

Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisions-Hochspannungsteilers bis 65kV für das KATRIN-Experiment

Diplomarbeit in Physik

von Stephan Bauer

angefertigt im Institut für Kernphysik

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

29. Juli 2010

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. Ch. Weinheimer

Koreferent: Prof. Dr. A. Khoukaz

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Neutrinoophysik	3
1.1.1	Die Geschichte des Neutrinos	3
1.1.2	Neutrinooszillation	4
1.1.3	Bestimmung der Neutrinomasse über den β -Zerfall	7
1.2	Das KATRIN-Experiment	10
1.2.1	MAC-E-Filter	10
1.2.2	Die Tritiumquelle	13
1.2.3	Pumpstrecke	13
1.2.4	Vor- und Hauptspektrometer	13
1.2.5	Der Detektor	15
1.3	Die Spannungskalibrierung und Stabilität des KATRIN-Experiments	16
1.3.1	Systematische Unsicherheiten des Retardierungspotentials	16
1.3.2	Methoden zur Überwachung des Retardierungspotentials	18
1.4	Der erste KATRIN-Spannungsteiler	20
1.5	Zielsetzung des zweiten Spannungsteilers	22
1.6	Inhalt dieser Arbeit	24
2	Design des zweiten Präzisions-Spannungsteilers	25
2.1	Elektrisches Design	26
2.1.1	Primäre Teilerkette	26
2.1.2	Kontrollteiler	29
2.1.3	Nutzung des Kontrollteiler als Hochfrequenz-Tastkopf	33
2.2	Mechanisches Design	36
2.3	Realisierung der Temperatursteuerung	38
2.4	Das Slow Control System	39
3	Untersuchung der elektrischen Bauteile	41
3.1	Präzisions-Messstand	42
3.2	Widerstandsmessungen	46
3.2.1	Untersuchung der Aufwärmabweichung	47
3.2.2	Untersuchung des Temperaturkoeffizienten	55

3.2.3	Weitere Untersuchungen	63
3.2.4	Auswertung der Widerstandsmessungen	64
3.3	Kondensatormessungen	65
4	Thermische Tests	67
4.1	Aufbau des thermischen Modells	68
4.2	PID-Regler	70
4.3	Test mit ursprünglichem Tunnelrohr	71
4.4	Die endgültige Version des Tunnelrohrs	75
4.5	Zusammenfassung der thermischen Tests	77
5	Aufbau und Inbetriebnahme des Spannungsteilers	79
5.1	Aufbau des Spannungsteilers	80
5.1.1	Hochspannungszuführung	80
5.1.2	Konfiguration der Abgriffwiderstände des Steuerteilers	82
5.1.3	Erdungsblock	83
5.1.4	Durchführungen für die Präzisionsabgriffe	83
5.1.5	Endgültiges Tunnelrohr	84
5.1.6	Hochspannungskontakt der Primärkette	85
5.1.7	Kessel und Transportrahmen	86
5.2	Inbetriebnahme und Testmessungen	88
5.2.1	Langzeitmessungen	89
5.2.2	Selbstkalibrierung bei Niederspannung	92
5.2.3	Testmessungen am kapazitiven Tastkopf	93
5.2.4	Zusammenfassung des Aufbaus und der Inbetriebnahme	94
6	Selbstkalibrierung der KATRIN Spannungsteiler	95
6.1	Anforderungen an Methoden und Geräte	96
6.2	Direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren	98
6.3	Wechselseitige Kalibrierung mit zwei Präzisions-Spannungsteilern	99
6.4	Kalibrierung mit Niederspannungen bis 1000 Volt	101
6.5	Zusammenfassung und Diskussion der Methoden	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	105
A	Ergebnisse der Messungen zur Aufwärmabweichung	111
A.1	Abgriffebene	112
A.2	Hauptebenen	112
B	Baupläne der Mechanischen Komponenten	119
B.1	Innere Bauteile des Spannungsteilers	120
B.2	Transportrahmen und weitere Bauteile des Spannungsteilers	135
	Literaturverzeichnis	141
	Danksagung	144

KAPITEL 1

EINLEITUNG

Neutrinos gehören zu den Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik. Die drei unterschiedlichen Neutrino-Flavours werden entsprechend ihrer geladenen leptonischen Partner (e^- , μ^- und τ^-) als ν_e , ν_μ und ν_τ bezeichnet. Allerdings beschreibt das Standardmodell die Neutrinos als masselose Elementarteilchen. Verschiedene Experimente zu Neutrinooszillationen konnten jedoch zeigen, dass sich die unterschiedlichen Neutrino-Flavours ineinander umwandeln können. Eine solche Eigenschaft ist nur möglich, wenn Neutrinos nicht masselos sind. Da die Experimente zur Neutrinooszillation nur den Mischungswinkel und Massendifferenzen, jedoch keine absolute Masse bestimmen konnten, bleibt die Frage nach der Masse der Neutrinos weiter offen.

Die Kenntnis der Neutrinomasse trägt zur Klärung vieler offener Fragen bei, so zum Beispiel der Beitrag der Neutrinomasse an der Gesamtenergiedichte des Universums. Daher suchten viele Experimente in den vergangenen Jahrzehnten nach der Neutrinomasse. Die niedrigste Obergrenze, für die Neutrinomasse, wurde bei Tritium- β -Zerfallsexperimenten in Mainz und Troisk ermittelt. An diese Experimente soll das KATRIN-Experiment anknüpfen und die Suche nach der Neutrinomasse, mit um eine Größenordnung verbesserte Sensitivität, fortsetzen.

Um die gewünschte Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ zu erreichen, ist es notwendig die Hauptbeiträge zur systematischen Unsicherheiten soweit einzuschränken, dass sie die statistischen Unsicherheiten nicht übersteigen. Eine der Hauptbeiträge zur systematischen Unsicherheit ist die Stabilität des elektrostatischen Analysierpotentials im Hauptenergiefilter des Experiments. Hierzu muss die Hochspannung von bis zu 35 kV mit einer relativen Stabilität von wenigen ppm (10^{-6}) über die gesamte Messzeit überwacht werden. Zu diesem Zweck wurden zwei Präzisions-Hochspannungsteiler in Zusammenarbeit mit der PTB entwickelt.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme des zweiten KATRIN-Spannungsteiler, als Weiterentwicklung des ersten Spannungsteiler, ist Inhalt dieser Arbeit. Dabei soll zunächst die Neutrinophysik und das KATRIN-Experiment kurz vorgestellt werden. Anschließend wird der Aufbau des zweiten Spannungsteiler, von der Vermessung und Selektion der Bauteile, bis zur ersten Inbetriebnahmen und ersten Testmessungen sowie Kalibrierungen im Labor der PTB Braunschweig beschrieben.

1.1 Neutrinophysik

1.1.1 Die Geschichte des Neutrinos

Bei Untersuchungen des Radiumzerfalls entdeckte Chadwick, dass das β -Spektrum nicht wie zuvor angenommen aus einer Reihe von Strahlengruppen besteht, sondern aus einem kontinuierlichem Spektrum [Cha14]. Bei einem angenommenen Zweikörperzerfall würde dies eine Verletzung von Impuls- und Energieerhaltung bedeuten.

In seinem offenen Brief von 1930 postulierte Pauli die Existenz von „Neutronen“¹ welche beim β -Zerfall zusammen mit dem Elektron emittiert werden. Durch den Dreikörperzerfall werden die Erhaltungssätze nicht verletzt [Pau30].

Die theoretische Beschreibung des β -Zerfalls als Dreikörperzerfall gelang Fermi im Jahr 1934. Dabei kam er zu dem Schluss, dass das Neutrino entweder keine oder aber eine sehr kleine Ruhemasse haben muss. Fermi wies weiterhin auf die Abhängigkeit der Form des Spektrums von der Neutrinomasse, im Bereich der Endpunktsenergie hin (s. Abb. 1.1) [Fer34].

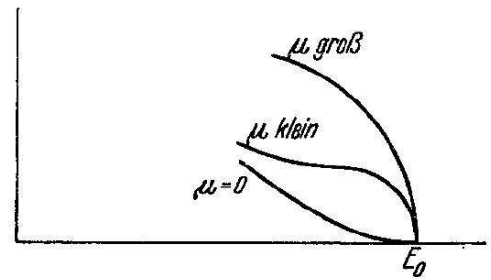


Abbildung 1.1: Abhängigkeit des β -Spektrums von der Neutrinomasse. Gezeigt ist die Abhängigkeit der Form des β -Spektrums, in der Endpunktsregion, von der Neutrinomasse. Aus [Fer34].

Reines und Cowan gelang 1956 der experimentelle Nachweis von Neutrinos durch die Bestimmung des Wirkungsquerschnitts des inversen β -Zerfalls.

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (1.1.1)$$

Dazu wurde ein, mit einer wässrige Kadmiumchloridlösung gefüllter, Detektor in der direkten Umgebung eines Reaktors aufgebaut. Durch den Antineutrinoeinfang eines Protons entsteht ein Positron und ein Neutron. Für den Nachweis dieser Reaktion wurden charakteristische Signale beobachtet. Zuerst werden die 511 keV Photonen aus der e^+e^- -Annihilation beobachtet und einige μs später die Photonen aus der Neutroneneinfangreaktion des Kadmiums. Der Wirkungsquerschnitt für Neutrinos (mit $E(\bar{\nu}_e) < 8 \text{ MeV}$) wurde von Reines und Cowan zu $(11 \pm 2,6) \cdot 10^{-44} \text{ cm}^2$ bestimmt [Rei59].

Bei der Untersuchung der Wechselwirkung von hochenergetischen Neutrinos mit Materie am Brookhaven AGS (Alternating Gradient Syncrotron) entdeckten Lederman und Schwartz 1962 das Myonneutrino (ν_μ). Sie beobachteten die Entstehung von Neutrinos beim Pionen-Zerfall, konnten aber keine Elektronen nachweisen. Dafür konnte die Produktion von Myonen

¹Pauli verwendete den Begriff Neutronen für elektrisch neutrale Teilchen mit Spin 1/2. Fermi prägte den heutigen Begriff Neutrino.

nachgewiesen werden, was zu dem Ergebnis führte, dass es mehr als eine Art Neutrino geben muss [Led62].

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu \quad (1.1.2)$$

Nach der Entdeckung des Tauons durch M. Perl im Jahr 1975 [Per75], gab es mehrere Hinweise auf das Tauneutrino (ν_τ). Experimentell nachgewiesen wurde das Tauneutrino jedoch erst im Jahr 2000 durch das DONUT-Experiment (Direct Observation of the NU Tau) am Fermilab [DON00].

Durch das Abstoppen eines 800 GeV Protonenstrahl in einem Wolfram-Absorber wurde ein Neutrinostrahl erzeugt. Dieser traf, nach dem Durchgang durch verschiedene Abschirmungen, auf ein Emulsions-Target. In diesem Detektor wurden dann Tauonen nachgewiesen, welche nur durch folgende Reaktion entstanden sein können:

$$\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau \quad (1.1.3)$$

Kein anderes Teilchen, welches im Wolfram-Absorber entstand, konnte die Abschirmungen passieren und ein Tauon erzeugen. Dadurch war der Beweis für die Existenz des Tauneutrino erbracht und somit auch das letzte Neutrino des Standardmodells experimentell nachgewiesen.

Nachdem die Existenz von Neutrinos belegt war, bleibt die Frage nach der Neutrinomasse bis heute ungeklärt. Dass Neutrinos eine endliche Masse besitzen, zeigen Experimente die eine Neutrinooszillation beobachten. Dies ist nur möglich, wenn Neutrinos unterschiedliche Massenquadrate (m_ν^2) aufweisen, was direkt dazu führt, dass mindestens zwei der Neutrinomasseneigenzustände von Null verschiedene Massen aufweisen müssen.

1.1.2 Neutrinooszillation

Das Homestake Experiment wurde von 1965 bis 1967 aufgebaut, um solaren Standardmodelle (SSM) durch die Untersuchung des solaren Neutrinofluss zu überprüfen. Bei dem Experiment handelt es sich um einen radiochemischen Detektor gefüllt mit 615 t Tetrachloroethylen (C_2Cl_4) in der Homestake Goldmine (USA). Dieser Detektor nutzt die Neutrinoeinfangreaktion $^{37}\text{Cl}(\nu_e, e^-)^{37}\text{Ar}$ für den Neutrinonachweis. Dazu wird das entstandene $^{37}\text{Ar}(t_{1/2}=50,5\text{d})$ mittels Helium aus dem Detektor ausgewaschen und die Aktivität in Gaszählern über vier bis acht Halbwertszeiten bestimmt. Dabei beträgt die mittlere Produktionsrate 0,5 Ar-Atome/Tag [Dav96].

Der gemessene, solare Elektronneutrinofluss war deutlich kleiner als von solaren Standardmodellen vorhergesagt. Dies führte zum sogenannten solaren Neutrinoproblem welches durch Messungen von Kamiokande [Hir89] und Super-Kamiokande bestätigt wurde [Hos06]. Beim Kamiokande-Experiment und dessen Nachfolger Super-Kamiokande handelt es sich um einen Wasser Čerenkov-Detektor in der Kamioka Mine in Japan.

Bei den durch das SSM vorhergesagten Raten wird davon ausgegangen, dass alle in der Sonne erzeugten Elektronneutrinos auch als diese auf der Erde nachgewiesen werden. Heute ist bekannt, dass Neutrinos ihren Flavor wechseln können. Somit kann sich ein Elektronneutrino auf dem Weg zum Detektor, in ein Myon- oder Tauneutrino umwandeln. Um dies zu untersuchen ist es nötig einen Detektor zu nutzen, welcher in der Lage ist alle Neutrino-Flavors nachzuweisen.

Dies ermöglicht der Čerenkov-Detektor des Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Dieser hat einen Durchmesser von 12 m und ist mit schwerem Wasser (D_2O) gefüllt. Der Detektor befindet sich in der Creighton Mine in Kanada in einer Tiefe von 6010 m wasseräquivalent und wird von etwa 9500 Sekundärelektronenvervielfachern überwacht. Das SNO-Experiment ist in der Lage, durch die unten genannten Reaktionen alle Neutrino-Flavors ($x = e, \mu, \tau$) nachzuweisen.

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \quad \text{geladener Strom (CC)} \quad (1.1.4)$$

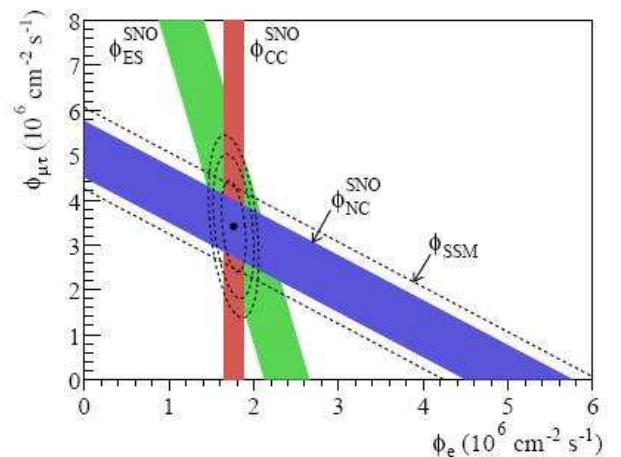
$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \quad \text{neutraler Strom (NC)} \quad (1.1.5)$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad \text{elastische Streuung (ES)} \quad (1.1.6)$$

Der geladene Strom ist nur auf Elektronneutrinos sensitiv und der neutrale Strom ist auf alle Neutrino-Flavors gleich sensitiv. Die Reaktionen durch elastische Streuung ermöglichen es ebenfalls alle Flavors nachzuweisen, jedoch für ν_μ und ν_τ mit geringerer Sensitivität. Somit ist das SNO-Experiment in der Lage zwischen dem Elektronneutrino-Anteil und dem Anteil ohne Elektronneutrinos des solaren Neutrinoflusses zu unterscheiden [SNO02]. Der Fluss des neutralen Stroms Φ_{NC}^{SNO} setzt sich dabei aus den Strömen der Elektronneutrinos $\Phi_{\nu_e}^{SNO}$ und des Gesamtstroms der anderen beiden Neutrino-Flavors $\Phi_{\nu_{\mu,\tau}}^{SNO}$ zusammen.

