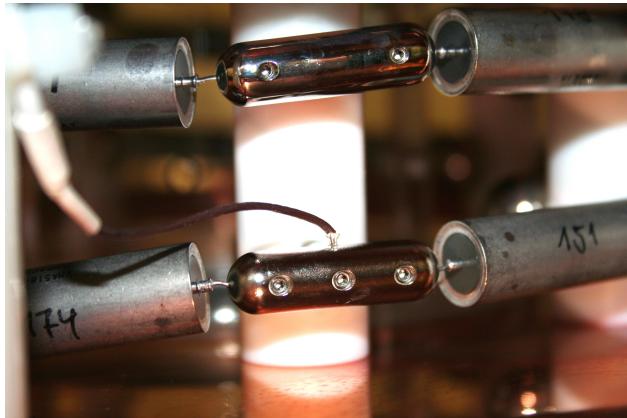


Abbildung 2.9.: **Realisierung des 1:100 Abgriffes.** In dieser Abbildung ist der das neue T-förmige Verbindungsstück zu sehen, das im Vergleich zu dem vorigen Bauteil eine zusätzliche Bohrung aufweist, wo die Messleitung angeschlossen wurde.

Bei dem Kabel handelt es sich um ein geschirmtes Teflonkabel. Der Schirm wurde mit Schrumpfschlauch isoliert, da er auf Erdpotenzial liegt und die oberste Kupferelektrode aufgrund des Steuerteilers auf einer höheren Spannung liegt.

Im vorigen Kapitel wurde erwähnt, dass keine freie Buchse mehr für den Einbau des Feuchtigkeitssensors zur Verfügung stand. Nun ist es so, dass im ursprünglichen Aufbau vier Temperatursensoren innerhalb des Kessels ausgelesen wurden. Einer davon wurde stillgelegt um hier die Buchse für den neuen 100:1 Abgriff einzubauen. Bleibt jedoch zu beachten, dass die verwendeten Vierpolbuchsen im Radius erheblich größer sind als diejenigen, die bei den beiden anderen Abgriffen verwendet wurden. Daher wird in dieser Stelle eine Zweipolbuchse eingesetzt dessen Radius entsprechend größer ist. Bei diesen Buchsen handelt es sich um die gleichen, wie sie auch im KATRIN Teiler II für die Abgriffe verwendet werden.

Bei der Umsetzung stellte sich jedoch schnell ein Problem ein. Wie schon in der Einleitung dargestellt wurde, ist der Widerstandswert von der Temperatur abhängig. Für einen stabilen 100:1 Abgriff ist es jedoch notwendig einen Abgriffwiderstand zu verwenden, der einen möglichst kleinen TCR besitzt. Im Zuge der Kompensation ist jedoch der letzte Widerstand in seiner Temperaturabhängigkeit nicht klein genug.

Der Widerstand mit der laufenden Nummer 174 hat eine Aufwärmabweichung von 3,632 ppm. Es war nicht möglich einen stabilen 100:1 Abgriff mit diesem Widerstand aufzubauen. Es wurde also beschlossen diverse Widerstände zu tauschen, um auf der einen Seite beim letzten Widerstand einen möglichst kleinen TCR zu erhalten und zum Anderen die Kompensation

der positiven und negativen Driften zu erhalten. Es wurden insgesamt fünf Widerstände getauscht, sodass der letzte Widerstand mit der laufenden Nummer 163 eine Aufwärmabweichung von 0,1261 ppm aufweist. Die komplette Anordnung der Widerstände ist im Anhang zu finden. Die gewechselten Widerstände sind hervorgehoben und die vorige Widerstandsnummer steht in Klammern dahinter.

Dabei ist zu beachten, das die Kompensation der gesamten Kette stets erhalten bleibt, da keine neuen Widerstände eingebaut wurden. Worauf es ankam war die lokale Kompensation zu erhalten. Dies ist wichtig um lokale Driften, die aufgrund von Inhomogenitäten in der Temperaturverteilung im Kessel entstehen könnten, zu vermeiden.

Für die Anwendung muss also später bedacht werden, dass es für den KATRIN Spannungsteiler I Abgriffkabel mit zwei verschiedenartigen Buchsen gibt. Der Vorteil hierbei ist, das bei angelegter Hochspannung die Gefahr versehentlich einen falschen Abgriff zu verwenden minimiert wird.



Abbildung 2.10.: **Der KATRIN Hochspannungsteiler nach den Modifikationen.** Gezeigt ist der KATRIN Spannungsteiler nach den Umbauten. Der Aluminiumrahmen macht ihn stabil und gleichzeitig mobil. Im unteren teil sieht man den WEST PID regler sowie die Netzteile zum heizen und Kühlen und den Compact Fieldpoint mit den Messkarten.

2.3. Vorbereitung für Testmessung und letzte Modifikationen

Nachdem die Wartungs- und Umbauarbeiten am Spannungsteiler abgeschlossen waren, wurde der Kessel wieder verschlossen und die Trocknungsphase mit Stickstoff begonnen.

An der Oberseite des Kessels befindet sich der Stickstoffeinlass. Bei allen Trocknungsphasen wurde ein Überdruck von etwa 100 mbar eingestellt, wobei das Überdruckventil sich öffnet und ein kontinuierlicher Austausch des Gases im Kessel durch eine trockene Stickstoffatmosphäre stattfindet. Die Abnahme der Feuchtigkeit kann mit dem installierten Sensor beobachtet werden. Während der ganzen Prozedur war die Temperatursteuerung aktiv um das Gasgemisch im Teiler umzuwälzen und damit eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen.

Es wurde gespült bis die relative Luftfeuchtigkeit sich auf einen Wert nahe Null eingependelt und nicht weiter fiel. Es stellt sich nun die Frage, ob sich die Feuchtigkeit im Innenraum des Kessels auf diesem niedrigen Wert bleibt. Das Spülen mit Stickstoff wurde unterbrochen und das Ventil verschlossen. Nachdem sich der Überdruck auf etwa 70 mbar abgebaut hatte, wurde die Entwicklung der Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von mehreren Tagen aufgezeichnet. Danach war zu sehen, dass die Luftfeuchtigkeit im Innern bis über 60% an-



Abbildung 2.11.: **Abdichtung der Leckstelle** In diesem Bild erkennt man die neue Senkung an der Bohrung sowie den Dichtring an der Verschraubung.

gestiegen war, bei einer Luftfeuchtigkeit im Labor von etwa 45%. Damit war klar, dass es im Inneren des Kessels eine Leckstelle gab. Um diese zu finden und abzudichten musste der Kessel ein zweites Mal geöffnet werden. Wie sich herausstellte gab es beim Einbau der neuen Swagelok-Verschraubung in den Wasserkreislauf Probleme, die erst zu diesem Zeitpunkt sichtbar wurden. In der ursprünglichen Konstruktion ist im Flansch von beiden Seiten jeweils eine Verbindung eingeschraubt worden. Dazwischen wurde ein O-Ring platziert der von zwei Seiten durch die Gewinde eingedrückt und somit die dichtende Wirkung erreicht wurde.

Bei den neuen Verschraubungen ist das Gewinde allerdings kürzer. Somit wird nicht genügend, bzw. überhaupt kein Druck auf den Dichtungsring ausgeübt. Die Verbindung wurde Undicht und Wasser trat aus.

Um das Problem gänzlich zu lösen musste der Flansch entfernt werden. Die einfachste Möglichkeit der Abdichtung bestand darin, eine Senkung in dem Flansch zu bohren und mit

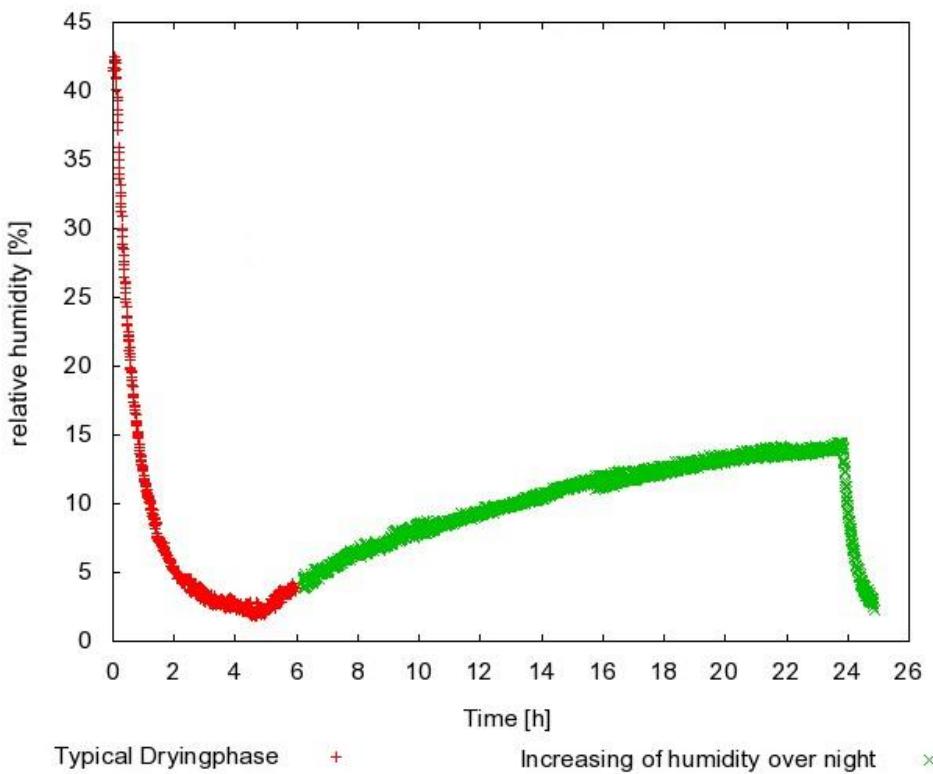


Abbildung 2.12.: **Trocknung des Spannungsteilers mit Stickstoff.** In diesem Diagramm ist die relative Luftfeuchtigkeit gegen die Zeit aufgetragen. Während der ersten sechs Stunden ist ein Abfall der Luftfeuchtigkeit bis auf einige wenige Prozent zu beobachten, aufgrund der Spülung mit Stickstoff. Nach Beendigung der Spülung steigt die Luftfeuchtigkeit leicht an, bis zur nächsten Spülung nach etwa 24 Stunden. Diese Abbildung wurde aus zwei Messungen zusammengesetzt, die unmittelbar nacheinander durchgeführt wurden (Rote und grüne Datenpunkte).

einem O-Ring zwischen Senkung und Verschraubung die Leckstellen zu verschließen. (siehe Abbildung 2.11)

Die Gesamtheit aller Veränderungen an der Widerstandskette und den Abgriffen hat einige Konsequenzen zur Folge, wie in den nachfolgenden Kapiteln noch zu sehen sein wird.

Nachdem der Deckel wieder verschlossen wurde, ist eine weitere Spülung mit Stickstoff vorgenommen worden. Wie man in Diagramm 2.12 erkennt, sinkt der Wert über eine Spültdauer von etwa 6 Stunden auf etwa 1 % ab. Nach dem Abstellen des Gasflusses steigt der Wert langsam wieder an (grüne Datenpunkte). Dabei bleibt er stets unter der gemessenen Luftfeuchtigkeit der Umgebung von etwa 40 %. Diese Tatsache und die Geschwindigkeit des Anstiegs legen nahe, dass es sich nicht um Leckstellen handelt, sondern um Feuchtigkeit die sich auf sämtlichen Oberflächen innerhalb des Kessels befindet und langsam an die Atmosphäre abgegeben wird. Mit dem neuen Feuchtigkeitssensor lässt sich diese Entwicklung überwachen und bei zu hoher Luftfeuchtigkeit sollten weitere Spülungen mit Stickstoff erfolgen. Dies

wird solange nötig sein, bis sämtliche Oberflächen trocken sind. Feuchtigkeiten unter 20 % sollten aber kein Problem darstellen.

Im Anschluss wurden Hochspannungstests durchgeführt um zu prüfen ob der Hochspannungsteiler I auch nach den Modifikationen zufriedenstellend arbeitet. Es wurde Hochspannungen bis 35 kV von positiver und negativer Polarität angelegt, um die Spannungsfestigkeit zu prüfen. Mit einem Handmultimeter wurden die Abgriffe überwacht um zu überprüfen ob die Teilverhältnisse annähernd korrekt waren. Nachdem diese Tests erfolgreich verliefen sollte der Hochspannungsteiler an der PTB kalibriert werden.

3. Kalibrierung des KATRIN Hochspannungsteilers I

3.1. Kalibrierungsgeschichte des KATRIN Hochspannungsteilers I

Nach der Montage des Spannungsteilers im Jahr 2005 ist dieser zweimal an der PTB mit dem dort entwickelten Präzisions-Hochspannungsteiler, dem MT-100 kalibriert worden. Der MT-100 gilt als der stabilste Hochspannungsteiler bis 100 kV weltweit und dient als Referenzteiler, um an ihm die Maßstabsfaktoren der beiden KATRIN Spannungsteiler mittels einer wechselseitigen Kalibrierung zu bestimmen. Die Hochspannungsteiler für das KATRIN Experiment wurden nach dem Vorbild des MT-100 entwickelt. Mit der zweimaligen Bestimmung der Maßstabsfaktoren im Abstand von etwa einem Jahr konnte eine Langzeitdrift des ersten Teilers gezeigt werden. Außerdem wurden die Stabilität sowie die Temperatur- und Spannungsabhängigkeit bestimmt.

Parameter	1972:1-Abgriff	3944:1-Abgriff
Kalibrierung 2005	1972,4645(11) : 1	3944,9305(21) : 1
Kalibrierung 2006	1972,48016(61) : 1	3944,9597(14) : 1
Temperaturabhängigkeit	-0,081(6) ppm/K	-0,171(73) ppm/K
Temperaturschwankung		<0,1 K
Spannungsabhängigkeit (bei -18 kV)	0,030(2) ppm/kV	0,028(2) ppm/kV
Spannungsbereich		8 kV bis 32 kV
Aufwärmabweichung		1 ppm
Aufwärmzeit (ppm)		0,7 min
Langzeitstabilität	0,6 ppm/Monat	0,56 ppm/Monat

Tabelle 3.1.: **Kalibrierungsergebnisse des ersten Spannungsteilers an der PTB.** Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse des ersten KATRIN-Spannungsteilers. Die angegebene Langzeitstabilität wurde aus den ermittelten Maßstabsfaktoren der beiden Kalibrierungsphasen von 2005 und 2006 bestimmt [Thu09].

In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse aufgezeigt. Wie man erkennt, driftet der Teiler etwa 0,6 ppm/Monat und hat eine Temperaturabhängigkeit von 0,081 ppm/K bei einer internen Stabilisierung von <0,1 K. Die Einzelheiten zu den Kalibrierungsmessungen sind in [Thu07] zu finden.

Im Folgenden werden kurz die Techniken zur Kalibrierung eines Hochspannungsteilers erläutert. Außerdem werden die Ergebnisse der beiden Kalibrierungsphasen von 2009 an der PTB sowie die Niederspannungskalibrierungen im Hochspannungslabor des IKP in Münster präsentiert. Mit diesen Ergebnissen lässt sich abschätzen ob die vorgenommenen Veränderungen das elektrische Verhalten des Teilers verändert haben und ob die bisherige Kalibrierungsgeschichte fortgesetzt werden kann.

3.2. Kalibrierung eines Hochspannungsteilers

Für eine exakte Bestimmung der Eingangsspannung an einem Spannungsteiler ist es notwendig den Maßstabsfaktor, die Eigenschaften und die Stabilität des Teilers genau zu kennen.

Was den Maßstabsfaktor angeht ist es neben seinen genauen Wert auch wichtig sowohl die Temperatur- als auch die Spannungsabhängigkeit zu kennen. Zur Stabilität des Teilers gehören auf der einen Seite die Reproduzierbarkeit und die Unsicherheiten die bei einzelnen Messungen auftreten, aber auch das Langzeitverhalten, wie zum Beispiel die oben erwähnte Langzeitdrift.

Um die Charakteristika eines Spannungsteilers zu ermitteln gibt es verschiedene Verfahren:

- Direkte Kalibrierung mit einem Referenzteiler
- Wechselseitige Kalibrierung
- Niederspannungskalibrierung mit einem 1 kV-Referenzteiler

Bei der direkten Kalibrierung wird eine Spannung von einer sehr gut bekannten Quelle an den Teiler angelegt und aus der Ausgangsspannung der Maßstabsfaktor errechnet. Bei einer hohen Präzision wie sie beim KATRIN Experiment erforderlich ist, wird die angelegte Hochspannung mit einem zweiten Referenzteiler überwacht, der im gleichen Spannungsbereich arbeitet. Die Kalibrierung ist also Abhängig von der Güte der Spannungsquelle bzw. der Genauigkeit des Referenzteilers.

Bei einer wechselseitigen Kalibrierung können die Maßstabsfaktoren des zu kalibrierende Spannungsteiler (z.B. der KATRIN Teiler I) mit einem Normalteiler mit ausreichender Spannungsfestigkeit und Kenntnis der Maßstabsfaktoren auf etwa 1 ppm (z.B. der MT100) bestimmt werden.

Bei diesen beiden Verfahren ist ein zweiter Spannungsteiler mit ähnlichen Eigenschaften wie der zu kalibrierende Teiler von Vorteil bzw. für die wechselseitige Kalibrierung sogar notwendig.

Bei der Niederspannungskalibrierung werden lediglich eine hochpräzise Spannungsquelle, ein hochpräzises Voltmeter und einen kommerziell erhältlichen Referenzteiler für Spannungen bis zu 1 kV verwendet, sodass ein hochpräziser Referenzteiler bis 35 kV nicht benötigt wird.

Eine genaue Beschreibung der Verfahren sowie die Betrachtung der systematischen Fehler ist in [Bau09] zu finden. In Abschnitt 3.3.2 ist eine kurze Beschreibung der Niederspannungskalibrierung und deren Durchführung zu finden.

Das Problem der Kalibrierung eines hochpräzisen Spannungsteilers bis 35 kV ist in der Regel das Vorhandensein eines geeigneten Referenzteilers. Zur Kalibrierung des Spannungsteilers für das KATRIN Experiment gibt es nur den MT-100, der eine korrekte Kalibrierung ermöglicht. Nun ist eine Messphase an der PTB immer mit hohem Aufwand und Kosten verbunden, sodass man nicht einmal im Monat den Spannungsteiler überprüfen lassen kann. Mit der Konstruktion des zweiten KATRIN Spannungsteilers steht künftig eine Möglichkeit zur Verfügung selbstständig Kalibrierungen bis 35 kV durchzuführen.

Es wäre allerdings von Vorteil wenn es die Möglichkeit gäbe ohne einen gleichwertigen Referenzteiler Kalibrierungen vorzunehmen. Diese Möglichkeit liegt in der Methode der Niederspannungskalibrierung. Dabei werden nur vergleichsweise niedrige Spannungen verwendet, die man relativ stabil erzeugen und mit einem Referenzteiler der nur 1 kV an Spannungsfestigkeit aufweist, sehr präzise vermessen kann. Diese Geräte stehen im Hochspannungslabor im Institut für Kernphysik der Universität Münster zur Verfügung, sodass die Möglichkeit besteht Niederspannungskalibrierungen nach dem Vorbild der PTB durchzuführen.

3.3. Kalibrierung des KATRIN Hochspannungsteilers I

In diesem Abschnitt werden die Kalibrierungen des Spannungsteiler im Hochspannungslabor des IKPs in Münster und am Referenzteiler an der PTB beschrieben. Im Anschluss werden die gewonnenen Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Es gab für beide Spannungsteiler eine Kalibrierungsphase an der PTB im Sommer 2009 und eine im Herbst 2009. Die Gründe für die zwei Phasen werden im folgenden erläutert ebenso wie die Resultate der beiden Aufenthalte.

3.3.1. Erste Kalibrierungsphase 2009 an der PTB

Nachdem die Wartungsarbeiten abgeschlossen waren und der zweite Teiler aufgebaut war, sollten beide Hochspannungsteiler zusammen an der PTB kalibriert werden. Es zeigte sich schnell, dass der Teiler II die geplante Spannungsfestigkeit von 65 kV nicht halten konnte und man entschied sich zunächst nur den Teiler I zu kalibrieren und den zweiten Teiler für den Betrieb mit 65 kV umzurüsten.

Aber auch mit dem Teiler I gab es ein Problem. Bei den Messungen zur Langzeitstabilität wurde eine Drift festgestellt die nicht geklärt werden konnte. In Diagramm 3.1 ist zu sehen, wie sich die gemessene Ausgangsspannung am Teiler I im Vergleich zum Mittelwert um mehr als 1 ppm ändert. Dabei bleiben die Temperaturen im Teiler (gemessen an der Abgriffbox) und im Labor annähernd konstant.

Diese Drift wurde in mehreren Messungen nachgewiesen wobei sich der genau Zeitpunkt und die Ausprägung der Drift nicht reproduzieren ließen.

Eine derartige Drift ist für das KATRIN-Experiment von großem Nachteil da keine präzise Spannungsmessungen möglich ist. Die Klärung dieses Effektes ist von enormer Wichtigkeit für das KATRIN Experiment. Allerdings war es zu jenem Zeitpunkt nicht möglich die Ursache einzugrenzen. Entweder gab es ein Problem mit dem Referenzteiler und der Messelektronik an der PTB oder der Fehler war im KATRIN Teiler I zu finden. Daraufhin wurde beschlossen den Teiler I nach Münster zurückzubringen um zusätzliche Messungen durchzuführen. Nach der Fertigstellung des Teilers II sollten dann beide Teiler zur PTB gebracht werden um eine endgültige Kalibrierung durchzuführen und die Ursache für die Drift zu ermitteln.

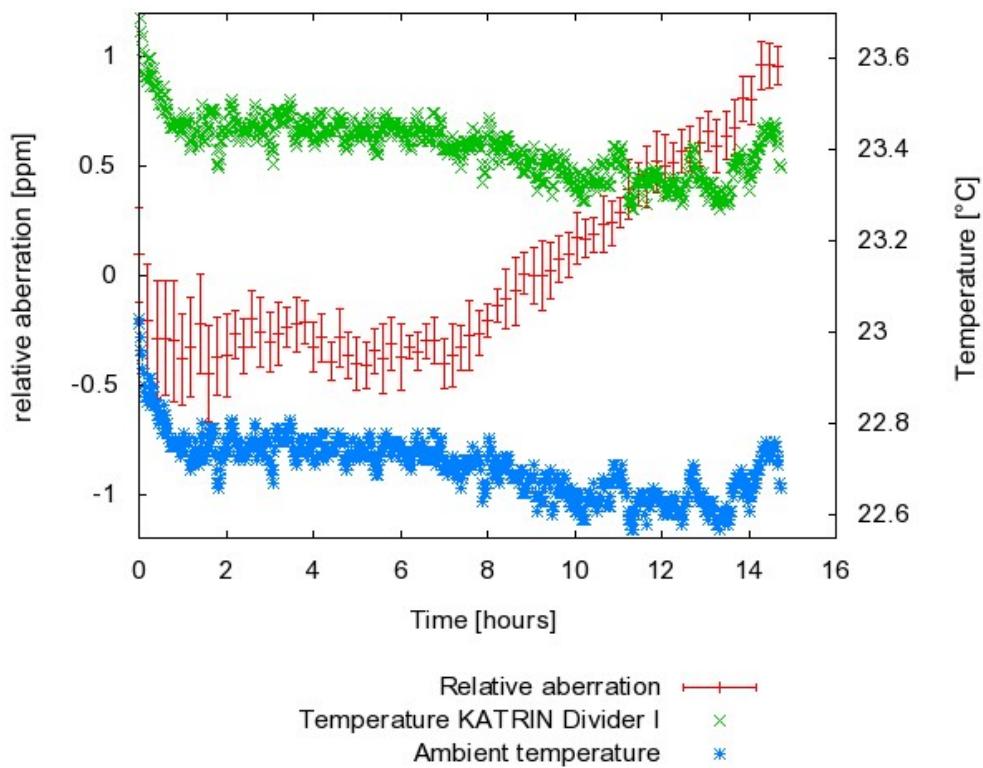


Abbildung 3.1.: **Drift des KATRIN-Teilers I.** In diesem Diagramm ist die relative Abweichung der gemessenen Spannung in Bezug auf den Mittelwert dargestellt. Dabei fällt eine Drift von über 1 ppm in der Spannungsmessung auf. Um Temperaturschwankungen auszuschließen wurde die Temperatur in der Abgriffbox im Teiler sowie die Umgebungstemperatur aufgezeichnet [PTB09].

3.3.2. Niederspannungskalibrierung im Hochspannungslabor in Münster

Nach der Rückkehr des Spannungsteilers I sollten Niederspannungskalibrierungen nach dem Vorbild der PTB vorgenommen werden, um zu überprüfen ob mit der Messelektronik in Münster die Ergebnisse an der PTB zu reproduzieren waren. Es galt herauszufinden ob eine vergleichbare Präzision erreicht werden kann.

Allerdings stellte sich heraus, dass die Temperatur von über 25°C im Labor die Messung stark verfälscht hat und somit die Ergebnisse der ersten Niederspannungskalibrierungen nicht korrekt waren.

Erst bei Raumtemperaturen von 20°C bis 23°C konnten dann wieder zuverlässige Niederspannungskalibrierung durchgeführt werden. Zu dieser Zeit war der Umbau des Teilers II abgeschlossen, sodass beide Teiler parallel angeschlossen und kalibriert werden konnten.

Es wurden zwei Niederspannungskalibrierung durchgeführt. Der Ablauf einer solchen Messung wird im Folgenden erläutert.

1. Offset und Verstärkung

Vor einer präzisen Hochspannungsmessung muss der Einfluss des Messgerätes auf die Messung ermittelt und der Messwert rechnerisch korrigiert werden. Dazu zählen der Offset und die Verstärkung.

Bei dem Offset handelt es sich um die Verschiebung des Messsignals vom Nullpunkt. Auch wenn keine Spannung am Multimeter anliegt wird dennoch eine von Null verschiedenen Spannung gemessen, die bei anliegender Spannung das Messsignal um den entsprechenden Wert verschiebt. Der Offset wird bestimmt indem der Hochspannungs-eingang des Teilers und die Erde kurzgeschlossen werden. So erhält man den Offset des gesamten Messaufbaus einschließlich Teiler, der verwendeten Kabel und dem Multimeter. In diesem Offset sind dann auch alle verbliebenen Thermospannungen enthalten. Daraus folgt auch, dass bei konstanten Umgebungsbedingungen der Offset konstant sein sollte.

Die Verstärkung beschreibt die Veränderung der zu messenden Spannung durch das Messgerät, genauer gesagt kompensiert man durch diese Messung die alterungsbedingte Drift der internen Spannungsreferenz des Multimeters. Die Verstärkung wird bestimmt indem das Messgerät an eine bekannte 10 V-Referenz angeschlossen wird. Bei der Referenz handelt es sich um eine Fluke 732A 10 V_{DC}-Referenz dessen Absolutwert aufgrund von Kalibrierungen an einem Josephsonnormal¹ an der PTB sehr gut bekannt ist. Damit lassen sich dann Abweichungen in der gemessenen Spannung durch das Multimeter berechnen, um die tatsächlichen Spannungen zu erhalten. Eine Beispielrechnung ist in folgendem Abschnitt gezeigt. Die Offset- und Verstärkungsmessung wurden vor, zwischen und nach den folgenden Messungen mit je 30 Messpunkten aufgezeichnet.

2. Absolutkalibrierung des 100:1 Messabgriff

Für die Absolutkalibrierung des 100:1 Abgriffes geht man wie folgt vor: An einer hochstabilen Spannungsquelle (Fluke Calibrator 5720A) wird eine Spannung von 1000 V erzeugt und über ein Hochspannungskabel auf die Hochspannungszuführung des Spannungsteilers gegeben. Gleichzeitig wird die 1000 V auf einen Referenzteiler, den Fluke 752A, gegeben, dessen 100:1 Abgriff mit einem Digitalmultimeter der Firma Agilent 3458A ausgelesen wird. Somit hat man einen zusätzlichen Kontrollparameter für die Stabilität der Hochspannung. Der 100:1 Abgriff des Spannungsteilers wird mit einem Digitalmultimeter der Firma Fluke, Typ 8508A ausgemessen. Wie schon beschrieben, wurden bei beiden Multimetern sowohl Offset als auch Verstärkung bestimmt.

Mit der graphischen Programmiersprache Labview wurde ein Messprogramm aufgebaut, dass alle gemessenen Spannungen ausliest und abspeichert. Gleichzeitig war es in der Lage die Steuer- und Kontrollparameter von jeweils einem Spannungsteiler über eine Netzwerkverbindung auszulesen und abzuspeichern. Diese Werte wurden zusätzlich

¹Spannungsnormal mit einer Genauigkeit von 10 nV bei 10 V, das auf dem Josephson-Effekt beruht. Dabei entstehen zwischen zwei schwach gekoppelten Supraleiter diskrete Spannungsstufen sobald Mikrowellen eingestrahlt werden. Dieser Effekt wurde von Brian D. Josephson vorhergesagt.