Die Messungen des neutralen Stromes am SNO-Experiment konnten die Vorhersagen des SSM bestätigen und somit einen starken Hinweis auf die Neutrino-Flavor-Oszillation geben. In Abbildung 1.2 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt, wobei der Fluss der Myon- und Tauneutrinos gegen den Elektronneutrino-Fluss aufgetragen ist.

Abbildung 1.2: Ergebnisse des SNO-Experiments. Die farbigen Bänder zeigen die Resultate aus den Reaktionen des geladenen Stroms (Φ_{CC}^{SNO}), des neutralen Stroms (Φ_{NC}^{SNO}) und der elastischen Streuung (Φ_{ES}^{SNO}). Aufgetragen jeweils der Elektronneutrino-Fluss gegen den Myon- und Tauneutrino-Fluss. Die gestrichelten Linien geben die Vorhersage des solaren Standardmodells (Φ_{SSM}) wieder und die gestrichelten Ellipsen Fits für die jeweiligen Flüsse [SNO02].



Dass die gefundenen Oszillationen wirklich ein Beweis für eine endliche Neutrinomasse sind, soll die folgende Betrachtung der Übergangswahrscheinlichkeit von einem Flavorzustand (ν_α) in einen anderen (ν_β) zeigen ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) [Giu07]. Das Neutrino mit dem Flavor α ist eine Überlagerung seiner Masseneigenzustände ν_i in der Form:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle, \quad (1.1.7)$$

wobei U die unitäre PMNS² Matrix ist. Die zeitliche Entwicklung des Neutrino Masseeigenzustands und somit seine Propagation ist durch die zeitabhängige Schrödinger Gleichung gegeben:

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle = e^{ipt} e^{-im_i^2 \frac{L}{2E}} |\nu_i\rangle \quad (1.1.8)$$

Dabei wurde angenommen, dass die Neutrino Masseneigenzustände denselben Impuls haben und dass die Ausbreitungszeit gleich der Länge L ist, die die Neutrinos zwischen ihrer Entstehung und Detektion zurück legen. Damit folgt für die Darstellung eines Neutrino-Flavor in der Basis seiner Masseeigenzustände:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* e^{ipt} e^{-im_i^2 \frac{L}{2E}} |\nu_i\rangle \quad (1.1.9)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutrino welches mit dem Flavor α entstanden ist mit dem Flavor β detektiert wird, ist:

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} \\ &\quad - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{E} \right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left(2.54 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{E} \right) \end{aligned} \quad (1.1.10)$$

Aus Gleichung (1.1.10) ist zu erkennen, dass die Übergangswahrscheinlichkeit eines Neutrino-Flavors von der Differenz der Massenquadrate (Δm_{ij}^2) abhängt. Dabei ist $\Delta m_{ij}^2 = |m_i^2 - m_j^2|$ in eV^2 , L die Propagationslänge in km und E die Energie in GeV. Wären alle $m_i = 0$ so wäre insbesondere $\Delta m_{ij}^2 = 0$ und somit könnten Oszillationen zwischen Neutrino-Flavors nicht beobachtet werden. Daher sind die Beobachtung von Neutrinooszillationen in verschiedenen Experimenten ein klares Indiz für eine endliche Neutrinomasse [Kay08].

²Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata Matrix

Bei Experimenten zur Neutrinooszillation muss der MSW-Effekt³ berücksichtigt werden. Bedingt durch elastische Neutrino-Elektron-Streuung in Materie, haben Elektronneutrinos eine höhere Streuwahrscheinlichkeit als die anderen beiden Flavors. Diese ist dadurch gegeben, dass das Elektronneutrino neben Reaktionen mit Z^0 -Austausch auch an solchen mit W^\pm -Austausch teilnehmen können und somit stärker an Materie koppeln.

Experimente zur Neutrinooszillation sind nur sensitiv auf den Betrag der Massendifferenz Δm_{ij}^2 sowie den Mischungswinkel Θ_{ij} , eine Auskunft über den Absolutwert der Masseneigenzustände kann nicht getroffen werden. Aus Beobachtungen solarer Neutrinos kann durch den MSW Effekt $m_1 < m_2$ gefolgert werden. Für die Hierarchie können zwei Szenarien realisiert werden, zum einen kann $m_3 > m_2$ sein und damit die, als „normale Hierarchie“ bezeichnete, Anordnung eintreten und zum anderen kann, mit $m_3 < m_2$, die „invertierte Hierarchie“ eintreten.

Die kombinierten Ergebnisse der Experimente zur Neutrinooszillationen mit atmosphärischen und solaren Neutrinos lauten derzeit [PDG08]:

$$\Delta m_{1,2}^2 = \Delta m_{sol}^2 = (8,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{eV}^2 \quad (1.1.11)$$

$$\Delta m_{2,3}^2 = \Delta m_{atm}^2 = (1,9 - 3,0) \cdot 10^{-3} \text{eV}^2 \quad (1.1.12)$$

Da bei Oszillations-Experimenten der Absolutbetrag unbekannt bleibt, muss diese Frage durch Experimente, welche einen direkten Zugang zur Neutrinomasse haben, geklärt werden.

1.1.3 Bestimmung der Neutrinomasse über den β -Zerfall

Für die Bestimmung der Neutrinomasse gibt es verschiedene Methoden wie zum Beispiel den neutrinolosen Doppel- β -Zerfall wie ihn zum Beispiel das Gerda-Experiment mittels ^{76}Ge untersucht [Ger04]. Dabei ist es Voraussetzung, dass das Neutrino ein Majorana-Teilchen ist. Weiter gibt es Experimente mit kryogenen Bolometern und ^{187}Re , welche der direkten Neutrinomassenbestimmung dienen, wie zum Beispiel das Mare-Experiment [Mar06].

Es hat sich gezeigt, dass eine der sensitivsten Möglichkeiten zur Bestimmung der Neutrinomasse die kinematische Bestimmung über das Spektrum des β -Zerfalls ist. Ein wichtiger Vorteil dieser Methode ist, dass keine Modellannahmen einfließen. In diesem Abschnitt, soll zunächst der β -Zerfall betrachtet und danach die Vorteile der Verwendung von Tritium aufgeführt werden.

Theorie des β -Zerfalls

Beim β -Zerfall⁴ zerfällt ein Mutterkern (Z, A) in einen Tochterkern $(Z + 1, A)$, ein Elektron (e^-) und ein Elektronantineutrino ($\bar{\nu}_e$).

³Benannt nach Mikheyev, Smirnov und Wolfenstein

⁴Hier wird nur auf den β^- -Zerfall eingegangen. Der β^+ -Zerfall geht analog unter Aussendung eines Positrons und einem Elektronneutrino wobei die Ordnungszahl um 1 verringert wird.

$$(Z, A) \longrightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1.13)$$

Nach Fermis Goldener Regel gilt für die Übergangsrate in einem Zeitintervall dt und einem Energieintervall zwischen E und $E+dE$, unter der Verwendung der Phasenraumdichte ($\rho(E)$) der möglichen Endzustände und des Kernmatrixelements M :

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = \frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{2\pi}{\hbar} |M|^2 \rho(E). \quad (1.1.14)$$

Für das β^- -Spektrum erhält man [Alt03]:

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = R(E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \Theta(E_0 - E - m_{\nu_e} c^2) \quad (1.1.15)$$

mit

$$R(E) = \frac{G_F^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cos^2(\theta_C) |M|^2 F(Z+1, E) p(E + m_e c^2) (E_0 - E). \quad (1.1.16)$$

Dabei ist:

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

Durch die Stufenfunktion $\Theta(E_0 - E - m_{\nu_e} c^2)$ wird berücksichtigt, dass der Zerfall nur unter Einhaltung der Energieerhaltung stattfinden kann. Die Fermifunktion $F(Z+1, E)$ beschreibt die Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektron und dem Tochterkern. Die Neutrinomasse wirkt sich nur über den Phasenraumfaktor $p_\nu = \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4}$ auf das Spektrum aus. Der Einfluss der Neutrinomasse auf den Phasenraumfaktor wird bedeutender je näher die Elektronenergie an der Endpunktsenergie liegt. Aus dem β^- -Spektrum kann somit die Neutrinomasse bestimmt werden, wobei der Einfluss der Neutrinomasse größer wird, je näher man dem kinematischen Endpunkt des Spektrums kommt.

Bei diesen Betrachtungen wird von einem reinen, unendlich schweren Atomkern ausgegangen und Einflüsse von weiteren Hüllenelektronen oder aber von weiteren Atomkernen bei Molekülen (z.B. Tritium T_2) werden nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung dieser Effekte ist in [Alt03] beschrieben.

Vorteile von Tritium bei der kinematischen Neutrinomassen-Bestimmung

Der Tritium- β -Zerfall bietet einen sehr sensitiven Zugang für die kinematische Bestimmung der Neutrinomasse. Beim β -Zerfall des Tritium zerfällt ein Tritiumatom gemäß Gleichung (1.1.17). Aus dem Spektrum des e^- lässt sich m_{ν_e} bestimmen, da sich die Form des Spektrums im Bereich der Endpunktsenergie ändert. Das Spektrum für zwei unterschiedliche Neutrinomassen zeigt Abbildung 1.3.



Die wichtigsten Vorteile von Tritium für die Bestimmung der Neutrinomasse sind, neben der einfachen Konfiguration, vor allem die folgenden Eigenschaften.

- Die niedrige Endpunktsenergie von $E_0 = 18,6 \text{ keV} \rightarrow$ Anteil der Zerfallselektronen im Bereich der Endpunktsenergie ist $\sim \frac{1}{E_0^3}$.
- Die kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren \rightarrow höhere Aktivität der Quelle
- Es handelt sich um einen übererlaubten Übergang \rightarrow maximales und elektronenenergieunabhängiges Kernübergangsmatrixelement M

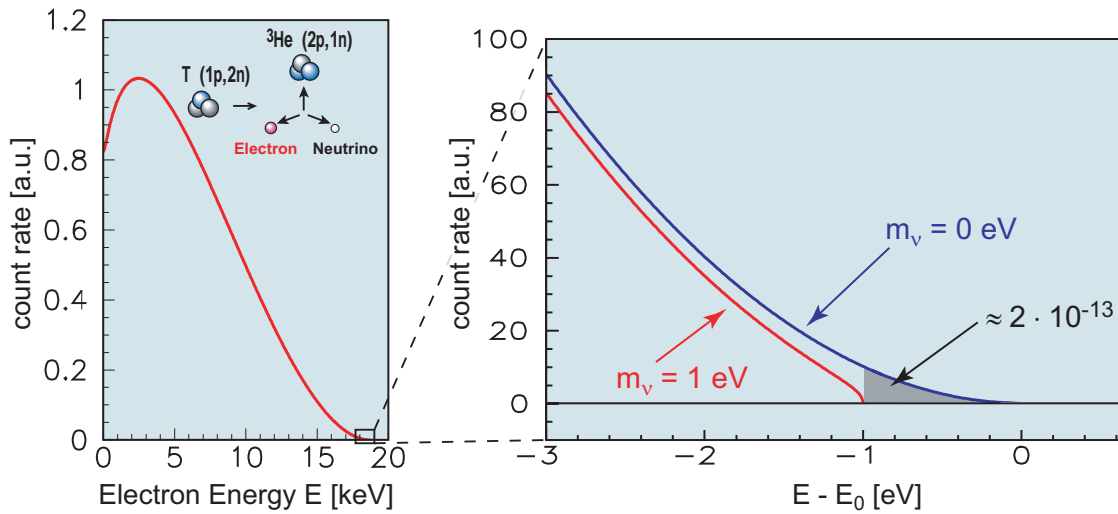


Abbildung 1.3: Energiespektrum des Elektrons beim Tritium- β -Zerfall. In der linken Abbildung ist das gesamte Spektrum des Tritium- β -Zerfalls gezeigt. In der rechten Abbildung ist nur der Bereich von 3 eV unterhalb des Endpunktes gezeigt. Die blaue Kurve beschreibt das Spektrum für masselose Neutrinos und die rote Kurve beschreibt das Spektrum für eine hypothetische Neutrinomasse von 1 eV.

Da nur etwa $2 \cdot 10^{-13}$ aller Zerfallselektronen in die Region von 1 eV unterhalb der Endpunktsenergie fallen, ist für die direkte Bestimmung der Neutrinomasse ein Spektrometer mit hoher Luminosität und einer hohen Energieauflösung unerlässlich. Diese Voraussetzungen erfüllt ein Spektrometer vom MAC-E-Filter Typ welcher bei den Experimenten zur Bestimmung der Neutrinomasse in Mainz und Troisk Anwendung fand. Beide Experiment lieferten eine Obergrenze für die Neutrinomasse:

Mainz: $m_\nu < 2,3 \text{ eV}/c^2$ (95%C.L.) [Kra05]

Troisk: $m_\nu < 2,1 \text{ eV}/c^2$ (95%C.L.) [Lob03]

Eine konsequente Weiterentwicklung dieser Experimente stellt das KATRIN-Experiment dar, welches im nächsten Abschnitt näher beschrieben wird.

1.2 Das KATRIN-Experiment

In diesem Teil der Arbeit wird ein Überblick über das KATRIN-Experiment gegeben und die Funktion der wichtigsten Komponenten beschrieben. Für weitere Details sei auf den KATRIN Design Report [KAT04] hingewiesen. Weiterhin wird näher auf die Kalibrierungsmöglichkeiten und die Stabilität der Hochspannung am KATRIN-Experiment eingegangen.

Das Karlsruher Tritium Neutrino Experiment hat das Ziel die Elektronantineutrinomasse $m_{\bar{\nu}_e}$ aus dem Spektrum des Tritium- β -Zerfalls, mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$, zu bestimmen bzw. eine neue Obergrenze für die Neutrinomasse festzulegen. Die Sensitivität ist um eine Größenordnung besser als bei bisherigen Experimenten. Kern des Experiments ist ein Spektrometer vom MAC-E-Filter Typ mit 10 m Durchmesser und 23,3 m Länge sowie eine fensterlose gasförmige Tritiumquelle [KAT04].

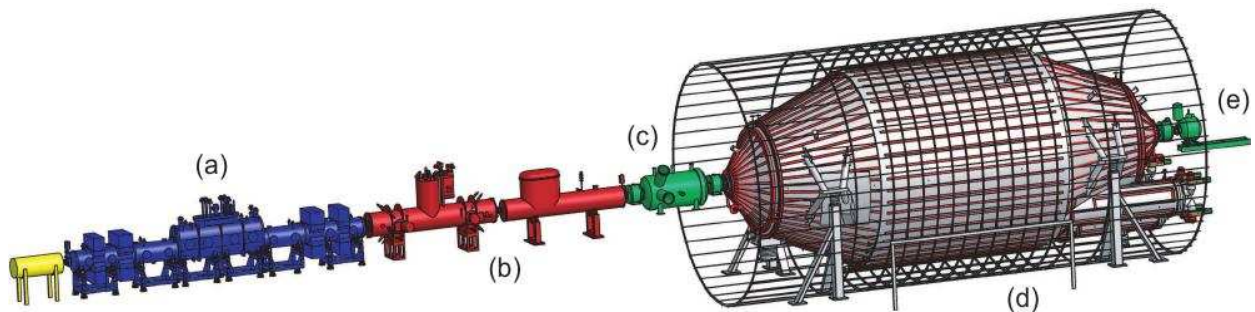


Abbildung 1.4: Überblick über den experimentellen Aufbau des KATRIN Experiments. Das Experiment gliedert sich in fünf Hauptkomponenten. Eine fensterlose gasförmige Tritiumquelle (WGTS) (a), gefolgt von einer Pumpstrecke aus differentiellen und kryogenen Pumpsystemen (b) führen zum Vorspektrometer (c) und schließlich ins Hauptspektrometer (d). An das Spektrometer schließt sich ein Silizium-Halbleiter Detektor an (e).

1.2.1 MAC-E-Filter

Um die Neutrinomasse aus dem Spektrum des Tritium- β -Zerfalls zu bestimmen, benötigt man ein Spektrometer mit hoher Luminosität und hoher Energieauflösung. Diese Bedingungen werden von einem MAC-E-Filter (magnetic adiabatic collimation with electrostatic filter) bestens erfüllt.

Die Hauptkomponenten des MAC-E-Filters sind zum einen ein magnetisches Führungsfeld und zum anderen ein elektrostatisches Gegenfeld. Im oberen Teil von Abbildung 1.5 ist das Prinzip dargestellt. Zwei supraleitende Solenoide erzeugen das inhomogene, magnetische Führungsfeld, welches um die Analysierebene (mittlerer Bereich) des Spektrometers symmetrisch ist. In diesem Führungsfeld bewegen sich die Elektronen auf Zyklotronbahnen um die Feldlinien. Dies hat zur Folge, dass alle in den vorderen Halbraum emittierten Elektronen auf den Detektor abgebildet werden können (2π -Akzeptanz), wenn sich die Quelle im Maximum des Magnetfeldes befindet. Der maximale Akzeptanzwinkel von 90° führt zu einer hohen Luminosität.

An ein modulares System aus Ringelektroden wird die Retardierungsspannung U_{ret} angelegt und dadurch das um die Analysierebene symmetrische, elektrostatische Gegenfeld mit dem Potential $\Phi = -e \cdot U_{ret}$ erzeugt. Nur Elektronen deren Longitudinalenergie größer ist als die Energie des Gegenfeldes überwinden die Analysierebene des Spektrometers und werden auf dem Weg zum Detektor wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt, was einem Hochpassfilter gleich kommt. Da die Energieauflösung des Spektrometers wesentlich größer ist als die des Detektors, handelt es sich um einen integrierenden Hochpassfilter.

Die Energie des Elektrons innerhalb des Flussschlauchs des Spektrometers lässt sich durch folgende Formel beschreiben.

$$E_{kin} = E_{\perp} + E_{\parallel} \quad (1.2.1)$$

Dabei ist:

$$\text{Energie in der Zyklotronbewegung } E_{\perp} = E_{kin} \sin^2 \Theta \quad (1.2.2)$$

$$\text{Energie entlang des Führungsfeldes } E_{\parallel} = E_{kin} \cos^2 \Theta \quad (1.2.3)$$

und Θ der Winkel zwischen Geschwindigkeitsvektor und magnetischem Feld. Das Elektron besitzt aufgrund seiner Spiralbewegung ein magnetisches Moment μ . Für den nichtrelativistischen Fall gilt:

$$\mu = |\vec{\mu}| = \frac{e}{2m_e} \cdot |\vec{l}| = \frac{E_{\perp}}{B} \quad (1.2.4)$$

Wird nun das magnetische Feld sehr langsam geändert, bleibt das magnetische Moment des Elektrons adiabatisch erhalten. Somit folgt aus Gleichung (1.2.4), dass bei sinkendem Magnetfeld auch die Transversalenergie im gleichen Maße abnehmen muss. Diese geht auf Grund der Energieerhaltung in Longitudinalenergie über (Abb.1.5 unten). Da aufgrund der adiabatischen Änderung das magnetische Moment eine Erhaltungsgröße ist, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$\frac{E_{\perp,max}}{B_{max}} = \frac{E_{\perp,A}}{B_A} \quad (1.2.5)$$

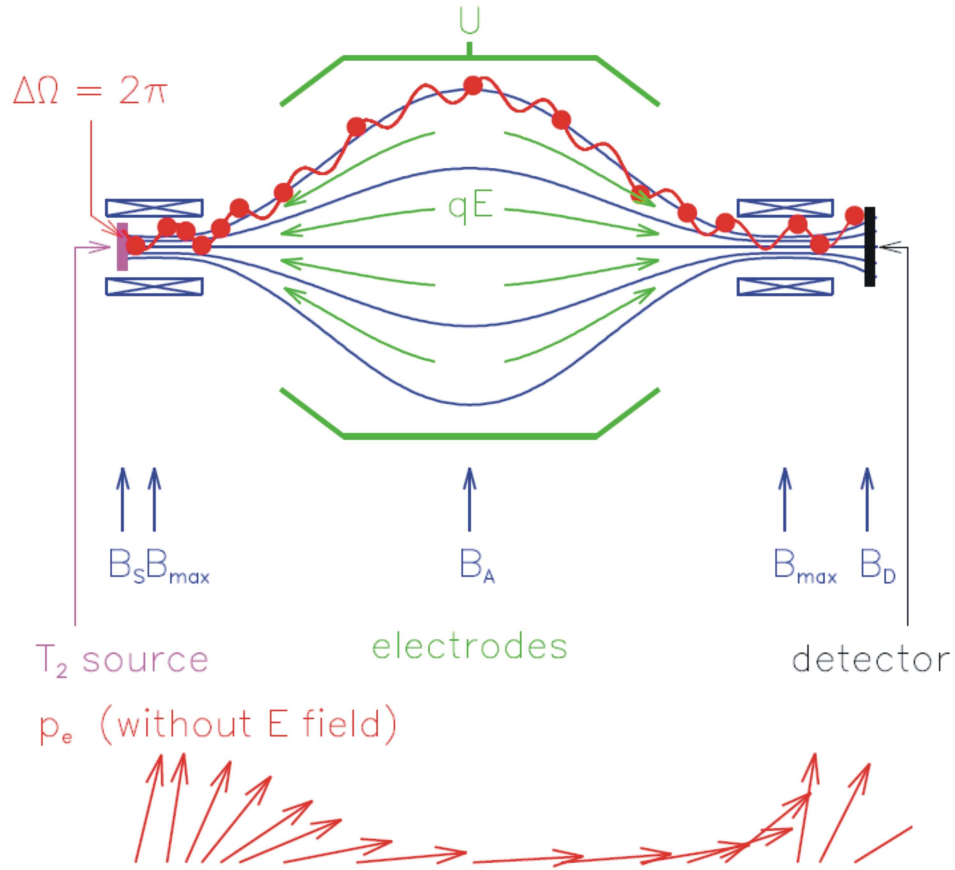


Abbildung 1.5: Prinzip des eingesetzten MAC-E-Filter beim KATRIN Experiment. Im oberen Teil ist der Aufbau des MAC-E-Filters beim KATRIN-Experiment gezeigt. Zwei Solenoiden erzeugen das magnetische Führungsfeld und ein modulares Elektrodensystem erzeugt das elektrostatische Gegenfeld. Im unteren Teil ist der Verlauf der Transformation der Transversalenergie in Longitudinalenergie, ohne elektrostatisches Gegenfeld, gezeigt

Wobei $E_{\perp,max}$ und $E_{\perp,A}$ die Transversalenergien im linken Solenoiden und in der Analysierebene und B_{max} und B_A die entsprechenden magnetischen Felder sind. Daraus folgt, dass die Energieauflösung direkt durch das Verhältnis der magnetischen Felder bestimmt wird.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_A}{B_{max}} = \frac{3 \cdot 10^{-4} \text{ T}}{6 \text{ T}} = \frac{1}{20000} \quad (1.2.6)$$

Unter Auflösung versteht man das Energieintervall ΔE , in welchem die Transmission des Hochpasses von 0 auf 1 ansteigt. Geht man von der maximal möglichen Energie in der Zyklotronbewegung ($E_{\perp,max} = 18,575 \text{ kV}$) aus, so ergibt sich eine Auflösung von $0,93 \text{ eV}$ [Thu07].

Da sich die Tritiumquelle nicht im maximalen Magnetfeld sondern im Magnetfeld B_S befindet, ist der Akzeptanzwinkel kleiner als 90° . Das Magnetfeld B_S ist mit $3,6 \text{ T}$ kleiner als

das maximale Feld am Spektrometer, so dass es nach (1.2.4) zum Effekt des magnetischen Spiegels kommt. Elektronen mit einem zu großen Startwinkel werden dadurch reflektiert. Das magnetische Feld der Quelle wurde bewusst kleiner gewählt, um Elektronen mit einem zu großen Startwinkel heraus zu filtern, da diese aufgrund von inelastischen Stößen mit Tritiummolekülen schon einen Teil ihrer Energie verloren haben können. Der maximal akzeptierte Startwinkel für das KATRIN Experiment lässt sich wie folgt berechnen:

$$\Theta_{max} = \arcsin \sqrt{\frac{B_S}{B_{max}}} = 50,77^\circ \quad (1.2.7)$$

1.2.2 Die Tritiumquelle

Die eingesetzte Quelle ist eine fensterlose, gasförmige Quelle (windowless gasium tritium source WGTS) welche im Inneren aus einem 10 m langen Rohr mit 90 mm Durchmesser besteht. In der Mitte dieses Rohrs wird molekulares Tritiumgas mit einer Temperatur von 30 K und einer Einlassrate von 2 mbarℓ/s injiziert. Von der Mitte der Quelle diffundiert das Gas zu beiden Enden des Rohrs. Die Temperatur des Rohrs wird durch zweiphasiges Neon auf $30 \pm 0,03$ K stabilisiert. Die bei den Zerfällen entstehenden Elektronen werden durch ein axiales, magnetisches Führungsfeld zu den beiden Enden der WGTS geführt. Dieses Feld wird von zwei supraleitenden Solenoiden mit jeweils 3,6 T erzeugt [KAT04].

Um den Untergrund durch Tritium in den Spektrometern ausreichend zu reduzieren, muss der Restfluss des Tritium auf 10^{-14} mbarℓ/s reduziert werden. Diese Reduktion um 14 Größenordnungen erfolgt durch die im Folgenden beschriebenen Pumpstrecke.

1.2.3 Pumpstrecke

Die Pumpstrecke gliedert sich in ein aktives und ein passives Pumpsystem. Das aktive System besteht aus zwei differentiellen Pumpstrecken (DPS) welche den Gasfluss durch Turbomolekularpumpen auf etwa $0,4 \cdot 10^{-7}$ mbarℓ/s reduziert. Nach der DPS folgen zwei kryogene Pumpstrecken (CPS) als passives Pumpsystem. In der CPS werden verbleibende Tritiummoleküle auf Argonschnee mit 3 K aufgefroren.

1.2.4 Vor- und Hauptspektrometer

An die Pumpstrecke schließt sich ein Tandemsystem von Spektrometern des MAC-E-Filter-Typs an. Im Vorspektrometer wird der niederenergetische Teil des β -Spektrums geblockt und im Hauptspektrometer wird der hochenergetische Teil untersucht.

Die mechanischen Ausmaße der beiden Spektrometer ergeben sich aus der adiabatischen Führung der Elektronen, da der Flusschlauch

$$B \cdot A = 191 \text{ T} \cdot \text{cm}^2 \quad (1.2.8)$$



Abbildung 1.6: KATRIN Hauptspektrometer. Gezeigt ist das Hauptspektrometer mit einem Durchmesser von 10 m und einer Länge von 23,3 m während des Transports an das Forschungszentrum Karlsruhe.

in beiden Spektrometern erhalten bleiben muss, um alle Elektronen zu führen.

Vorspektrometer

Das Vorspektrometer ist ein Edeltank mit einem Durchmesser von 1,7 m und einer Länge von 3,4 m. Es arbeitet wie das Hauptspektrometer nach dem MAC-E-Filter Prinzip. Für das KATRIN Experiment dient es als Hochpassfilter welcher den niederenergetischen Teil des β -Spektrums sperrt. Legt man an das Vorspektrometer eine um 300 V positivere Spannung als an das Hauptspektrometer an, so wird nur der hochenergetische Teil bis 300 eV unterhalb der Endpunktsenergie ins Hauptspektrometer geführt.

Die Reduktion des Elektronenfluss von etwa 10^{10} auf 10^3 Elektronen pro Sekunde verringert das Auffüllen von Penningfallen innerhalb des Hauptspektrometers sowie die Ionisation von Restgasmolekülen. Dies führt zu einer Reduktion des Untergrunds.

Die Energieauflösung des Vorspektrometers liegt bei etwa 100 eV, was für die Funktion als Vorfilter ausreichend ist. Der Druck innerhalb des Spektrometers liegt bei 10^{-11} mbar.

Neben der Reduktion des Elektronenflusses dient das Vorspektrometer schon vor Beginn der Messzeit als Prototyp des Hauptspektrometers für wichtige Untersuchungen. Es wurden zum Beispiel das Vakuum, das Kühl-/Heizsystem und das Hochspannungssystem getestet. Auch Simulationen zum elektromagnetischen-Design des Hauptspektrometers und wichtige Untergrundquellen wurden am Vorspektrometer überprüft.

Hauptspektrometer

Das Hauptspektrometer (Abbildung 1.6) hat einen Durchmesser von 10 m, eine Länge von 23,3 m und ist ebenfalls aus Edelstahl gefertigt. Der mittlere Teil des Spektrometers ist zylinderförmig und die beiden Enden sind konisch. Der Druck im Inneren beträgt wie im Vorspektrometer 10^{-11} mbar. Aufgrund der Magnetfeldkonfiguration hat das Hauptspektrometer eine Energieauflösung von 0,93 eV.

Im Inneren des Hauptspektrometers befindet sich ein modulares, zweilagiges Drahtelektrodensystem, welches mehrere Aufgaben erfüllt.

- **Untergrundreduktion:**

Aufgrund radioaktiver Zerfälle innerhalb des Spektrometermaterials und durch das Auftreffen von kosmischen Myonen können Elektronen aus der Spektrometerwand gelöst werden. Diese werden zu einem geringen Anteil trotz der magnetischen Abschirmung zum Detektor gefördert und tragen im hohen Maße zum Untergrund bei. Legt man nun an die Drahtelektrode ein negativeres Potential als an die Tankwand an, wird der Flussschlauch von solchen Untergrundelektronen abgeschirmt. Da die Drahtelektrode mit Drahtstärken von 0,3 mm bzw. 0,2 mm als quasi masselos angesehen werden kann, ist die Wahrscheinlichkeit, dass kosmische Myonen Elektronen aus der Drahtelektrode auslösen, vergleichbar gering.

- **Formung des elektrischen Feldes:**

Durch die ringartige Anordnung der Drahtelektrode ist eine Feinjustierung des elektrostatischen Gegenfeldes möglich.

- **Dipolmodus:**

Durch die Unterteilung der Elektrodenringe in zwei Hälften ist es möglich, ein Dipolfeld anzulegen und dadurch in Penningfallen gespeicherten Elektronen durch eine $E \times B$ Drift aus dem Flussschlauch zu entfernen.

Details zur Drahtelektrode sowie deren Spannungsversorgung finden sich in [Hug08], [Val09], [Hil10] und [Ros10].

Da das magnetische Feld in der Analysierebene auf 0,3 mT abfällt ist es nötig, das Erdmagnetfeld durch eine Anordnung von Luftspulen zu kompensieren.

1.2.5 Der Detektor

Die Elektronen, welche die Analysierebene des Hauptspektrometers überwunden haben, werden wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt und durch das magnetisches Führungsfeld auf den Detektor abgebildet. Dieser Detektor ist eine Silizium PIN-Diode⁵ mit 90 mm Durchmesser welche in 148 Pixel unterteilt wird. Die Unterteilung gliedert sich in 12 Kreisringe mit je 12 Segmenten und einem vierfach unterteilten Zentrum wie in Abbildung 1.2.5 gezeigt ist [Val09].

Die wichtigsten Anforderungen an den Detektor sind:

- Eine hohe Nachweiseffizienz für Elektronen
- Eine hohe Energieauflösung und dünne Totschicht
- Eine niedrige Untergrundzählrate

Weitere wichtige Anforderungen sind die Fähigkeit hohe Zählraten von etwa 10^5 1/s aus einer Elektronenkanone zu verarbeiten, sowie der Betrieb in starken Magnetfeldern von über 3 T.

⁵Halbleiterdiode mit der Schichtfolge p-dotiert, intrinsisch, n-dotiert.