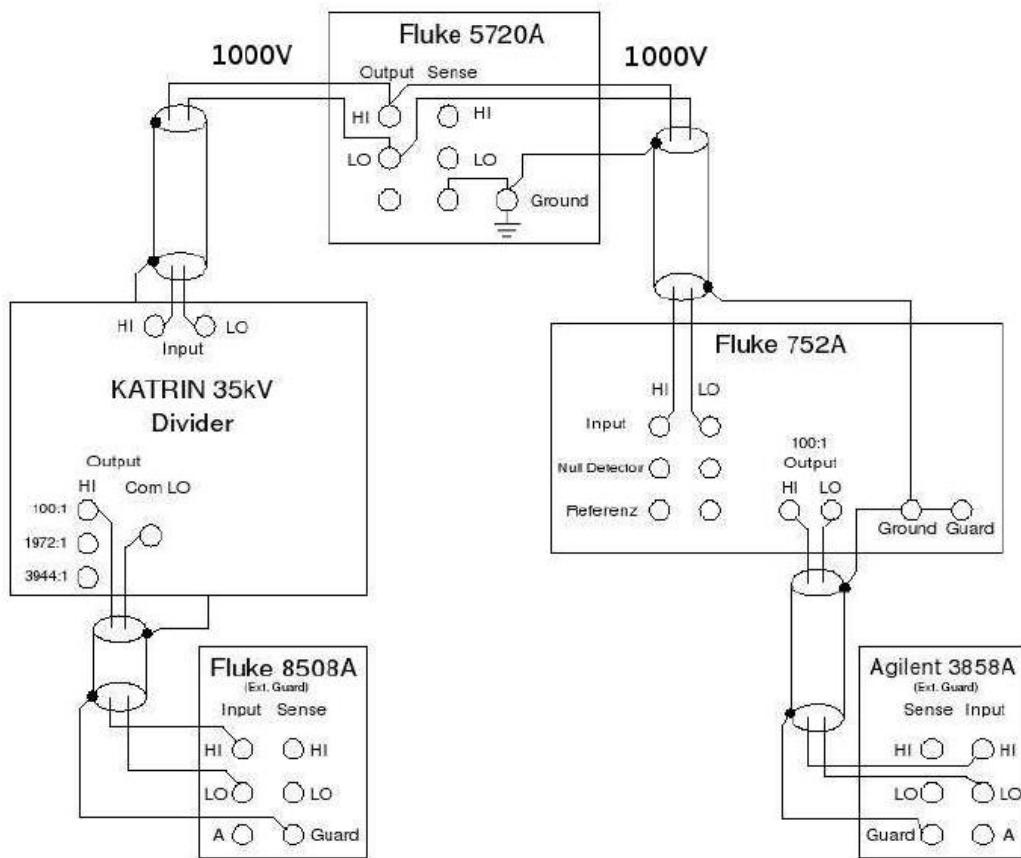


Abbildung 3.2.: **Absolutkalibrierung mit 1000 V.** Gezeigt ist die Absolutkalibrierung des 100:1-Abgriffes mit einem Referenzteiler. Die Schaltung ist von der PTB empfohlen (Szizze aus [Bau09]).

auch auf der Compact-Flash Speicherplatine im Compact Field Point des Teilers abgespeichert. Um Erdschleifen zu vermeiden, welche die Messung beeinträchtigen würden, ist es notwendig sich an den exakten Aufbau der Schaltung zu halten (siehe Abbildung 3.2). Diese Art der Verschaltung ist von der PTB empfohlen und hat sich dort bewährt.

Beim Agilent sind noch folgende Einstellungen zu beachten: Die Autozero-Funktion muss eingeschaltet sein. Dadurch wird bei jedem Messwert eine Nullpunkt-Korrektur in Abhängigkeit von der Gerätetemperatur auf das Messsignal angewendet. Außerdem ist der NPLC-Wert² auf 100 einzustellen und es ist notwendig darauf zu achten in regelmäßigen Abständen die Selbstkalibrierungsfunktion des Gerätes zu verwenden. Beim Fluke Digital-Multimeter wird im folgenden Modus aufgezeichnet: Es wird im 7 1/2-Stellen Modus (entspricht einem NPLC = 64) mit eingeschaltetem Low-Pass Filter gemessen.

²NPLC: „Number of Powerline Cycles“; Bezeichnet die Häufigkeit der Nulldurchgänge in der Netzspannung als Maß für die Messdauer. Ein NPLC von 100 entspricht einer Messdauer von zwei Sekunden. Dies ist vergleichbar mit der Messdauer des Fluke Digital-Multimeters

3. Bestimmung der Untermaßstabsfaktoren

Im zweiten Schritt werden die Untermaßstabsfaktoren bestimmt. Dazu wird von dem

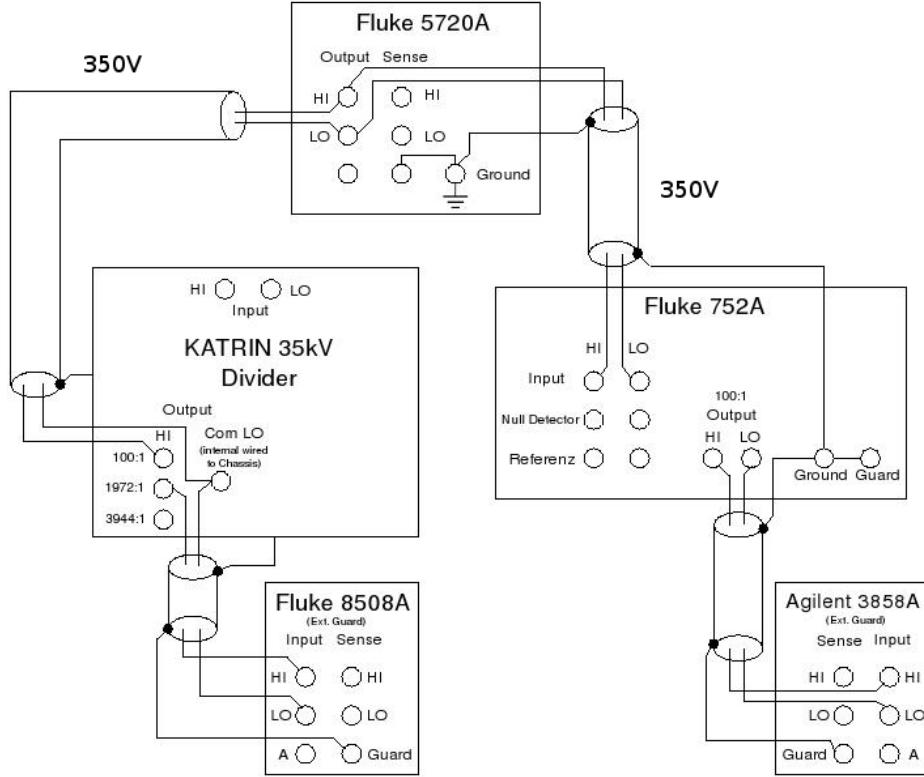


Abbildung 3.3.: **Bestimmung der Untermaßstabsfaktoren.** Gezeigt ist die Bestimmung der Untermaßstabsfaktoren indem eine Spannung von 350 V an den 100:1-Abgriff des KATRIN Spannungsteilers angeschlossen und der nachfolgenden 2000:1 Maßstabsfaktor mit einem Digitalmultimeter ausgemessen wird (Abbildung aus [Bau09]).

Fluke Calibrator eine Spannung von 350 V auf den 100:1-Abgriff gegeben. Aufgrund des Maßstabsfaktors scheint es für die nachfolgenden Abgriffe, als würde an der Hochspannungszuführung 35000 V anliegen. Die 2000:1 und 4000:1 Abgriffe werden dann nacheinander mit den Digitalmultimetern ausgelesen. Bei dieser und ebenso bei der obigen Messung wurden jeweils 50 Messwerte genommen.

Als Abgriffskabel werden in allen Messungen Teflonkabel mit den passenden LEMO-Steckern auf der Seite des Hochspannungsteilers und vergoldete Kupfer-Tellur Bananostecker auf der Seite des Messgerätes verwendet. Die Kupfer-Tellurlegierung garantiert niedrige Thermospannungen, da die Buchsen an den Multimetern ebenfalls aus dieser Legierung bestehen³.

³Es werden bei Multimeter auch Anschlussbuchsen aus Kupfer-Beryllium verwendet, allerdings ist der Hauptbestandteil beider Legierungen Kupfer, sodass die Ausbildung von Thermospannungen reduziert wird.

3.3.3. Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung in Münster

Um die korrigierte Spannungen ($U_{mess,korr}$) zu erhalten, muss der gemessene Wert jeweils um den Offset ($U_{0,Fluke}$) und die Verstärkung (K_{Fluke}) korrigiert werden:

$$U_{mess,korr} = (U_{meas} - U_{0,Fluke}) \cdot K_{Fluke} \quad (3.3.1)$$

Der Offset lässt sich dann durch das arithmetische Mittel der aufgezeichneten Messpunkte bestimmen. Bei der Berechnung der Verstärkung benötigt man das arithmetische Mittel der gemessenen Spannungen ($U_{10V,mittel}$) sowie den Absolutwert der Spannungsreferenz (U_{Ref}). Daraus lässt sich dann die Verstärkung berechnen zu:

$$K_{Fluke} = \frac{U_{Ref,10V}}{U_{meas,10V} - U_{0V}} \quad (3.3.2)$$

Dies ist die generelle Vorgehensweise bei allen Präzisionshochspannungsmessung.

Abgriff		19.10.09	22.10.09	Abweichung	Mittel	
100:1	pos	95,20510	95,20509	-7,14E-08	95,20509	1 kV
	neg	95,20508	95,20496	-1,26E-06	95,20502	350 V
	Mittel	95,20509	95,20503	-6,67E-07	95,20506	350 V
M20	pos	20,71774	20,71777	1,45E-06	20,71776	1 kV
	neg	20,71774	20,71778	1,93E-06	20,717776	350 V
	Mittel	20,71774	20,71778	1,69E-06	20,71776	350 V
M40	pos	41,43551	41,43554	7,24E-07	41,43553	1 kV
	neg	41,43550	41,43551	2,41E-07	41,43551	350 V
	Mittel	41,43551	41,43553	4,83E-07	41,43552	350 V

Tabelle 3.2.: **Niederspannungskalibrierung in Münster (2009).** Angegeben sind die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung des KATRIN-Spannungsteilers I im HV-Labor in Münster. M20 und M40 stellen die Untermaßstabsfaktoren dar.

Bei der Niederspannungskalibrierungen kann diese Korrektur auf jeden der 50 Messwerte angewendet werden, sodass man die korrigierten Spannungen erhält. Aus diesen Messungen wird dann zeilenweise der Maßstabsfaktor ermittelt. Diese werden dann wieder arithmetisch gemittelt und stellen das finale Ergebnis der Messung dar. Die Fehlerrechnung ist detailliert in [Bau09] zu finden und wird hier nicht behandelt.

Es wurden in Münster zwei Niederspannungskalibrierungen vorgenommen, bevor die zweite Kalibrierungsphase an der PTB begann. In Tabelle 3.2 sind die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierungen gezeigt. Die Werte konnten im ppm-Bereich reproduziert werden.

Der Vergleich zwischen den Werten aus Münster und der PTB aus den beiden Kalibrierungsphasen ist im nachfolgenden Abschnitt zu finden.

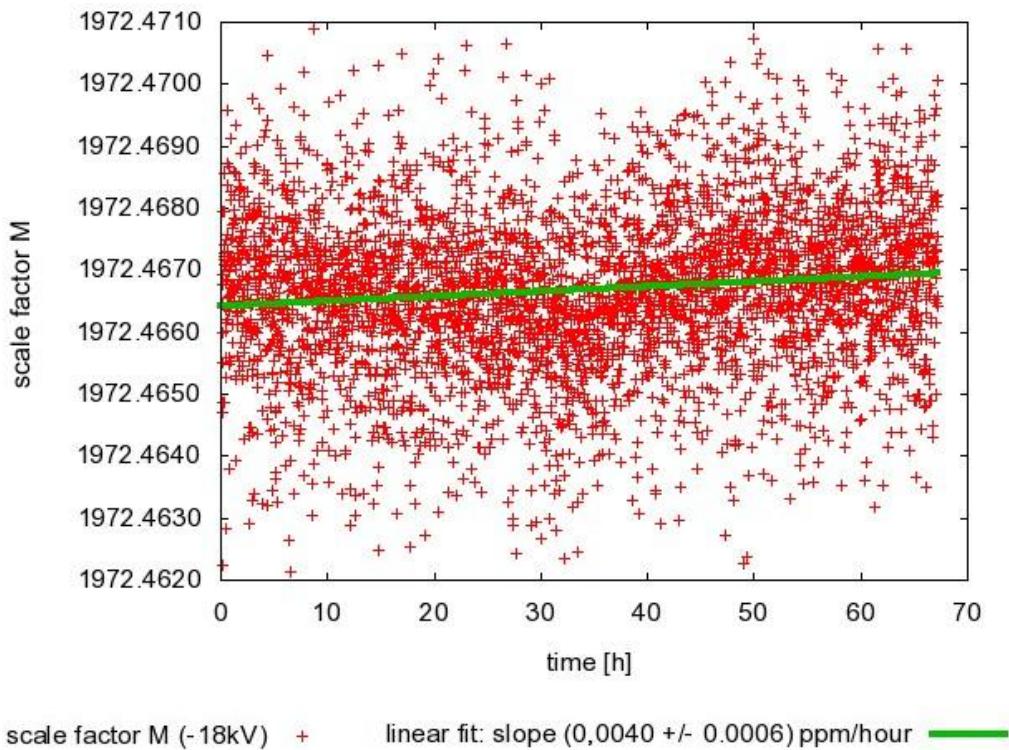


Abbildung 3.4.: **Stabilität des KATRIN-Teilers I (-18,5 kV).** In diesem Diagramm ist der Maßstabsfaktor bei einer angelegten Spannung von -18,5kV gegen die Zeit aufgetragen (Erstellt nach den Daten der PTB von 2009 [PTB09]).

3.3.4. Zweite Kalibrierungsphase 2009 an der PTB

Nach der Fertigstellung des KATRIN Spannungsteilers II und den durchgeführten Niederspannungskalibrierungen sind beide Teiler wieder an die PTB gebracht worden. Mit dem KATRIN Teiler II sollte dann auch der Ursprung der Drift geklärt werden, die in der vorigen Kalibrierungsphase entdeckt wurde.

Zusätzlich sollten Messungen zu weiteren Fragestellungen durchgeführt werden, nämlich die Bestimmung der Maßstabsfaktoren, die Stabilität (im Zusammenhang mit der Drift) sowie die Spannungsabhängigkeit.

Langzeitstabilität

Die Langzeitstabilität der Maßstabsfaktoren ist von entscheidender Bedeutung für die Spannungsüberwachung. Die Methode soll hier anhand von zwei Beispielen verdeutlicht werden. Es wurden jeweils die Spannungen von -18,5 kV und -35 kV an den Hochspannungsteiler angelegt und die Ausgangsspannungen am Teiler mit einem Fluke 8508A aufgezeichnet. Das Intervall zwischen zwei Messpunkten liegt bei einer Minute (-18,5 kV) über einen Zeitraum

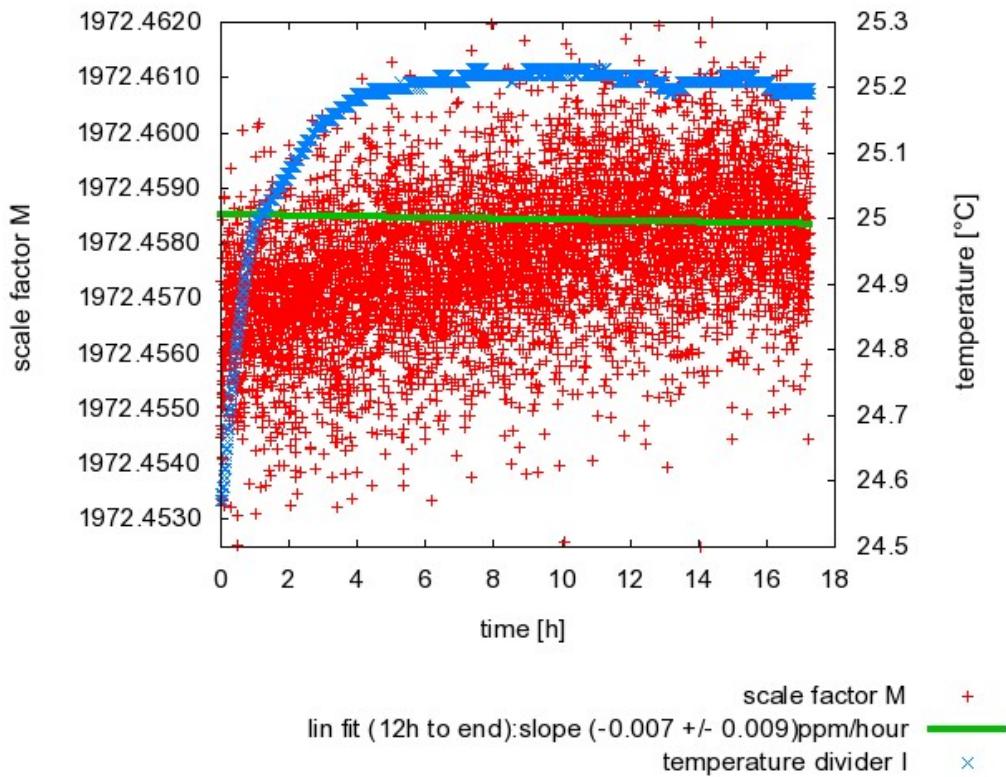


Abbildung 3.5.: **Stabilität des KATRIN-Teilers I (-35 kV)** In diesem Diagramm ist der Maßstabsfaktor und die Temperatur an den Abgriffen bei einer angelegten Spannung von -35kV gegen die Zeit aufgetragen(Erstellt nach den Daten [PTB09]).

von mehr als 67 Stunden und bei 10 Sekunden (-35 kV) über einen Zeitraum von etwa 17 Stunden.

Im Diagramm 3.4 sind die ermittelten Maßstabsfaktoren als Funktion der Zeit aufgetragen.

Der Mittelwert dieser Langzeitmessung lag bei $M(-18,5 \text{ kV}) = 1972,467$ mit $\sigma = 0,7 \text{ ppm}$. Die gemessenen Temperatur in der Abgriffbox stieg während der Messzeit um $0,2 \text{ K}$ an.

Zum Vergleich wird jetzt noch die Messung bei -35 kV betrachtet. In Diagramm 3.5 wurde zusätzliche noch die gemessenen Temperatur in der Abgriffbox aufgetragen. Die Regelung ist darauf ausgelegt gewesen, die Temperatur bis $0,1 \text{ K}$ konstant zu halten. Wie man sieht, steigt die Temperatur um mehr als $0,7 \text{ K}$ an. Mit diesem Temperaturanstieg ist auch eine Veränderung des Maßstabsfaktors verknüpft. Dieser ändert sich jedoch nur langsam, da die Temperaturmessung an der Außenseite der Abgriffbox durchgeführt wird und die Thermaлизierung des Innenraums mit der Teileratmosphäre langsamer von statthen geht.

Da die Wärmeproduktion über die Leistung quadratisch mit der angelegten Spannung ansteigt, ist dieses Einlaufverhalten bei höheren Spannungen deutlich ausgeprägter. Daraus ergibt sich, dass die Temperatursteuerung in diesem Spannungsbereich nicht korrekt arbeitet.

Der Mittelwert für den Maßstabsfaktor aus dieser Messung beträgt $M(-35 \text{ kV}) = 1972,459$ mit $\sigma = 0,6 \text{ ppm}$. Wobei nur die Datenpunkte nach der zwölften Stunde für die Bildung des Mittelwertes verwendet wurden. Bei der Messung mit $-18,5 \text{ kV}$ wurde der Mittelwert über die ganze Messdauer gebildet, da kein Einlaufverhalten festzustellen war.

Es bleibt also zunächst fest zuhalten, dass die Stabilität des Spannungsteilers über mehr als 60 Stunden im sub-ppm Bereich stabil ist, wobei das Einlaufverhalten aufgrund der Wärmeentwicklung bei Spannungen von 35 kV nicht den Vorgaben entsprechen.

Der Vergleich zwischen beiden Mittelwerten zeigt, dass bei höheren Spannungen der Maßstabsfaktor um $\Delta M = -4,2 \text{ ppm}$ absinkt. Dies entspricht einer Spannungsabhängigkeit von $-0,26 \text{ ppm/kV}$. Nach der Kalibrierung von 2005/2006 wurde jedoch eine Spannungsabhängigkeit von $0,03 \text{ ppm/kV}$ für den 2000:1-Abgriff ermittelt. In diesem Beispiel ist diese Abhängigkeit also um einen Faktor 10 größer als Erwartet. Auch ein Vergleich mit den Kalibrierungswerten der PTB zeigt diese Diskrepanz. Der Maßstabsfaktor aus der Stabilitätsmessung bei $-18,5 \text{ kV}$ weicht von dem Absolutwert um etwa $4,4 \text{ ppm}$ ab, während die Maßstabsfaktoren aus der Stabilitätsmessung bei -35 kV und aus den Kalibrierungsmessungen an der PTB im Rahmen der Unsicherheiten übereinstimmen. Dies ist auch schlüssig, da die Kalibrierungen an der PTB mit $\pm 35 \text{ kV}$ durchgeführt wurden.

Für den Messbetrieb am KATRIN-Experiment werden aber hauptsächlich Spannungen im Bereich von $-18,6 \text{ kV}$ verwendet, sodass eine genau Bestimmung der Spannungsabhängigkeit notwendig wird. Zusätzlich sollten weitere Auswertungen von Stabilitätsmessungen bei $18,5 \text{ kV}$ erfolgen um zu versuchen dieses Ergebnis zu bestätigen.

Spannungsabhängigkeit

Im Jahre 2005 wurde die reine Spannungsabhängigkeit ohne Einlaufverhalten untersucht. Dazu wurden vier Spannungsstufen zwischen -8 kV und -32 kV eingestellt und Messwerte für jede Spannungsstufe über jeweils vier Stunden aufgezeichnet. Diese Messreihe wurde für beide Abgriffe jeweils drei mal wiederholt. Zur Bestimmung der Spannungsabhängigkeit wurden die Maßstabsfaktoren gemittelt und als Funktion der Spannung aufgetragen. Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden erhält man die Spannungsabhängigkeit.

Für den 2000:1-Abgriff betrug die Spannungsabhängigkeit $0,030 \pm 0,008 \text{ ppm/kV}$, für den 4000:1-Abgriff betrug sie $0,027 \pm 0,007 \text{ ppm/kV}$.

In der zweiten Messphase von 2009 wurde nur eine einzelne Messung durchgeführt wobei vier Spannungstufen zwischen -5 kV und -35 kV eingestellt und etwa 10 Minuten gemessen wurde. Es gab nur eine einzelne Messung mit einer Spannungsabhängigkeit von $(-0,061 \pm 0,002) \text{ ppm/K}$ für den 2000:1 Abgriff, da das Hauptaugenmerk dieser Kalibrierungsphase auf der Erstkalibrierung des KATRIN-Teilers II lag. Das Ergebniss der Linearitätsmessung aus 2009 sollte für spätere Auswertungen nicht herangezogen werden. Zum einen gibt es nur eine einzige Messung von einem Maßstabsfaktor und zum Anderen wurden für jede Spannungsstufe nur über 10 Minuten Messwerte aufgezeichnet. In der Messung von 2005 wurde extra vier Stunden gemessen um das Einlaufverhalten des Teilers nach dem Anlegen der Spannung völlig auszuschließen. In der Messung von 2009 geht dieses Einlaufverhalten

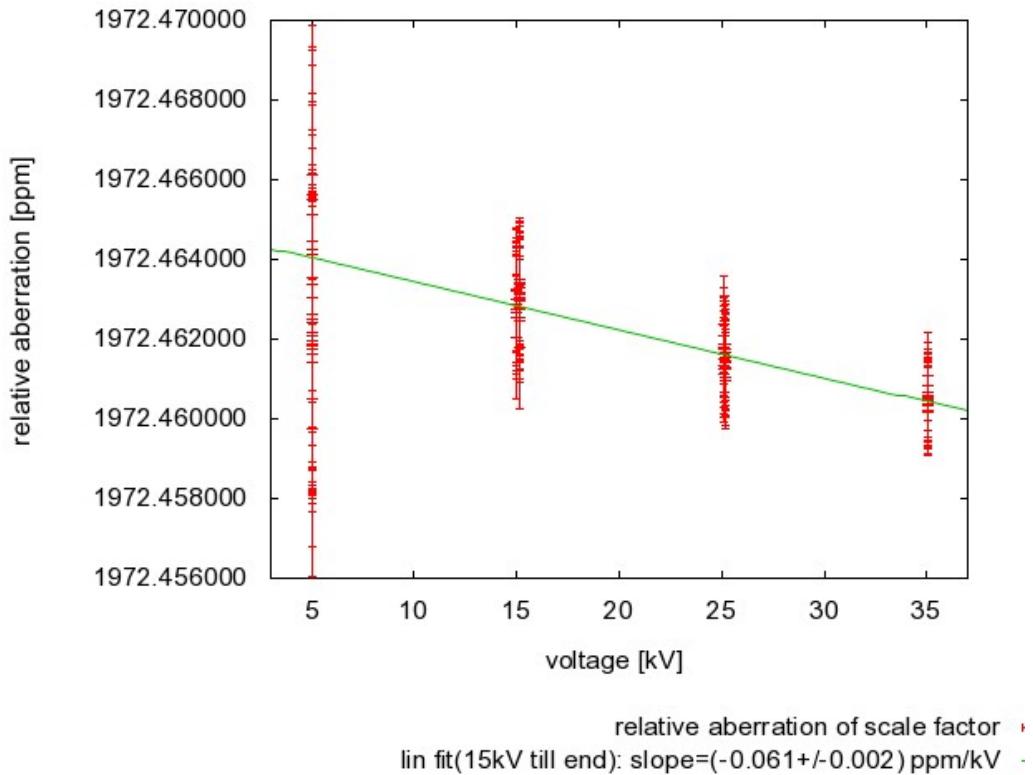


Abbildung 3.6.: **Spannungsabhängigkeit des KATRIN Teiler I.** In diesem Diagramm ist die Änderung des Maßstabsfaktors als Funktion der Spannung aufgetragen. Der Geradenfit beginnt erst bei 15 kV da die Streuung bei 5 kV sehr groß ist. Die Steigung der Geraden entspricht der Spannungsabhängigkeit (Erstellt nach den Daten [PTB09]).

komplett mit ein, was das Ergebnis verfälscht. Außerdem ist die Statistik bei einer einzelnen Messung von etwa einer Stunde zu gering um Aussagekräftig zu sein, bzw. um diese Werte mit denen aus 2005 sinnvoll vergleichen zu können.

Mit dem KATRIN-Teiler II sind aber selbstständige Messungen zur Spannungsabhängigkeit bis 35 kV in Münster möglich, da die Spannungsabhängigkeit mit -0,02 ppm/K äußerst gering und gut bekannt ist.

Absolutkalibrierung

Die Maßstabsfaktoren werden über eine wechselseitige Kalibrierung mit dem MT-100 gewonnen. Die nachfolgende Tabelle 3.3 gibt die ermittelten Maßstabsfaktoren aus der Hochspannungskalibrierung wieder.

Es wurden jeweils mehrere Messungen mit positiver und negativer Polarität durchgeführt. Die Differenz zwischen beiden Messungen ist ebenfalls angeben. Die vollständige Tabelle mit den Kalibrierungsergebnissen ist im Anhang zu finden. Für den 100:1 Abgriff wurde eine Spannung von 1 kV angelegt und der Abgriff direkt im 20 V-Messbereich des Multimeters ausgemessen.

Abgriff	Mittelwert	relative Differenz (pos. und neg. Polarität)	angelegte Spannung
100:1	95,20535(4)	1,1E-06	1kV nur direkt
2000:1	1972,4584(9)	1,2E-08	35kV
4000:1	3944,9163(16)	3,8E-07	35kV

Tabelle 3.3.: **Kalibrierungsergebnisse des KATRIN Spannungsteilers I an der PTB (2009).** Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse des KATRIN-Spannungsteilers I nach der zweiten Kalibrierungsphase im November 2009 [PTB09].

Vergleicht man nun diese Werte mit den vorigen Kalibrierungen (vgl. Tabelle 3.4) so fällt auf, dass sich der Maßstabsfaktor drastisch geändert hat.

Abgriff	Kalibrierung 2006	Relative Änderung 2005-2006	Kalibrierung 2009	Relative Änderung
				2006-2009 (nach Modifikationen)
2000:1	1972,48016(61)	+7,95 ppm	1972,4584(9)	-11 ppm
4000:1	3944,95973(138)	+7,42 ppm	3944,9163(16)	-11 ppm

Tabelle 3.4.: **Kalibrierungsgeschichte des KATRIN Spannungsteilers I an der PTB.** In dieser Tabelle sind die ermittelten Maßstabsfaktoren und deren relative Abweichungen zwischen den einzelnen Kalibrierungen dargestellt [Thu07] und [PTB09].

Zwischen den Kalibrierungen von 2005 und 2006 konnte eine Langzeitdrift des Teilers von 0,6 ppm/Monat ermittelt werden. Diese Drift konnte ebenfalls an Messungen mit der kondensierten Kryptonquelle in Mainz nachgewiesen werden [Ost08]. Die Kalibrierung von 2009 zeigt jetzt, dass sich die Maßstabsfaktoren deutlich verändert haben (-11 ppm) mit dem umgekehrten Vorzeichen im Vergleich zur Langzeitdrift.

Die Umbauten am Spannungsteiler hatten also einen erheblichen Einfluss auf die Maßstabsfaktoren, was dazu führt, dass die bisherige Kalibrierungsgeschichte für künftige Messungen nicht mehr berücksichtigt werden darf.

Neben der Hochspannungskalibrierung wurden auch noch Niederspannungskalibrierungen durchgeführt. In Tabelle 3.5 sind die Ergebnisse dieser Messungen dargestellt.

Die Multiplikation mit dem Maßstabsfaktor M_{100} ergibt: $M_{2000}=1972,438$ und $M_{4000}=3944,8759$ die relative Abweichung zum ermittelten Hochspannungswert beträgt jeweils 10 ppm. Dieser Wert ist relativ hoch wenn man ihn mit den Messungen vom KATRIN Teiler II vergleicht. Die Differenz zwischen Hochspannungs- und Niederspannungskalibrierungswert weichen beim Teiler II nur um -1,3 ppm beim M_{20} Wert und 0,5 ppm beim M_{40} Wert ab. Damit ist der Vergleich zwischen Hoch- und Niederspannungskalibrierung beim Teiler I um einen Faktor zehn schlechter.

Abgriff	Mittelwert	relative Differenz (pos. und neg. Polarität)	Angelegte Spannung
20:1	20,7177265(97)	1,7E-07	350V
40:1	41,435445(16)	-2,4E-07	350V

Tabelle 3.5.: **Niederspannungskalibrierung des KATRIN Spannungsteilers I an der PTB (2009).** Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse für Niederspannungen des KATRIN-Spannungsteilers I nach der zweiten Kalibrierungsphase im November 2009 [PTB09].

Zum Abschluss werden die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierungen an der PTB mit den Ergebnissen aus Münster verglichen (Tabelle 3.6).

Abgriff	PTB-Mittel	Münster-Mittel	relative Differenz	
20:1	20,7177265(97)	20,71776	1,33E-06	350V
40:1	41,435445(16)	41,43552	1,09E-06	350V

Tabelle 3.6.: **Vergleich der Niederspannungskalibrierung Münster-PTB (2009).** Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse für Niederspannungen des KATRIN-Spannungsteilers I von der PTB und Münster [PTB09].