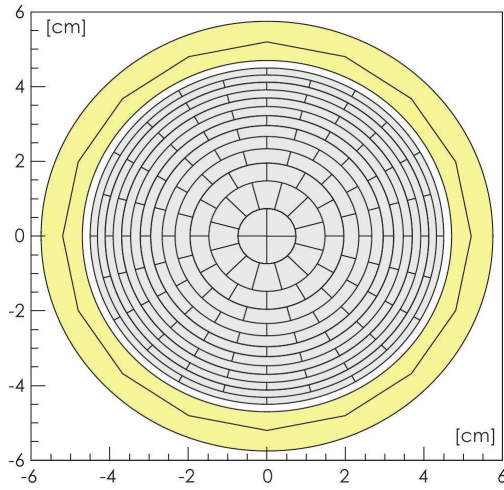


Abbildung 1.7: Design des 148 Pixel Detektors. Die in 148 Pixel unterteilte PIN Diode hat eine sensitive Fläche von $63,6 \text{ cm}^2$ und unterteilt sich in 12 Kreisringe mit jeweils 12 Segmenten sowie ein vierfach unterteiltes Zentrum.

1.3 Die Spannungskalibrierung und Stabilität des KATRIN-Experiments

In diesem Abschnitt wird die systematische Unsicherheit und der Einfluss von Fluktuationen der Retardierungsspannung auf die Bestimmung der Neutrinomasse diskutiert. Anschließend werden Methoden zur Überwachung der Retardierungsspannung aufgezeigt.

1.3.1 Systematische Unsicherheiten des Retardierungspotentials

Damit das KATRIN Experiment die geplante Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ erreicht, gelten folgende Obergrenzen für die statistischen Unsicherheiten

$$\Delta m_{\text{stat}}^2 = 0,018 \text{ eV}^2/c^4 \quad (1.3.1)$$

Des weiteren dürfen die systematischen Unsicherheiten den Wert von

$$\Delta m_{\text{syst,total}}^2 \leq 0,017 \text{ eV}^2/c^4 \quad (1.3.2)$$

nicht überschreiten. Für die gesamte systematischen Unsicherheit gibt es fünf Hauptbeiträge von jeweils⁶:

$$\Delta m_{\text{syst},U_{\text{ret}}}^2 \leq 0,0075 \text{ eV}^2/c^4 \quad (1.3.3)$$

Einer dieser Hauptbeiträge ist die systematische Unsicherheit des Retardierungspotentials. Diese wird im Folgenden näher betrachtet und die resultierenden Anforderungen an die Überwachung der Hochspannung dargestellt.

⁶Die Beiträge werden quadratisch addiert $\Delta m_{\text{syst,total}}^2 \leq 0,017 \text{ eV}^2/c^4 = \sqrt{5 \cdot (0,0075 \text{ eV}^2/c^4)^2}$

Betrachtet man zunächst eine einfache Form des β -Spektrums in Abhängigkeit der Energie E (1.3.4) und der Neutrinomasse m_{ν_e} , so enthält diese die Endpunktsenergie E_0 als freien Parameter. Alle weiteren, hier nicht relevanten, Konstanten sind zu einem konstanten Faktor a zusammengefasst [Thu07].

$$S_{theo}(E, m_{\nu_e}) = \frac{d\dot{N}}{dE} = a \cdot (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4}. \quad (1.3.4)$$

Entwickelt man diese theoretische Zählrate in einer Taylorreihe bis zur zweiten Ordnung mit dem Entwicklungspunkt $m_{\nu_e} = 0$ so ergibt sich:

$$S_2(E, m_{\nu_e}) = a \cdot (E_0 - E)^2 - a \cdot \frac{1}{2} m_{\nu_e}^2 c^4. \quad (1.3.5)$$

Um den Einfluss einer unbekannten gaussförmigen Fluktuation der Hochspannung zu bestimmen, betrachtet man die Faltung der Zählrate (1.3.4) (mit $m_{\nu_e} = 0$) und der unbekannten Störung mit dem Erwartungswert $\mu = 0$ und der Breite σ .

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (1.3.6)$$

So folgt die simulierte Zählrate $S_{sim}(E, 0)$:

$$\begin{aligned} S_{sim}(E, 0) &= f(x) \otimes S_{theo}(E, 0) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot S_{theo}(E - x, 0) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} a \cdot (E_0 - E + x)^2 dx \\ &= a(E_0 - E)^2 \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx}_{=1} + 2a(E_0 - E) \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx}_{=0} \\ &\quad + a \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} dx}_{=\sigma^2} \\ S_{sim}(E, 0) &= f(x) \otimes S_{theo}(E, 0) = a(E_0 - E)^2 + a\sigma^2. \end{aligned} \quad (1.3.7)$$

Vergleicht man die Koeffizienten der Taylorentwicklung der theoretischen Zählrate (1.3.5) mit der simulierten Zählrate (1.3.7) so ergibt sich:

$$m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2 \quad (1.3.8)$$

Aus dem obigen Koeffizientenvergleich zeigt sich, dass eine unbekannte Fluktuation der Retardierungsspannung einen scheinbar negativen Beitrag zur Neutrinomasse leistet.

$$\Delta m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2 \quad (1.3.9)$$

Durch den maximalen Beitrag der Retardierungsspannung zur systematischen Unsicherheit (1.3.3) ergibt sich die zulässige Breite einer unbekannten Fluktuation der Hochspannung zu:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{0,0075 \text{eV}^2}{2}} = 0,061 \text{eV} \\ \Rightarrow \sigma_{U_{ret}} &\leq 61 \text{ mV} \end{aligned} \quad (1.3.10)$$

Die maximale Unsicherheit von 61 mV entspricht bei einer Retardierungsspannung von 18,6 kV einer relativen Unsicherheit von 3,3 ppm. Die Hochspannung muss daher mindestens über die Dauer eines Messzyklus mit einer Genauigkeit von 3,3 ppm bekannt sein. Um systematische Effekte über alle Messzyklen zu untersuchen, ist es nötig, die Genauigkeit über die gesamte Messdauer von drei Jahren einzuhalten.

Eine Absolutkalibrierung der Retardierungsspannung ist nicht notwendig, da die Neutrinomasse aus der Form des integrierten Spektrum bestimmt wird und daher nur relative Änderungen mit einfließen. Eine absolute Kalibrierung bietet jedoch die Möglichkeit, systematische Effekte zu untersuchen.

1.3.2 Methoden zur Überwachung des Retardierungspotentials

Um die Vorgaben der systematischen Unsicherheit für das Retardierungspotential einzuhalten, sind hochpräzise und redundante Überwachungen der Retardierungsspannung nötig. Zu diesem Zweck nutzt das KATRIN-Experiment mehrere Methoden.

Monitorspektrometer

Paralell zum Hauptspektrometer wird ein so genanntes Monitorspektrometer betrieben. Es handelt sich hierbei um das Spektrometer vom MAC-E-Filter Typ des ehemaligen Mainzer Neutrinoexperiments. Die Retardierungsspannung ist für beide Spektrometer dieselbe (s. Abb. 1.8).

Das Monitorspektrometer wird genutzt, um die Messungen des KATRIN-Experiments an atomare und nukleare Standards zu koppeln. Diesem Zweck dient eine Elektronenquelle,

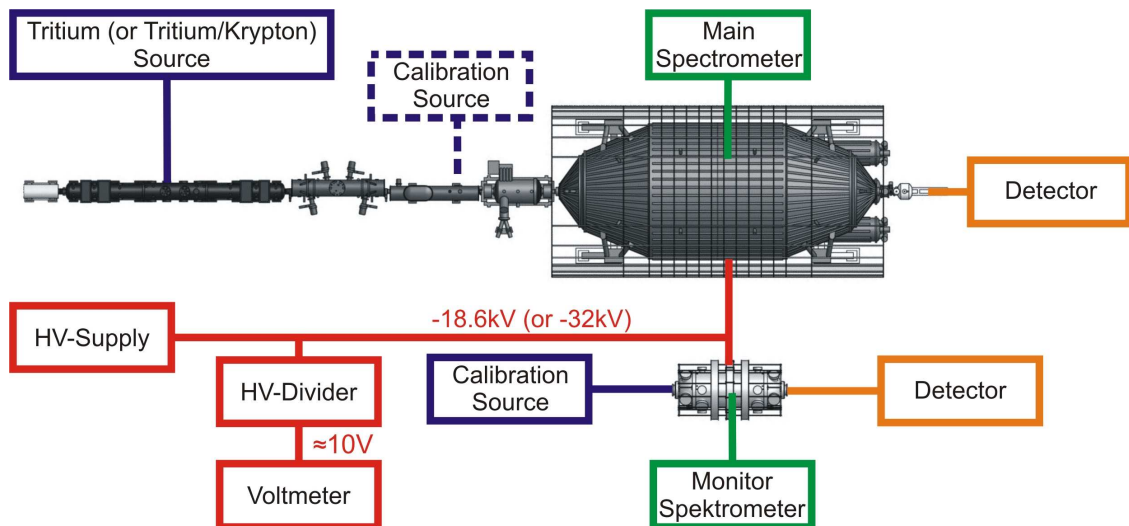


Abbildung 1.8: Schaubild der Kalibrierungs und Überwachungsmaßnahmen des KATRIN-Experiments. Alle genutzten Möglichkeiten zur Überwachung der Retardierungsspannung während einer Tritiummessung sind durch durchgezogene Linien dargestellt. Für Kalibrierungsmessungen werden Kalibrierungsquellen eingekoppelt (gestrichelte Linie).

welche Konversionselektronen aus dem Zerfall von ^{83m}Kr mit wohldefinierten, scharfen Linien bei 17,8 und 30 kV nutzt. [Zbo10].

Kalibrierung durch Kalibrierungsquellen

Für die direkte Kalibrierung des Experiments werden ebenfalls Konversionselektronen aus dem Zerfall von ^{83m}Kr verwendet. Dies kann auf zwei Arten geschehen, entweder wird dem Tritiumgas ein bestimmter Anteil ^{83m}Kr beigemischt oder eine kondensierte Kryptonquelle (CKrS) [Sch10] wird im Bereich der kryogenen Pumpstrecke in das Experiment eingekoppelt (s. Abb. 1.8).

Hochpräzisionsmessung der Retardierungspotentials

Eine direkte Messung der Retardierungsspannung ist mit Voltmetern aufgrund der hohen Spannung nicht möglich, daher muss die Spannung zuvor mit einem Spannungsteiler auf eine niedrigere Spannung herunter geteilt werden. Wie in Kapitel 1.3.1 beschrieben, ist es nötig, die Retardierungsspannung auf 3 ppm über die Messdauer von drei Jahren zu überwachen. Daher ist es nötig auf einen Spannungsteiler, sowie ein Voltmeter, mit einer entsprechend hohen Präzision und Stabilität zurück zu greifen.

Kommerziell erhältliche $8\frac{1}{2}$ -Stellen Digital-Multimeter besitzen eine Stabilität von 3,2 ppm über ein Jahr in Messbereichen zwischen 10 und 20 V [Flu85]. Diese Stabilität kann durch den regelmäßigen Vergleich mit einer 10 V Gleichspannungsreferenz (Fluke 732A oder 732B) auf unter 1 ppm reduziert werden. Diese Referenz kann in jährlichen Abständen an der PTB mit

dem Josephson-Normal⁷ verglichen und somit ihr Spannungswert auf besser 1 μV (entspr. 0,1 ppm) bestimmt werden.

Da die oben genannten Multimeter ihre höchste Präzision und Stabilität im 10 bzw. 20 V Messbereich aufweisen, ist es nötig die anliegende Hochspannung auf diesen Bereich herunter zu teilen. Daher ist es nötig einen Spannungsteiler zu verwenden, der die Spannung im Verhältnis von etwa 1860:1 (3200:1 bei Kalibrierungen mit N-Konversionselektronen von $^{83\text{m}}\text{Kr}$, $E_{\text{N}32}=32,1\text{ keV}$) teilt. Die mit dem Multimeter zu messende Spannung sollte überdies so nah wie möglich bei der vorhandenen Referenzspannung (10 V) liegen, damit Fehler aufgrund nichtlinearer Verstärkung des Multimeters minimiert werden können.

Da es keinen kommerziellen Spannungsteiler gibt der den Anforderungen des KATRIN-Experiments genügt, wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Messwandler und Hochspannung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (Abt. 2.32 der PTB) ein 35kV Hochspannungsteiler entwickelt [Thu07].

1.4 Der erste KATRIN-Spannungsteiler

Als Vorbild für beide KATRIN-Spannungsteiler dient der Referenzspannungsteiler MT100 der PTB [Mar01]. Dieser ist in der Lage Spannungen von bis zu 100 kV in den Verhältnissen 100:1 und 10000:1 herunter zu teilen. Im MT100 sind 101 Präzisions-Drahtwiderstände mit einem Gesamtwiderstand von etwa 1 G Ω verbaut, in der Verwendung dieser Widerstände liegt der wesentliche Unterschied zu den KATRIN-Spannungsteilern. Die hervorragenden und sehr stabilen im MT100 verbauten Präzisions-Drahtwiderstände werden nicht mehr hergestellt.

Mechanisch ist der erste KATRIN-Spannungsteiler aus fünf runden Kupferelektroden mit einem Durchmesser von 460 mm aufgebaut. Diese bilden durch 105 mm lange Abstandshalter die vier Ebenen, welche je 25 der 100 Widerstände der Primärkette beinhalten. Der gesamte Aufbau wird von einem Edeltank umgeben, welcher geerdet ist und so für Berührungssicherheit sorgt. Durch sein abgeschlossenes Volumen ermöglicht der Tank eine interne Temperaturregelung und dient zusätzlich als Faraday'scher Käfig, welcher das Einstrahlen von äußeren elektromagnetischen Störungen vermeidet. Damit der Spannungsteiler leicht transportiert werden kann, wurde der gesamte Aufbau in einem rollbaren Rahmen aus Aluminium-Profilen (Kanya) installiert.

Der eigentliche Spannungsteiler (siehe Abbildung 1.9) besteht aus 100 Präzisionswiderständen vom Typ Vishay VHA-518-11 mit einem Widerstandswert von je 1,84 M Ω . Die beiden Abgriffwiderstände werden durch jeweils drei parallele 140 k Ω Widerstände gebildet. Dadurch ergeben sich die Teilverhältnisse zu $M_{1972}=1972:1$ und $M_{3944}=3944:1$.

Parallel zur Primärkette verläuft ein Kontrollteiler aus Hochspannungswiderständen und Hochspannungskondensatoren. Die Widerstände ermöglicht die Formung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden. Dazu sind Widerstände vom Typ Caddock MX480 [CAD08]

⁷Spannungsnorm basierend auf dem von Brian D. Josephson vorhergesagten Josephson-Effekt. Zwischen zwei schwach gekoppelten Supraleitern entstehen, bei Einstrahlung von Mikrowellen, diskrete Spannungstufen. Dabei wird eine Genauigkeit von bis zu 1 nV bei Spannungen von 10 V erreicht.