Die Ergebnisse der PTB lassen sich also im Bereich von etwa 1 ppm reproduzieren.

In der zweiten Kalibrierungsphase sind also folgende Erkenntnisse gewonnen worden. Die Maßstabsfaktoren haben sich aufgrund des Umbaus deutlich verändert (-11 ppm im Vergleich zur letzten Kalibrierung), dadurch kann die bisherige Kalibrierungsgeschichte künftig nicht mehr benutzt werden.

Es sind noch zwei weitere Probleme an der PTB aufgefallen die es noch zu untersuchen gilt. Zunächst mal ist am Ausgang des Spannungsteilers bei offenem Hochspannungsanschluss ein Rauschen von einigen hundert μ V beobachtet worden. Sobald die Versorgungsnetzgeräte in der Peripherie ausgeschaltet wurden verschwand es. Dies könnte durch eine fehlerhafte oder nicht ausreichende Erdung eines Netzgerätes produziert werden. Außerdem gibt es noch Probleme bei der Auslese des Steuerteilers mit dem Compact Field Point. Dies Problem existiert bei beiden Teilern gleichermaßen und scheint sich um ein grundsätzliches Problem zu handeln. Positiv zu bewerten ist die Möglichkeit jetzt Niederspannungskalibrierungen durchzuführen.

Die Spannungsabhängigkeit ist angestiegen. Dies wird höchstwahrscheinlich durch die Probleme bei der Temperatursteuerung bei hohen Spannungen bedingt und sollte mit dem KATRIN-Teiler II genauer untersucht werden.

Positiv zu bewerten ist, dass sich die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierungen von der PTB im Hochspannungslabor in Münster im ppm-Bereich reproduzieren lassen. Der einzige Nachteil hierbei ist, dass die Werte aus Hoch- und Niederspannungskalibrierung relativ stark voneinander abweichen. Dies scheint kein Problem in der Methode an sich zu sein, da die Kalibrierungen am KATRIN Teiler II und an dem MT-100 gezeigt haben, dass sich die Maßstabsfaktoren die aus Hochspannungskalibrierungen ermittelt wurden im ppm-Bereich

durch Niederspannungsmessungen reproduzieren lassen. Eine Möglichkeit der Erklärung liegt in dem unterschiedlichen thermischen Verhalten der verschiedenen Spannungsteiler. Beim Anlegen von 35 kV wird an den Widerständen deutlich mehr Wärmestrahlung erzeugt als bei 350 V. Beim KATRIN Teiler II ist die Temperatusteuerung deutlich verbessert worden, sodass diese Effekte minimiert werden. Außerdem gehen hier auch noch Spannungsabhängigkeiten mit ein, die im zweiten Teiler geringer sind.

Mit der Möglichkeit der Niederspannungskalibrierung erhält man ein nützliches Werkzeug zur regelmäßigen Überwachung der Stabilität des Spannungsteilers. Dabei sind regelmäßige Hochspannungskalibrierungen an der PTB weiterhin notwendig um die genauen Maßstabsfaktoren zu erhalten.

4. Einsatz des KATRIN Hochspannungsteilers II am CERN

Die genaue Überwachung von Hochspannungen ist nicht nur für das KATRIN-Experiment von großer Bedeutung. Es gibt auch andere Experimente an denen ein hochpräziser Spannungsteiler eingesetzt werden kann. Da es keinen kommerziellen Teiler mit einer ausreichenden Präzision gibt, erreichte die KATRIN-Kollaboration schon kurz nach der Inbetriebnahme des Spannungsteilers die Anfrage ob es möglich wäre den Spannungsteiler für das COLLAPS-Experiment (COLinear LAser Spectroscopy) am CERN einzusetzen. Das Collaps Experiment beschäftigt sich mit der Untersuchung von Grundzustandseigenschaften exotischer, kurzlebiger Isotope (wie der Spin, elektromagnetische Momente und Ladungsradien) unter Anwendung der kollinearen Laser Spektroskopie. Für die Durchführung der Experimente sind zwei Parameter von entscheidender Bedeutung, zum einen die Wellenlänge des verwendeten Lasers und zum Anderen die kinetische Energie der Ionen

Das Experiment ist in der ISOLDE-Halle am CERN aufgebaut, wo auch die Isotope für die Untersuchung produziert werden. Die Isotope werden durch Kollisionen von Protonen mit einem Target produziert, im Anschluss mit einem Massenfilter on-line separiert und über eine Transportstrecke zu den verschiedenen Experimenten, die in der Halle aufgebaut sind, geführt.

Die Erzeugung der Isotope geschieht in einem Potenzial, das von einer Spannung $\sim 60\text{ kV}$ erzeugt wird. Die geladenen Teilchen werden dann auf eine Erdelektrode beschleunigt. Für die Bereitstellung der Hochspannung stehen zwei Netzgeräte zur Verfügung, das ASTEC 2 und ein Heinzinger (Serie PNChp). Beide Netzgeräte werden über Spannungsteiler geregelt und mit einem zweiten Teiler (ROSS VD 75-10-BDL) und einem Multimeter wird die Ausgangsspannung ausgelesen. Das Heinzinger ist eine Neuanschaffung und soll das ASTEC 1 ersetzen, wobei allerdings der Regelkreis vom alten ASTEC 1 übernommen wurde.

Im COLLAPS-Aufbau gibt es zusätzliche Elektroden, welche die Isotope mit $\pm 10\text{ kV}$ nachbeschleunigen bzw. abbremsen. Für die Laserspektroskopie ist nun die kinetische Energie die sich aus der Spannungsdifferenz ergibt neben der genauen Wellenlänge des Lasers die entscheidende Messgröße. Die Wellenlänge des Lasers ist mit sehr guter Genauigkeit bekannt (relative Genauigkeit $>10^{-9}$ [Bet10]), sodass die Bestimmung der anliegenden Beschleunigungsspannung die dominante Unsicherheit darstellt.

Um die systematischen Fehler des Experiments zu reduzieren sollten die verwendeten Spannungsquellen mit einem präzisen Hochspannungsteiler kalibriert werden.

Im Herbst 2008 ist der KATRIN Hochspannungsteiler an das CERN gebracht worden um diese Kalibrierung durchzuführen. Die Details zu diesen Messungen werden in [Hoc08] beschreiben und sollen hier nur kurz zusammengefasst werden. Die mit dem KATRIN Teiler I und dem Fluke 8508A Digitalmultimeter gemessenen Spannungen sollten mit der angezeigten Spannung der Messequtronik verglichen werden. Das Ergebnis dieser Messungen ist in Diagramm 4.1 dargestellt. Die Abweichung betrug beim Astec 1 etwa $-2,6 \cdot 10^{-4}\text{ V/V}$, während beim ASTEC 2 eine Abweichung von $6,4 \cdot 10^{-4}\text{ V/V}$ festgestellt wurde. Für das Experiment ist eine Spannungsmessung besser als 10^{-5} von großem Interesse [Hoc08]. Wie man erkennt gibt es einen Datenpunkt bei $22,5\text{ kV}$ der mehrmals reproduzierbar gemessen aber verworfen wurden, da für diese Abweichung keine Erklärung gefunden wurde.

Das Problem an dieser Messung ist jedoch, dass die Beschleunigungsspannung zwischen 30 kV und 60 kV variiert wird. Da jedoch der Spannungsteiler I eine Maximalspannung von

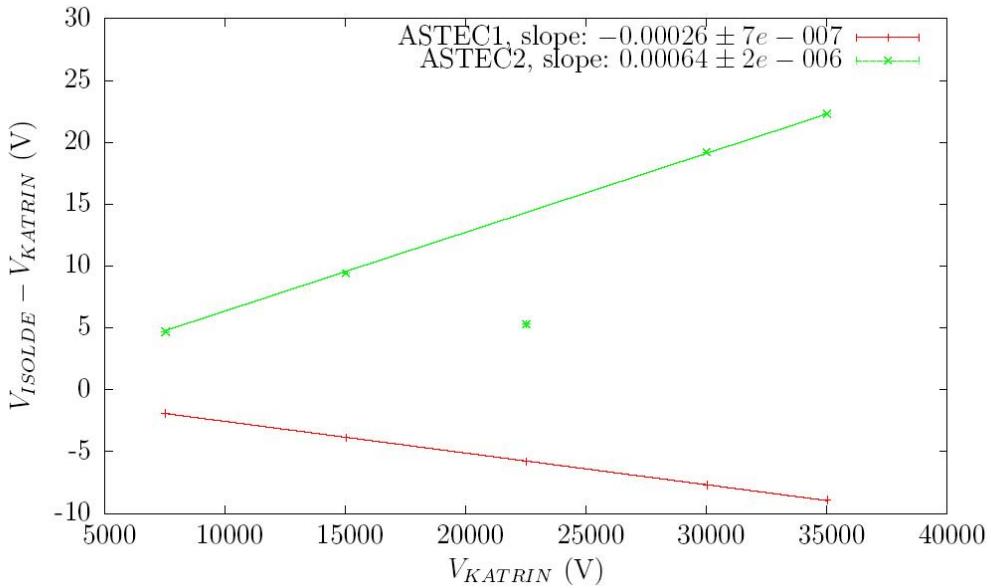


Abbildung 4.1.: **Kalibrierung der ISOLDE Spannungsquellen (2008).** Gezeigt ist die Abweichung zwischen den gemessenen Spannungen an der Messelektronik der Isotopenquelle und der Spannung die am KATRIN-Teiler I mit dem Fluke 8508A gemessen wurde. Diese Daten stammen aus der Kalibrierungsphase von 2008 [Hoc08].

35 kV aufweist, wurde Messwerte zwischen 5 kV und 35 kV aufgenommen und die Ausgleichsgerade auf 60 kV extrapoliert. Die extrapolierten Abweichungen stimmten im Bereich der Messunsicherheiten mit den Ergebnissen aus der Laserspektroskopie überein.

Allerdings stellte diese Kalibrierung nur eine Momentaufnahme dar und sagt nichts über die Stabilität der Anlage aus. Außerdem wurde das ASTEC 1 Netzgerät durch ein neues Heinzinger ausgetauscht. Nicht zu vergessen ist auch, dass die Abweichung bis 60 kV, was gerade der interessante Bereich für ISOLDE darstellt, nur extrapoliert ist. Eine zweite Kalibrierungsphase mit einem Teiler der Spannungen bis 60 kV herunter teilen kann wäre durchaus sinnvoll.

Im Zuge der Konstruktion des zweiten KATRIN Spannungsteilers wurde die Möglichkeit überprüft eine Erweiterung auf 65 kV vorzunehmen. Da eine solche Modifikation leicht durchzuführen war wurde beschlossen den zweiten KATRIN Spannungsteiler für den Betrieb bis auf 65 kV auszurüsten, sodass er ein breiteres Anwendungsspektrum findet. Außerdem wurde der Steuerteiler auf die Nutzung als Hochfrequenz-Tastkopf optimiert, sodass Wechselspannungsanteile auf hohen Gleichspannungen untersucht werden können.

Es wurden auch Messungen mit diesem Tastkopf an den beiden Netzgeräten durchgeführt um das Wechselspannungsverhalten der netzgeräte zu untersuchen. Allerdings ist das Wechselspannungsverhalten des KATRIN Teilers II zur Zeit Gegenstand von Untersuchungen, sodass im Folgenden nicht auf diese Messungen eingegangen wird.

Im Herbst 2009 gab es eine zweite Kalibrierungsphase der Netzgeräte am ISOLDE-Experiment mit dem KATRIN Hochspannungsteiler II. Im Folgenden werden die Messungen und die vorläufigen Ergebnisse präsentiert.

Kalibrierung

Zunächst wurde, wie im Jahr zuvor, eine Spannungsrampe zwischen 10 kV und 60 kV gefahren und die angezeigten Spannungen der ISOLDE-Anlage mit den angezeigten Spannungen des KATRIN-Spannungsteilers verglichen. Nach jeder neu eingestellten Spannung wurde

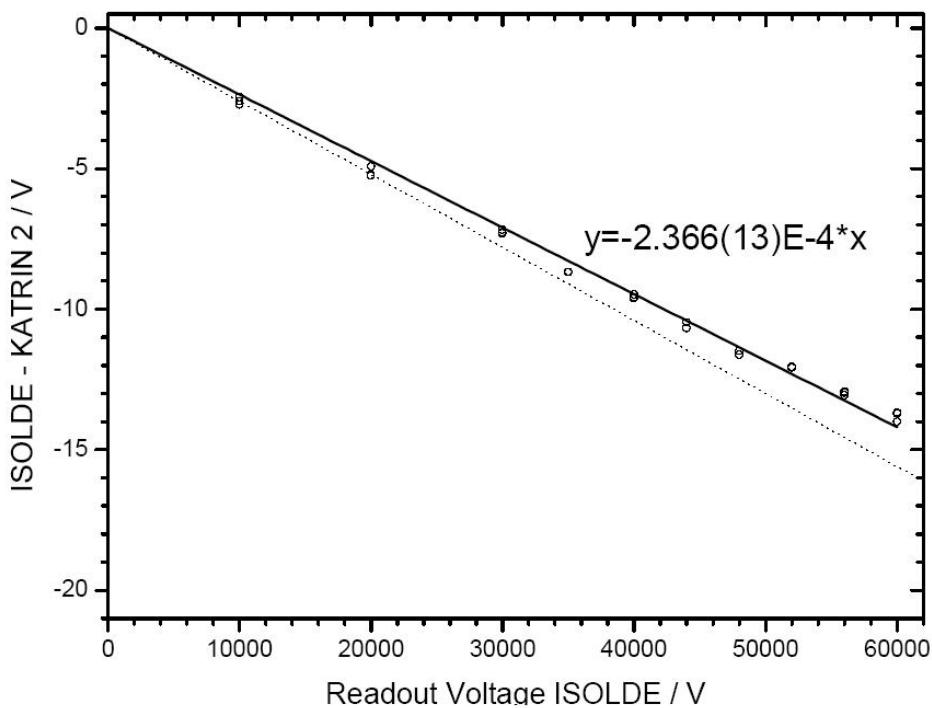


Abbildung 4.2.: **Abweichung des Heinzingers.** Gezeigt sind die Abweichungen zwischen den angezeigten Spannungen an der Anlage und den Spannungen die am KATRIN-Teiler mit dem Fluke 8508A gemessen wurden [Gep09].

eine Zeit von sieben Minuten zur Thermalisierung des Systems gewartet bevor die Daten genommen wurden. Für die einzelnen Spannung wurden jeweils drei Messwerte aufgezeichnet (im Abstand von 30 Sekunden) und der Mittelwert gebildet. Diese Messungen wurden sowohl mit dem Heinzinger als auch mit dem ASTEC 2 durchgeführt. In den Diagrammen 4.2 und 4.3 sind die vorläufigen Ergebnisse dieser Messungen gezeigt.

Wie man erkennt wurden beim Astec 2 im Bereich von 22 kV zusätzliche Messpunkte genommen. Dies hat zutun mit dem bereits erwähnten abweichenden Messpunkt bei 22,5 kV der in der Messung von 2008 auftrat. Wie man jedoch sieht, konnte dieser Einbruch nicht reproduziert werden.

Vergleicht man nun die Messung von 2008 die am ASTEC 1 vorgenommen wurden (Diagramm 4.2 gestrichelte Linie) und die neuen Messungen mit dem Heinzinger, so fällt auf,

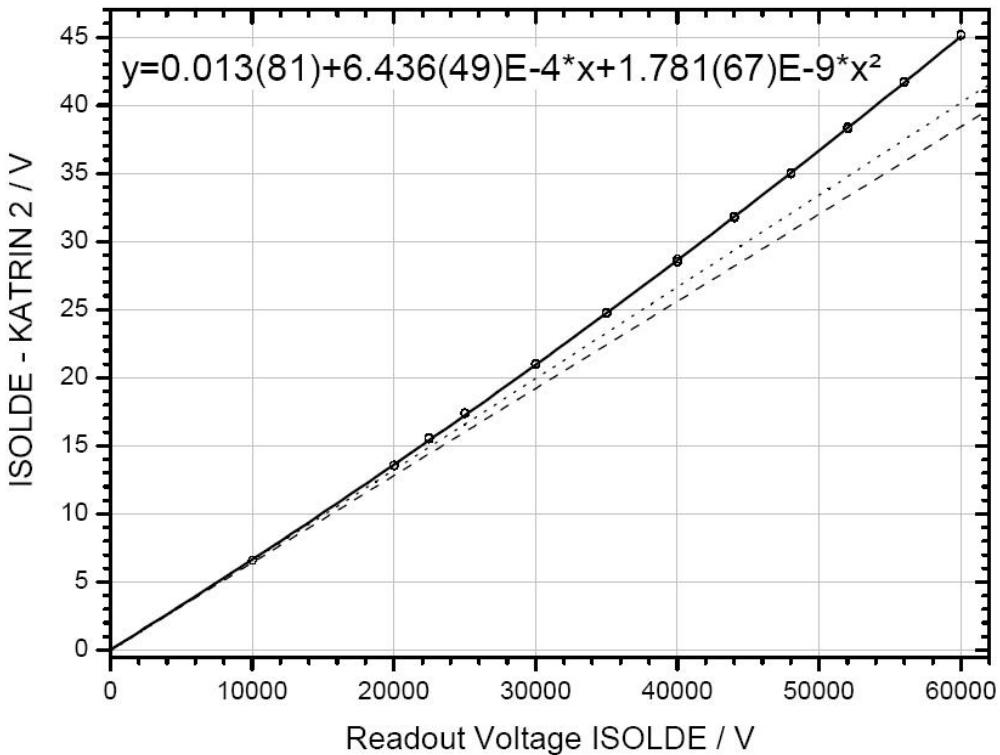


Abbildung 4.3.: **Abweichung des Astec 2.** Gezeigt sind die Abweichungen zwischen den angezeigten Spannungen an der Anlage und den Spannungen die am KATRIN-Teiler mit dem Fluke 8508A gemessen wurden. Bei der durchgezogenen Linie handelt es sich um den Parabelfit der Messpunkte von 2009, während die gestrichelte Linie die lineare Ausgleichgerade von 2008 mit einer parabolischen Ausgleichsgeraden (gepunktet) von 2008 vergleicht [Gep09].

dass sie von der selben Größenordnung sind ($-0,00026 \text{ V/V}$ aus 2008 gegenüber $-0,00023 \text{ V/V}$ aus 2009). Daraus wurde gefolgert, dass die Abweichung unabhängig ist vom verwendeten Netzgerät und KATRIN-Teiler. Die Abweichung scheint durch den Regelkreis bedingt zu sein, da in beiden Messungen dieselben ISOLDE ROSS Spannungsteiler und Agilent 3458A verwendet wurden. Die Abweichung von etwa $2 \cdot 10^{-5}$ zwischen den beiden Kalibrierungen ist geringer als die spezifizierte Langzeitstabilität des ISOLDE ROSS Spannungsteilers von $5 \cdot 10^{-5}/\text{y}$. Die absolute Genauigkeit der ISOLDE-Messelektronik beim Heinzinger zeigt eine Abweichung von 14 V bei 60 kV. Dies entspricht einer Abweichung von 0,03 % wohingegen der Hersteller eine Genauigkeit von 0,01 % angibt.

Für ASTEC 2 konnte durch die Messung bis zu 60 kV eine parabolische Abweichung festgestellt werden, die in der Messung von 2008 bis 35 kV nicht sichtbar wurde, da in diesem Spannungsbereich die Residuen und die χ^2 -Werte für lineare und parabolische Ausgleichsgeraden sehr ähnlich sind. Zum Vergleich ist die lineare Ausgleichsgeraden (2008, gestrichelt) zusammen mit einer parabolischen Ausgleichsgeraden der Daten von 2008 (gepunktet) eingezeichnet. Der Unterschied zwischen 2008 und 2009 beträgt etwa $8 \cdot 10^{-5}$ was den Spezifikationen des ROSS Spannungsteilers entspricht ($5 \cdot 10^{-5}/\text{y}$) führt zu $7,5 \cdot 10^{-5}$ Abweichung bei

einem Intervall von 18 Monaten zwischen den beiden Messungen. Die absolute Genauigkeit der ISOLDE-Messelektronik beim ASTEC 2 zeigt eine Abweichung von 45 V bei 60 kV. Dies ist einen Faktor 7,5 mal größer als die Angeben des Herstellers.

Einlaufverhalten und Langzeistabilität

Neben einer genauen Kalibrierung ist die Stabilität und das Einlaufverhalten von entscheidender Bedeutung für das COLLAPS-Experiment. Falls im Messbetrieb die Spannung einbricht ist es nötig zu wissen, wie lange die Netzgeräte benötigen den Spannungswert zu reproduzieren. Für das Heinzinger wurden über einen Zeitraum von etwa drei Stunden Messwerte in einem Intervall von 10 Sekunden aufgezeichnet. Dabei war das Netzgerät schon einige Stunden bei den vorigen Messungen in Betrieb und lieferte etwa zwei Stunden lang 35 kV Ausgangsspannung bevor die Spannung auf 55 kV hochgefahren wurde. Nach etwa 2,5 Stunden wurde ein Spannungseinbruch simuliert indem die Spannungsquelle in den Standby-Modus geschaltet wurde. Nach einige Minuten wurde das Netzgerät wieder in Betriebsmodus geschaltet. Der Zweck dieses Versuch zielt darauf ab herauszufinden, nach welcher Zeit die Spannung wieder auf den vorigen Wert zurückkehrt. Spannungsabfälle dieser Art wurden während der letzten Spektroskopiephasen aufgrund hoher Ströme auf dem Target häufiger beobachtet und die Folgen aus so einem Spannungsabfall sind daher von besonderem Interesse. Das Ergebnis dieser Messung ist in Diagramm 4.4 zu sehen.

Wie man erkennt braucht das Heinzinger mehr als drei Stunden um sich asymptotisch auf eine stabile Spannung einzuregeln. Dieses Verhalten macht das Heinzinger als Spannungsquelle für Laserspektroskopie ungeeignet.

Die gleiche Messung wurde mit dem ASTEC 2 wiederholt, wobei über einen Zeitraum von 10 Stunden Messwerte in einem Intervall von 10 Sekunden aufgezeichnet wurden. Nach etwa 9,5 Stunden wurde auch hier ein Spannungsabfall simuliert. In Abbildung 4.5 ist das Ergebnis zu sehen. Das ASTEC 2 erreicht schon nach dem Einschalten die eingestellte Spannung mit einer Abweichung von 3 V. Nach einer Stunde schwankt die Spannung nur noch um etwa 0,5 V. Nach dem Spannungsabfall braucht das Netzgerät 11 Minuten um die Spannung wieder auf dem vorigen Wert zu stabilisieren. Dabei wird beim Wiedereinschalten eine Spannungsüberhöhung gemessen. Eine ähnliche Überhöhung trat auch beim Heinzinger-Netzgerät auf.

Mit dieser zweiten Messphase konnten die Ergebnisse von 2008 verifiziert und gezeigt werden, dass die Messung vom Prinzip her richtig durchgeführt wurden, da man die Ergebnisse mit zwei verschiedenen Spannungsteilern reproduzieren konnte. Es scheint, dass die Abweichung in den Netzgeräten durch den Regelkreis bedingt ist, da die Messergebnisse von ASTEC 1 und dem Heinzinger bis auf eine Abweichung identisch sind. Außerdem konnte gezeigt werden, dass die Spannung beim Heinzinger-Netzgerät erst nach mehreren Stunden stabil steht, sodass dieses Netzgerät für Laserspektroskopie ungeeignet ist.

Mit der Kalibrierung der Netzgeräte unter Verwendung der KATRIN Spannungsteiler konnten Inkonsistenzen in verschiedenen Isotopiemessungen mit identischen Isotopen auf die Verwendung zweier unterschiedlicher Netzgeräte zurückgeführt werden. Unter Verwendung der ermittelten Kalibrierungswerte konnten diese Abweichung geklärt und korrigiert werden.

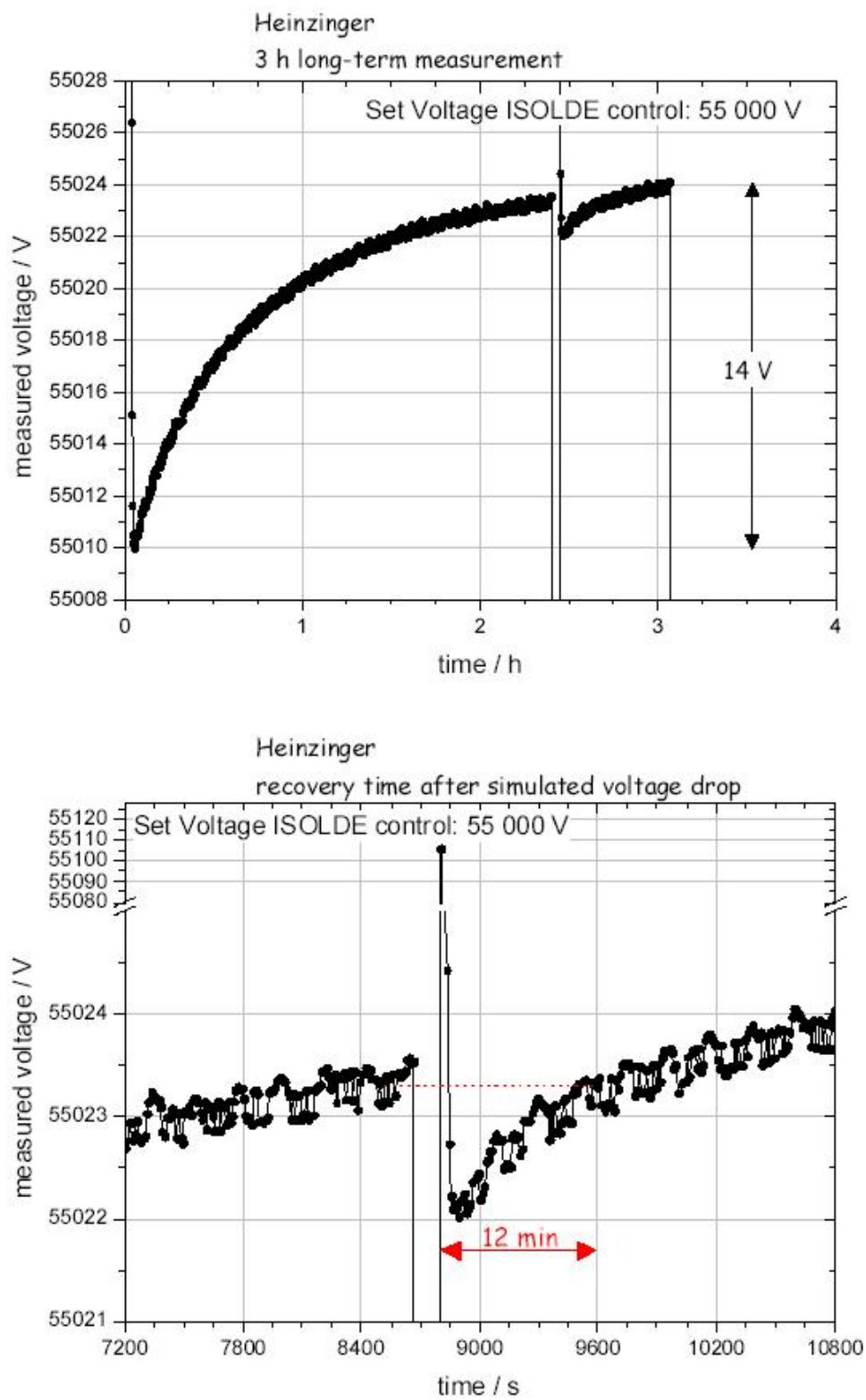


Abbildung 4.4.: **Stabilität des Heinzingers.** Gezeigt ist die gemessenen Ausgangsspannung über einen Zeitraum von etwa drei Stunden. Im unteren Bild erkennt man das Verhalten des Netzgerätes nach einem simulierten Spannungsabfall [Gep09].

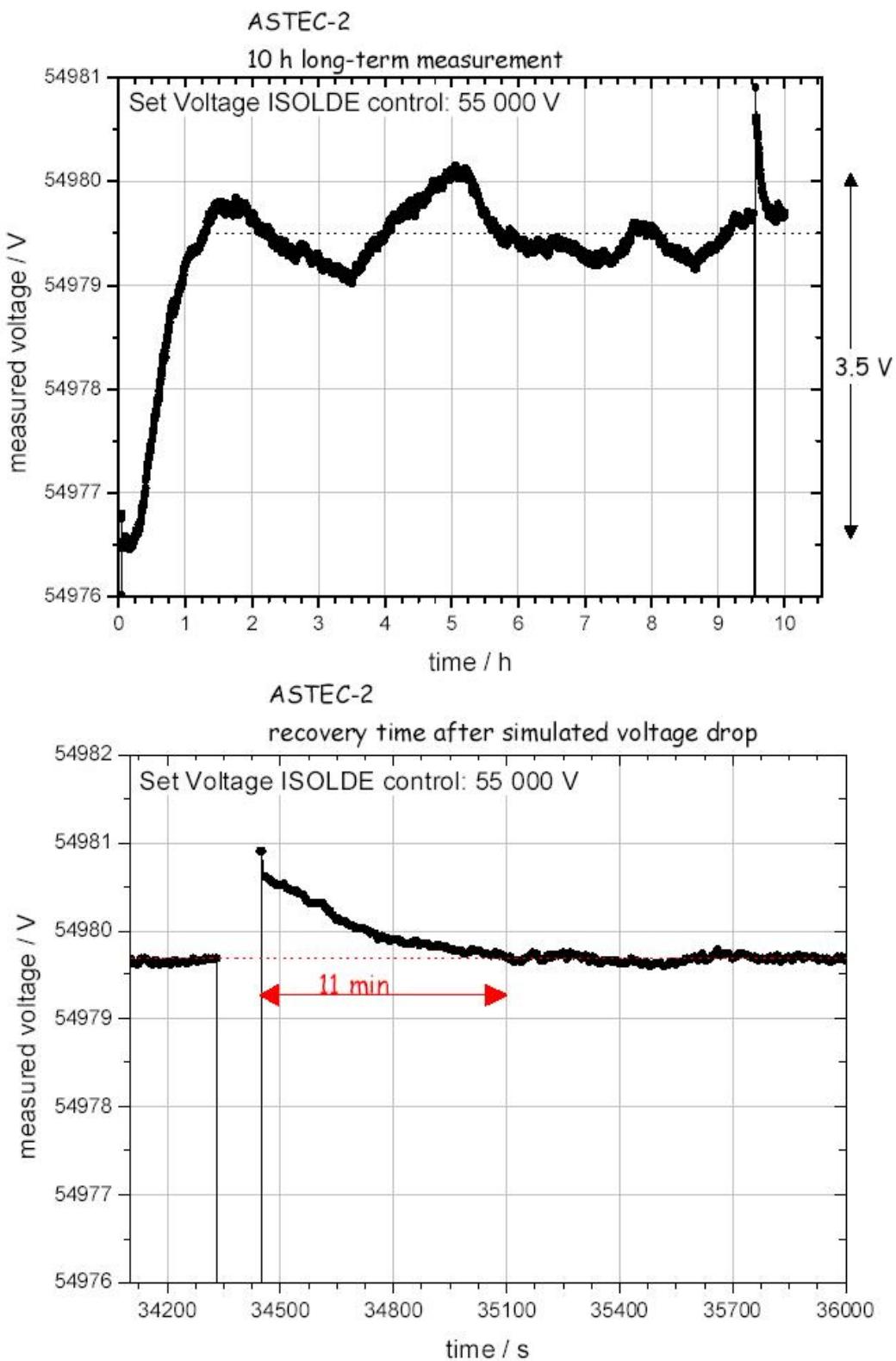


Abbildung 4.5.: **Stabilität des Astec 2.** In diesem Diagramm ist die gemessenen Spannung des Netzgerätes über eine Messdauer von etwa 10 Stunden dargestellt. Im unteren Bild erkennt man das Einlaufverhalten nach einem simulierten Spannungsabfall [Gep09].

Die zweite Kalibrierungsphase mit dem KATRIN Teiler II hat außerdem gezeigt, dass die Ungenauigkeiten in der Spannungserzeugung durch den Regelkreis bedingt sind, da das ASTEC 1 gegen ein Heinzinger ausgetauscht wurde und die Kalibrierungswerte bis auf eine alterungsbedingte Drift reproduziert werden konnten. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass das neue Heinzinger-Netzgerät über viele Stunden keine stabile Hochspannung aufbauen konnte und somit für die kollineare Laserspektroskopie ungeeignet ist.

5. Die Hochspannungsversorgung der Drahtelektrode

Wie schon in der Einleitung beschrieben wird der gesamte Hauptspektrometertank auf Hochspannung gelegt um das elektrostatische Gegenfeld zu erzeugen. Die Stabilität der Spektrometerspannung wird dabei vom Spannungsteiler und der Verwendung der Kalibrierungsquellen am Monitorspektrometer überwacht. Zur Feineinstellung des elektrischen Feldes und zur Reduzierung des Untergrundes wird eine Drahtelektrode verwendet.

Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit dem Problem der Versorgung der Drahtelektrode mit Hochspannung. Es geht dabei hauptsächlich um die Erzeugung, die Einstellung und die Überwachung der Hochspannung, sowie um die Verteilung der einzelnen Spannungen zu den Segmenten der Drahtelektrode. Die Einkopplung in den Tank und die Weiterverteilung zu den Elektroden wird in [Pra10] eingehend beschrieben und soll hier nicht weiter erläutert werden.

5.1. Das Grundkonzept der Hochspannungsverteilung zu der Drahtelektrode

Das Konzept der Spannungsversorgung für die Drahtelektrode wurde bereits im KATRIN Design Report [KAT04] skizziert. Dabei wird das Hauptspektrometer auf eine Hochspannung gelegt die um einige hundert Volt geringer ist als die angestrebten $U_0 = -18,6\text{kV}$ welche als Retardierungspotenzial für den Endpunkt des Tritium- β -Spektrums benötigt wird. Die Drahtelektrode soll auf einem negativeren Potenzial als U_0 liegen um mit hochpräzisen Spannungsquellen von positiver Polarität die Spannungen der Drahtlagen und Ringsegmente an U_0 anzupassen.

Im November 2008 wurde das konkrete Design für die Hochspannungsversorgung abgesprochen und beschlossen [HV08].

In Abbildung 5.1 ist eine schematische Skizze des beschlossenen Konzeptes gezeigt. Für die Hochspannungsversorgung wird ein Versorgungsschrank aufgebaut. Die Schrankhülle befindet sich dabei auf dem selben Potenzial wie das Hauptspektrometer. Innerhalb dieses Schrankes wird es eine isolierte Bereich geben (im Folgenden als isolierte Box bezeichnet), welche gegenüber dem Hauptspektrometer auf einer deutlich negativeren Spannung liegt (einige hundert Volt bis zu 1 kV im Dipolmodus).

Beide Hochspannungen werden von hochpräzisen Netzteile (FuG, Typ HCP 18_35000 M) produziert und durch die genannten Methoden überwacht. In der isolierten Box werden die hochpräzisen Spannungsquellen mit positiver Polarität (Details sind im Kapitel 5.4 zu finden) untergebracht. Ebenso das Kontroll- und Messsystem sowie ein sog. Patchpanel, das die Spannungen von den Netzgeräten auf die Kabel, die zu den Segmenten der Elektrode führen, leitet. Neben den Geräten innerhalb der Box gibt es weiter Komponenten im Schrank, die folglich auf dem selben Potenzial liegen wie die Hülle des Spektrometers. Zum Einen wird eine Spannungsquelle installiert, welche über einen Schalter direkt mit der Box verbunden ist und das Potenzial der Box sprunghaft etwa 1 kV versetzen kann. Diese Spannung wird für den Dipolmodus benötigt (Kapitel 5.4.3). Außerdem gibt es ein Hochspannungsmodul für die Versorgung der Antipenning-Elektrode. Die Antipenningelektrode ist nicht Teil

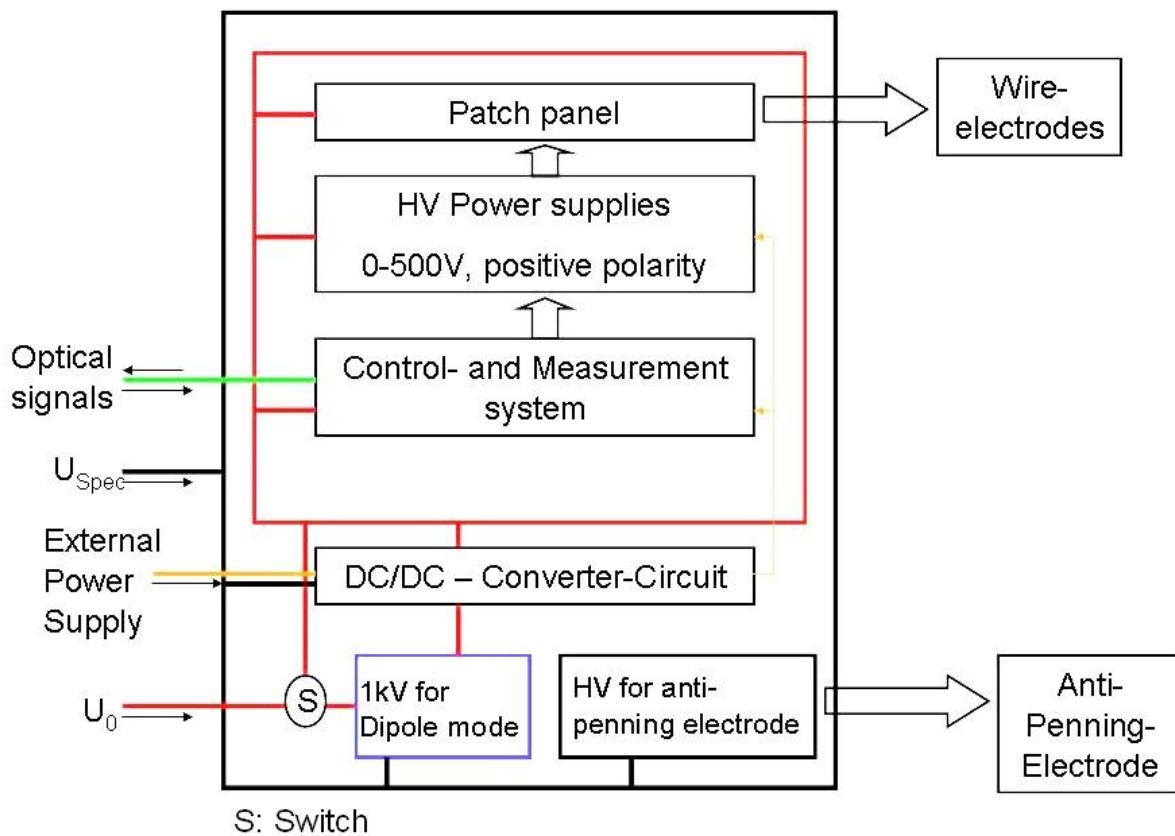


Abbildung 5.1.: **Konzept für die Hochspannungsversorgung der Drahtelektrode:** In dieser Abbildung ist das Konzept für die Hochspannungsversorgung dargestellt wie es mit dem HV-Taskleader beschlossen wurde.

des Dipolmodus und deswegen ist das Netzgerät auch nicht in der isolierten Box untergebracht. Außerdem gibt es Komponenten zur Bereitstellung der Versorgungsspannungen für die einzelnen Geräte, sowie optische Umsetzer um das System galvanisch von der übrigen Elektronik des Experiments zu trennen. Dadurch werden einerseits elektronische Störungen die von Außen kommen vermieden, andererseits lässt sich das System von einem externen Netzwerk kontrollieren.

Es wird jeweils einen Aufbau dieser Art für eine Dipolhälfte geben. Mit Ausnahme des Moduls für die Versorgung der Antipenning-Elektrode.

Wie schon in der Einleitung beschrieben, besteht die Drahtelektrode aus einzelnen Ringsegmenten und Drahtlagen, wobei insgesamt 22 Spannungen pro Dipolhälfte und zwei Spannungen für die Antipenningelektrode bereitzustellen sind. Somit sind es 46 einzelne Spannungen die eingestellt, erzeugt, gemessen und verteilt werden müssen. Im Folgenden werden die verschiedenen Komponenten detailliert erläutert, sowie die Planung des Hochspannungsschrankes und die Untersuchung der Eigenschaften der einzelnen Komponenten beschrieben.

5.2. Der Hochspannungsschrank

Als Schrank wo die Komponenten eingebaut werden sollen, wird ein Schaltschrank der Firma Rittal verwendet. Die Abmessungen betragen 2225 x 600 x 810 mm (Höhe, Breite, Tiefe). Da es im Prinzip zwei fast identische Aufbauten geben wird, werden zwei dieser Schränke benötigt, die sich jedoch über Montagehilfen zu einem einzigen Schrank aus zwei Schrankhälften kombinieren lassen. Somit kommt man auf eine Gesamtbreite von 1210 mm. Der Schrank selbst besteht aus einzelnen Profilstangen aus Edelstahl mit einem Lochmuster, die ineinander verschweißt sind.



Abbildung 5.2.: **Aufbau der Hochspannungsschränke in der KATRIN-Halle.** In dieser Abbildung sind die beiden Schrankhälften gezeigt wie sie auf den Isolatoren in der KATRIN-Halle unterhalb des Hauptspektrometers aufgestellt sind.

Die Breite in Kombination mit den mitgelieferten Rackstangen ergeben die standardisierte 19-Zoll Rackbreite, sodass sich viele Gerätschaften komfortabel einbauen lassen. Die Außenwände lassen sich mit angebrachten Halterungen befestigen, sodass eine Erweiterung um eine zusätzliche Schrankhälfte, durch Entfernung der Seitenwände, kein Problem darstellt. Im Sockel befinden sich Lüftungsschlitz und an der Oberseite kann zur Temperaturregulierung ein Lüfter oder eine Klimaanlage angebracht werden. Im Anhang finden sich schematische Zeichnungen des Schrankes sowie eine Abschätzung des Gesamtgewichtes.

Die zwei Schrankhälften werden über mitgelieferte Flach- und Winkelisen miteinander verbunden, wobei zwischen den Schränken ein Streifen Schaumstoff eingebracht wird um den Luftstrom nicht durch den Schlitz zwischen den Hälften entweichen zu lassen. Um diese

Lücke vor hochfrequenten Einstrahlungen abzuschirmen, wird an der Innenseite ein Blech mit dem Lochprofil verschraubt.

Der gesamte Schrank besteht aus Edelstahl. Der Hauptgrund dafür ist die Positionierung des Schrankes in der KATRIN Halle (siehe Abbildung 5.2). Der Aufbau wird auf Isolatoren, die am KIT gefertigt wurden, in der Nähe des Hautspektrometers innerhalb der Luftspulen stehen. Der Schrank soll nichtmagnetisch sein um das Spektrometerfeld nicht zu deformieren.

5.3. Die isolierte Box

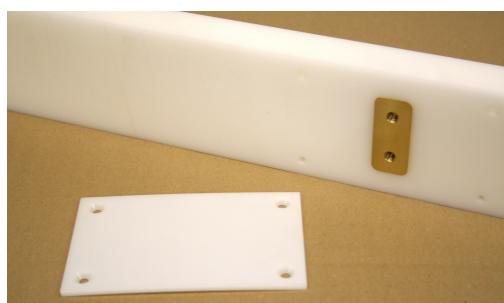
Wie schon beschrieben, wird ein Großteil der Geräte auf einem anderen Grundpotential betrieben. Je nach eingestellter Spannung und verwendetem Dipolmodus.

Um diese Box zu realisieren werden flache Bauteile aus Polyamid (PA) gefertigt, welche in die Struktur des Schrankes geschraubt werden können. Diese Teile haben Bohrungen an denen die Rackstangen befestigt werden können. Im wesentlichen bestehen die Stäbe aus drei einzelnen Bauteilen. Zum ersten der Grundstab, mit einer Länge von 750 mm hat er die exakte Länge um mit jeweils drei abgesenkten Bohrungen auf jeder Seite an dem Profil im Schrank verschraubt zu werden (siehe Abbildung 5.3). Die Stärke von 15 mm sorgt für ausreichende Stabilität und ist so ausgelegt, dass eine montierte Rackschiene automatisch die 19-Zoll Rackbreite liefert. Aufgrund des großen spezifischen Widerstandes von $\rho = 10^{15} \Omega \cdot cm$ [Bec98] sollten die Box ausreichend isolieren. Die zugehörigen Hochspannungstest sind in Kapitel 6.2.2 zu finden.

Zur Befestigung der Rackschienen auf der anderen Seite wurden in den PA-Stab Bohrungen eingesetzt und eine Senkung eingefräst. In diese Senkung wurde ein Messingstück eingesetzt welches mit Bohrungen und Gewinde versehen wurde um das Gewicht der eingebauten Geräte auf eine größere Fläche zu verteilen. Einzelne Bohrungen in PA sind nicht stabil genug das ganze Gewicht über einen längeren Zeitraum zu tragen.

Abbildung 5.3.: **Polyamid-Stäbe der isolierten**

Box. In dieser Abbildung sind die einzelnen Komponenten der Polyamid Stäbe gezeigt die zum Aufbau der isolierten Box konstruiert wurden. Das Messingstück wird in eine Senkung in dem Stab eingepresst und mit einer Platte abgedeckt um Entladungen von der Schrankwand zu verhindern.



Um dieses Messingteil abzudecken ist nun eine kleine Platte aus PA darüber verschraubt worden. So kann es zwischen dem Messing und der Außenwand des Schrankes nicht zu Entladungen aufgrund der Potenzialdifferenz kommen.

Die Box hat nun eine Breite wie ein Standard 19-Zoll Einschub und eine Höhe von 1270 mm. Sie nimmt also ein Großteil der zur Verfügung stehenden 1900 mm im Schrankinneren ein.

5.4. Die Hochspannungsquellen

In diesem Abschnitt sollen die verwendeten Hochspannungsquellen die zum Einsatz kommen detailliert erläutert werden. Im Grunde werden vier verschiedene Spannungsquellen verwendet. Davon werden im folgenden die drei Versorgungsquellen beschrieben, die für die Drahtelektrode, die Antipenningelektrode und den Dipolmodus verwendet werden. Diese arbeiten im Hochspannungsbereich mit der Möglichkeit Spannungen bis $U = 6 \text{ kV}$ von positiver und negativer Polarität zu erzeugen. Die vierte Spannungquelle, die Verwendung findet, liefert die Versorgung für die einzelnen Geräte. Sie arbeitet im Niederspannungsbereich und wird in einem späteren Abschnitt separat behandelt.

5.4.1. Spannungquellen für die Drahtelektrode

Für die Versorgung der Drahtelektrode nach dem Konzept wie es im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt werden:

- Spannungen bis zu 300 V von positiver Polarität
- Spannungsquellen auf einem hochgelegten Grundpotenzial betreibbar (Nicht floatend)
- Hohe Stabilität (Restwelligkeit $< 10 \text{ mV}$)
- Bereitstellung von 2x22 einzeln einstellbaren Spannungen in einer minimalen Anzahl an Geräten
- Versorgung über Gleichspannung
- Ansteuerung mit Labview möglich

Diese Anforderungen konnten von den Firmen FuG und ISEG erfüllt werden. Tabelle 6.1 zeigt eine kurze Übersicht der beiden angebotenen Spannungsquellen.

Parameter	ISEG	FuG
Typ	EHS 8205 – 505p-K-SHV	MCV 55 – 500 MOD
Channels	8	22
Output	0-500 V, 0-5 mA, positiv	0-500 V, 0-5 mA, positiv
Input Voltage	5 V und 24 V	24 V
Restwelligkeit	max. 5 mV	max. 10 mV p-p
Interface	CAN-bus	Ethernet
Mechanik	1/2 19Crate für vier Module, DC Sonderanfertigung	19SZoll Einschub Sonderanfertigung

Tabelle 5.1.: Gegenüberstellung der angebotenen Hochspannungsquellen. In dieser Tabelle sind die für den Aufbau wichtigen Eigenschaften der beiden angebotenen Module von den Firmen ISEG und FUG gegenübergestellt [ISE08][FuG08].

Beide Modulsorten erfüllten die Anforderungen für die Hochspannungsversorgung, wobei die modulare Bauweise der Iseg-Module es ermöglicht einzelne defekte Geräte schnell durch ein

Ersatzmodul auszutauschen. Dadurch kann der Messbetrieb schneller wieder aufgenommen werden.

Es wurden also insgesamt sieben Module der Sorte EHS 8205-505p_K_SHV bestellt. Jeweils zwei mal drei Stück für beide Dipolhälften und ein Ersatzmodul. Gleichzeitig wurden zwei Überrahmen mitbestellt, welche die Module aufnehmen. Das besondere an diesen Überrahmen war die Sonderanfertigung für eine Gleichspannungsversorgung.



Abbildung 5.4.: **ISEG Modul EHS 8205-505p_K_SHV.** Diese Abbildung zeigt eines der Module die der Versorgung der Drahtelektrode mit Hochspannung dient. Auf der Vorderseite sind die HV-Ausgänge zu sehen, sowie die Potentiometer zur Begrenzung von Ausgangstrom und -spannung

Die Module werden mit 5 V und 24 V versorgt, wobei die 5 V mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ der Versorgung der internen Elektronik dienen und die 24 V mit einer Toleranz von $\pm 10\%$ zur Erzeugung der Hochspannung. Sollten die Versorgungsspannungen außerhalb der Toleranz liegen gibt das Modul eine Fehlermeldung aus. Bei einer zu großen Versorgungsspannung wird das Modul beschädigt. Die einzelnen Kanäle haben eine gemeinsame Erde, sodass sie alle auf einem gemeinsamen Potenzial betrieben werden können. Wie in der Tabelle zu sehen ist, ist die Restwelligkeit auf der Hochspannung kleiner als $U_{ripple} = 5 \text{ mV}$, was bei einer Spannung von $U_0 = -18,6 \text{ kV}$ einem Ripple von 0,3 ppm p-p entspricht¹. Der Temperaturkoeffizient ist kleiner als $3 \cdot 10^{-5}/\text{K}$. Dies entspricht bei 300 V einer Temperaturabhängigkeit von etwa 10 mV/K, sodass im Schrank eine stabile Temperatur notwendig ist. Die Auflösung der Spannungseinstellung beträgt 20 mV, die maximale Ausgangsspannung liegt bei 500 V wobei als Ausgangsbuchsen sogenante SHV-Stecker verwendet wurden.[ISE09].

Da für die Drahtelektrode eine zugelassene Spannungsdifferenz von $\Delta U = 300 \text{ V}$ existiert und die nachfolgende Mikroelektronik ebenfalls nur Spannungsdifferenzen bis zu diesem Wert verträgt, werden alle Module mit dem internen Potentiometer auf eine maximale Ausgangsspannung von $U_{max} = 300 \text{ V}$ eingestellt. Dadurch werden Drahtelektrode und Messelektronik geschützt. Das Potentiometer lässt sich über eine Stellschraube an der Vorderseite verstetzen. An dieser Stelle gibt es auch eine kleine, einpolige Lemobuchse, wo mit einem Handmultimeter eine niedrige Vergleichsspannung U_V ausgelesen werden kann. Um die gewünschte Maximalspannung einzustellen wird diese Vergleichsspannung ausgelesen und die Stellschraube variiert bis die gewünschte Spannung eingestellt ist. Die maximale Vergleichsspannung beträgt $U_{V,max} = 2,5 \text{ V}$. Dies entspricht 102% der maximalen Spannung, was für $U_{max} = 300 \text{ V}$ zu einer Vergleichsspannung von $U_V = 1,47 \text{ V}$ führt. Die Ansteuerung der Module erfolgt über eine CAN Schnittstelle.

¹Zusätzlich zu dem Ripple der aus der Erzeugung von U_{Box} entsteht.

Die Überrahmen zur Aufnahme der Module haben die Abmessungen 330 x 230 x 370 mm (Höhe, Breite, Tiefe). An der Vorderseite können insgesamt vier Module eingeschoben werden. Hier befinden sich auch die Anschlüsse für die CAN Schnittstelle und die Resetknöpfe für die eingeschobenen Module.



Abbildung 5.5.: **ISEG Überrahmen mit vier eingebauten Modulen.** Der ISEG Überrahmen hat die Breite von 1/2 19-Zoll und kann vier einzelne Module aufnehmen. Die Versorgungsanschlüsse sind auf der Rückwand, während an der Vorderseite die Ausgänge der einzelnen Module und die CAN Schnittselle angebracht sind.

Auf der Rückseite befinden sich die Anschlüsse für die 5 V- und die 24 V-Versorgung sowie der Erdungsanschluss. Aufgrund der halben 19-Zoll Breite des Überrahmens werden an beiden Seiten des Rahmens Winkelstücke angebracht um auf die voll 19-Zoll Breite zu kommen. Zeichnungen dieser Winkel sind im Anhang zu finden.

Der CAN-Bus

Das Iseg Netzteil EHS 8205-505p_K_SHV lässt sich über eine sogenannte CAN Schnittstelle ansteuern. Beim CAN-Bus (Controller Area Network) handelt es sich um ein Bussystem, welches in den 80er Jahren von der Firma Bosch für die Steuerung von elektrischen Komponenten in Kraftfahrzeugen entwickelt wurde. Ziel war es die elektronischen Steuerkomponenten durch möglichst wenig Kabelverbindungen zu verknüpfen um somit Gewicht einzusparen. Die



Abbildung 5.6.: **Übersicht eines CAN Datenframes.** Die Datenpakete die in einem CAN-Interface ausgetauscht werden bestehen immer aus verschiedenen Teilen mit unterschiedlicher Länge. Es beginnt mit einem Start of Frame Bit (SOF) und endet entsprechend mit einem End of Frame Bit (EOF) [CAN09].

Kommunikation zwischen den Komponenten erfolgt über sogenannte „Frames“. Dabei handelt es sich um Datenpakete, wobei es in jedem Frame eine exakte Abfolge an zu verwendeten Bits gibt, die es einzuhalten gilt. In Abbildung 5.6 ist der schematische Aufbau eines solchen Datenpaketes gezeigt. Im wesentlichen besteht ein Frame aus den Start- und Stoppbits, einem Identifierfeld, dem Datenlängenfeld und dem eigentlichen Datenfeld. Hinzu kommen

einige Kontrollbits, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Um eine Kollision beim Buszugriff zu vermeiden wird das Verfahren der bitweisen Arbitrierung verwendet, dabei wird im Identifierfeld der Inhalt der Nachricht und ihre Priorität kodiert. Das Endgerät entscheidet dann, ob der Frame genutzt wird oder nicht. Senden zwei Geräte gleichzeitig, bricht das Gerät mit der niedrigeren Priorität die Sendung ab, sodass es zu einer Hierarchie kommt. Zeitkritische Nachrichten können mit höherer Priorität verschickt werden durch Zuweisung eines geeigneten Identifiers.

Zur Versorgung der Drahtelektrode werden pro Dipolhälfte maximal 22 Spannungen benötigt. Aufgrund der Anzahl an Kanälen werden drei Spannungsquellen pro Dipolhälfte benötigt. Bei der Ansteuerung unterscheidet man die Module nach ihrem Identifier. Somit kann man jedem Modul separat Kommandos übermitteln. Außerdem kodiert man mit dem Identifier zwei verschiedene Arten von Frames. Zum einen gibt es Frames bei denen das Gerät lediglich Informationen übermittelt und es gibt Frames zur Kontrolle der Funktionen, z.B. eine Spannung ausgeben. Diese beiden Kommandoklassen werden ebenfalls im Identifier unterschieden.

Das ISEG EHS 8205-505p_K_SHV arbeitet nach dem CAN 2.0A-Protokoll. Der Identifier hat eine Länge von 11 Bits, womit das Modul an den ein Kommando gesendet wird, kodiert wird. Das eigentliche Kommando steckt im Datenfeld. Zu jeder Gerätefunktion existiert ein eigenes Kommando das in zwei mal acht Bits kodiert wird. Die Kodierung wird von der Firma ISEG auch als EDCP („Enhanced Device Control Protocol“) bezeichnet. Fließkommazahlen, wie die gewünschte Spannung, werden in Hexadezimalschreibweise konvertiert und zusammen mit der Kanalzahl an die Kommando-Bits angehängt. In Labview gibt es schon fertige Unterprogramme um Informationen mit einem CAN-Interface auszutauschen. Damit ist ein Programm aufgebaut worden, dass es erlaubt vier Module in einem Überrahmen zu betreiben. Es ermöglicht die grundlegenden Funktionen wie die Einstellung von Spannungen an einzelnen Kanälen und Spannungsrampen zu kontrollieren, sowie die wesentlichen Statusparameter wie Gerätetemperatur und Güte der Versorgungsspannungen auszulesen.

5.4.2. Spannungsquellen für die Antipenningelektroden

Für die Antipenning Elektrode werden Spannungen bis zu 4 kV benötigt. Auch hierfür wurde ein Modul der Firma ISEG gewählt. Das NHQ 226-L ist ein NIM-Modul mit zwei Ausgangskanälen und in der Lage Spannungen bis zu 6 kV von positiver und negativer Polarität zu erzeugen. Es wird über eine RS-232 Schnittstelle angesteuert, kann aber, im Gegensatz zu den EHS Modulen, auch manuell bedient werden.

Diese Funktion ist für das KATRIN Experiment jedoch überflüssig, da aufgrund von Sicherheitsbestimmungen Niemand an die Geräte herankommt. Im Betrieb befindet sich der ganze Schrank auf Hochspannung. Es ist jedoch für Testaufbauten durchaus hilfreich wenn gerade kein PC zur Ansteuerung verfügbar ist.

Ein großer Vorteil an diesem Modul ist, dass es zwei separat einstellbare Kanäle gibt, sodass mit einem einzigen Modul beide Spannungen für die zwei Antipenningelektroden eingestellt werden können. Aus diesem Grund reicht ein Modul für den Hochspannungsschrank völlig



Abbildung 5.7.: **ISEG Modul NHQ 226-L.** Diese Abbildung zeigt das verwendete 6kV-Modul für die Antipenningelektroden. Auf der Vorderseite befinden sich die manuellen Kontrollen sowie der Umschalter für die RS-232 Schnittstelle. Mit einem Drehregler auf der linken Außenseite kann zwischen positiver und negativer Polarität gewählt werden. Das Display ermöglicht die eingestellte Spannung abzulesen. Die Ausgänge befinden sich auf der Rückseite.

aus. Da sich dieses Modul auf einem anderen Potenzial befindet wird ein optischer Umsetzer (Moxa TCF-90M/S) benötigt, um eine Kontrolle mit dem PXI-System zu ermöglichen.

5.4.3. Spannungsquellen für den Dipolmodus

Wie schon in der Einleitung beschrieben, wird im Dipolmodus die eine Spektrometerhälfte gegenüber der Anderen um eine Spannungsdifferenz in der Größenordnung von $U_{Dipol} = 1000\text{ V}$ verschoben. Um diesen Dipolmodus zu realisieren muss die Spannungsdifferenz allerdings blitzschnell zugeschaltet werden. Im Konzept ist vorgesehen ein 1kV-Netzgerät zu verwenden und es mit über einen Schalter mit der Erde der isolierten Box zu verbinden 5.1. Das Netzgerät würde auf $U_{Dipol} = 1000\text{ V}$ voreingestellt und dann im Dipolmodus mit dem Schalter zugeschaltet um das ganze Potenzial der isolierten Box um diesen Spannungswert zu verschieben. Dadurch werden Effekte durch das Hochfahren der Spannung vermieden und die Spannung würde quasi sofort anliegen.

5.5. Kontroll- und Messelektronik

Wie eben beschrieben wurde, werden die Spannungsquellen über verschiedene Schnittstellen angesteuert. Um also die Geräte bedienen zu können, sowie zur Auslese von Statusmeldungen der Komponenten wird ein Kontrollsysteem benötigt. Außerdem sollen die erzeugten Spannungen mit einem Messsystem überwacht und für die Auswertung aufgezeichnet werden. Für diese Zwecke wurde ein PXI System der Firma National Instruments angeschafft. Dieses System besteht aus mehreren Komponenten:

- Gehäuse mit Controller
- $7\frac{1}{2}$ -Stellen Multimeter
- Multiplexer
- CAN-Schnittstellenkarte
- Oszilloskop

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten und ihr Zweck erläutert.