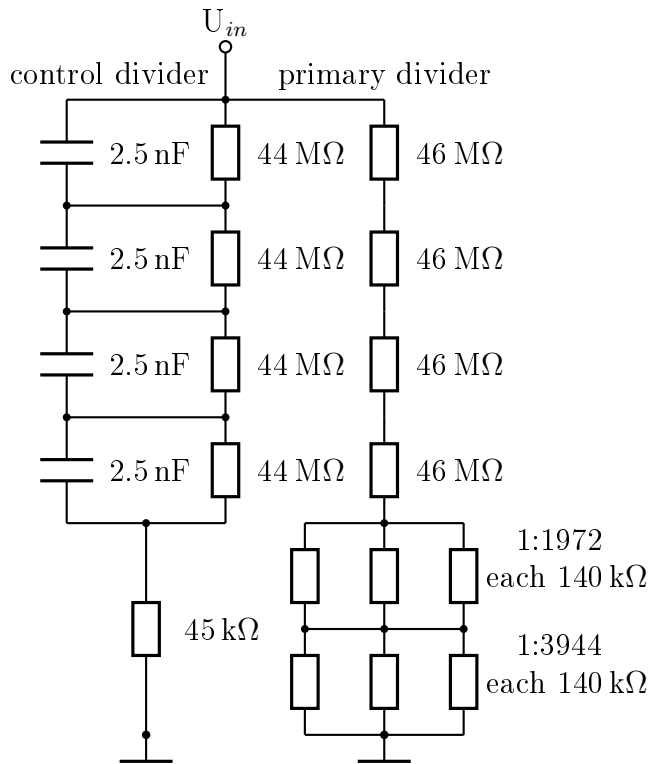


Abbildung 1.9: Der erste KATRIN Spannungsteiler. Gezeigt ist das Schaltbild des Spannungsteiler, wobei die Widerstände der Primärkette zu vier Widerständen zusammen gefasst sind (links) und der geöffnete Spannungsteiler, bei dem der innere Aufbau gut zu sehen ist (rechts).

zwischen den Elektroden montiert und die unterste Elektrode wird über zwei parallele Cad-dock MS260 [CAD04] mit einem Widerstandswert von je $90\text{ k}\Omega$ geerdet. Dadurch kann der Kontrollteiler auch zur Überwachung der Hochspannung mit einer Genauigkeit von etwa 100 ppm genutzt werden. Die Kapazitäten schützen die Widerstände der Primärkette vor Überspannungen bei plötzlichen, starken Spannungssprüngen der anliegenden Hochspannung. Es ist in jeder Ebene ein Hochspannungskondensatoren vom Typ Vishay MKT1816 mit je $2,5\text{ nF}$ und einer Spannungsfestigkeit von 10 kV verbaut.

Der erste KATRIN-Spannungsteiler wurde insgesamt dreimal am Referenzspannungsteiler MT100 der PTB kalibriert. Dies geschah in den Jahren 2005, 2006 und 2009. Dabei ist anzumerken, dass vor der Kalibrierung im Jahr 2009 einige Umbauten und Erweiterungen am Spannungsteiler vorgenommen wurden. Als Wichtigste ist die Realisierung eines 1:100 Abgriffs zur Selbstkalibrierung zu nennen. Aus diesem Grund wurde die Teilerkette geöffnet und einige Widerstände wurden untereinander getauscht und somit an andere Positionen im Spannungsteiler gebracht [Ros10]. Dadurch sind die Werte der Kalibrierungen aus den Jahren 2005 und 2006 nicht direkt mit den Daten aus 2009 zu vergleichen.

Die Ergebnisse der Kalibrierung aus den Jahren 2005 und 2006 sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst. Die Daten der Kalibrierung im Jahr 2009 finden sich in [Ros10].

Betrachtet man die gewonnenen Daten der Kalibrierungen aus 2005 und 2006 so beobachtet man eine Stabilität und Reproduzierbarkeit im ppm-Bereich. Das Langzeitverhalten des ersten Spannungsteiler ist jedoch nicht optimal für das KATRIN-Experiment, da sich die

Parameter	1972:1-Abgriff	3944:1-Abgriff	MT100
Maßstabsfaktor	1972,48016(61) : 1	3944,95973(138) : 1	100:1, 10000:1
Temperaturabhängigkeit	-0,081(6) ppm/K	-0,171(73) ppm/K	0,67 ppm/K
Temperaturschwankung	<0,1 K		±0,15 K
Spannungsabhängigkeit	0,032(6) ppm/kV	0,031(4) ppm/kV	≤0,5 ppm, $U \geq 1$ kV
Spannungsbereich	8 kV bis 32 kV		bis 100 kV
Aufwärmabweichung	≈ 1 ppm		1 ppm
Aufwärmzeit (ppm)	2 min		
Aufwärmzeit (sub-ppm)	3 h		
Reproduzierbarkeit	0,33 ppm		
Langzeitstabilität	0,604 ppm/Monat	0,564 ppm/Monat	≤2 ppm/Jahr

Tabelle 1.1: Kalibrierungsergebnisse des ersten Spannungsteilers an der PTB (2006) [Thu07]. Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse des ersten KATRIN-Spannungsteilers sowie die Spezifikationen des PTB Referenzteiler MT100. Die angegebene Langzeitstabilität des 35kV KATRIN-Spannungsteilers bezieht sich auf eine Drift des Maßstabsfaktors zwischen den Kalibrierungsergebnissen von 2005 und 2006. Die Spezifikationen des PTB-Referenzteilers sind als Höchstwerte zu verstehen, die sich aus der doppelten Standardabweichung der langjährigen Kalibrierungshistorie des Teilers ergeben.

Teilverhältnisse bei einer Drift von etwa 0,6 ppm/Monat und einer Messzeit von drei Jahren um etwa 20 ppm ändern. Eine Messperiode des KATRIN-Experiment dauert drei Monate und in dieser Zeit driftet der Spannungsteiler um etwa 1,8 ppm, damit können die KATRIN Anforderungen (3 ppm) für einen Messzyklus eingehalten werden. Dadurch ist aber keine Untersuchung der systematischen Effekte über die gesamte Messdauer möglich. Die Drift von 0,6 ppm/Monat bezieht sich auf die Messungen im Jahr 2005 und 2006. Die Drift wird laut Vishay mit zunehmender Betriebsdauer kleiner. Dies kann nur durch wiederholte Messungen an der PTB gezeigt werden.

Die Langzeitdrift ist ein wichtiger Punkt für die Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungs-Messung am KATRIN-Experiment. Diese und weitere gewonnene Erfahrungen wurden bei der Entwicklung eines zweiten Präzisions-Hochspannungsteilers für das KATRIN-Experiment berücksichtigt.

1.5 Zielsetzung des zweiten Spannungsteilers

Aufgrund der Tatsache, dass das KATRIN-Experiment für den Messbetrieb auf eine sehr präzise Überwachung der Retardierungsspannung angewiesen ist (Kap. 1.3), würde ein Ausfall des Spannungsteilers unweigerlich zum Stillstand des Experiments führen. Um eine redundante Hochspannungsüberwachung aufzubauen, wurde von F. Hochschulz im Rahmen seiner Diplomarbeit ein zweiter Hochspannungsteiler entwickelt, wobei die am ersten Spannungsteiler gewonnenen Erfahrungen in die Entwicklung einfließen [Hoc08].

Neben des Vorhandenseins eines zweiten Spannungsteilers bei Ausfall des Ersten, ist es so auch möglich, einen Spannungsteiler an der PTB zu kalibrieren während mit dem anderen

am Experiment gemessen wird. Somit lassen sich Pausen im Messbetrieb des KATRIN-Experiments aufgrund routinemäßiger Kalibrierungen vermeiden. Weiterhin lassen sich mit zwei Spannungsteiler das Monitorspektrometer und die Hauptstrecke unabhängig voneinander betreiben.

Durch einen zweiten Spannungsteiler ist es möglich, die Spannungsteiler gegenseitig zu kalibrieren und somit ist eine Möglichkeit zur Selbstkontrolle gegeben. Weiterhin kann, durch das Vorhandensein von zwei Spannungsteiler dieser Präzision, eine eigenständige Kalibrierung durchgeführt werden, was ein weitgehend von der PTB unabhängiges Arbeiten ermöglicht.

Ein weiterer wichtiger Vorteil eines zweiten Spannungsteilers ist die Möglichkeit der Weiterentwicklung. Während des Aufbaus und Betriebs des ersten Spannungsteilers wurden einige Verbesserungsmöglichkeiten gefunden und beim zweiten Spannungsteiler umgesetzt. So gibt es im zweiten Spannungsteiler eine separate Ebene für die Abgriffebene und ein Peltierelement mit doppelter Leistung zur Temperaturstabilisierung innerhalb des Teilers.

Nach Gesprächen mit der Firma Vishay, welche schon die Widerstände für den ersten Spannungsteiler herstellte, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kernphysik Entwicklungsarbeit in der Fertigung geleistet. Das führte zu kleineren, intern vorkompensierten Temperaturkoeffizienten. Zusätzlich wurde das so genannten „pre-aging“-Verfahren angewendet wodurch eine alterungsbedingte Drift reduziert werden soll (s. Abschnitt 3.2.3).

Um dem Spannungsteiler mehr Anwendungs- und Testmöglichkeiten an unabhängigen Experimenten, über das KATRIN-Experiment hinaus zu geben, wurde die Maximalspannung auf 65 kV erhöht und die Frequenzabhängigkeit des Maßstabsfaktor des Kontrollteiler hinsichtlich der Realisierung eines Hochfrequenz-Tastkopfes optimiert. Dies ermöglicht die Untersuchung von Restwelligkeiten und ähnlichen Störungen auf Hochspannungen. Eine, durch diese Erweiterungen ermöglichte, Anwendung ist zum Beispiel die Reduzierung von systematischen Unsicherheiten am BeTINA-Experiment.

Das BeTINA-Experiment (Beryllium Trap for the Investigation of Nuclear charge radii) hat das Ziel den Ladungsradius von Halo-Kernen am Beispiel von Beryllium zu untersuchen. Dazu wird die Isotopenverschiebung der Energieniveaus verschiedener Isotope eines Elements mittels hochauflösende Laserspektroskopie ermittelt. Die Berylliumionen für diese Messungen werden von ISOLDE am CERN bereitgestellt. Der Zugang zur Änderung des Ladungsradius erfolgt über die Kombination von Laserspektroskopie und theoretischen Berechnungen der Isotopenverschiebung [Bet06]. Bei der Erzeugung der Ionen treten Beschleunigungsspannungen bis 60 kV auf. Bei der Ionenoptik werden Spannungen von ± 10 kV benötigt. Mögliche Einsatzgebiete für den Spannungsteiler sind die Kalibrierung der verwendeten Netzteile sowie die Untersuchung von Rauschen bis herunter zu 100 Hz auf Gleichspannungen bis 65 kV. Während des Messbetriebes kommt es bei der Ionenoptik zu Spannungssprüngen von 3 V alle 4 ms, was besondere Ansprüche an die Zeitkonstante des Spannungsteiler stellt [Hoc08].

1.6 Inhalt dieser Arbeit

Diese Arbeit beschreibt den Aufbau und die Inbetriebnahme des zweiten KATRIN-Spannungsteilers sowie die vorausgegangenen Untersuchungen der elektrischen Bauteile. Dabei gliedert sich die Arbeit folgendermaßen:

Kapitel 2: Design

Dieses Kapitel beschreibt das elektrische und mechanische Design sowie die Temperatursteuerung und das Slow Control System.

Kapitel 3: Untersuchung der elektrischen Bauteile

Dieses Kapitel behandelt die Untersuchung der verwendeten elektrischen Bauteile und insbesondere die Vermessung der Widerstände und deren Selektion. Dabei werden die verschiedenen Messmethoden beschrieben und die Ergebnisse der Widerstandsmessungen dargestellt.

Kapitel 4: Thermische Tests

Dieses Kapitel beschreibt durchgeführte Tests und Optimierungen der Temperatursteuerung.

Kapitel 5: Aufbau und Inbetriebnahme

Dieses Kapitel behandelt den Aufbau, die Inbetriebnahme und erste Testmessungen des zweiten KATRIN-Spannungsteilers. Dabei wird auf spezielle Probleme und deren Lösungen beim endgültigen Aufbau eingegangen.

Kapitel 6: Selbstkalibrierung der KATRIN Spannungsteiler

Dieses Kapitel beschreibt verschiedene Methoden der Kalibrierung der KATRIN-Spannungsteiler und deren Überwachung. Des weiteren werden grundlegende Methoden und Anforderungen an die Messelektronik aufgelistet.

Anhang:

Der Anhang beinhaltet die Ergebnisse der Widerstandsmessungen und die für die Kompensation gefundenen Widerstandspaare und Tripeln und deren Position im Spannungsteiler. Die Zeichnungen der verwendeten Bauteile finden sich ebenfalls im Anhang.

KAPITEL 2

DESIGN DES ZWEITEN PRÄZISIONS-SPANNUNGSTEILERS

Ein Spannungsteiler ist eine elektronische Schaltung (siehe Abb. 2.1), um Spannungen in einem bestimmten Verhältnis über zwei Widerständen abfallen zu lassen. Dies wird genutzt, um zum Beispiel Spannungen mit einer Referenzspannung zu vergleichen, (Komparatorschaltungen) oder aber wie im Fall der KATRIN-Spannungsteiler, um Hochspannungen auf sehr genaue Messbereiche eines Digitalvoltmeters herunter zu teilen.

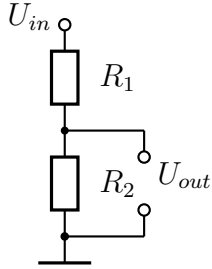


Abbildung 2.1: Einfachster Spannungsteiler. Gezeigt ist die einfachste Möglichkeit einen Spannungsteiler zu realisieren. Über die beiden Widerstände fällt jeweils ein bestimmter Teil der Spannung ab. Dabei wird der Widerstand R_1 als Teilerwiderstand und Widerstand R_2 als Abgriffwiderstand bezeichnet.

Wird nun die Spannung über den Widerstand R_2 gemessen, so ergibt sich das Verhältnis M von Eingangsspannung U_{in} und gemessener Spannung U_{out} wie folgt:

$$\frac{1}{M} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_{ges}} = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (2.0.1)$$

Dabei wird M Maßstabsfaktor bezeichnet.

In diesem Kapitel wird das elektrische und mechanische Design des zweiten KATRIN-Spannungsteiler beschrieben. Dabei wird speziell auf Änderungen gegenüber dem von F. Hochschulz geplanten Design [Hoc08] und besondere Neuerungen gegenüber dem ersten Spannungsteiler eingegangen. Weiterhin wird die Realisierung der Temperatursteuerung und die Funktion des Slow Control Systems dargestellt.

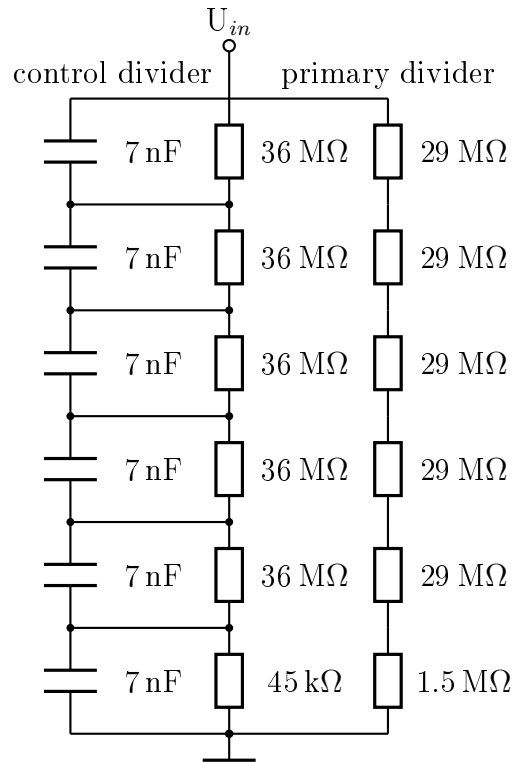
2.1 Elektrisches Design

Wie schon beim ersten KATRIN-Spannungsteiler gliedert sich auch der zweite Spannungsteiler in eine primäre Teilerkette und einen Steuer- bzw. Kontrollteiler. Ein vereinfachter Schaltplan des Spannungsteilers ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Die einzelnen Teilerketten und deren Funktion werden im Folgenden vorgestellt.

2.1.1 Primäre Teilerkette

Der Spannungsteiler, der sich aus den Präzisionswiderständen zusammensetzt, wird als Primärkette bzw. Präzisionsteiler bezeichnet. Dabei besteht die Primärkette aus Teiler- und Abgriffwiderständen. Für den Aufbau des 65 kV Spannungsteilers sollte der Teilerwiderstand durch 170 Widerstände vom Typ Vishay VHA518-11 [Vis07] (siehe Tab. 2.1 und Kapitel 3.2) mit einem Widerstand von je 880 k Ω realisiert werden. Im Vergleich zum ersten KATRIN

Abbildung 2.2: Ersatzschaltbild des 65 kV KATRIN-Spannungsteilers. Gezeigt ist das Schaltbild des zweiten Spannungsteilers. Die Widerstände der Primärkette sind ebenenweise zusammengefasst. Ein detaillierteres Schaltbild der Abgriffebene ist in Abbildung 2.3 dargestellt.