5.5.1. Gehäuse und Controller

PXI („PCI eXtensions for Instrumentation“) ist eine Erweiterung des PCI-Standards. Es ist ein standardisiertes Bussystem das für Mess- und Automatisierungsverfahren benutzt wird. Es besteht im wesentlichen aus einem Gehäuse und einzelnen Steckkarte die unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

Für den Hochspannungsschrank wurde ein Gehäuse der Firma National Instruments ange schafft, Typ PXI 1036-DC. Dieses Gehäuse hat neben den Steckplatz für den Kontroller noch sechs zusätzliche Steckplätze.

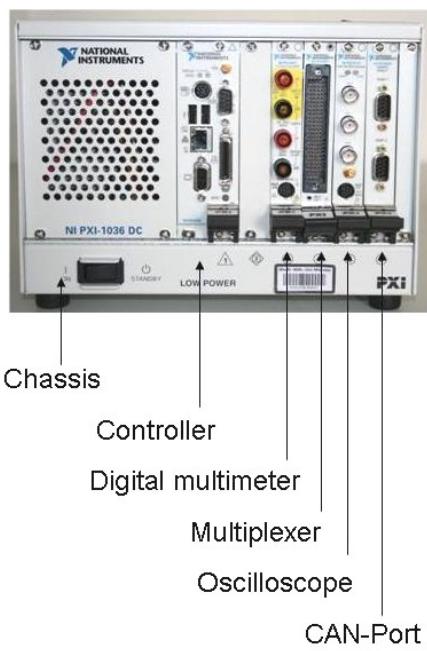


Abbildung 5.8.: **PXI-System.** Diese Abbildung zeigt das komplette PXI System wie es in einer Dipolhälfte zum Einsatz kommen wird.

Das Besondere an dem Gehäuse besteht in der Möglichkeit der Gleichspannungversorgung. Neben einem herkömmlichen 230 V Wechselspannungsanschluss gibt es eine Anschlussmöglichkeit für Niedervolt Gleichspannungsversorgung im Bereich von 11 V bis 30 V. Als Controller dient ein PXI-8183 RT Embedded Controller. Dabei handelt es sich im Prinzip um einen Computer mit einem 850 MHz-Prozessor und 512MB RAM. Der Kontroller ist mit verschiedenen Schnittstellen, wie Ethernet, USB oder Seriell (u.A.) ausgestattet. Als Betriebssystem wird Labview-Realtime von NI verwendet, was eine einfachen Bedienung des Systems über ein Netzwerk mit einer Labview-Realtime Software ermöglicht.

5.5.2. Das Digital-Multimeter

Bei dem Digitalmultimeter handelt es sich um ein sogenantes 7½-Stellen FlexDMM der Firma National Instruments, Typ PXI-4071. Es ermöglicht eine Auflösung von $7\frac{1}{2}$ Stellen

(26 Bit) in einem Spannungsbereich bis 1000 V. Die Auflösung ist Abhängigkeit vom eingestellten Bereich und variiert zwischen 10 nV im kleinsten Messbereich von 100 mV bis 100 μ V im 1000 V Messbereich. Weitere Bereiche sind die 1 V, 10 V und 100 V Bereiche die sich durch unterschiedliche Auflösungen, Eingangswiderstände und Stabilität auszeichnen. Die Eigenchaften wie Stabilität, Reproduzierbarkeit und Temperaturabhängigkeit werden im Kapitel 6 zu den Testmessungen erläutert.



Abbildung 5.9.: **Digitalmultimeter NI PXI 4071**

Hier ist eine Abbildung der Multimeter Steckkarte zu sehen. An der Vorderseite befinden sich die Anschlüsse für die Messleitungen. Die zwei Oberen sind für die Spannungsmessung relevant [DMM40]

Das FlexDMM arbeitet mit einem sogenannten FlexADC-Wandler. Dabei wird ein Sigma-Delta-Wandler mit einem hochgeschwindigkeits-ADC kombiniert. Beim Sigma-Delta-Wandler handelt es sich um eine Schaltung bei dem ein Eingangssignal zunächst grob vermessen (Quantisiert) und durch Integration des Messfehlers und Anwendung einer Gegenkopplung korrigiert wird. Aus dieser Kombination erreicht das FlexDMM bei niedrigen Geschwindigkeiten eine gute Linearität und geringes Rauschen (aufgrund der Sigma-Delta-Schaltung), während bei hohen Geschwindigkeiten durch die Kombination mit einem A/D-Wandler eine Digitalisierung bei kontinuierlicher Abtastung gewährleistet wird [Arc09]. Die Messrate ist abhängig von der Auflösung und variiert zwischen 7 S/s bei voller Auflösung bis zu 10 kS/s bei der kleinsten Auflösung. Das DMM verwendet onboard Spannungsreferenzen, die aufgrund ihrer thermischen Isolierung einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten von 0,3 ppm/ $^{\circ}$ C. Die Langzeitstabilität ist abhängig von dem Messbereich, der Nutzungsduer und der Verwendung der Selbstkalibrierfunktion. Im 1000 V-Messbereich liegt sie bei etwa ± 20 ppm für zwei Jahre in einem Temperaturbereich von 18°C bis 28°C. Ein Auszug aus dem Datenblatt ist im Kapitel 6.1.1 zu den Testmessungen mit dem Multimeter zu finden. Dort werden auch die ermittelten Werte mit den Angaben von National Instruments verglichen.

5.5.3. Der Multiplexer

Um jetzt alle 22 Kanäle für die Drahtelektrode auszulesen wird das Digitalmultimeter mit einem sogenannten Multiplexer verbunden. Dabei handelt es sich um ein System aus Relais, wobei eine Verbindung zwischen beliebigen Kanälen hergestellt werden kann. In diesem Fall wird ein PXI-2527 verwendet. Dabei handelt es sich um einen Multiplexer mit 64x1 Kanälen, bzw. 32x2 und 16x4 Kanälen. Die Konfiguration lässt sich je nach verwendetem Modus ändern. Mit 64x1 Kanälen können 64 Kanäle auf einen einzelnen Referenzkanal aufgeschaltet



Abbildung 5.10.: **Multiplexer NI PXI 2527.** Hier ist eine Abbildung der Multiplexer-Steckkarte zu sehen. An der Vorderseite wird der Anschlussblock befestigt, der die Messleitungen mit dem Relaissystem verbindet.[Mul25]

werden. Mit der 32x2 Konfiguration können 32 unterschiedliche Zweidrahtmessungen durchgeführt werden. Und mit der 16x4 Konfiguration lassen sich entsprechend Vierdrahtmessungen aufbauen, z.B. für die Auslese von Temperatursensoren. Für das KATRIN Experiment ist die 64x1 Konfiguration interessant, da hiermit die Spannung an jedem einzelnen Kanal mit einer Eindrahtmessung bezüglich der gemeinsamen Erdung bestimmt werden kann.

Der Multiplexer ist für Spannungen bis zu 300 V ausgelegt. Hier liegt auch einer der Hauptgründe für die Begrenzung der ISEG-Module auf 300 V. Höhere Spannungen würden den Multiplexer beschädigen. Das nachfolgende Multimeter kann bis zu 1000 V problemlos messen.

Dieser Multiplexer wird nun mit dem Multimeter verbunden, dazu wird ein Adapter benötigt, der den Übergang zwischen der gewöhnlichen Messleitung und den Schaltrelais des Multiplexers herstellt. Dazu wird ein sogenannter Terminalblock, Typ PXI-TB 2627 verwendet. In seinem Inneren befinden sich Schraubklemmen an denen die Messleitungen und die Zuführung von den Spannungsquellen angebracht werden können.

5.5.4. Das Oszilloskop

Neben der Kenntnis der genauen Spannung ist es von enormer Wichtigkeit die Stabilität überprüfen zu können. Genauer gesagt ist das Rauschen einzelner Kanäle von großem Interesse. Um ein solches Rauschen sichtbar zu machen ist in das PXI System ein Oszilloskop eingesetzt worden.

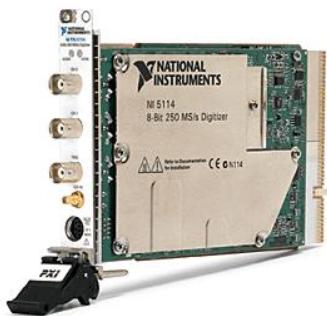


Abbildung 5.11.: **Oszilloskop NI PXI 5114** Hier ist eine Abbildung des verwendeten Oszilloskops zu sehen. An der Vorderseite können zwei Signalleitung über zwei BNC-Buchsen betrachtet werden. An der dritten Buchse lässt sich ein Triggersignal anlegen [Osz51].

In Verbindung mit einem Kanal auf dem Multiplexer ist es möglich alle Kanäle der ISEG Module auf Störungen hin zu untersuchen. Als Oszilloskop ist eine PXI Steckkarte vom Typ PXI-5114 angeschafft worden. Die Bandbreite umfasst 125 MHz bei einer maximal zulässigen Spannung von 40 V peak to peak. Es können dabei zwei Kanäle gleichzeitig ausgelesen werden.

5.5.5. Die CAN-Schnittstelle

Wie schon beschrieben, werden die ISEG Hochspannungsmodule für die Drahtelektrode über einen CAN-Bus (controler area network) angesteuert. Diese Art von Bus ist nicht in dem Kontroller implementiert, sodass eine zusätzliche Schnittstellenkarte eingesetzt werden musste, Typ NI PXI-8464/2 Series 2 von National Instruments. Diese Modul verfügt über zwei Schnittstellen, sodass im Falle einer Beschädigung von einem Kanal noch ein Reservekanal zur Verfügung steht.

Abbildung 5.12.: CAN-Schnittstelle NI PXI

8464. Hier ist eine Abbildung der CAN-Schnittstellenkarte zu sehen. An der Vorderseite sind die beiden Kanäle zu erkennen. Der Anschluss wird mit einem neunpoligen Sub-D Stecker hergestellt [CAN25].



Das Modul ist in der Lage die Datenrate im Highspeed oder Lowspeed Modus zu übertragen. Die gewünschte Übertragungsgeschwindigkeit lässt sich über die Software einstellen und ist Abhängig von den Kommunikationsfähigkeiten der angeschlossenen Geräte. Die ISEG Hochspannungsmodule werden im Lowspeed-Modus angesteuert, das führt zu einer Datengeschwindigkeit von 125 kB/s. Die Einzelheiten zur CAN Ansteuerung ist bereits in Abschnitt 5.4.1 beschrieben worden.

5.6. Das Patchpanel

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Problem der Verbindung zwischen den Hochspannungsnetzteilen und den Drahtelektroden. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der Verschaltung. Die Erste besteht darin eine Festverdrahtung vorzunehmen, sodass jedem Kanal der HV-Module genau ein Segment der Drahtelektrode zugeordnet wird. Eine zweite Möglichkeit besteht darin ein Verbindungselement zu konstruieren, sodass verschiedene Segmente mit unterschiedlichen Kanälen betrieben werden können. Der große Vorteil ist dabei, das man die Flexibilität gewinnt verschiedenen Segmente mit dem gleichen Kanal anzusteuern.

Es stellt sich natürlich die Frage nach dem Grund für die Notwendigkeit dieser Art von Flexibilität. In der Testphase und auch später im KATRIN Messbetrieb kann es sein, dass es einzelne Segmente der Drahtelektrode gibt, die mit identischen Spannungen versorgt werden sollen. Bei einer Festverdrahtung hat man nur bedingt die Möglichkeit auf verschiedene Segmente das identische Potenzial zu erzeugen. Es wird stets eine, wenn auch geringe, Differenz zwischen den einzelnen Kanälen geben, die sich nicht verhindern lässt. Um diese Differenzen zu vermeiden, ist es von Vorteil wenn man die gewünschten Segmente an einen einzelnen Kanal betreiben könnte. Aus diesem Grund wurde beschlossen einen Verteiler zu konstruieren der eine derartige Verschaltung ermöglicht, das sogenannte Patchpanel.

5.6.1. Elektrisches und Mechanisches Design

Das Design sieht eine Matrixform vor bei der die unterschiedlichen Zeilen für verschiedenen Kanäle an den Netzgeräten stehen. Jede Spalte entspricht dann einem Segment der Drahtelektrode die man wahlweise mit unterschiedlichen Zeilen verbinden kann. In der obersten Zeile werden die Kontakte zu den Elektroden fest verarbeitet. An einem Kabel wird jetzt ein Audiostecker befestigt und in einer quadratischen Matrix die aus den entsprechenden Buchsen aufgespannt ist, stellt die Verbindung zur Hochspannung her. Jede Zeile der Matrix ist mit einem Kanal der Hochspannungsmodule verdrahtet. Mit einem Stecker kann nun immer ein Kanal mit einer Elektrode verbunden werden. Dadurch bleibt die Flexibilität erhalten, sodass man in der Lage ist verschiedene Segmente mit unterschiedlichen oder identischen Spannungen zu versorgen. Gleichzeitig minimiert man die Gefahr von unbeabsichtigten Kurzschlüssen zwischen zwei HV-Ausgängen, da es nur ein offenes Kabelende gibt.

Ein Nachteil dabei ist die große Menge von 23 Kabeln die im Prinzip in eine beliebige Buchse gesteckt werden kann, von denen es ganze 529 Stück gibt. Das führt unausweichlich zu einem übersichtlichem Bund an Kabeln. Für das Experiment ist es später wichtig zu wissen, welches Segment mit welchem Kanal verbunden ist. Dies soll auch festgestellt werden können, falls der Schrank im Messbetrieb nicht geöffnet werden kann.

Um also die Übersicht zu behalten und später eine Kontrollmöglichkeit zu besitzen wird es drei Sicherungssysteme geben.

- mechanische Sicherung
- elektrischer Interlock
- elektrische Abfrage der Steckverbindungen

Zunächst einmal ist es, aufgrund der Matrixform, leicht jeder Elektrode, also jedem Kabel, eine Spalte zuzuordnen. Der Übersichtlichkeit halber sollen die Stecker nur so gesetzt werden, dass sie in ihrer eigenen Spalte bleiben. Um dieses zu gewährleisten sollten in einer ersten Überlegung zwischen den einzelnen Spalten kleine Stege eingezogen werden die als eine Art Kabelführung dienen sollten. Diese Art der Konstruktion stellte sich als unvorteilhaft heraus, sowohl in der Konstruktion als auch in der späteren Montage und Bedienung.

Es wurde dann die Möglichkeit diskutiert eine farbliche Kodierung der einzelnen Spalten einzuführen. Jede Spalte sollte eine zugehörige Farbe erhalten, die mit der Farbe von Kabel und

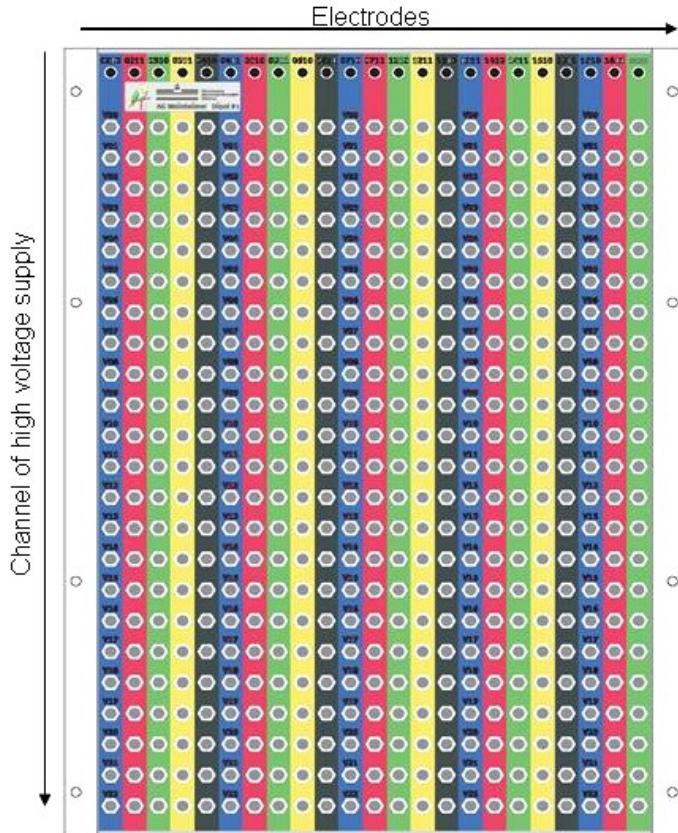


Abbildung 5.13.: **Das Patchpanel.** In dieser Abbildung ist der endgültige Entwurf für das Patchpanel zu sehen. Die Idee und das Design sind von Norbert Heine, elektronische Werkstatt, Institut für Kernphysik [Hei09].

Stecker übereinstimmen sollte. Auf diese Weise hätte man eine optische Kontrollmöglichkeit. Das Ergebnis der Überlegungen ist in Abbildung 5.13 zu sehen.

An der Oberseite sieht man, leicht abgesetzt, die Anschlüsse zu den Elektroden. In der quadratischen Matrix darunter ist jede Zeile mit einem Kanal der Hochspannungsquellen verbunden. Die Farbkodierung wechselt von Spalte zu Spalte, wobei insgesamt fünf verschiedene Farben verwendet werden. Dies ist bedingt durch die begrenzte Zahl an unterschiedlichen Kabelfarben die beschafft werden konnten. Bei den Kabeln wurde darauf geachtet, dass die Ummantelung aus Halogenfreien Material hergestellt wurden, sodass sie den Brandschutzverordnungen genügen. Somit gibt es mehrere blauen Spalten, die aber niemals nebeneinander liegen. Sollte man eine nicht erlaubte Steckverbindung aufbauen muss man unweigerlich andere Farben kreuzen.

Nun ist die farbliche Kodierung nur ein Hilfsmittel das Patchpanel übersichtlicher zu gestalten. Es soll aber auch eine Möglichkeit geben die Konfiguration der Stecker im geschlossenen Schrank zu überprüfen.

Dies wird erreicht, indem zwischen den freien Lötösen der Buchsen für jede Spalte eine Widerstandskette aus Drahtwiderständen gespannt wird. Ist ein Stecker gesetzt, führt dies zu einem Bruch der Kette. Durch Bestimmung des Widerstandswertes lässt sich damit auch die Positionierung bestimmen. Sollte ein Stecker keinen guten Kontakt haben verhindert ein Interlock-Signal das anlegen der Hochspannung.

Die Hochspannungen gelangen dann vom Patchpanel auf eine Schutzschaltung. Diese dient dazu die Geräte vor Spannungsspitzen aus dem Spektrometer zu schützen. Im wesentlichen besteht die Schutzschaltung aus einem Tiefpassfilter und einem Spannungsabhängigen Widerstand, welcher Spannungsüberhöhungen gegen die Spektrometererde abführt. Eine Prinzipskizze ist im Anhang zu finden, die genaue Dimensionierung ist zur Zeit Gegenstand von Diskussionen. Für jeden Kanal wird es diese Schutzschaltung geben. An dieser Stelle schließt sich das Hochspannungskabel an, dass die Spannung zu den Vakuumports des Hauptspektrometers führt.

5.7. Energieversorgung der elektronischen Komponenten

Im Prinzip braucht man zwei Arten von Versorgungsnetzgeräten, zum einen müssen die Komponenten versorgt werden die auf Tankpotential liegen, wie die Schranklüftung, Antipenning- und Dipolspannungsquellen. Auf der anderen Seite müssen aber auch die Geräte die sich in

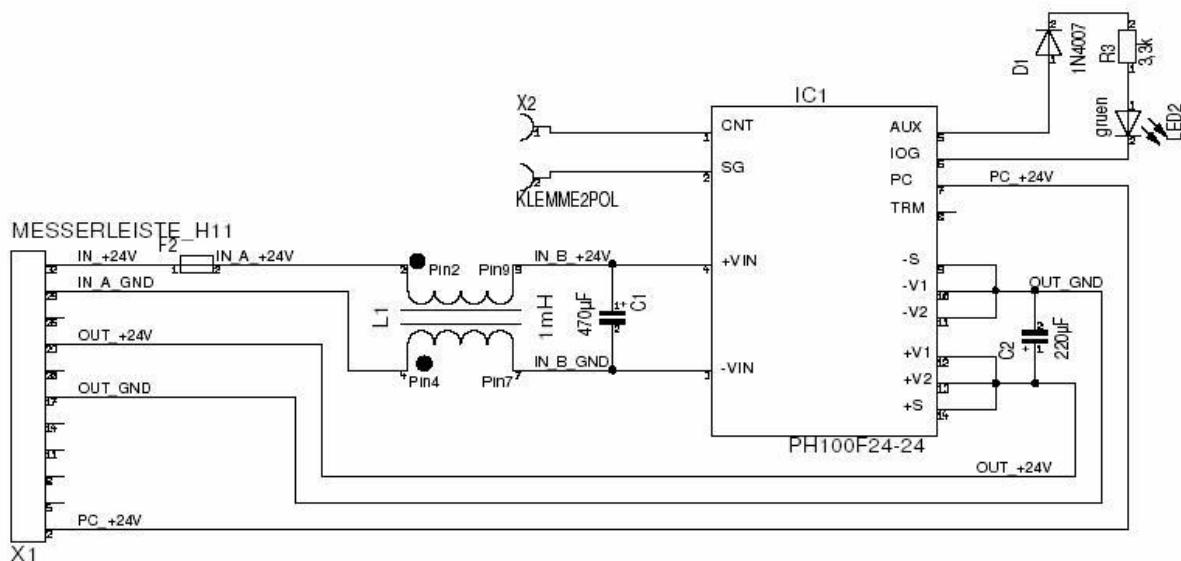


Abbildung 5.14.: Die Versorgungsschaltung der isolierten Box. In dieser Abbildung ist Aufbau für die Versorgung der Komponenten in der isolierten Box gezeigt. Kernkomponente ist der DC/DC-Wandler. Mit diesem Bauteil lässt sich die 24 V-Versorgungsspannung auf das höhere Potenzial innerhalb der Box übertragen [Kol09].

der isolierten Box befinden an eine Stromversorgung angeschlossen werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass diese Geräte auf einem anderen Grundpotenzial liegen.

Die Schrankbelüftung ist die einzige Komponente die mit 230 V_{AC} Wechselspannung betrieben wird, die auch standardmäßig keine Möglichkeit der Gleichspannungsversorgung besitzt.

An dieser Stelle bleibt die Frage offen ob die 230 V-Versorgung der Lüftung einen schädlichen Wechselspannungsanteil auf das Gehäuse des Hochspannungsschranks überträgt.

Die Komponenten die auf Tankpotenzial liegen werden von Außen mit hochgelegten Netzgeräten die am 230 V-Netz hängen versorgt. Eines dieser Netzgeräte liefert ebenfalls eine Spannung von $U_{Versorgung} = 24 \text{ V}$ die für die Versorgung der Komponenten in der isolierten Box benutzt werden. Von den Komponenten innerhalb der Box sind die ISEG-Module auf



Abbildung 5.15.: **Modul für die 24 V-Versorgung.** Dieser Abbildung zeigt ein Modul, wie es für die 24 V-Versorgung aufgebaut wurde

präzise Versorgungsspannungen angewiesen (Abschnitt 5.4.1). Es müssen also 24 V und 5 V äußerst genau und stabil erzeugt werden. Das PXI-System und die Mediakonverter können Versorgungsspannungen in einem breiten Spannungsbereich aufnehmen und sind mit 24 V gut zu betreiben. Die Versorgung geschieht über eine DC/DC-Wandlerschaltung, welche die Versorgungsspannung auf ein höheres Grundpotenzial umwandeln kann. Die entsprechende Schaltung ist in Abbildung 5.7 zu sehen. Kernstück dieser Schaltung ist der DC/DC-Wandler,

Abbildung 5.16.: **Überrahmen für die DC/DC-Module.** Diese Abbildung zeigt den Überrahmen mit drei Modulen für die 24 V-Versorgung ein einem Modul für die 5V-Versorgung. Im funktionsfähigen Zustand leuchten die grünen LEDs auf.



Typ PH100F24-24. Mit diesem Element lässt sich die 24 V die auf Tankpotenzial liegt verwenden um 24 V für die isolierte Box zu erhalten. Dies ist möglich, da die Ein- und Ausgänge galvanisch getrennt sind und auf eine Potenzialdifferenz von 1000 V ausgelegt sind. Die übrigen Komponenten wie die Induktivität L1 oder die Kondensatoren dienen der Reduktion von Störungen. Der Aufbau erfolgt Modular. In Abbildung 5.15 ist ein Beispiel für ein Modul gezeigt. Jedes Modul erreicht eine Leistung von etwa 100 W.

Nach der Abschätzung der Leistungsaufnahme benötigt man mindestens drei Module um die Komponenten zu versorgen. Diese werden parallel geschaltet und erlauben noch eine Erweiterung falls sie benötigt wird.

Eine ähnliche Schaltung ist für die 5V-Versorgung aufgebaut worden. Da nur der Steuerschaltkreis des ISEG Moduls auf 5 V ausgelegt ist, wird aufgrund der geringen Leistungsaufnahme nur ein Modul benötigt. In Abbildung 5.16 und 5.17 ist jeweils der Überrahmen für die Einschübe gezeigt.



Abbildung 5.17.: **Anschlussklemmen der DC/DC-Module**
Diese Abbildung zeigt die Anschlussklemmen für die Spannungsein- und Ausgänge.

An der Vorderseite sind die Status-LED zu erkennen, wie sie auch im Schaltplan angegeben sind. An der Rückseite sind die Klemmen für die 24 V-Zuführung und die Ausgangsklemmen, die mit den Geräten in der isolierten Box verbunden sein wird. Dabei wird der 0 V-Ausgang mit dem Potenzial verbunden auf dem sich auch die isolierte Box befindet.

6. Testmessungen am Hochspannungsschrank

In diesem Kapitel sollen die Testmessungen erläutert werden die an den Komponenten des Schrankes durchgeführt wurden. Dazu zählen zunächst die Messungen zur Stabilität und Temperaturabhängigkeit der Spannungsmessung. Es werden sowohl das Multimeter als auch die Kombination aus Multimeter und Multiplexer mit verschiedenen Spannungen vermessen und die ermittelten Kennzahlen mit den Angaben im Datenblatt verglichen. Außerdem wird in diesem Kapitel die Spannungsfestigkeit der isolierten Box und die Charakteristika der DC/DC-Versorgungsmodule überprüft.

6.1. Testmessungen mit dem Digitalmultimeter und dem Multiplexer

Wie bereits beschrieben ist die Güte der einzelnen Spannungen von enormer Bedeutung für die Formung des elektrischen Feldes. Um diese Parameter nun exakt bestimmen zu können ist es notwendig die Charakteristika der Messelektronik zu ermitteln. In diesem Fall sind die Hauptkomponenten der Spannungsmessung das Digitalmultimeter und der Multiplexer. Es wurden nun Testmessungen mit beiden Geräten durchgeführt um die Genauigkeit der Spannungsmessung zu überprüfen.

6.1.1. Testmessungen mit dem Multimeter

In diesem Abschnitt werden die Methoden erläutert mit denen die Stabilität und die Temperaturabhängigkeit des PXI-4071 Digitalmultimeters ermittelt wurden.

Range	Resolution	24-Hour	90-Day	2-Year	Tempco/K	Tempco/K
		$T_{Cal} \pm 1^\circ\text{C}$	18 to 28°C	18 to 28°C	0 to 55°C	0 to 55°C
100mV	10nV	5+4	18+7	20+8	3+2	0,3+1
1V	100nV	4+0,8	13+0,8	15+0,8	2+0,2	0,3+0,1
10V	1 μ V	2+0,5	9+0,5	12+0,5	0,3+0,02	0,3+0,01
100V	10 μ V	5+2	18+2	20+2	4+0,2	0,3+0,1
1000V	100 μ	4+0,5	18+0,5	20+0,5	3+0,02	0,3+0,01

Tabelle 6.1.: Spezifikation des PXI DMM 4071 (DC Spannungsmessung \pm (ppm of reading + ppm of range)). Diese Tabelle zeigt einen Auszug aus dem Datenblatt des PXI 4071. Es sind die Genauigkeit über mehrere Zeiträume in ppm (part per million) angegeben, sowie der Temperaturkoeffizient mit und ohne durchgeführter Selbstkalibrierung [DMM40].

Wie schon im Auszug von dem Datenblatt in Tabelle 6.1 zu erkennen ist, unterscheiden sich die Messbereiche in den Genauigkeiten und ihren Unsicherheiten. Generell ist nur der 1000 V Messbereich für das KATRIN Experiment interessant, da für die Drahtelektrode Spannungen bis zu 300 V gemessen werden sollen. Der 10 V-Messbereich ist laut Datenblatt

äußerst stabil und lässt sich mit einer $10 V_{DC}$ -Referenz gerade noch kalibrieren. An diesen beiden Messbereichen sollen nun die Charakteristika des Multimeters überprüft werden.

Der Messwert muss natürlich wie bei jedem anderen Multimeter auch um den Offset und die Verstärkung mit den genannten Methoden korrigiert werden. Im Folgenden wurden diese Korrekturen nicht gemacht um zu Veranschaulichen wie sich die Messwerte ohne Korrektur von dem wahren Wert unterscheiden. Die beiden Spannungsbereichen zeigen nämlich ein völlig unterschiedliches Verhalten. Im Folgenden wird die Gesamtheit aus Offset und Verstärkung als Abweichung zum wahren Wert bezeichnet.

Zur Bestimmung der Stabilität wurde das Multimeter an eine $10 V_{DC}$ -Standard Referenz (Fluke 732A) angeschlossen. Mit einem Handmultimeter ist die Masseverbindung zwischen PXI System und der Referenz überprüft worden. Es wurden dann über einen Zeitraum von über 16 Stunden in einem Intervall von 300 s Messwerte aufgezeichnet, wobei die Raumtemperatur bis auf Schwankungen von etwa $1,4^{\circ}\text{C}$ konstant blieb. Um eventuelle Schwankungen in der Spannungsquelle aufzuzeichnen wurde ein zweites Digitalmultimeter ein Agilent 3458A angeschlossen, welches die Spannung separat misst.

Zunächst wurde eine Messung mit dem 10 V-Messbereich des PXI-4071 durchgeführt.

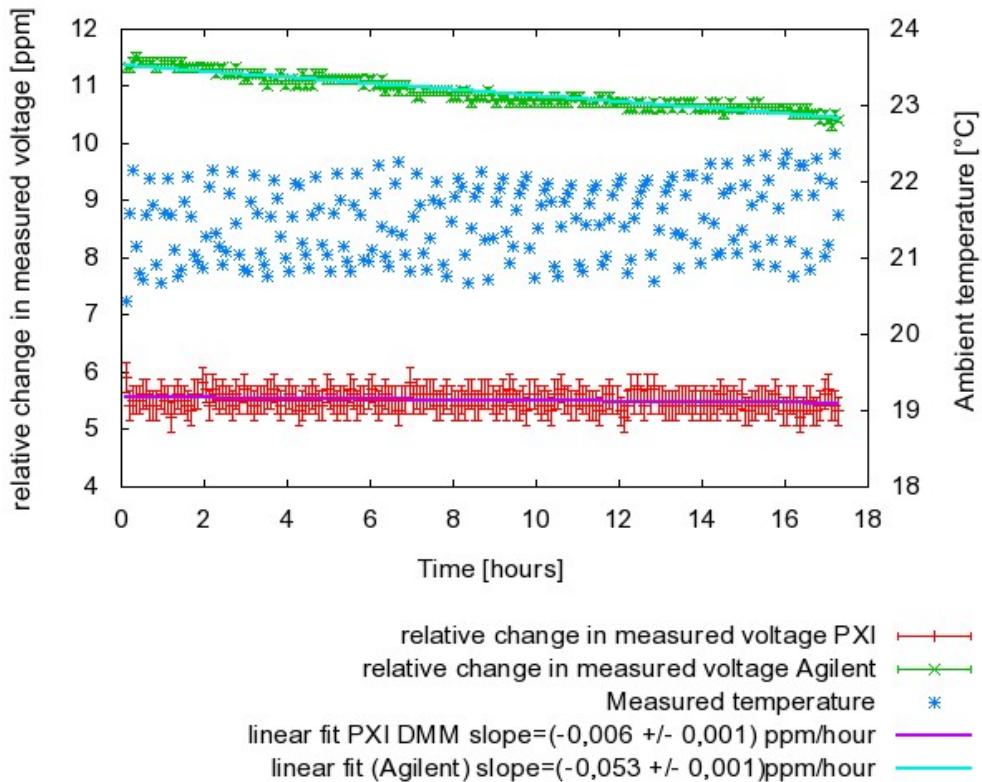


Abbildung 6.1.: **Stabilität des PXI-4071 (10 V-Messbereich).** Hier wurden die gemessenen Spannungen des PXI-4071 und des Agilent 3458A als Funktion der zeit aufgetragen. Außerdem ist die Änderung der Umgebungstemperatur über die Zeit eingezeichnet.

Mit den 8 1/2 Stellen und einer Genauigkeit von 0,55 ppm in 24 Stunden im 10V-Messbereich ist es um etwa einen Faktor 4,5 besser als das PXI-DMM und daher als Referenzmultimeter gut geeignet. Im 1000 V Messbereich erreicht es in 24 Stunden eine Genauigkeit von 2,6 ppm und ist damit immer noch um einen Faktor 1,7 besser.

Der Mittelwert wurde errechnet zu $U_{mittel} = 10,000067 \text{ V} \pm 0,1 \text{ ppm}$ der statistische Fehler entspricht einer Standardabweichung von $\sigma = 0,1 \text{ ppm}$. Das entspricht einer Spannungsabweichung von $1,2 \mu\text{V}$. Für eine Messdauer von 24 Stunden gibt das Datenblatt eine Genauigkeit von 2,5 ppm im 10 V-Messbereich an. Wie man sieht ist der 10 V-Messbereich äußerst stabil. Es bleibt jedoch eine Abweichung von 5,5 ppm zu dem Absolutwert der Spannungsreferenz zu berücksichtigen die aus der Nichtkorrektur von Offset und Verstärkung herrühren. Dies entspricht einer Spannung von $55 \mu\text{V}$.

Im Anschluss wird nun der 1000 V-Messbereich mit den gleichen Methoden untersucht. Hier wurden zunächst ebenfalls 10 V angelegt.

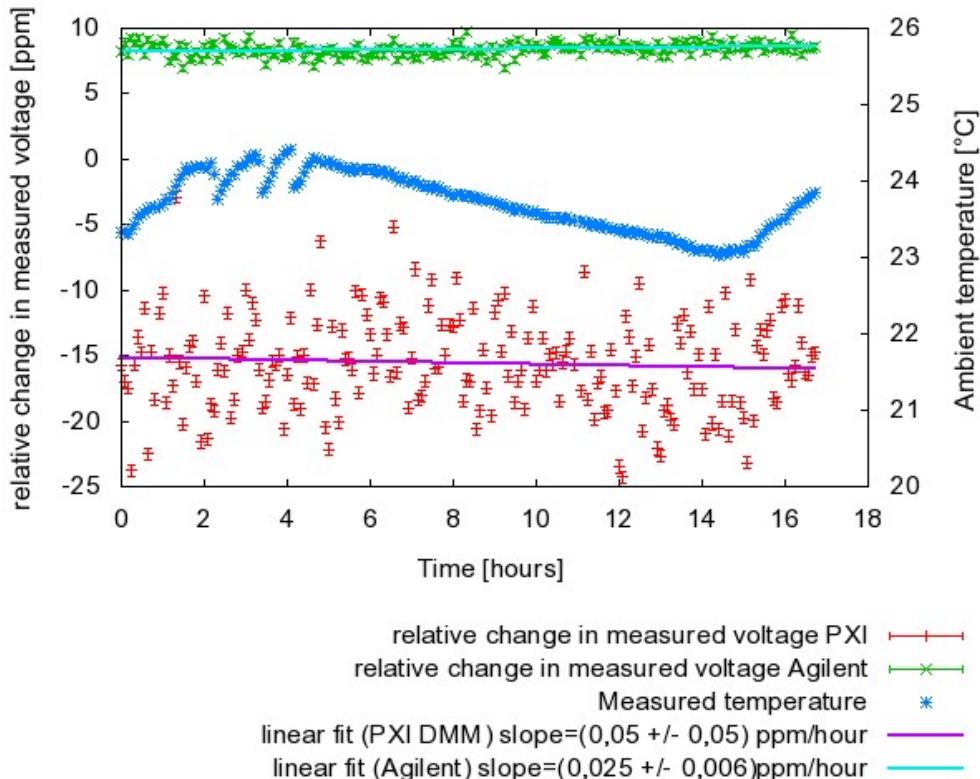


Abbildung 6.2.: **Stabilität des PXI-4071 (1000 V-Messbereich).** Hier wurden die gemessenen Spannungen des PXI-4071 und des Agilent 3458A als Funktion der Zeit aufgetragen. Außerdem ist die Änderung der Umgebungstemperatur über die Zeit eingezeichnet. Die angelegte Spannung betrug 10 V

Das Ergebnis ist in Abbildung 6.1.1 zu sehen. Der Mittelwert wurde errechnet zu $U_{mittel} = 9,999856 \pm 3,6 \text{ ppm}$ (Standardabweichung von $\sigma = 3,6 \text{ ppm}$), was zu einer Spannungsabweichung von $36 \mu\text{V}$ führt. Das Datenblatt gibt eine Genauigkeit von 4,5 ppm im 1000 V Messbereich an. Die gemessenen Werte befinden sich also innerhalb dieser Grenzen. Die Abweichung

im 1000 V-Messbereich beträgt -15,6 ppm zu dem Absolutwert der Spannungsreferenz. Dies entspricht einer Spannung von 156 μ V.

Man erkennt auch im Vergleich zum Graph 6.1.1, dass im 1000 V-Messbereich die Abweichung zum Referenzwert deutlich Größer sind und vor allem negativ. Hierbei erkennt man deutlich, dass eine Korrektur von Offset und Verstärkung immer vorgenommen werden muss, selbst wenn es sich um die verschiedenen Messbereiche desselben Gerätes handelt.

Als nächstes sollte ermittelt werden, wie das Multimeter auf schwankende Aussentemperaturen reagiert. Dazu wurde wieder die obige Schaltung verwendet, wobei der gesamte Raum mit der Klimaanlage herunter gekühlt wurde. Das PXI System mit dem Multimeter stand frei im Raum mit einem PT-100 Temperatursensor in der Nähe. Der Sensor wurde mit einem Agilent Multiplexer, Typ 34970A ausgelesen.

Das Referenzmultimeter und die 10V-Referenz sind in einem Messschrank eingebaut gewesen.

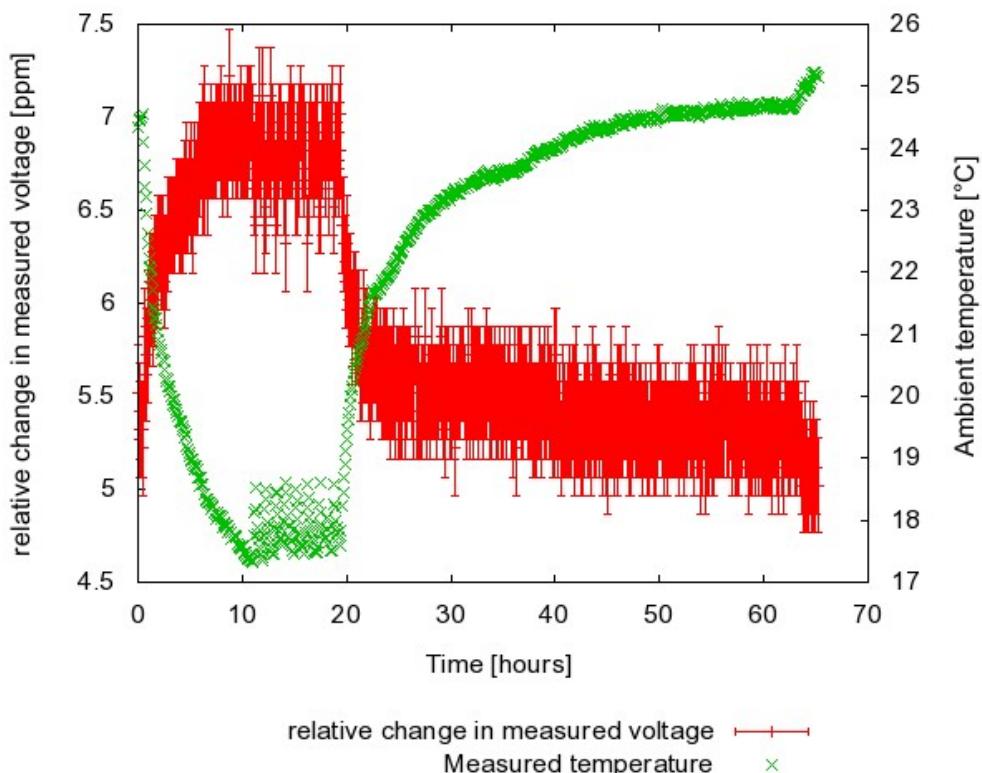


Abbildung 6.3.: Temperaturabhängigkeit des PXI-4071 im 10 V-Messbereich. In diesem Diagramm ist die Abhängigkeit der Spannungsmessung von der Raumtemperatur zu sehen.

Die Raumtemperatur wurde von 25°C auf etwa 17°C abgekühlt. Die gemessene Spannungen wurden mit dem Absolutwert der Referenz von $U_{ref} = 10,0000118 V$ verglichen und die Abweichung in ppm berechnet. Da die Temperaturkoeffizient der Referenz mit $\pm 0,05$ ppm/K um eine Größenordnung besser ist als der erwartete Temperaturkoeffizient des Multimeters, wird die Drift in der Spannungsquelle vernachlässigt.

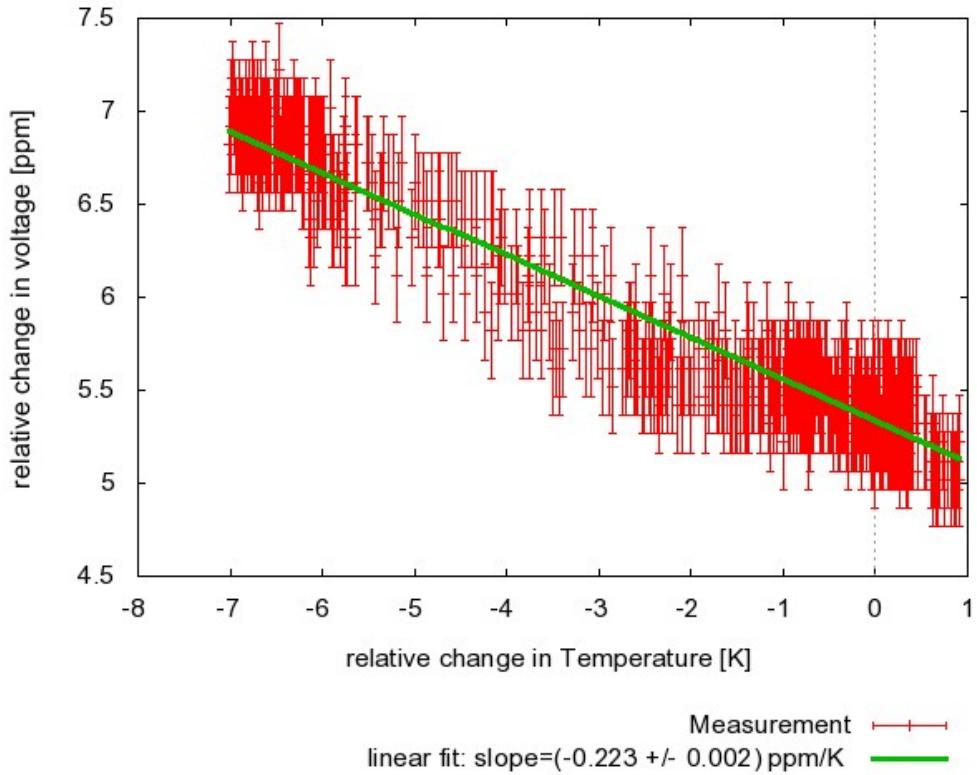


Abbildung 6.4.: **Bestimmung des Temperaturkoeffizient im 10 V-Messbereich.** In diesem Graph sind die relativen Änderungen von Spannung und Temperatur gegeneinander aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden entspricht dem Temperaturkoeffizienten des Multimeters.

$$\Delta U_{rel} = \frac{(U_{meas} - U_{ref}) \cdot 10^6}{U_{ref}} = [\text{ppm}] \quad (6.1.1)$$

Die Fehlerechnung beruht auf dem Gausschen Fehlerfortpflanzungsprinzip. Dabei gehen die Unsicherheiten des Multimeters und der Quelle mit ein:

$$\Delta u(U_{rel}) = \sqrt{\left(\frac{10^6}{U_{ref}} \cdot \Delta u_{PXI}\right)^2 + \left(\frac{U_{meas} \cdot 10^6}{U_{ref}^2} \cdot \Delta u_{Fluke732A}\right)^2} \quad (6.1.2)$$

Das Datenblatt gibt für die Referenz eine Unsicherheit von $\Delta u_{Fluke732A} = 3 \cdot 10^{-8}$. In Abbildung 6.1.1 sind der Temperaturverlauf und die relative Spannungsänderung für den 10 V-Messbereich als Funktion der Zeit aufgetragen worden.

Man erkennt hier zunächst qualitativ die Abhängigkeit von Temperatur und Spannungsmessung. Mit sinkender Temperatur steigt die Abweichung in der Spannungsmessung um etwa 2 ppm.

Zur Bestimmung des Temperaturkoeffizienten trägt man nun die relative Spannungsänderung als Funktion der Temperatur auf. Auch hier wurden relative Temperaturänderungen berechnet. Man erhält den Temperaturkoeffizienten als Steigung der Ausgleichsgeraden.

Es ergibt sich ein Temperaturkoeffizient von $(-0,223 \pm 0,002)$ ppm/K. Das Datenblatt gibt einen Wert von $(0,3 + 0,02)$ ppm/ $^{\circ}$ C vor. Es konnte also gezeigt werden, dass für den 10 V-Messbereich die Temperaturabhängigkeit die Angaben im Datenblatt übertreffen.

Für das KATRIN-Experiment ist der 10 V-Messbereich nicht ausreichend, sodass im Folgenden zusätzlich noch der 1000 V-Messbereich überprüft worden ist. Da jedoch Effekte im sub-ppm Bereich überprüft werden sollen, reicht bei Verwendung der 10 V-Referenz die Auflösung im 1000 V-Messbereich nicht aus. Aus diesem Grund werden mit dem Fluke Calibrator (Typ 5720A) eine Spannung von 300 V erzeugt, die mit den beiden Multimetern ausgemessen wurde.

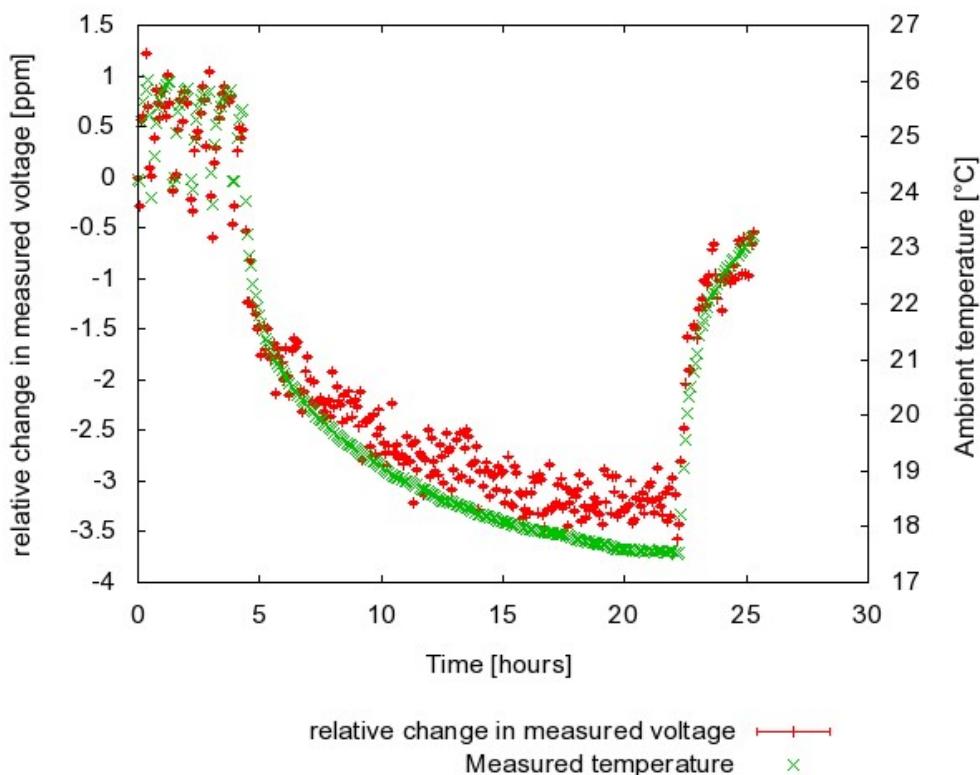


Abbildung 6.5.: **Relative Spannungsänderung in Abhängigkeit der Raumtemperatur im 1000 V-Messbereich.** Gezeigt ist die Änderung in der Spannungsmessung als Funktion der Zeit. Hier wurde der 1000 V-Messbereich verwendet bei 300 V angelegter Spannung.

Wie man in Abbildung 6.1.1 erkennt, wurde die Temperatur wieder in einem Bereich von etwa 25°C auf diesmal 18°C verändert. Auch hierbei ist die Temperaturabhängigkeit in der Spannungsmessung zu beobachten.

In Abbildung 6.1.1 ist die relative Spannungsänderung als Funktion der Temperatur aufgetragen.

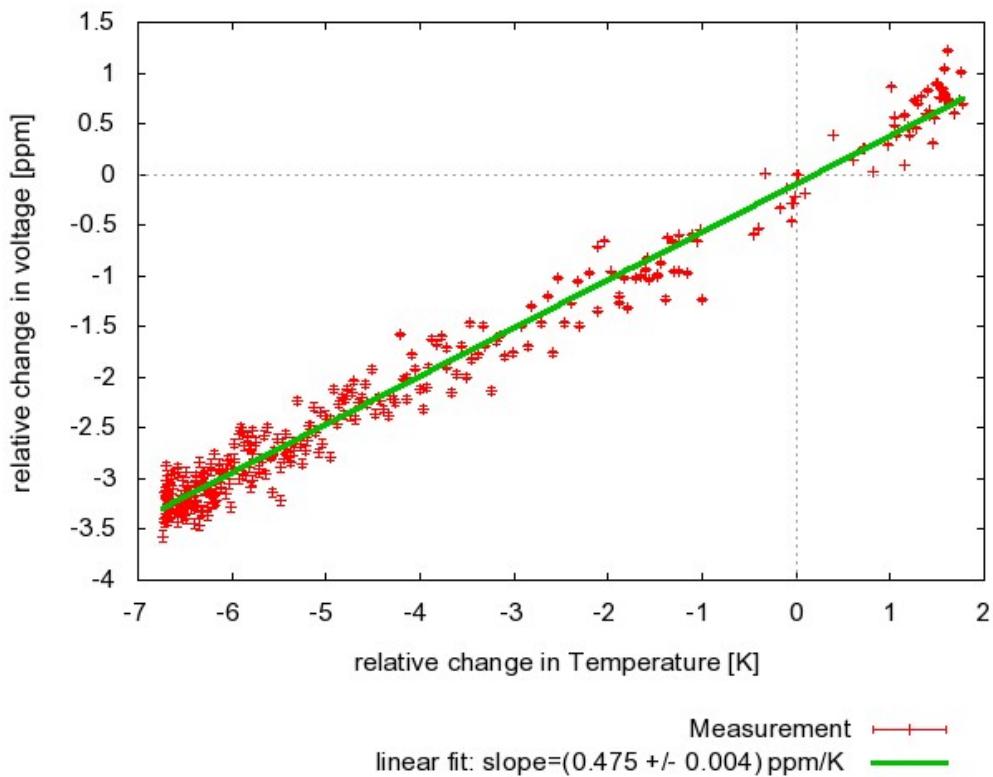


Abbildung 6.6.: Bestimmung des Temperaturkoeffizient im 1000 V-Messbereich.

Auch im 1000 V-Messbereich ist der Temperaturkoeffizient nach dem gleichen Prinzip bestimmt worden.

Der ermittelte Temperaturkoeffizient beträgt $(0,475 \pm 0,004)$ ppm/K. Das Datenblatt gibt einen Wert von $0,3+0,02$ ppm/K für alle Messbereiche nach verwendeter Selbstkalibrierung vor. Bei nicht verwendeter Selbstkalibrierung steigt der Wert auf $3+0,01$ ppm/K. In diesem Versuch muss man allerdings noch die Temperaturabhängigkeit der Spannungsquelle berücksichtigen. Das Datenblatt gibt für den Calibrator einen Temperaturkoeffizienten von $0,5$ ppm $+10 \mu$ V pro Kelvin vor in einem Temperaturbereich zwischen 10°C und 40°C . Damit ist die Drift in der Spannungserzeugung von der gleichen Größenordnung wie der Temperaturkoeffizient des Multimeters nach verwendeter Selbstkalibrierung.

In diesem Versuch konnte nur eine gemeinsame Temperaturabhängigkeit von Multimeter und Spannungsquelle ermittelt werden, da der Temperaturkoeffizient in der Spannungserzeugung nicht mehr vernachlässigt werden kann. Im ungünstigsten Fall sind die Temperaturkoeffizienten beider Geräte deutlich größer aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, sodass sie sich bis in den sub-ppm Bereich aufheben.

6.1.2. Testmessungen mit dem Multimeter und dem Multiplexer

Als nächstes wird die Messelektronik um den Multiplexer erweitert und ähnliche Testmessungen durchgeführt. Ziel ist es herauszufinden, wie die Eigenschaften des Multiplexers sich

auf die gemessenen Spannungen auswirken.

Für diese Versuche werden 23 Kanäle des Multiplexers mit derselben Spannung versorgt. Dazu wurde ein Kabel im Kanal 1 (Ch1) des Terminalblock verschraubt das mit Bananenstecker an eine Spannungsquelle angeschlossen werden kann. zu den übrigen 22 Kanälen wurden Kabelbrücken hergestellt und in die entsprechenden Schraubklemmen eingebaut. Der Kabelschirm welcher mit der Schutzleitung der Referenz verbunden wird ist am Terminalblock mit der zugehörigen Erdungsschraube verbunden worden. Am Channel 0 wurden zwei Messleitungen angeschraubt, die mit dem Multimeter verbunden sind. Im Folgenden wird nur der 1000 V Messbereich des Multimeters untersucht.

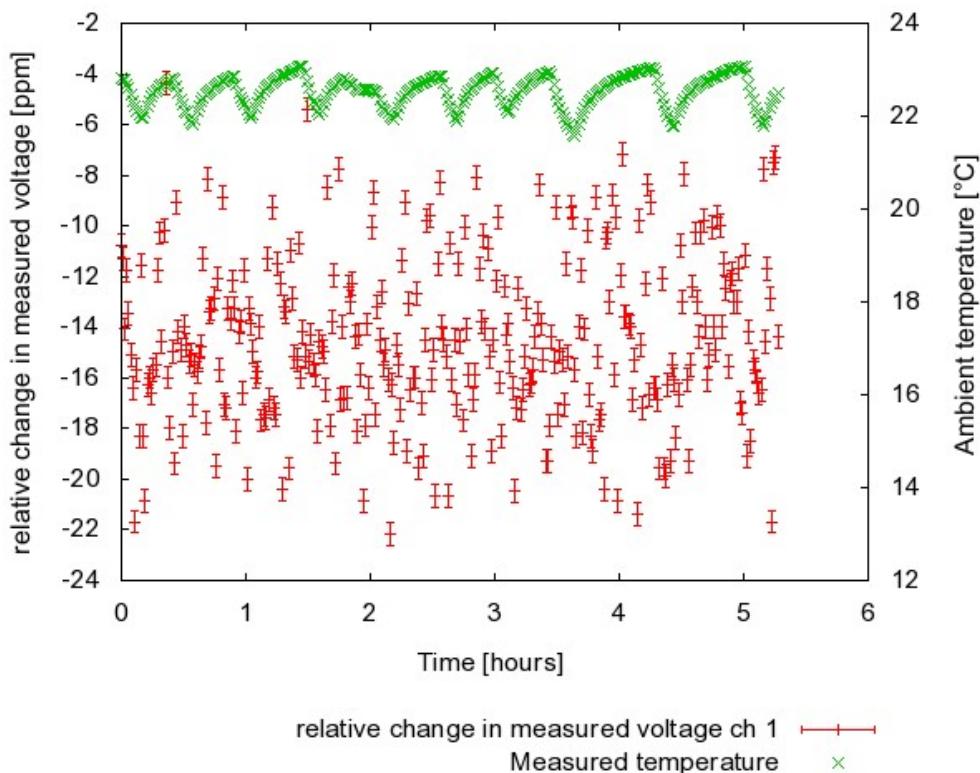


Abbildung 6.7.: **Stabilität von Kanal 1 des Multiplexers** Hier zeigt sich die Stabilität des Multimeters in Kombination mit dem Multiplexer am Beispiel von Kanal 1. Bei 10 V angelegter Spannung.

Zunächst wird wieder die Stabilität der einzelnen Kanäle über die Zeit ermittelt. Als Beispiel ist Kanal 1 dargestellt, wobei der Multiplexer mit der 10 V-Referenz verbunden ist. In Abbildung 6.1.2 ist die Schwankung der Messwerte über die Zeit dargestellt. Die Temperatur ist auf 1,5°C stabil. Die Schwankung in der Temperatur stammt von der Regelung der Klimaanlage.

Die gemessene Spannung betrug im Mittel $U_{mittel} = 9,999866 \text{ V}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 3,3 \text{ ppm}$. Bei der Messung ohne Multiplexer wurde ein Wert von $U_{mittel} = 9,999856 \text{ V}$ bestimmt. Beide Werte stimmen also im Rahmen der Standardabweichungen

Kanal	T_C [ppm/K]	ΔT_C [\pm ppm/K]	Kanal	T_C [ppm/K]	ΔT_C [\pm ppm/K]
ch 1	0,61	0,08	ch 13	0,22	0,05
ch 2	0,47	0,03	ch 14	0,22	0,08
ch 3	0,55	0,07	ch 15	0,54	0,03
ch 4	0,45	0,04	ch 16	0,50	0,03
ch 5	0,23	0,06	ch 17	0,50	0,05
ch 6	0,73	0,06	ch 18	0,04	0,08
ch 7	0,28	0,04	ch 19	0,52	0,07
ch 8	0,40	0,05	ch 20	0,42	0,07
ch 9	0,47	0,05	ch 21	0,38	0,07
ch 10	0,38	0,05	ch 22	0,47	0,05
ch 11	0,56	0,05	ch 23	0,57	0,06
ch 12	0,58	0,07			

Tabelle 6.2.: **Temperaturkoeffizienten des Multiplexers.** In dieser Tabelle sind die ermittelten Temperaturkoeffizienten der einzelnen Kanäle dargestellt

überein und liegen deutlich unterhalb der Angaben im Datenblatt von 4,5 ppm für das Multimeter. Der Offset zum Referenzwert beträgt im Mittel 14,5 ppm.

Es bleibt jetzt noch die Aufgabe, dieses Verhalten auch für die übrigen 23 Kanäle nachzuweisen. Es zeigt sich aber, dass alle untersuchten Kanäle ein ähnliches Verhalten zeigen. Bildet man den Mittelwert der Offsets aus allen Kanälen so erhält man eine Spannungsabweichung von $\Delta U = -14,8$ ppm und einer Standardabweichung von nur $\sigma = 0,2$ ppm. Damit ist gezeigt, dass der Multiplexer die Stabilität in der Spannungsmessung nicht beeinträchtigt.

Bleibt noch die Frage offen, ob das bisherige Temperaturverhalten in der Spannungsmessung durch den Multiplexer verändert wird. Um das zu überprüfen wird am Calibrator eine Spannung von 250 V erzeugt und in Verbindung mit einem Referenzmultimeter und der Verwendung der Klimaanlage eine Messung durchgeführt.

Es wurde bereits festgestellt, dass diese Art der Messung mit dem Calibrator wenig über den Absolutwert des Temperaturkoeffizienten aussagt. Allerdings kann in diesem Versuch qualitativ erkennen, ob der Multiplexer einen Einfluss auf das Temperaturverhalten hat. Ist dies nicht der Fall, müsste der Verlauf demjenigen in Abbildung 6.1.1. Falls sich eine gravierende Änderung ergibt, verlangt dies nach weiteren Untersuchungen.