Spannungsteiler konnte so die Last pro Widerstand von 56 mW auf 43 mW bei 32 kV reduziert werden. Dies sollte zu einer geringeren Spannungsabhängigkeit führen, da durch die verringerte Verlustleistung im Widerstand auch die innere Erwärmung reduziert wird.

Die 170 Teilerwiderstände sollten aus einer Lieferung von 184 intern vorkompensierten Widerständen mit den in Tabelle 2.1 gezeigten Spezifikationen selektiert werden. Nach Absprache mit der Firma Vishay sollten Widerstände mit einem TCR von weniger als $\pm 0,3$ ppm/K zwischen 24 und 26 °C geliefert werden. Die Vermessung der Aufwärmabweichung jedes einzelnen Widerstandes (siehe Kapitel 3) ergab jedoch, dass die Kompensation der gesamten Aufwärmabweichung mit 170 Widerständen nicht ideal ist. Im endgültigen Aufbau des Spannungsteilers werden daher 165 Widerstände als Teilerwiderstand eingesetzt. Dies führt zu einer Gesamtaufwärmabweichung von etwa -0,46 ppm und einem Teilerwiderstand von 145,2 MΩ.

Die Verwendung von 165 VISHAY VHA518-11 Widerständen würde eine Maximalspannung des Teiler von 99 kV ermöglichen. Die reale Maximalspannung des Spannungsteilers beträgt 65 kV und wird durch die räumlichen Abstände innerhalb des Spannungsteilers und der verwendeten Hochspannungsbuchse vom Typ HVS65 der Firma FuG begrenzt.

Der Spannungsteiler ist in sechs Ebenen unterteilt. Die oberen Fünf beinhalten die Widerstände des Teilerwiderstands und in der untersten Ebene sind die Abgriffwiderstände untergebracht. Die Durchführung der Primärkette, durch die Kuperelektroden, erfolgt durch einen Isolator aus PTFE¹. Aus diesen Durchführungen resultieren die in Abbildung 2.6 gezeigten Streukapazitäten „CHauptEbene“ von 2,5 pF. Das Potential der Elektroden wird über den Kontrollteiler (Kapitel 2.1.2) gesteuert.

¹Polytetrafluorethylen, auch bekannt unter dem Markennamen Teflon

VISHAY VHA518-11	
Widerstand	880 k Ω
Toleranz in %	$\pm 0,1$
Maximalspannung in V	600
Maximale Leistung in W	2,5
Temperaturabhängigkeit (-50 bis 125 °C) in ppm/K	2
Temperaturabhängigkeit (24 bis 26 °C) in ppm/K	0,2 nach bestem Bemühen 0,3 Ausschlusskriterium
Leistungskoeffizient in ppm/W	4
Arbeitsleistung bei 25 °C in W	0,07

Tabelle 2.1: Spezifikation der Vishay Präzisionswiderstände vom Typ VHA518-11. Die in der Abgriffebene verbauten Widerstände sind von selben Typ jedoch mit Widerstandswerten zwischen 121 k Ω und 1,2 M Ω (siehe Abb. 2.3).

Anders als in Abbildung 2.1 gezeigt, ist der Abgriffwiderstand von 1,5 M Ω durch eine Reihenschaltung von mehreren parallel geschalteten Widerständen realisiert (siehe Abb. 2.3).

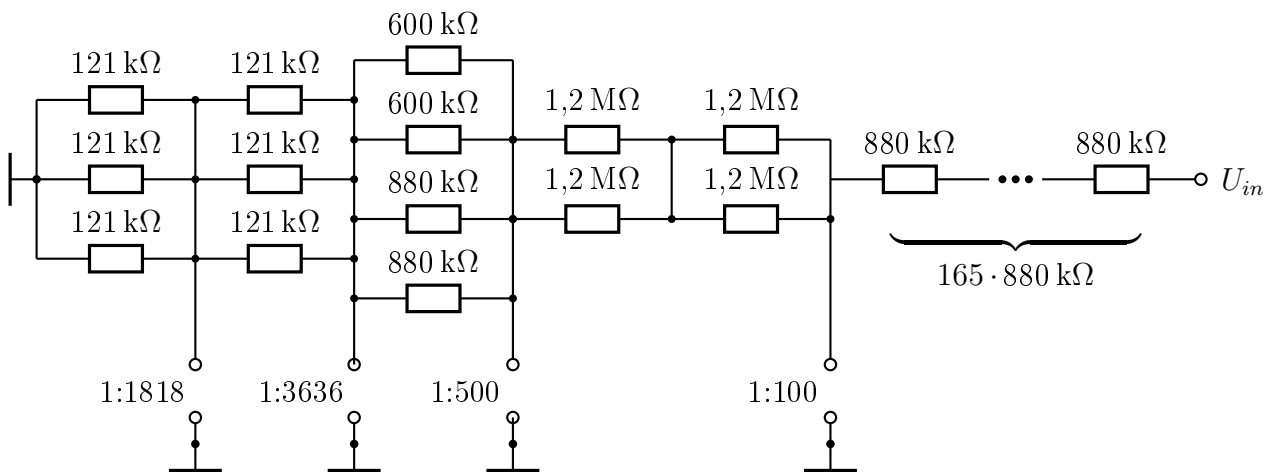


Abbildung 2.3: Widerstandskonfiguration der Primärkette in der Abgriffebene. Es wird gezeigt, wie die einzelnen Teilverhältnisse durch Parallel- und Serienschaltung von Widerständen realisiert wurden. Die Parallelschaltung dient dem angeschlossenen Präzisionsmultimeter als Schutz.

Durch die Serienschaltung ist es möglich mehrere Maßstabsfaktoren in einem Teiler zu realisieren. Die Parallelschaltung der Abgriffwiderstände schützt das nachfolgende Multimeter vor Schaden bei Ausfall eines Widerstands. Wäre nur ein Widerstand pro Teilverhältnis vorhanden, würde beim Ausfall des Widerstandes die am Teiler anliegende Spannung fast vollständig am Multimeter abfallen, da dieses einen Innenwiderstand von mehr als 10 G Ω besitzt [Flu85].

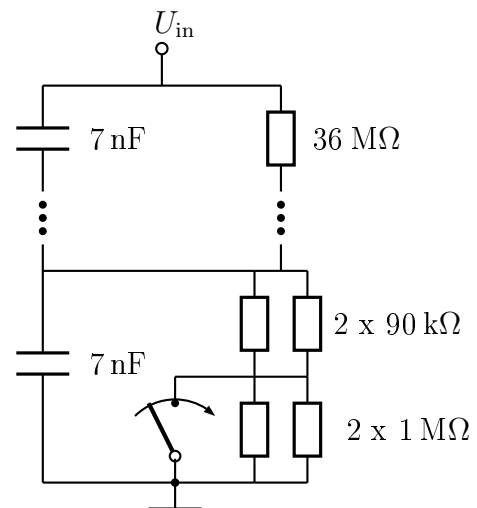
2.1.2 Kontrollteiler

Der Kontroll- oder auch Steuerteiler besteht aus Hochspannungswiderständen und dazu parallelen Hochspannungskondensatoren welche zwischen den Kupferelektroden verbaut sind. Es handelt sich demnach um einen kapazitiven ohmschen Kontrollteiler. Die Widerstände sorgen für einen Spannungsabfall zwischen den Ebenen, welcher dem Spannungsabfall der Primärkette annähernd entspricht. Die Kupferelektroden der Ebenen formen, durch das Design ihrer Ränder, ein nahezu homogenes elektrisches Feld. Dadurch befindet sich jeder Widerstand ungefähr in dem Potential, welches an ihm anliegt. Dies führt zu einer Reduzierung von Kriechströmen und dient dem Schutz vor Coronaentladungen [Thu09].

Es wurden Widerstände vom Typ MX480 der Firma Caddock [CAD08] mit einem Wert von je $36\text{ M}\Omega$ verbaut. Diese sind somit leicht hochohmiger als der Widerstandswert von $29\text{ M}\Omega$ der Primärkette pro Ebene.

In der Abgriffebene (Abb. 2.4) wurden Widerstände mit kleinerem Wert verbaut, denn der Gesamtwiderstand der Abgriffebene der primär Kette beträgt $1,5\text{ M}\Omega$. Hier wurden zwei parallel geschaltete $90\text{ k}\Omega$ mit zwei ebenfalls parallel geschalteten $1\text{ M}\Omega$ Widerstände vom Typ MS260 [CAD04] in Reihe geschaltet. Die Eigenschaften der im Kontrollteiler verbauten Widerstände sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Abbildung 2.4: Widerstanskonfiguration des Kontrollteilers in der Abgriffebene. Gezeigt wird der Kontrollteiler in der Abgriffebene mit der Möglichkeit den Punkt zwischen den beiden Parallelschaltungen zu erden. Dabei ist der Kurzschlussstecker als Schalter dargestellt. Wird der Kurzschlussstecker gesteckt, so sind die $1\text{ M}\Omega$ Widerstände kurzgeschlossen und der Teiler arbeitet als wären diese Widerstände nicht eingebaut. Soll der kapazitive Tastkopf genutzt werden, so kann einfach der Kurzschlussstecker gezogen werden.



Die Wahl der Widerstandskonfiguration in der Abgriffebene hat zwei Gründe. Die parallele Anordnung dient auch hier als Schutz des nachgeschalteten Messgerätes. Der zusätzliche Einbau von zwei parallelen $1\text{ M}\Omega$ Widerständen wird für den kapazitiven Tastkopf (Kapitel 2.1.3) benötigt. Wie in Abbildung 2.4 gezeigt wird, gibt es einen Schalter in Form eines Kurzschlusssteckers am Spannungsteiler. Mit diesem kann man den Verbindungspunkt zwischen den Widerständen von Außen erden. Ist der Kurzschlussstecker gesteckt, so kann der Kontrollteiler auch als dieser benutzt werden und am Ausgang liegen maximal $16,25\text{ V}$ an. Ist der Stecker nicht gesteckt, so wird der Ausgang des Kontrollteilers als kapazitiver Tastkopf genutzt und es liegen maximal 200 V am Ausgang.

Nutzt man den Kontrollteiler bei gestecktem Kurzschlussstecker, so besteht die Möglichkeit die am Teiler anliegende Hochspannung mit einer Genauigkeit von etwa 100 ppm und einem Teilverhältnis von $1:4000$ durch das Slow Control System (Kapitel 2.4) zu überwachen.

Typ	Caddock MX480	Caddock MS260
Widerstand	36 M Ω	90 k Ω /1 M Ω
Toleranz in %	± 1	± 1
Maximalspannung in kV	24	2
Temperaturabhängigkeit ppm/K	80	50

Tabelle 2.2: Spezifikation der Caddock Hochspannungswiderstände vom Typ MX480 und MS260

Schaltet man plötzlich eine hohe Gleichspannung auf den Spannungsteiler, so würde aufgrund von Streukapazitäten welche zum Beispiel durch die Kapazität zwischen Kupferelektrode und Stahltank gebildet werden, im ersten Moment eine überhöhte Spannung am ersten Widerstand abfallen. Diesem Verhalten wirken Kapazitäten, welche parallel zur Widerstandskette verlaufen, entgegen. Diese werden zum einen durch die Kapazität zwischen den einzelnen Elektroden und zum anderen durch zusätzlich eingebaute Kondensatoren, des Kontrollteilers, gebildet [Thu09]. Die zusätzlichen Kondensatoren lassen, bei plötzlichem Einschalten der Hochspannung, die Wechselspannungsanteile der Hochspannung passieren und schützen somit die Widerstände vor Überspannung.

Die im zweiten Spannungsteiler verbauten Kondensatoren sind Folienkondensatoren der Firma Fischer und Tausche. Diese Kondensatoren wurden speziell auf die Anforderungen des Spannungsteiler gefertigt und besitzen eine Kapazität von 2,5 nF ($\pm 10\%$) bei einer Spannungsfestigkeit von 20 kV. Die ursprüngliche Planung sah einen Kondensator pro Ebene vor, doch die Implementierung eines Hochfrequenz-Tastkopfs (Kap. 2.1.3) machte es nötig die Kapazität zu erhöhen, um die Grenzfrequenz des Tastkopfs auf etwa 35 Hz zu verringern. Aus diesem Grund wurden pro Ebene drei Kondensatoren parallel verbaut, was eine Kapazität von etwa 7 nF ergab, da alle Kondensatoren in ihrer Toleranz nach unten abweichen.

Die folgenden Simulationen wurden mit dem Schaltungssimulationsprogramm QUCS² (Quite Universal Circuit Simulator) durchgeführt. Bei der Simulation wurden die Streukapazitäten berücksichtigt. Der verwendete Schaltplan ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Betrachtet man den Spannungsteiler zunächst ohne die in Abbildung 2.6 gezeigten Streukapazitäten C1-C7 und ohne die Schutzkapazitäten des Kontrollteilers, so zeigt die Transientensimulation, eines Spannungssprung von 99 kV, eine Überhöhung der zulässigen Spannung am ersten Widerstand von fast 450% (siehe Abb. 2.5 oben). Dies würde unweigerlich zur Zerstörung des Widerstandes führen.

Berücksichtigt man die Streu- und Schutzkapazitäten bei der Transientensimulation, so ergibt sich eine deutliche Reduzierung der am ersten Widerstand anliegenden Spannung. Die Transientensimulation für verschiedene Werte der Schutzkondensatoren ist in Abbildung 2.5 (unten) gezeigt. Durch die von den Elektroden gebildeten Streukapazitäten C1-C7 wird die Überhöhung der Maximalspannung auf 50% reduziert. Diese Reduktion kann durch die zusätzlichen Schutzkapazitäten noch erweitert werden. Bei der Verwendung von 2,5 nF Kondensatoren würde eine Überspannung am ersten Widerstand, selbst bei einem Spannungssprung von 99 kV, vollständig verhindert werden (Abb. 2.5 unten). Damit wären Kondensatoren mit

²Schaltungssimulationsprogramm unter GNU General Public License. <http://qucs.sourceforge.net>

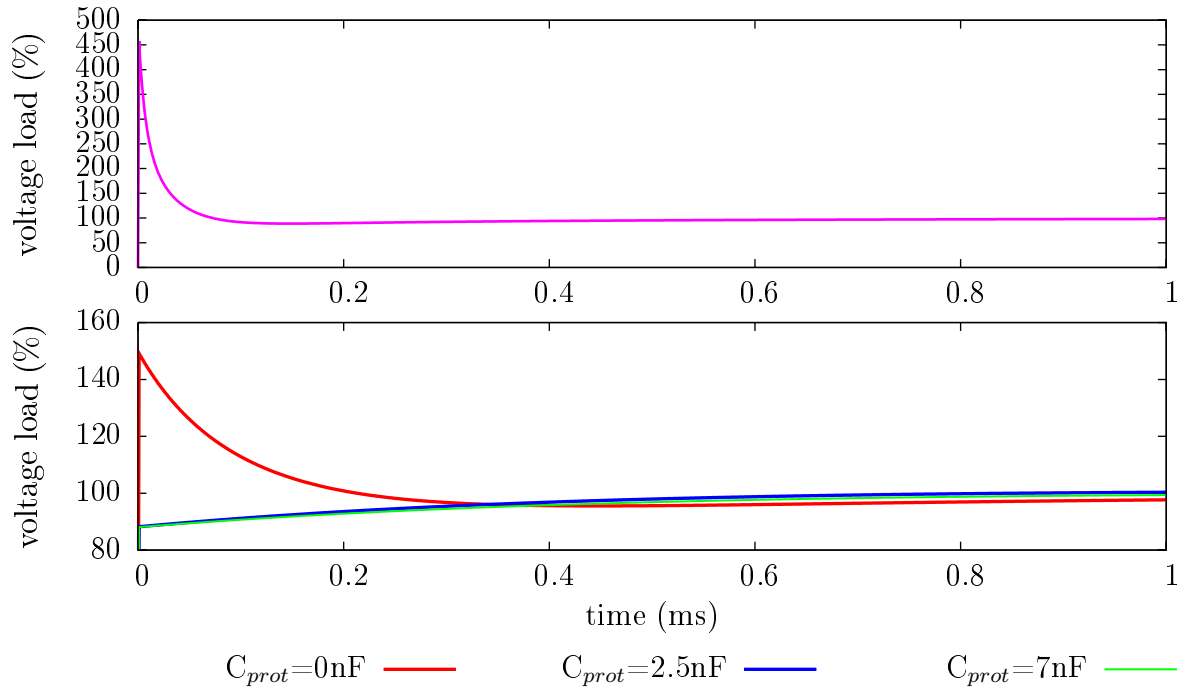


Abbildung 2.5: Simulation des Spannungsabfalls über dem ersten Widerstand der Primärkette bei einem Spannungssprung. Gezeigt ist die Transientensimulation des Spannungsabfalls über den ersten Widerstand der Primärkette bei einer Gleichspannung von 99 kV und einer Flankensteilheit von 1 ns. Die Graphen zeigen jeweils den Anteil der am ersten Widerstand abfallenden Spannung in Prozent der zulässigen Maximalspannung des Widerstandes gegen die Zeit. Die maximale Spannung für die verwendeten Widerstände beträgt 600 V. Der obere Graph zeigt das Verhalten ohne die Streukapazitäten (C1-C7 vgl. Abb. 2.6) und ohne Schutzkapazitäten. Im unteren Graphen ist das Verhalten des Spannungsteilers mit den Kapazitäten C1-C7 unter Berücksichtigung verschiedener Schutzkapazitäten (C_{prot}) gezeigt. Simuliert mit QUCS.