Es wird über einen Zeitraum von etwa 28 Stunden in einem Intervall von fünf Minuten gemessen wobei die Temperatur im Raum um 7°C verändert wurde. Während einer Messung wurden die Kanäle des Multiplexers durchgeschaltet und die Spannung aufgezeichnet. Der ermittelte Temperaturkoeffizient beträgt $0,61 \pm 0,08$ ppm/°C und ist damit leicht größer als der ermittelte Wert ohne Multiplexer. Allerdings ist die Streuung der Messwerte im Vergleich zu Abbildung 6.1.1 deutlich größer. Um zu überprüfen ob diese generell der Fall ist wurden die Temperaturkoeffizienten der übrigen Kanäle bestimmt. In Tabelle 6.2 sind die ermittelten Werte dargestellt. Die ermittelten Temperaturkoeffizienten schwanken zwischen 0,2 und 0,5 ppm/K.

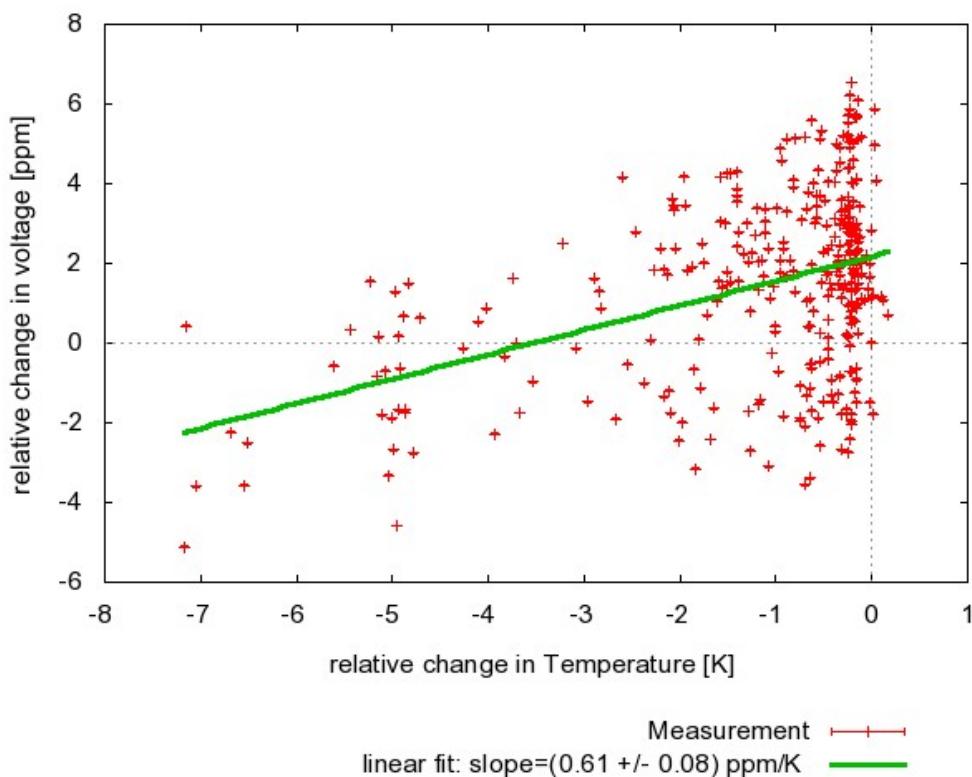


Abbildung 6.8.: **Temperaturkoeffizient von Kanal 1 des Multiplexers.** In diesem Diagramm ist die relative Spannungsänderung gegen die Temperaturänderung am Beispiel von Kanal 1 aufgetragen (1000 Messbereich des DMM und 250 V angelegte Spannung).

Das Temperaturverhalten mit und ohne Multiplexer sollte nochmal genauer untersucht werden. Dazu könnte man das PXI-System in eine abgeschlossene Box bringen welche mit Heizbändern langsam auf eine höhere Temperatur gebracht wird. Die Spannungsquelle und das Referenzmultimeter bleiben im temperaturstabilisierten Labor. Dieser Aufbau bringt zwei Vorteile. Zum einen wird die Quelle aus dem Temperaturverhalten entfernt und kann sehr gut mit dem Referenzmultimeter überwacht werden und zum Anderen stellt die Erzeugung von höheren Temperaturen einen guten Test für das System dar. Im Hochspannungsschrank wird aufgrund der Abwärme der Geräte im Betrieb ebenfalls eine höhere Temperatur als in der Spektrometerhalle erwartet.

Es lässt sich also feststellen, dass die Angaben im Datenblatt des Multimeters zur Genauigkeit und Stabilität reproduziert werden konnten. Die Temperaturkoeffizienten konnten im sub-ppm Bereich pro Kelvin bestimmt werden, allerdings sind diese Werte nicht ganz korrekt, da zum Teil die Temperaturabhängigkeit der Quelle mit einbezogen wurde. Qualitativ hat sich aber gezeigt, dass der Einsatz des Multiplexers bei schwankenden Temperaturen zu einer leicht erhöhten Streuung der Messwerte führt. Dieser Sachverhalt sollte in einem zweiten Aufbau noch einmal überprüft werden. Außerdem sollte in regelmäßigen Abständen die Selbstkalibrierung durchgeführt und die Verstärkung mit einer 10 V-Gleichspannungsreferenz ermittelt werden.

6.2. Testaufbau der Komponenten für die Versorgungsspannung

Neben der Güte der Messelektronik ist die Funktionalität der Versorgungsspannungen von großer Wichtigkeit. In Kapitel 5.7 ist das Konzept für die Versorgung der Bauteile in der isolierten Box Box dargestellt. Es fehlt bisher jedoch der Nachweis ob dieses Prinzip zufriedenstellend arbeitet. Im Folgenden sollen die durchgeführten Testaufbauten erläutert und die Ergebnisse präsentiert werden.

6.2.1. Spannungsfestigkeit der isolierenden Box

Zunächst mal ist es wichtig ob der Aufbau mit den isolierenden Stäben innerhalb des Schrankes überhaupt ein höheres Grundpotenzial erlaubt. Die Gefahr besteht in Entladungen zwischen den Metallteilen die auf unterschiedlichem Potenzial liegen. Es ist stets darauf zu achten, dass die gewählten Abstände ausreichend groß sind gegen die Potenzialdifferenz. Da diese sich zwischen einigen hundert Volt bis maximal 1 kV bewegt, sind an trockener Luft nur wenige Millimeter Isolierabstand notwendig, wenn man davon ausgeht Luft zwischen 2 kV/mm - 3 kV/mm isoliert [Bog07]. Bei Luft sollte man dazu sagen, dass die Durchschlagsfestigkeit mit der Luftfeuchtigkeit zusammenhängt. Neben der reinen Durchschlagsfestigkeit müssen auch Faktoren wie Oberflächenleitfähigkeit von Kunststoff und das Aufsprühen von Ladung in Betracht gezogen werden.

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, trennt sich das Innere des Schrankes in zwei Bereiche auf, zum einen gibt es den isolierten Teil und dann noch den Bereich der auf Tankpotenzial gehalten wird. Um jetzt die Hochspannungseigenschaften zu überprüfen, wird zunächst mit einem Hochspannungs Isolationsmesser (Typ Metriso 5000) der Widerstand zwischen der Profilstange im isolierten Teil und dem Gehäuse ausgemessen. Dazu wird eine Prüfspannung erzeugt die auf vier Stufen einstellbar ist (500 V, 1000 V, 2000 V und 5000 V). Über zwei Prüfspitzen wird die Hochspannung den beiden Komponenten zugeführt und der Widerstand gemessen. Bei einer Prüfspannung von 5000 V wurde zwischen der isolierenden Box und dem Rahmen ein Widerstand von über $5\text{ G}\Omega$ gemessen. Dabei handelt es sich nur um eine Momentaufnahme und beinhaltet nur den reinen Widerstand der PA-Stützen. Die langsamer fortschreitende Oberflächenleitfähigkeit wurde damit nicht untersucht.

Um jetzt die Box über einen längeren Zeitraum auf ein anderes Potenzial zu legen, wird eine Spannungsquelle mit den Schienen in der Box verbunden, wobei der Rest des Schrankes auf Erd-Potenzial gehalten wird.

Als Spannungsquelle dient ein 3 kV-Netzgerät der Firma Canberra (Typ 3103D), welches auf negative Polarität eingestellt ist. Das Netzgerät hat als Ausgang eine SHV-Buchse. Die Ader des HV-Kabels wurde mit einer Öse verpresst und mit der Schiene in der isolierenden Box verschraubt. Der Schirm des Hochspannungskabels wurde mit dem Schrankgehäuse verbunden. Insgesamt sind sowohl der Schrank als auch die HV-Quelle auf dem gleichen Erd-Potenzial. Beide schienen der isolierenden Box wurden über Kabel miteinander verbunden verbunden, sodass sie auf gleichem Potenzial liegen.

Das Gehäuse wurde mit einem Kupferkabel geerdet. An beiden Enden des Kabels waren Ösen aufgepresst, sodass das eine Ende mit dem Schrank und das andere Ende mit der Laborerde verbunden werden konnte.



Abbildung 6.9.: Erdung des Hochspannungsschrankes. Die Erdung des Hochspannungsschrankes bzw. das spätere Grundpotenzial von -18,6 kV kann sehr leicht über Verschraubungen mit dem Edelstahlrahmen erreicht werden.

Die Spannung ist dann langsam in Schritten von einigen hundert Volt auf insgesamt 1000 V erhöht worden. Mit dem Metriso wurde dann im Modus für Spannungsmessung die Differenz zwischen den Rackschienen der isolierenden Box und dem Rahmen gemessen. Die eingestellte Potenzialdifferenz konnte damit nachgewiesen werden.

Es hat sich also gezeigt, dass die Konstruktion der isolierten Box erfolgreich war. Die Isolierung reicht aus und es konnten keine Überschläge oder andere negative Effekte beobachtet werden. Es bleibt noch die Frage offen wie sich die Isolierungen bei den entgültigen Spannungen im Bereich um 18 kV verhalten. In diesem Bereich wird die Ausbildung von Kriechströmen und die Oberflächenleitfähigkeit wieder kritischer.

6.2.2. Test der elektronischen Komponenten auf Hochspannung

Im nächsten Schritt werden nun die einzelnen Komponenten in den Schrank installiert um zu testen wie sie sich bei angelegter Hochspannung verhalten. Die Verkabelung des Hochspannungsanschlusses und der Erdung, wie sie im vorigen Kapitel beschrieben wurde, wird beibehalten, sodass der Rahmen auf Laborerde liegt, während die Box auf ein höheres Potenzial gebracht werden kann. Als erstes Bauteil wird der Einschub mit den DC/DC-Wandlermodulen in den Schrank eingesetzt. Dieser Einschub wird im unteren Teil, der sich auf Laborerde befindet eingesetzt. Der Einschub besitzt Ausgänge für 0 V, 5 V und 24 V bei einer Eingangsspannung von 24 V. Da Ein- und Ausgang galvanisch getrennt sind, kann der 0 V Ausgang auf ein höheres Grundpotenzial angehoben werden. Dies geschieht indem dieser Ausgang mit einer Schiene der isolierenden BOX verbunden wird.

Im späteren Aufbau wird es eine Schiene geben, wo alle Komponenten über Schraubklemmen angeschlossen werden.

Als 24 V-Versorgung dient ein Labornetzteil der Firma EA (Typ EA PS 3032-05 B) mit einem maximalen Ausgangsstrom von 5 A. Der 24 V Ausgang wird nun mit einem Multimeter überwacht um zu überprüfen ob sich durch eine Veränderung des Grundpotenzials der Box die Ausgangsspannung ändert. Außerdem ist es interessant zu sehen, ob die zusätzliche Kabelführung das Hochlegen der Box beeinträchtigt. Der Versorgungseinschub bezieht nach dem einschalten eine Leistung von fast 12,4 W (24,3 V bei 0,51 A). Am Ausgang für die 24 V

Abbildung 6.10.: Einbau der DC/DC-Wandlermodule.

Wie man sieht ist der Einschub mit den Wandlermodulen in den Teil des Schrankes eingebaut der auf Laborerde gehalten wird. Die beiden Scheinen im isolierten Teil sind über ein Kabel miteinander verbunden, wobei das rote HV-Kabel die Spannungsquelle mit einer schiene verbindet.



werden mit dem Handmultimeter 24,05 V gemessen. Wird jetzt die Hochspannung an die Box angelegt, so geschieht es wieder in einem langsamen Ansteigen der Spannung wobei bei 300 V und 600 V kurz gewartet wurde. Die Ausgangsspannung blieb unverändert, ebenso die Anzeigen an dem Versorgungsnetzteil. Es gab keine Spannungs- oder Stromschwankungen.

Der selbe Versuch wurde mit dem 5 V Ausgang wiederholt. Auch hierbei blieb die anfangs gemessenen Spannung von 5,01 V konstant.

Im nächsten Schritt sollte nun einer der Verbraucher mit einbezogen werden. Zunächst wurde nur das PXI-System eingesetzt. Da jedoch die Leistungsaufnahme beim Einschalten die Ausgangsleistung des Netzgerätes übersteigt wurde eine andere 24 V-Versorgung angeschlossen. Dabei handelte es sich um ein Heinzinger TNs 30-600. Es wurden wieder zuerst die 24 V-Versorgung angeschaltet und als das System ordnungsgemäß arbeitete wurde die Hochspannung langsam eingeschaltet. Die 24 V-Ausgangsspannung aus dem DC/DC-Wandlermodulen wurde wieder mit einem Handmultimeter überwacht. Alle angezeigten Spannungen blieben über die Rampe auf 1 kV stabil. Nachdem das PXI-System zu funktionieren schien, wurde ein ISEG-Überrahmen mit drei Netzgeräten eingebaut und der Versuch wiederholt. Auch die Netzgeräte ließen sich Problemlos in der isolierten Box auf ein höheres Potenzial legen.

Der Test hat gezeigt, dass die Hauptkomponente in der Box auch auf einem höheren Grundpotential gelegt und versorgt werden können. Für die Leistung der 24 V-Versorgung die von außerhalb zugeführt werden muss, kann folgende Abschätzung getroffen werden: Der aufgenommene Strom betrug $I_{Heinzinger} = 5,5 \text{ A}$ bei $U_{Heinz} = 24,09 \text{ V}$. Daraus ergibt sich eine Leistung von größer 132,5 W die für jede Schrankhälfte zugeführt werden muss.

Die Testmessungen an den Komponenten der Spannungsmessung hat gezeigt, dass die Spezifikationen im Datenblatt erfüllt werden und eine Spannungsmessung im ppm-Bereich ermöglicht. Allerdings gibt es noch Aspekte der Temperaturabhängigkeit die genauer untersucht werden sollten. Außerdem ist es von Vorteil die Spannungsabhängigkeit des Multimeters zu überprüfen. Da für die Drahtelektrode Spannungen bis zu 300 V gemessen werden, sollte man sicherstellen, dass die Unterschiede zwischen Nieder- und Hochspannungen genau bekannt sind.



Abbildung 6.11.: **Testaufbau für die Versorgungsschaltung.** Im Testaufbau wurden das PXI-System und der ISEG-Überrahmen mit drei Netzgeräten die die isolierte Box eingeschraubt und auf ein höheres Grundpotenzial von 1 kV angehoben.

Der Testaufbau für die Versorgungsspannungen hat gezeigt, dass die Konstruktion der isolierten Box einem Potenzialunterschied von einem Kilovolt genügt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Versorgung der elektronischen Bauteile im Schrank auch bei einem anderen Grundpotential mit der entwickelten Schaltung möglich ist.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das KATRIN Experiment hat das Ziel die Neutrinomasse mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ zu bestimmen. Dazu wird das Energiespektrum der Elektronen aus dem Tritium- β -Zerfall vermessen um aus dem Endpunkt des Spektrums die Information über die Neutrinomasse zu erhalten. Die Vermessung wird mit einem Spektrometer durchgeführt, dass nach dem sogenannten MAC-E Filter Prinzip funktioniert. Um die gewünschte Sensitivität zu erreichen ist es von enormer Wichtigkeit die angelegte Hochspannung genau zu überwachen, da sie ein Maß für die Stärke des elektrostatischen Feldes im Spektrometer darstellt.

Zur Überwachung der Hochspannung wurden zwei Spannungsteiler entwickelt, welche die angelegten Hochspannungen auf den hochpräzisen Messbereichs eines Multimeters herunter teilen können. Mit diesen Spannungsteilern soll die Hochspannung mit einer Genauigkeit von 3 ppm über die gesamte Messzeit überwacht werden.

Im Sommer 2009 sind an dem ersten Hochspannungsteiler einige Veränderungen vorgenommen worden. Neben dem Aufbau eines neuen Transportrahmens und einiger weitere Veränderungen an der Peripherie wurde auch ein zusätzlicher Messabgriff mit einem Maßstabsfaktor von 100:1 eingebaut. Damit sollte die Möglichkeit geschaffen werden im Messbetrieb von KATRIN Niederspannungskalibrierungen durchzuführen. Mit dieser Methode hat man, zusätzlich zu den Kalibrierungsphasen an der PTB, ein Werkzeug zur Überwachung der Stabilität des Spannungsteilers gewonnen. Für diesen Einbau des neuen Abgriffes wurde es jedoch notwendig die primäre Teilerkette zu öffnen und einige Widerstände neu Anzuordnen um einen, in seinem Temperaturverhalten, stabilen Abgriff aufzubauen. Während des Jahres 2009 gab es zwei Messphasen an der PTB in denen die Maßstabsfaktoren, die Stabilität und die Spannungsabhängigkeit des Hochspannungsteilers vermessen wurden.

Es hat sich gezeigt, dass durch die Modifikationen in der Teilerkette die Maßstabsfaktoren verändert wurden. Während man zwischen den Kalibrationen von 2005 und 2006 (zusammen mit den Messungen an der kondensierten Kryptonquelle in Mainz) eine Langzeitdrift von 0,6 ppm/Monat ermitteln konnte, haben sich nach der Modifikation die Maßstabsfaktoren um -11 ppm in die andere Richtung entwickelt. Dies hat den Nachteil, dass die bisherige Kalibrierungsgeschichte für zukünftige Messungen keine Gültigkeit mehr besitzt. Jetzt ist es allerdings so, dass die Messphase am KATRIN-Experiment voraussichtlich erst 2012 beginnt, sodass ausreichend Zeit ist eine neue Kalibrierungsgeschichte aufzustellen. Hinzu kommt, dass es jetzt die Möglichkeit zur Niederspannungskalibrierung gibt, die in regelmäßigen Abständen ohne die Messgeräte der PTB durchgeführt werden können.

Während der zweiten Kalibrierungsphase an der PTB konnte nicht geklärt werden, was der Grund für die unerklärliche Drift war die während der ersten Kalibrierungsphase 2009 gemessen wurde. Die Stabilität des Teilers ist mehrfach über viele Stunden im sub-ppm Bereich gemessen worden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Niederspannungskalibrierungen nach dem Vorbild der PTB im Hochspannungslabor in Münster im ppm-Bereich reproduziert werden können. Somit hat man eine nachweislich verlässliche Methode gewonnen, mit der es möglich ist die Stabilität des Spannungsteilers regelmäßig zu überprüfen. Die Maßstabsfaktoren, die auf diese Weise gemessen werden, sind als Kontrollparameter gut geeignet und geben Aufschluss über die Stabilität der Primärkette durch die Messungen des 100:1-Abgriffes mit 1000 V

und über die Stabilität der Abgriffwiderstände durch Bestimmung der M_{20} und M_{40} Untermäßstabsfaktoren mit 350 V. Dennoch bleiben regelmäßige Kalibrierungen an der PTB notwendig, nicht zuletzt um bis zum Beginn der KATRIN-Messphase eine neue Kalibrierungsgeschichte aufzubauen.

Während der Messungen an der PTB haben sich drei Probleme ergeben die es noch zu bewältigen gilt. Zum einen hat sich gezeigt, dass die Temperatursteuerung die vorgegebene Stabilisierung von 0,1 K nicht erfüllt. Bereits bei Spannungen von 18 kV gibt es Schwankungen von 0,2 K die auf 0,7 K ansteigt wenn man Spannungen von 35 kV anlegt. Da ein neuer Lüfter eingebaut wurde mit verändertem Luftdurchsatz sowie eine andere Position für den Sensor, auf den die Regelung läuft, gewählt wurde, reicht eventuell schon eine Neueinstellung der Parameter im PID-Regler aus um die Temperatursteuerung zu verbessern. Weiterhin ist es sinnvoll die Grundplatte besser zu isolieren um die Abwärme der Geräte an die Platte zu minimieren.

Das Problem mit dem Rauschen das bei offenem Hochspannungseingang gemessen wurde konnte auf eine defekte AIO-610 Karte zurückgeführt werden. Diese steht im elektrischen Kontakt zu dem Steuerteiler und hat das Rauschen verursacht. Da diese Karten bei beiden Spannungsteilern schon des öfteren beschädigt wurden, wird gegenwärtig in Kooperation mit dem Hersteller versucht den Grund für dieses Verhalten zu ermitteln.

Im zweiten Teil der Arbeit ging es um die Hochspannungsversorgung der Drahtelektrode im Hauptspektrometer. Um die geplante Sensitivität zu erreichen ist es notwendig den Untergrund an Elektronen im Spektrometer, die nicht aus dem Tritiumzerfall stammen, mit einer modular aufgebauten Drahtelektrode zu reduzieren. Die Drahtelektrode liegt auf einem negativeren Potenzial als das Spektrometer, sodass es den Flussschlauch vor, aus der Hülle emittierten, Elektronen abschirmt. Außerdem dient die Drahtelektrode zur Feineinstellung des elektrischen Gegenfeldes. Die Drahtelektrode ist in verschiedenen Segmente und Drahtlagen unterteilt, wobei jedes einzelne mit einer separaten Spannung versorgt wird. Insgesamt müssen 46 verschiedenen Spannungen erzeugt und zugeführt werden.

Das Konzept der Hochspannungsversorgung für die Drahtelektrode sieht vor, einen Hochspannungsschrank aufzubauen indem die Netzgeräte und die Messelektronik auf ein höheres Grundpotenzial gelegt werden, dass vom Betrag her negativer ist, als die Spektrometerhülle. Es werden dann Spannungsquellen mit positiver Polarität verwendet um die Feineinstellung der Drahtelektroden durchzuführen. Bei diesen Netzgeräten handelt es sich um ISEG EHS-Module mit 500 V Ausgangsspannung von positiver Polarität. Die Netzgeräte werden über eine CAN-Schnittstelle von einem PXI-System gesteuert. Die Spannungsmessung erfolgt über eine PXI-Multimeter-Einschubkarte und einem vorgesetzten Multiplexer. Das ganze System ist mit optischen Umsetzern galvanisch vom übrigen Netzwerk getrennt. Die Verteilung der Spannung zu der Drahtelektrode erfolgt über ein sogenanntes Patchpanel. Dabei handelt es sich um ein Bauteil, das es ermöglicht über eine Steckverbindung verschiedenen Segmente der Drahtelektrode mit unterschiedlichen Spannungsquellen zu verbinden. Der Vorteil dabei ist, dass es auch möglich wird unterschiedliche Segmente mit der identischen Spannung zu versorgen. Dabei ist die Konstruktion darauf ausgelegt Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Kanälen der Spannungsquellen zu vermeiden.

Weiterhin wurden Testmessungen mit den Komponenten der Spannungsmessung durchgeführt um die Kenngrößen zur Stabilität und Temperaturabhängigkeit die im Datenblatt angegeben werden zu verifizieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination aus Multiplexer und Multimeter eine stabile Spannungsmessung im Bereich von einigen hundert Microvolt erlaubt. Zur Temperaturabhängigkeit sollten noch zusätzliche Messungen mit einem neuen Aufbau durchgeführt werden, da die durchgeführten Messungen nur Bedingt geeignet waren. Es konnte aber qualitativ gezeigt werden, dass die Verwendung des Multiplexers zu einer Größeren Streuung der Messwerte bei schwankenden Außentemperaturen führt.

Für den Aufbau des Schrankes sind noch einige Dinge zu erledigen. Das Patchpanel befindet sich zur Zeit in der Elektronik-Werkstatt im IKP, Münster im Aufbau. Es sollte noch überprüft werden, ob die 230 V_{AC} -Versorgung des Lüfters sich störend auf das statische Potenzial des Schrankes auswirkt. Von entscheidender Bedeutung ist noch die Beschaffung der 1 kV Netzgeräte mit dem Schalter für den Dipolmodus. Einiges an Arbeit ist noch an der Slow-Control zutun. Es wurden bereits Treiber für die Kontrolle der Spannungsquellen und der Messsoftware aufgebaut. Diese gilt es weiter zu entwickeln und um einige Sicherheitsroutinen zu erweitern, sodass sie zuverlässig und sicher arbeiten. Außerdem sind die PXI-Systeme noch in die Netzwerk-Hierarchie der Hochspannungsverteilung einzubinden.

Ein Großteil der Komponenten sind bereits beschafft und nach der Fertigstellung des Patchpanels kann der Aufbau des Schrankes beginnen.

A. Der Hochspannungsteiler - Verbesserung und Kalibrierungsergebnisse

A.1. Aufbau der primären Widerstandskette nach der Modifikation

In der nachfolgenden Tabelle A.1 ist der Aufbau der primären Widerstandskette nach der Modifikation gezeigt. Die getauschten Widerstände sind hervorgehoben und die geklammerten Widerstandsnummern geben die vorige Konfiguration an.

Tabelle A.1.: **Übersicht eingebauter Widerstände nach der Modifikation.** Die Implementierung eines 100:1-Abgriffes über den letzten Widerstand der Primärkette führte zu einer Vertauschung von sieben Widerständen, sodass der letzte Widerstand einen möglichst geringen Temperaturkoeffizienten aufweist. Die folgende Tabelle gibt die Positionen der einzelnen Widerstände nach der Modifikation an.

Position in Setup	Resistor Number	Warmup Mean	Warmup RMS	Position in Setup	Resistor Number	Warmup Mean	Warmup RMS
1	172	-3.562	0.5264	51	120	2.662	0.1557
2	116	3.216	0.1637	52	137	0.2211	0.2262
3	155	-3.352	0.1296	53	180	5.292	0.2789
4	117	3.246	0.198	54	41	-7.526	0.1934
5	166	-3.128	0.1084	55	35	-7.515	0.1104
6	185	3.189	0.2486	56	122	5.253	0.3093
7	104	-3.106	0.09656	57	190	0.3533	0.1102
8	126	3.163	0.04831	58	125	2.603	0.2491
9	165	-3.016	0.1663	59	175	2.495	0.07478
10	159	3.153	0.08268	60	112	0.6489	0.07213
11	147	-2.675	0.1297	61	108	4.811	0.2173
12	188	3.018	0.08908	62	10	-7.437	0.1544
13	146	-2.446	0.08377	63	65	-7.049	0.257
14	179	2.942	0.09924	64	173	4.769	0.04722
15	7	-7.692	0.1988	65	161	0.9463	0.1674
16	105	7.936	0.1902	66	164	2.409	0.09279
17	26	-7.639	0.1412	67	127	2.271	0.1657
18	121	7.505	0.156	68	110	1.15	0.08451
19	85	-7.617	0.04827	69	115	4.729	0.1003
20	123	7.18	0.09346	70	94	-6.973	0.08647
21	154	-4.392	0.1041	71	34	-6.914	0.05022
22	101	3.597	0.2075	72	162	4.713	0.1967
23	140	-4.368	0.2216	73	135	1.191	0.1467
24	114	3.465	0.08434	74	184	2.207	0.1601

Position in Setup	Resistor Number	Warmup Mean	Warmup RMS	Position in Setup	Resistor Number	Warmup Mean	Warmup RMS
25	153	-4.301	0.1811	75	134	2.192	0.117
26	136	3.26	0.1844	76	113	1.321	0.1016
27	149	-4.076	0.1279	77	138	4.522	0.1261
28	183	3.256	0.09652	78	96	-6.787	0.07102
29	168	-4.024	0.1678	79	4	-6.767	0.1374
30	111	3.217	0.1911	80	191	4.376	0.08657
31	182	-2.078	0.2632	81	186	1.625	0.1125
32	142	2.924	0.2193	82	143	2.126	0.1523
33	103	-1.916	0.09387	83	189	2.049	0.1307
34	177	2.868	0.09115	84	144	1.728	0.09683
35	132	-1.782	0.1708	85	200	4.19	0.1195
36	176	2.852	0.198	86	45	-6.723	0.07062
37	198	-1.659	0.05808	87	88	-6.542	0.08472
38	119	2.85	0.09451	88	157	4.148	0.1427
39	130	-1.618	0.109	89	133	1.855	0.132
40	160	2.793	0.06919	90	178	1.965	0.06461
41	32	-9.403	0.05152	91	197	-5.805	0.09324
42	195	8.174	0.05655	92	187	4.0074	0.07242
43	50	-7.593	0.09772	93	158	3.959	0.1938
44	124	6.081	0.1338	94	152	-5.782	0.1297
45	39	-7.559	0.2117	95	167	-5.368	0.1971
46	106	6.024	0.07771	96	141	3.788	0.1551
47	98	-7.527	0.2074	97	151 (181)	-5.119	0.0608
48	181 (199)	3.784	0.07438	98	27	-5.291	0.1144
49	174 (163)	3.632	0.08002	99	199 (151)	5,635	0.1176
50	139	2.775	0.1045	100	163 (174)	0,1261	0.3359

A.2. Ergebnisse der Kalibrierung an der PTB 2009.

In den nachfolgenden Tabellen sind die gesammelten Ergebnisse aus allen Hoch- und Niederspannungsmessungen, die während der zweiten Kalibrierungsphase von 2009 ermittelt wurden, dargestellt.