7 nF für diesen Zweck überdimensioniert. Eine Kapazität der Schutzkondensatoren von 7 nF ist jedoch für die Verschiebung der Grenzfrequenz des Hochfrequenz-Tastkopfes nötig (siehe Kapitel 2.1.3).

Seitens des BeTINa-Experiments wurde angefragt, ob die KATRIN Spannungsteiler zur Reduzierung von systematischen Fehlern des Experiments eingesetzt werden könnten. Ein Aspekt der Untersuchungen ist die Untersuchung der Spannungsrampen an der Ionenoptik des Experimentes. Dabei ändert sich die Spannung alle 4 ms um 3 V. Um mit ausreichender Genauigkeit messen zu können, müssen die Maßstabsfaktoren des Spannungsteiler eine Genauigkeit von 10 ppm nach etwa 1 ms aufweisen. Ein weiterer Aspekt ist die Untersuchung von Rauschen herunter bis 100 Hz und Amplituden von 1 V_{pp} auf Gleichspannungen von 65 kV. Aus diesem Grund wurden weitere Simulationen durchgeführt, um die Eignung des zweiten Spannungsteilers für das BeTINa-Experiment zu überprüfen.

Betrachtet man die Zeitkonstanten ($\tau = R \cdot C$) der Präzisionsabgriffe in Hinblick auf das Folgen von Spannungsrampen am BeTINa-Experiment, so zeigen die Simulationen (Abb. 2.7)

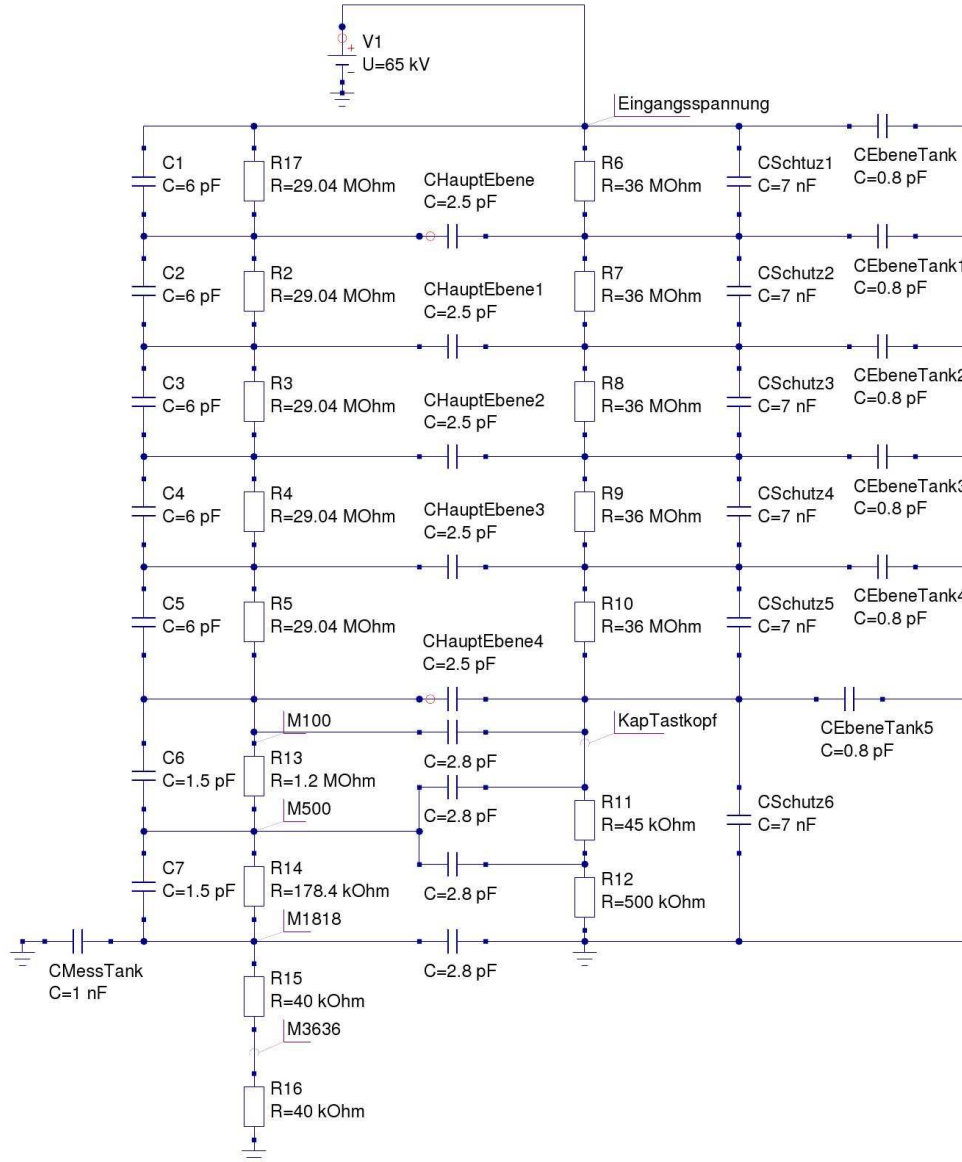


Abbildung 2.6: Schaltplan der QUCS Simulationen. Gezeigt ist der für die Simulationen verwendete Ersatzschaltplan des zweiten KATRIN-Spannungsteilers. Von links nach rechts: Die Streukapazitäten zwischen den Elektroden, die Primärkette, Streukapazitäten zwischen den Elektroden und der Primärkette, der Steuerteiler, die Schutzkapazitäten und die Streukapazitäten zwischen Elektroden und Tankwand.

dass der zweite KATRIN Spannungsteiler aufgrund der erhöhten Kapazitäten die geforderte Genauigkeit von 10 ppm erst nach etwa 41 ms erreicht. Dies verfehlt die Anforderungen des BeTINa-Experiments von 1 ms bei weitem.

Simuliert man den zweiten Spannungsteiler mit der gleichen Konfiguration der Schutzkapazitäten wie beim ersten Spannungsteiler (2,5 nF in den Ebenen und kein Kondensator über den Abgriffwiderständen), so erreicht der zweite Spannungsteiler eine Präzision von <10 ppm nach etwa 2,1 ms. Der erste Spannungsteiler erreicht bei dieser Simulation die geforderte Genauigkeit nach 1,3 ms was in den geringeren Streukapazitäten durch die geringere Anzahl an Kupferelektroden begründet ist.

Um den Spannungsrampen am BeTINa-Experiment mit der gewünschten Genauigkeit folgen zu können, müsste die Zeitkonstante weiter verringert werden. Dies ist nur möglich indem man die Streukapazitäten sowie die Schutzkapazitäten innerhalb des Spannungsteilers weiter reduziert. Da die Bauteile des Spannungsteilers bei der Anfrage durch das BeTINa-Experiment schon abschließend geplant und zum Teil schon produziert waren, konnte keine Reduktion der Streukapazitäten mehr durchgeführt werden. Auch eine Reduzierung der Schutzkapazitäten ist nicht möglich, da sonst die Grenzfrequenz des kapazitiven Tastkopfs zu sehr ansteigen würde.

Damit ein sicherer Einsatz des Spannungsteilers auch beim plötzlichen schalten von Hochspannungen gewährleistet ist, müssen Schutzkapazitäten von mindestens 2,5 nF im Kontrollteiler verbaut werden. Diese erhöhen die Zeitkonstante des Spannungsteiler über die vom BeTINa-Experiment geforderte Zeit von 1 ms. Damit kann der Spannungsteiler nicht für das Folgen schneller Spannungsrampen eingesetzt werden. Durch die Erhöhung der Schutzkapazitäten auf 7 nF kann die Grenzfrequenz des Kontrollteilers jedoch soweit nach unten verschoben werden, dass die Anforderungen für die Untersuchungen von Rauschen ab 100 Hz auf hohen Gleichspannungen voll erfüllt werden. Diese Eigenschaft kann auch am KATRIN-Experiment eingesetzt werden um Störungen auf der Hochspannungsversorgung zu untersuchen.

2.1.3 Nutzung des Kontrollteiler als Hochfrequenz-Tastkopf

Der Kontrollteiler kann zusätzlich zu seiner Steuer- und Schutzfunktion noch für die Untersuchung von Wechselspannungsanteilen auf Hochspannungen genutzt werden. Eine geplante Anwendung ist die Überwachung der Konstanz der Beschleunigungsspannung am BeTINa-Experiment. Hierfür müssen Schankungen mit einer Amplitude von $1 V_{pp}$ und einer Frequenz von 100 Hz aufgelöst werden.

Da der Kontrollteiler aus einem Widerstandsteiler parallel zu einem kapazitiven Spannungsteiler besteht (Abb. 2.8), ist der Maßstabsfaktor frequenzabhängig. Die gesamte Schaltung arbeitet ähnlich wie ein Hochpass-Filter, wobei Spannungen mit niedriger Frequenzen nicht gesperrt sondern stark unterdrückt werden. Die Transmissionsfunktion der Schaltung ist in Abbildung 2.9 gezeigt. Dabei ist bei Frequenzen unterhalb von 1 Hz der statische Fall erreicht und es wirkt sich nur der Widerstandsteiler auf die Spannung aus. Bei Frequenzen oberhalb von 1 kHz wirkt nur noch der kapazitive Teiler mit einem Maßstabsfaktor von etwa $\frac{1}{6}$.

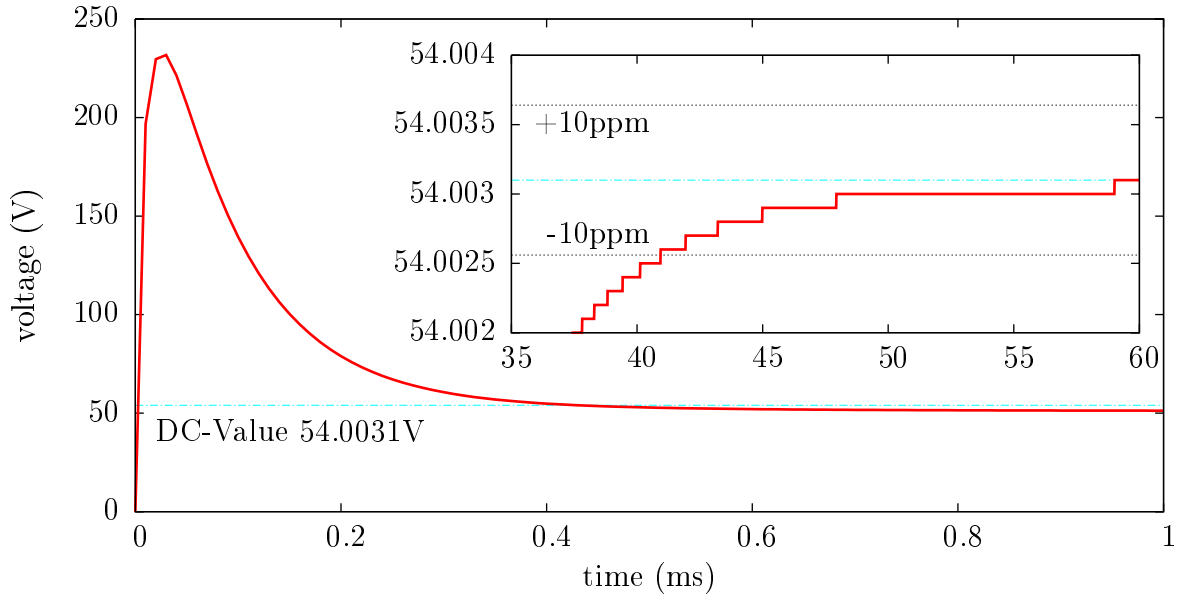


Abbildung 2.7: Antwort des 1818:1 Abgriffs auf einen Spannungssprung von 99 kV. Simulation des Ausgangssignal des 1818:1 Abgriffs bei einem Spannungssprung von 99 kV bei einer Flankensteilheit von 1 ns. Der statische Wert von 54.0031 V ist in blau eingezeichnet. Simuliert mit QUCS.

Der Maßstabsfaktor des Widerstandsteiler wird durch die Konfiguration seiner Abgriffwiderstände bestimmt. Hier besteht die Möglichkeit, über den Kurzschlussstecker, zwischen 45 k Ω (4000:1) und 545 k Ω (330:1) zu wählen. Dabei ändert sich auch die Grenzfrequenz nach Gleichung (2.1.1).

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.1.1)$$

Um die Grenzfrequenz des unbelasteten Tastkopfes auf etwa 35 Hz zu minimieren, ist eine Erhöhung des Abgriffwiderstandes nötig. Diese Reduzierung der Grenzfrequenz des unbelasteten Tastkopfes ergibt eine Grenzfrequenz von etwa 50 Hz im Betrieb mit einem Oszilloskop mit einem Eingangswiderstand von $R_i = 1 \text{ M}\Omega$. Da eine Erhöhung des Widerstandes in einer erhöhten Spannung am Abgriff des Kontrollteilers resultiert, kann dieser nicht beliebig erhöht werden. Daher wurde zunächst die Kapazität, der Kondensatoren des Kontrollteiler von 2,5 nF auf etwa 7 nF durch die Parallelschaltung von drei Kondensatoren, erhöht und dann der Widerstand der Abgriffebene so gewählt, dass eine Ausgangsspannung von 200 V nicht überschritten wird. Dadurch ist es möglich, mit einem Oszilloskop direkt an diesem Abgriff zu messen.

Die mit dem Programm QUCS simulierte Frequenzabhängigkeit des Maßstabsfaktor ist in Abbildung 2.9 dargestellt und muss noch durch Messungen verifiziert werden (Kapitel 5.2.3). Bei dieser Simulation wurde die Eingangsimpedanz des verwendeten Oszilloskops ($R_i = 1 \text{ M}\Omega$, $C_i = 13 \text{ pF}$) und die Kabelkapazität des 2,7 m langen RG174 Kabel ($C_c = 270 \text{ pF}$) berücksichtigt. Die simulierte Grenzfrequenz des Hochfrequentastkopfes, mit angeschlossenem Oszilloskop und gezogenem Kurzschlussstecker, ergibt eine Grenzfrequenz

Abbildung 2.8: Vereinfachte Darstellung des Kontrollteilers. Der Kontrollteiler besteht aus einem Widerstandsteiler parallel zu einem kapazitiven Teiler was zu einem frequenzabhängigen Maßstabsfaktor führt. In der Abbildung sind die Widerstände und Kondensatoren der oberen fünf Ebenen zu je einem Bauteil zusammengefasst. Im linken Teil des Bildes sind die Eingangskapazität (C_i) und der Eingangswiderstand (R_i) des Oszilloskops, sowie die Kabelkapazität (C_c) dargestellt. Dabei sind typische Werte für den Eingangswiderstand $1\text{ M}\Omega$, die Eingangskapazität $10\text{-}30\text{ pF}$ und für die Kabelkapazität 100 pF/m (RG58 und RG174).