Übersicht (Mit Fluke 8508a)

Stand: 16.12.2009

MT100

	Mittelwert	rel. STABW	N	Positiv	rel. STABW	N	Negativ	rel. STABW	N	rel. Dif. +/-
100:1	100,01213	7,5E-07	16	100,01215	6,7E-07	8	100,01211	8,1E-07	8	4,0E-07 1KV
3333:1	3334,6141	4,5E-07	17	3334,6139	3,5E-07	9	3334,6142	5,6E-07	8	-9,0E-08 50KV
10000:1	10001,911	3,2E-07	16	10001,912	2,2E-07	8	10001,910	4,0E-07	8	1,4E-07 50KV

Katrin 35

95:1	95,20535		10	95,20540	3,7E-07	5	95,20530	3,7E-07	5	1,1E-06 1KV nur direkt
2000:1	1972,4584		8	1972,4584	3,4E-07	4	1972,4584	5,5E-07	4	0,0E+00 35KV
4000:1	3944,9163		8	3944,9170	3,2E-07	4	3944,9155	5,0E-07	4	3,8E-07 35KV
20:1	20,7177265		6	20,717730	5,5E-07	3	20,717727	3,9E-07	3	1,7E-07 350V
40:1	41,435445		6	41,435440	3,8E-07	3	41,435450	4,1E-07	3	-2,4E-07 350V
rel. Abw. auf HV Wert										
M95 * M20	1972,4383	1,0E-05		1972,4397			1972,4373			1,2E-06
M95 * M40	3944,8759	1,0E-05		3944,8776			3944,8743			8,3E-07
Linearität/KV	-6,10E-08	+/- 2E-09								

Katrin 65

100:1	100,51484		10	100,51489	1,2E-07	5	100,51478	1,2E-07	5	1,1E-06 1KV nur direkt
2000:1	1818,1096		7	1818,1101	3,4E-07	4	1818,1090	6,8E-07	3	5,9E-07 35KV
4000:1	3636,2743		8	3636,2739	4,6E-07	4	3636,2747	7,0E-07	4	-2,2E-07 35KV
20:1	18,0879965		6	18,088000	2,2E-07	3	18,087993	2,1E-07	3	3,9E-07 350V
40:1	36,176511		6	36,176515	1,4E-07	3	36,176507	1,3E-07	3	2,2E-07 650V
rel. Abw. auf HV Wert										
M100 * M20	1818,1120	-1,3E-06		1818,1133			1818,1106			1,5E-06
M100 * M40	3636,2760	-4,8E-07		3636,2784			3636,2736			1,3E-06
Linearität/KV	-1,88E-08	+/- 2E-09								

Abbildung A.1.: Ergebnisse der Kalibrierung an der PTB (2009).

Gezeigt ist hier die Ergebnisse der Kalibrierung der beiden Spannungsteiler im Vergleich zum MT-100. Dabei ahndelt es sich um die Mittelwerte aller durchgeföhrten Messungen (N-Stück) mit positiver und negativer Polarität [PTB09].

Es sind auch die Ergebnisse der einzelnen Messungen in den nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Datum	Rel. Feuchte / % / °C	Raumtemp. HP3	Ausgelesen	Maßstabsfaktor Katrin 35 2000:1	rel. Stabw Katrin 35 2000:1	MT 100 100:1 Verhältnis	Hand / Auto	Normal	Nulvoltmete	Datei	Bemerkung
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4585	3,2E-07		MT 100	35kV	091118y.xls	positiv
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4584	4,3E-07		MT 100	35kV	091118z.xls	positiv
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4583	2,5E-07		MT 100	35kV	091118za.xls	positiv
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4584	3,7E-07		MT 100	35kV	091118zb.xls	positiv
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4577	4,9E-07		MT 100	35kV	091118a.xls	negativ
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4583	4,3E-07		MT 100	35kV	091118b.xls	negativ
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4586	5,4E-07		MT 100	35kV	091118c.xls	negativ
18.11.2009	42,5/28,8		X	Flukte KT35	1972,4589	7,4E-07		MT 100	35kV	091118d.xls	negativ

Datum	Rel. Feuchte / Raumtemp. % / °C	Ausgelesen			Maßstabsfaktor	rel. Stabw	MT 100 100:1	Hand / Auto	Nullvoltmeter	Datei	Bemerkung
		HP3	HP22	Flukte	Katrin 35 3800:1	Katrin 35 3800:1	Verhältnis				
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9169	3,5E+07		MT 100	35kV	091118u.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9167	3,5E+07		MT 100	35kV	091118v.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9168	2,6E+07		MT 100	35kV	091118w.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9175	3,1E+07		MT 100	35kV	091118x.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9163	3,5E+07		MT 100	35kV	091118q.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9158	4,4E+07		MT 100	35kV	091118r.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9156	6,0E+07		MT 100	35kV	091118s.xls
18.11.2009	42,5/28,8			X	Flukte KT35	3944,9142	5,9E+07		MT 100	35kV	091118t.xls

Abbildung A.2.: Ergebnisse der Hochspannungskalibrierungen an der PTB (2009).

In diesen Tabellen sind die ermittelten Maßstabsfaktoren des 2000:1 und des 4000:1-Abgriffes aus den Messungen an der PTB dargestellt. Es wurden jeweils Messungen mit positiver und negativer Polarität durchgeführt [PTB09].

Datum	Rel. Feuchte / Raumtemp. % / °C	Ausgelesen			Maßstabsfaktor Katrin 35	rel. Stabw 100:1	MT 100 Hand / Auto	Normal Nullvoltmeter	Datei	Bemerkung
		HP3	HP22	FL 11	Sonstige	100:1	Verhältnis			
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20529	3,30E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20528	4,30E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20530	3,60E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20530	3,30E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20531	3,9E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20539	3,3E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20539	3,1E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20540	3,8E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20540	4,4E-07	hand	752A 2.12	direkt
17.11.2009	40,8 / 23,2	X			Fluke Katrin	95,20541	3,7E-07	hand	752A 2.12	direkt

Datum	Rel. Feuchte / Raumtemp. % / °C	Ausgelesen			Maßstabsfaktor Katrin 35	rel. Stabw 100:1	Einspeisung/ Abgriff	Hand / Auto	Normal	Nullvoltmeter	Datei
		HP3	HP22	FL 11	Sonstige	Katrin 35					
19.11.2009	40,3 / 22,8		X		Fluke Katrin	20,71714	4,1E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116a.xls +350V
19.11.2009	40,3 / 22,8	X			Fluke Katrin	20,71743	4,2E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116c.xls +350V
19.11.2009	40,3 / 22,8	X			Fluke Katrin	20,71740	8,3E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116e.xls +350V
19.11.2009	40,3 / 22,8	X			Fluke Katrin	20,71720	3,8E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116g.xls -350V
19.11.2009	40,3 / 22,8	X			Fluke Katrin	20,71728	4,1E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116i.xls -350V
19.11.2009	40,3 / 22,8	X			Fluke Katrin	20,71723	3,7E-07	100:1 / 2k:1	752a 2.12	direkt	911116k.xls -350V

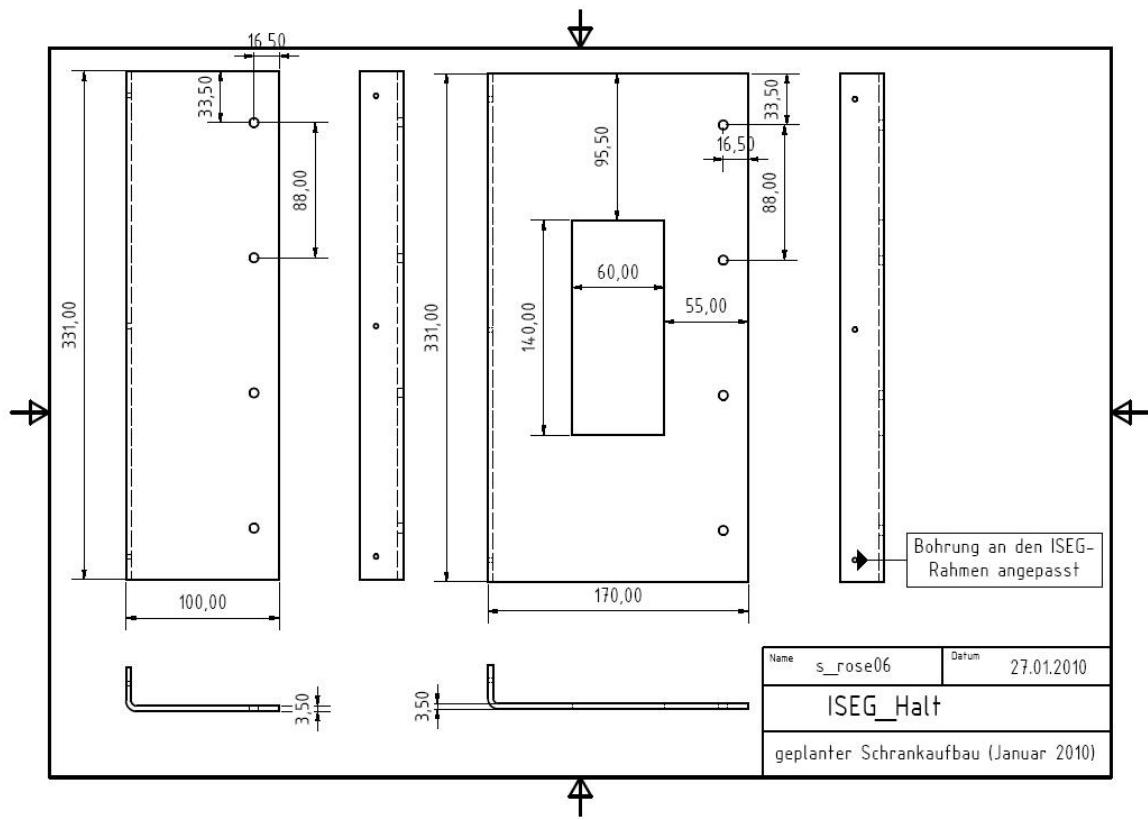
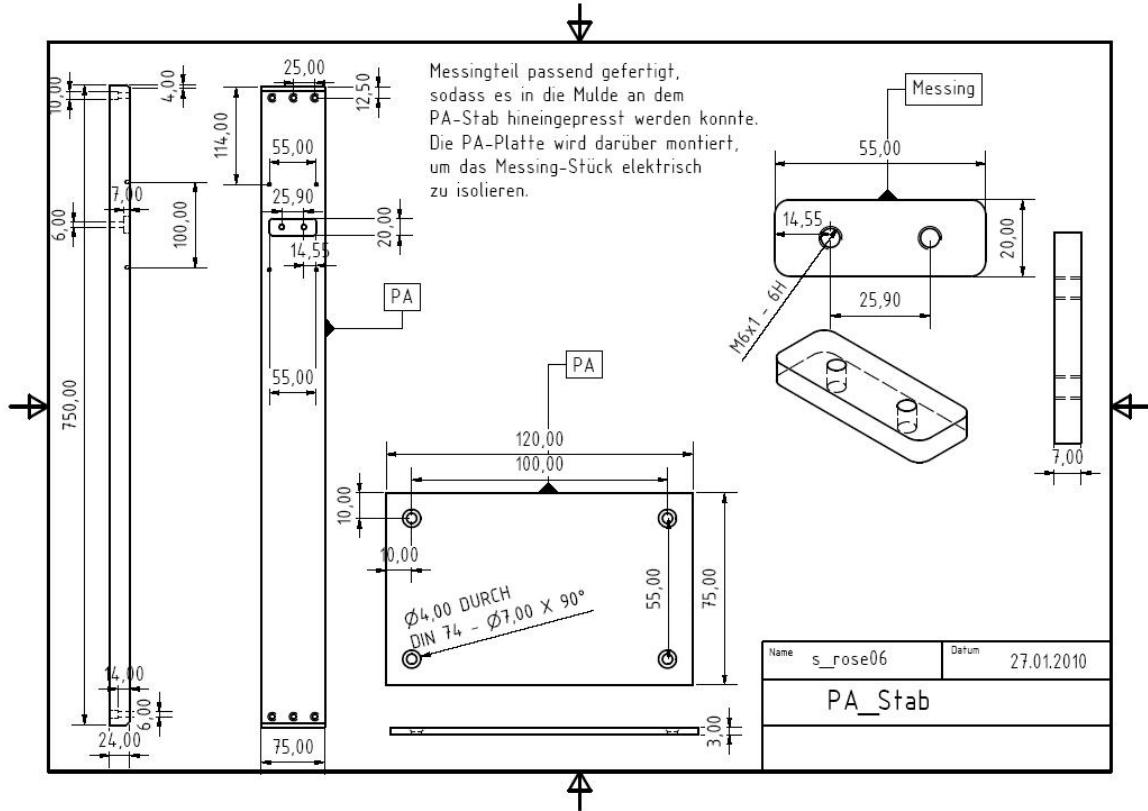
Abbildung A.3.: Ergebnisse der Niederspannungskalibrierungen an der PTB (2009).

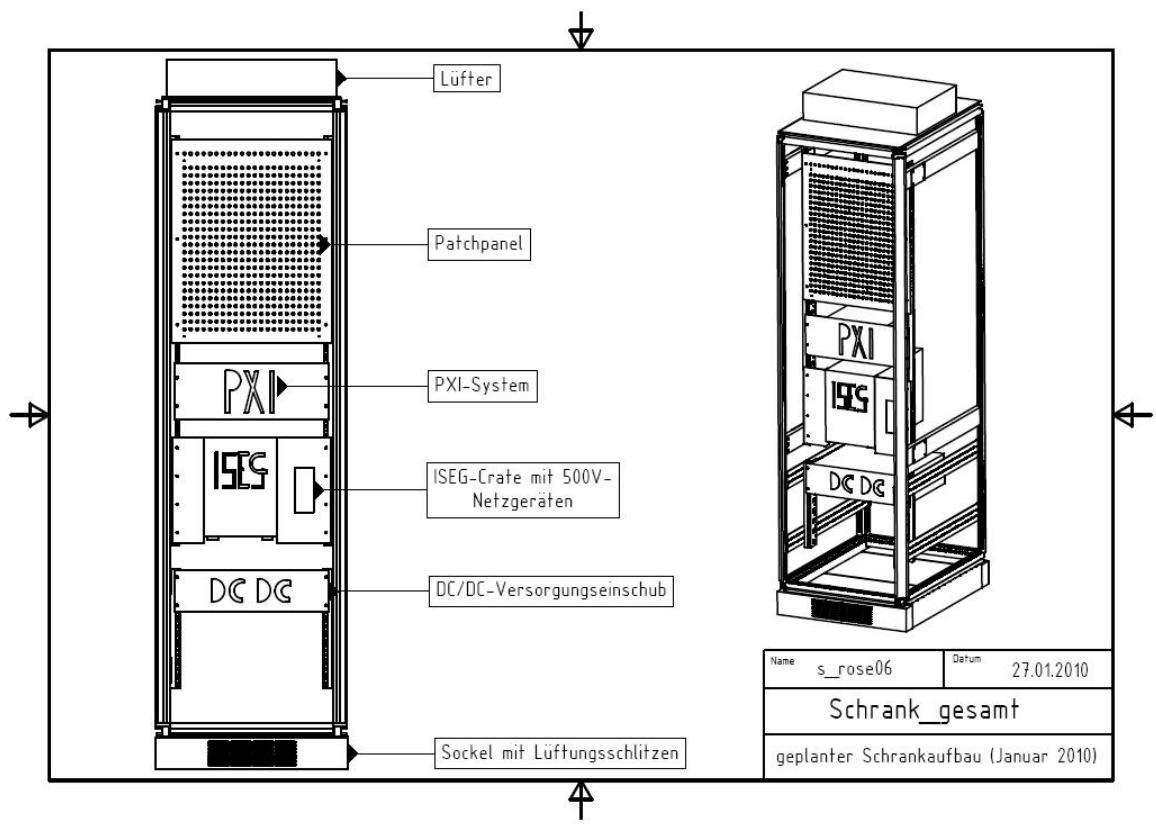
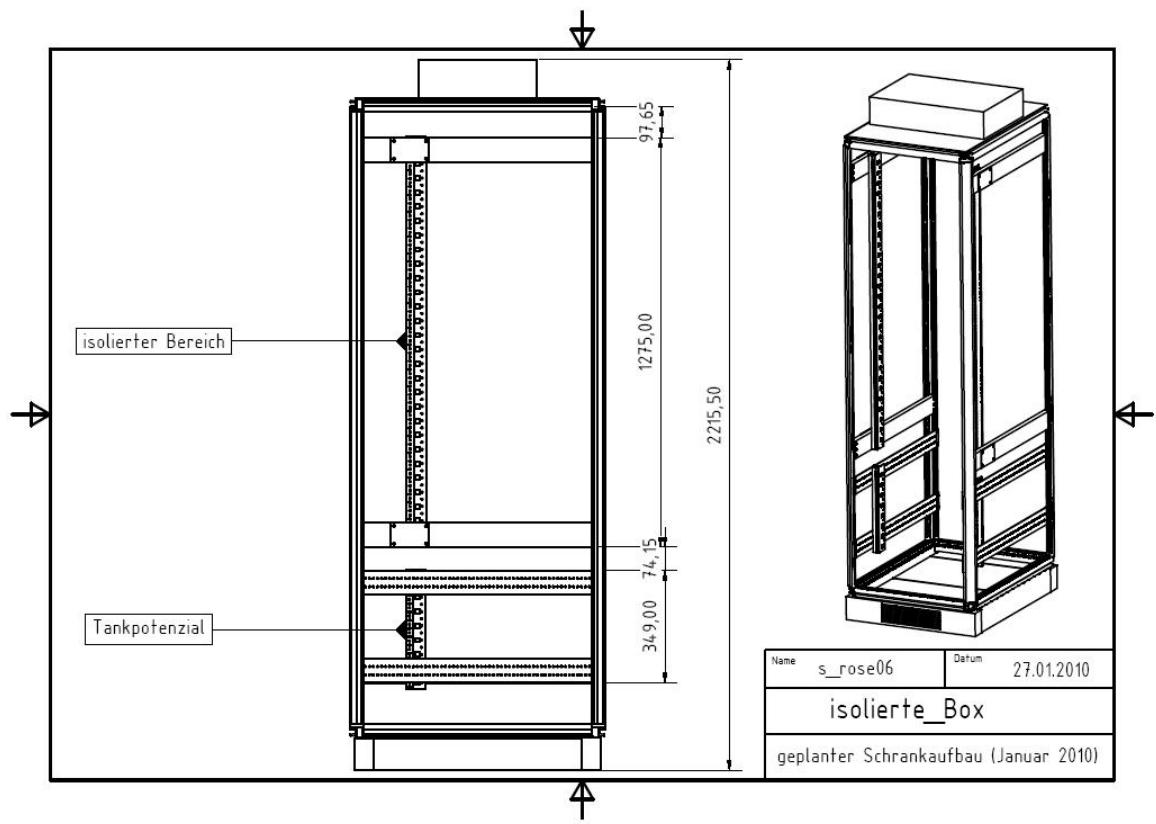
In diesen Tabellen sind die ermittelten Maßstabsfaktoren des 95:1-Abgriffes und des Untermaßstabsfaktors M₂₀ aus den Messungen an der PTB dargestellt. Es wurden jeweils Messungen mit positiver und negativer Polarität durchgeführt[PTB09].

Abbildung A.4.: Ergebnisse der Niederspannungskalibrierungen an der PTB (2009)

In dieser Tabellen sind die Messergebnisse für den Untermaßstabsfaktor M_{40} aus den Messungen an der PTB dargestellt [PTB09].

B. Technische Zeichnungen





Main Spectrometer Inner Electrode Protection and Filtering Circuit

S. Wuestling, KIT–FZK–IPE, 2009–01–27

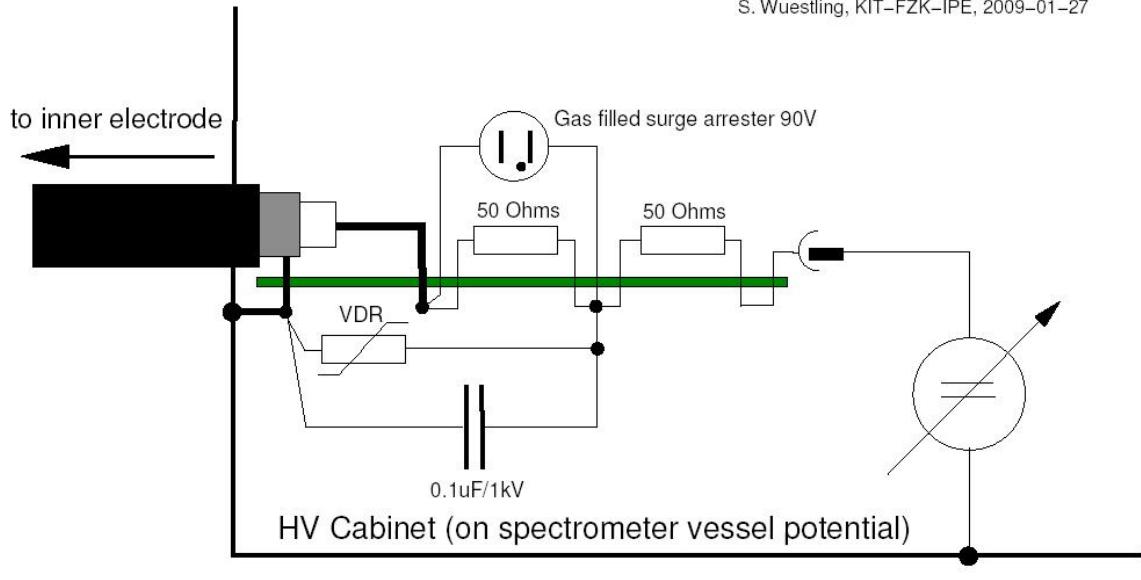


Abbildung B.1.: Filterschaltung zum Schutz der elektronischen Komponenten im Hochspannungsschrank [Wue09].

Literaturverzeichnis

- [Agi34] „Agilent Technologies 3458A Multimeter User’s Guide“, Agilent, Dez.2000, Edition 4
- [Alt03] „Laboratory Limits on Neutrino Masses“, C.Weinheimer, in G. Altarelli and K. Winter (Eds.), Neutrino Mass, Springer, 2003
- [Arc09] „Architektur des FlexDMM NI PXI-4071 mit 7 1/2 Stellen“, National Instruments Developer Zone, Jul.2009
- [Bau09] “Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisionshochspannungsteilers bis 65kV für das KATRIN-Experiment”, S.Bauer
- [Bec98] „Technische termoplaste 4. Polyamide“, Gerhard W. Becker,Ludwig Bottenbruch,Rudolf Binsack, Hanser Verlag 1998
- [Bet10] „B e T I N a - Be Halospektroskopie“, Homepage des BeTina-Experiment institut für Kernchemie Uni Mainz, abgerufen 03.02.2010 (<http://www.uni-mainz.de/FB/Chemie/AK-Noertershaeuser/de/experiments/betina/index.html>)
- [Bog07] „Vieweg Handbuch Elektrotechnik“, Bögen und Plaßmann (Hrsg.), Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, 4. Auflage 2007
- [CAN25] „Controller Area Network (CAN) Interfaces“, National Instruments, PXI-5114 Datenblatt (2005)
- [CAN09] „Controller Area Network (CAN) eine Übersicht“, National Instruments, Online Tutorial 2009-10-21, „<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/10420>“
- [DMM40] „7 1/2-Digit, 26-Bit, 100V Digital Multimeter and 1.8 MS/s Isolated Digitizer“, National Instruments, Datenblatt zum PXI-4071 (2008)
- [Fer34] „Versuch einer Theorie der β -Strahlen. I“, E. Fermi, Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei, Volume 88, Numbers 3-4, Pages 161-177 (März 1934)
- [Flu57] „5700A/5720A Series II Multi-Function Calibrator Operators Manual“, Fluke, Mai.1996 Rev. 2
- [Flu75] „752A Reference Divider Instruction Manual“, Fluke, Mai 1983 Rev. 1 4/84 incl. Manual Supplement 6/99
- [Flu85] „8508A Digital Reference Multimeter User Manual“, Fluke, July 2002
- [FuG08] „Angebot über Hochspannungsmodule“, FuG 2008

- [Gep09] „Report on the ISOLDE Voltage Calibration Campaign 2009“, Christopher Geppert, Preliminary internal report for discussion, Not for distribution
- [Hei09] „E-Mail zum Design des Patchpanels“, N.Heine 2009
- [Hoc08] “Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungs-Messung für das KATRIN-Experiment”, F. Hochschulz
- [Hon06] „HIH-4000-001“, Honeywell Datenblatt des Feuchtigkeitssensors, abgerufen August 2008
- [Hos06] „Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande I“, J. Hosaka et al. Super-Kamiokande Kollaboration, vers. Februar 2008, <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0508053v2>
- [Hug08] “Design of the electrode system for the KATRIN main spectrometer”, Diplomarbeit K. Hugenberg, 2008
- [HV08] “Hochspannungsmeeting des KATRIN-Experimentes”, S. Bauer, F. Hochschulz, M. Prall, S. Rosendahl, T. Thümmler, C. Weinheimer, Dezember 2008
- [ISE08] „Angebot über Hochspannungsmodule“, ISEG 2008
- [ISE09] „Operator´s Manuell“, High Precision Voltage Power Supply EHS 8205 – 505p_K – _SHV ISEG 2009-02-20
- [KAT04] „KATRIN Design Report 2004“, KATRIN Collaboration, FZK Scientifik Report 7090, <http://www-ik.fzk.de/katrin>
- [Kay08] „Neutrino mass, mixing, and flavor change“, B. Kayser März 2008, Particle Data Group Booklet Kapitel 13
- [Kol09] „E-Mail zm Aufbau der DC/DC-Versorgungsmodule“, B.Kolipost, September 2009
- [Kra05] „Final results from phase II of the Mainz neutrino mass searchin tritium b decay“, C. Kraus, B. Bornschein, L. Bornschein, J. Bonn, B. Flatt, A. Kovalik, B. Ostrick, E.W. Otten, J.P. Schall, T.Thümmler, C. Weinheimer, Eur.Phys.J.C **40** (2005)
- [Lob03] „The search for the neutrino mass by direct method in the tritium beta-decay and perspectives of study it in the project KATRIN“, V. M.Lobashev, Nucl. Phys. A **719** C153-C160 (2003)
- [Mar01] „New concept of PTBs standard divider for direct voltages of up to100 kV“, R. Marx, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume 50, Issue 2, Pages: 426 - 429 (2001)
- [Mul25] „32-Channel (2-Wire), 300 V Multiplexer Switches“, National Instruments, PXI-2527 Datenblatt (2009)
- [Ost08] „Eine kondensierte ^{83m}Kr -Kalibrationsquelle für das KATRIN-Experiment“, B. Ostrick
- [Osz51] „250 MS/s, 125 MHz, 8-Bit Digitizers“, National Instruments, PXI-5114 Datenblatt (2007)

- [PDG08] „Particle Physics Booklet“, C Amsler et al. (Particle Data Group), extracted from the Review of Particle Physics, Physics Letter B 667 (2008)
- [Pra10] Doktorarbeit Matthias Prall voraussichtlich 2010
- [PTB09] „Ergebnisse der Kalibrierung der beiden KATRIN Spannungsteiler an der PTB (2009)“, Zusammenstellung und Asuwertung von Matthias Schmidt und Rainer Marx (PTB, Braunschweig)
- [Rei59] „Free Antineutrino Absorption Cross Section. I. Measurement of the Free Antineutrino Absorption Cross Section by Protons“, F. Reines und C. L. Cowan Jr., Phys. Rev. 113, 273 - 279 (1959)
- [Thu07] „Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment“, T. Thümmler, URN: urn:nbn:de:hbz:6-16539562785. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:6-16539562785>. Datum der Einsichtnahme: 09.07.2009.
- [Thu09] „Precision high voltage divider for the KATRIN experiment“, T. Thümmler et al., arXiv:0908.1523v1, 11 August 2009
- [Vis05] „Seven Technical Reasons to Specify Bulk Metal® Foil“, Document Number: 63000, Revision: 14-Sep-05
<http://www.vishay.com/docs/63000/7reasdis.pdf> (abgerufen am 26.Jun.08)
- [Vis07] „Hermetically Sealed High Precision Bulk Metal Foil Technology Resistors with TCR of $\pm 2 \text{ ppm/K}$, Tolerance of $\pm 0.001 \%$ and Load Life Stability of $\pm 0.005 \%$ “, Vishay
<http://www.vishay.com/docs/63006/hmetlab.pdf> (abgerufen am 17.04.2008)
- [Wue09] „Main Spectrometer Inner Electrode Protection and Filtering Circuit“, Sasha Wuestling, 27.01.2009
- [Zac09] Vortrag Michael Zacher, 17. KATRIN Collaboration Meeting, Oktober 2009

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Weinheimer für die Möglichkeit bedanken ein spannendes Thema während meiner Diplomarbeit bearbeiten zu können und auch für die Reisen zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und zum CERN. Es war eine Großartige Erfahrung wissenschaftliches Arbeiten an diesen besonderen Standorten hautnah miterleben zu können.

Ich bedanke mich bei allen Gruppenmitgliedern der AG Weinheimer für die ganze Unterstützung während dieser Zeit und auch bei den Mitgliedern der Hochspannungsgruppe, Thomas, Marcus, Matthias und ganz besonders bei Stephan für die produktive Zusammenarbeit an diesem Projekt.

Ich möchte mich auch bei Herr Prof. Khoukaz bedanken, der sich als Koreferent zur Verfügung gestellt hat

Ein großer Dank geht auch an Hans-Werner Ortjohann, Herr Bourichter und der Feinmechanischen Werkstatt für die Hilfe bei der Planung und der Herstellung verschiedenster Bauteile für den Spannungsteiler und den Hochspannungsschrank.

Ich danke außerdem Roland Berendes und der Elektronischen Werkstatt für die Unterstützung bei der Planung und dem Aufbau des Hochspannungsschrankes. Ganz besonders aber bei allen an der Fertigung des Patchpanels beteiligten Leute, die viele hundert Kleinteilen in mühsamer Handarbeit zusammengebaut und verlötet haben!

Mein Dank gilt ebenfalls Rainer Marx und Matthias Schmidt von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig für die Unterstützung bei der Kalibrierung des Spannungsteilers.

Ein weiterer Dank geht an Christopher Geppert und Andreas Krieger für die Zusammenarbeit während der Kalibrierungsphase am CERN.

Mein Dank gilt ebenfalls den vielen netten Leuten die ich in den vergangen Jahren in Münster getroffen hab, sei es in Wohnheimen, bei den Fechtfreunden, im Ferienjob und an der Uni.

Mein Dank gilt auch meinen Freunden André und Timo, die es nach der Schule ebenfalls nach Münster verschlagen hat und mit denen ich viele Stunden in Autos und Zügen verbracht hab.

Und natürlich auch bei meinen Freunden aus Kiefeld; Volker, Wilko, Wolfgang, Meenhard und Christa zu denen der Kontakt nie abgebrochen ist und die ich bei jeder Heimkehr gerne Wiedertreffe.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium der Physik ermöglicht haben und auch bei meinen Geschwistern Uwe und Anja für die moralische Unterstützung über Telefon und ICQ und für die vielen Stunden Videomaterial meiner Lieblingssendungen, die ich sonst verpasst hätte.