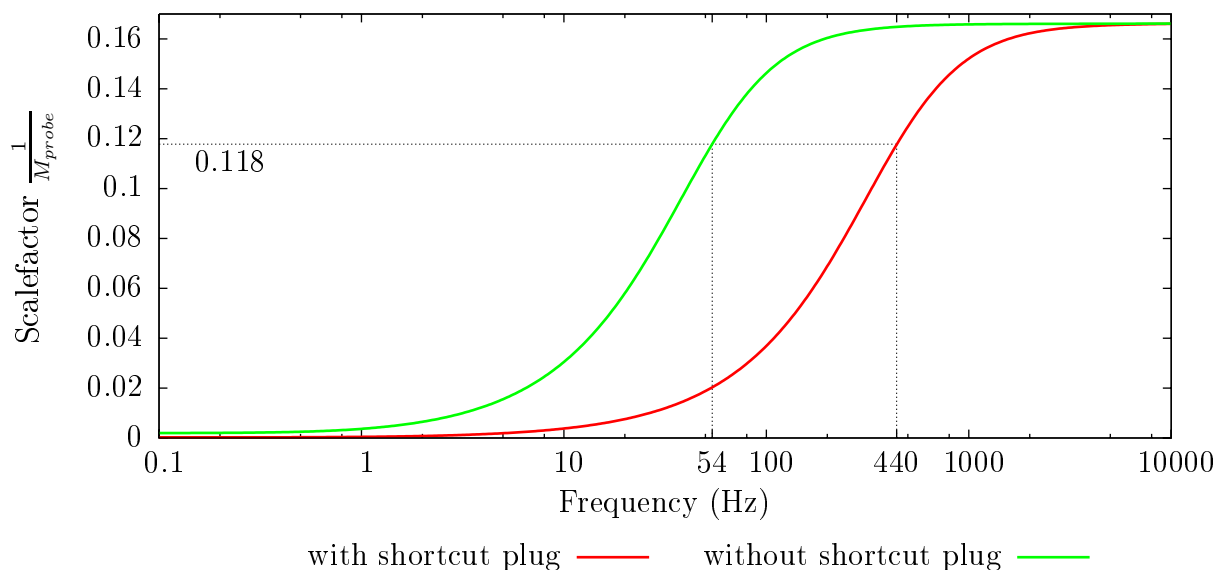
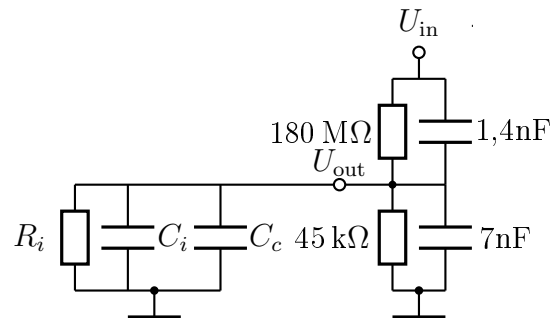


Abbildung 2.9: Simulation der Frequenzabhängigkeit des Maßstabsfaktor. Dargestellt ist der Maßstabsfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz der Eingangsspannung, bei gestecktem (rote Linie) und bei gezogenem Kurzschlussstecker (grüne Linie). Simuliert wurde ein Frequenzdurchlauf einer 10 V_{pp} Wechselspannung unter Berücksichtigung der Eingangsimpedanz des Oszilloskops und der Kabelkapazität ($R_i = 1\text{ M}\Omega$, $C_i = 13\text{ pF}$, $C_c = 270\text{ pF}$). Für hohe Frequenzen wirkt sich nur der kapazitive Teil des Kontrollteilers (mit $M=1:6$) auf die Spannung aus. Für niedrige Frequenzen arbeitet der Kontrollteiler mit seinen Gleichspannungsteilerverhältniss von $450:1$ bzw. $4170:1$ (ohne/mit Kurzschlussstecker). Simuliert mit QUCS.

von etwa 54 Hz. Ist der Kurzschlussstecker gesteckt, verschiebt sich die Grenzfrequenz durch den kleineren Abgriffwiderstand zu 440 Hz. Auch der Maßstabsfaktor des Widerstandsteiler ändert sich, durch den Eingangswiderstand des Oszilloskop, zu etwa 4170:1 bei gestecktem und 450:1 bei gezogenem Kurzschlussstecker.

Der durch die Simulation ermittelte Maßstabsfaktor bei gezogenem Kurzschlussstecker von etwa 9:1 bei 50 Hz ist ausreichend um eine Restwelligkeit von 20 mV_{pp} auf einem Oszilloskop darzustellen. Damit ist der durch den Kontrollteiler realisierte Tastkopf für die Untersuchung der Konstanz der Spannung am BeTINA-Experiment geeignet.

Oberhalb von 1 kHz bis hin zu 10 MHz ändert sich der Maßstabsfaktor um etwa 2,5 ‰, wodurch eine ausreichend genaue Untersuchung von hochfrequenten Störungen, z.B. durch Schaltnetzteile, gewährleistet ist.

2.2 Mechanisches Design

Dieser Abschnitt soll das mechanische Design zusammenfassen. Erklärungen und Daten zum Aufbau des Spannungsteilers finden sich im Kapitel 5.

Der innere Aufbau des Spannungsteiler ist in sechs Ebenen, welche die Widerstandskette aufnehmen, unterteilt. Die Abtrennung der Ebenen ist durch runde Kupferelektroden mit 474 mm Durchmesser gegeben. Diese Elektroden werden durch 105 mm lange Stützen aus POM ³getragen. Die unterste Elektrode wird durch 150 mm lange POM-stützen auf einer 15 mm starken Aluminiumplatte gehalten (s. Abb. 2.10).

In den so gebildeten Ebenen bewegt sich die Primärkette in einer Helix von der Hochspannungszuführung an der obersten Elektrode zur Erdelektrode am unteren Ende des Spannungsteilers. Dabei ändert sich die Drehrichtung nach jeder Ebene, um Induktionsströmen entgegen zu wirken.

Die Präzisionswiderstände selbst werden durch vernickelte Messinghalterungen, welche auf ebenfalls 105 mm langen PTFE-Stützen montiert sind, gehalten (Abbildung 2.10). Hier wurde PTFE anstelle von POM gewählt, da die Oberfläche von PTFE nicht benetzt und sich so keine Fette oder ähnliches auf der Oberfläche verteilen. Die Widerstände werden durch Madenschrauben in den Halterungen befestigt. Bei den Halterungen, wie bei allen hochspannungsführenden Teilen, ist es sehr wichtig, dass die Bauteile glatte Flächen und große Radien aufweisen. Durch scharfe Kanten würde es zu Feldüberhöhungen und somit zu Überschlängen kommen. Die Primärkette wird mit PTFE isolierten Durchführungen durch die Elektrode geführt.

Die Hochspannungszuführung wird durch eine vergoldete Edelstahlhalbkugel realisiert, welche in ein entsprechendes Gegenstück auf der obersten Kupferelektrode gedrückt wird. Die Halbkugel wird durch eine Spiralfeder gehalten welche fest mit der Hochspannungsbuchse

³Polyoxymethylen, auch bekannt unter dem Markennamen Delrin.

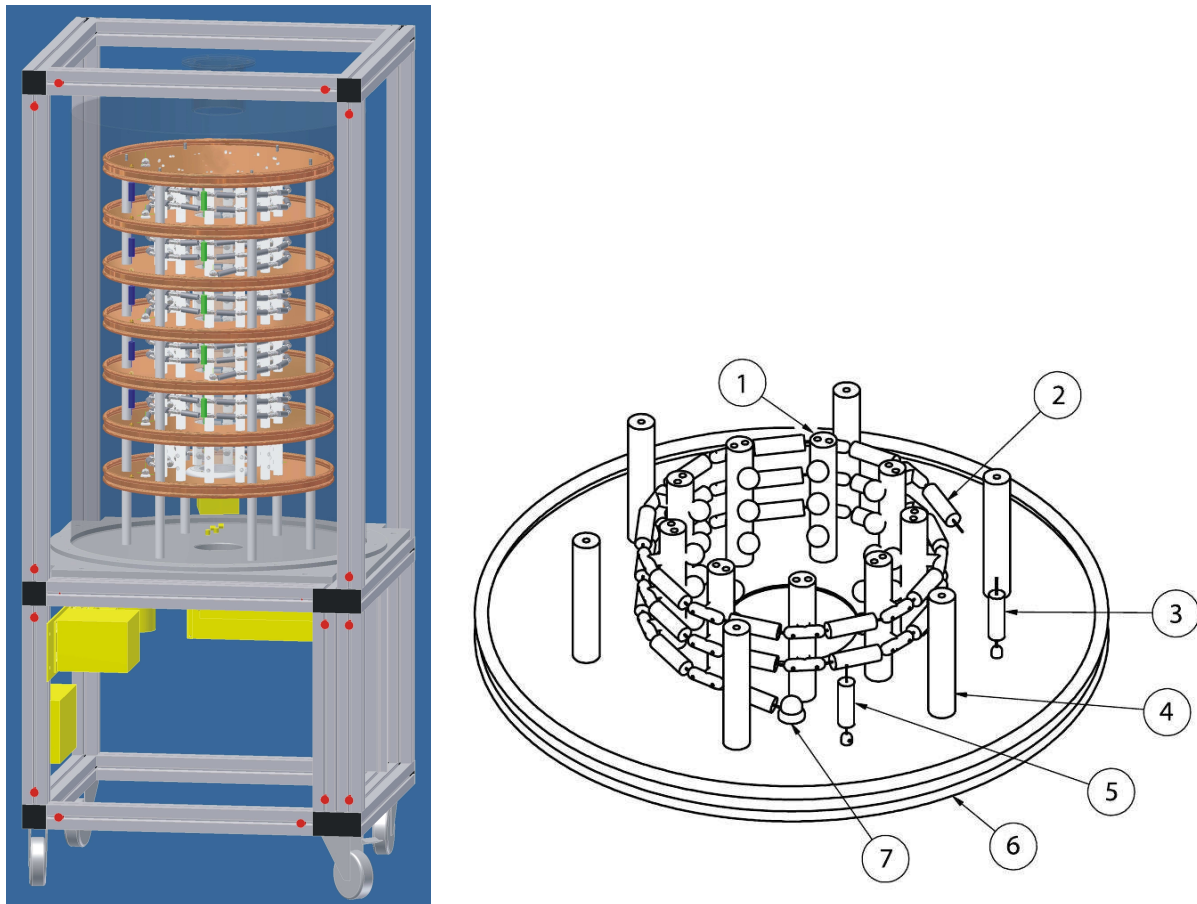


Abbildung 2.10: Mechanischer Aufbau des Spannungsteilers. Im linken Bild ist eine CAD-Zeichnung vom Aufbau des zweiten Spannungsteilers vor dem Umbau auf den 820 mm Kessel gezeigt [Hoc08]. Das rechte Bild zeigt den Aufbau einer einzelnen Ebene [Thu09]. (1) PTFE-Stab, (2) Präzisionswiderstand, (3) Hochspannungswiderstand, (4) POM-Stab, (5) Hochspannungskondensator, (6) Kupferelektrode und (7) isolierte Durchführung der Primärkette.

verbunden ist (s. Kapitel 5.1.1). Innerhalb der Spiralfeder verläuft ein Kupfergeflecht von Anschlusspunkt der Hochspannungsbuchse zur Halbkugel und stellt so den elektrischen Kontakt her.

Für die Durchführung der Präzisionsabgriffe und der Sensoren ist in der Grundplatte eine 100 mm Bohrung welche durch einen Flansch abgedeckt wird. In diesem Abgriffhansch befinden sich Bohrungen für die elektrischen Durchführungen sowie Edelstahlröhrchen für den Wasserkreislauf und das Füllgas.

Als Gehäuse für den Spannungsteiler dient ein Edelstahlkessel mit 820 mm Durchmesser und 980 mm Höhe. Der Kessel wird mittels eines Überwurfrings in einen O-Ring auf der Aluminiumgrundplatte gedrückt. Zum einen dient der Kessel als Faraday-Käfig und schützt somit Personen vor dem Kontakt mit der anliegenden Hochspannung und den Spannungsteiler vor elektromagnetischen Störungen. Zum anderen bildet er ein abgeschlossenes Volumen welches temperiert und mit Stickstoff als Füllgas gefüllt werden kann. Der Kessel sowie alle anderen temperierten Oberflächen werden mit Armaflex der Firma Armacell, einer Wärmeisolierung

aus synthetischem Vinylkautschuk, versehen.

Damit der Spannungsteiler leicht bewegt und sicher transportiert werden kann wurde ein Transportrahmen aus Kanya (Aluminiumprofil) hergestellt (Abb. 2.10). Dieses ist auf Rollen montiert und nimmt den Spannungsteiler samt seines Slow-Control-Systems auf.

Da sich von der ursprünglichen Planung zum endgültigen Aufbau einige mechanische Änderungen ergeben haben, werden alle aktuellen Bauteilzeichnungen im Anhang B abgedruckt.

2.3 Realisierung der Temperatursteuerung

Die Temperatursteuerung des zweiten KATRIN Spannungsteilers orientiert sich nach der des ersten Spannungsteilers. Die Komponenten und der Aufbau sowie die Funktion wurden schon in [Hoc08] beschrieben. In dieser Arbeit wird die Realisierung der Temperatursteuerung der Vollständigkeit halber zusammengefasst und nachträgliche Änderungen zum ursprünglichen Design aufgezeigt.

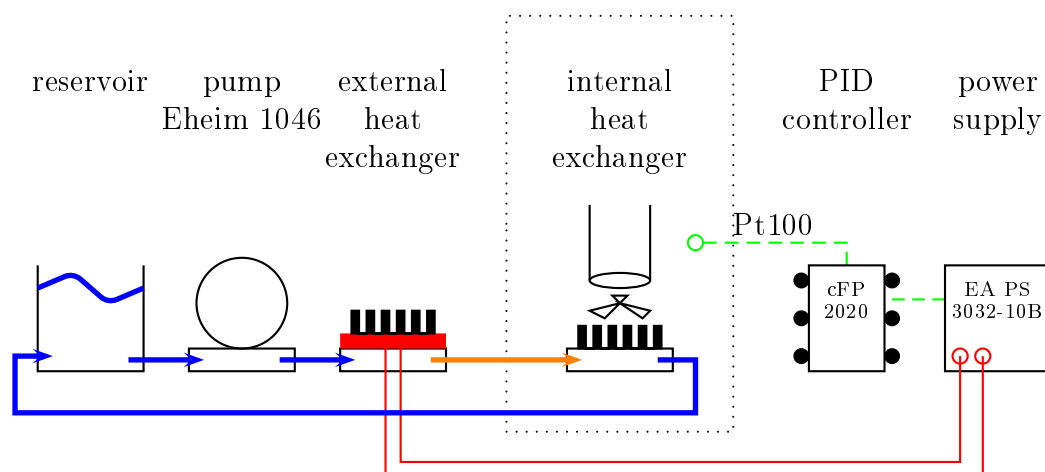


Abbildung 2.11: Diagramm der Temperatursteuerung. Gezeigt sind die einzelnen Komponenten der Temperatursteuerung, das Peltier Element ist in rot dargestellt. Das Innere des Spannungsteilers ist durch eine gestrichelte Box angedeutet, in der auch der Lüfter und das Tunnelrohr skizziert sind [Hoc08].

Die Temperatursteuerung besteht im wesentlichen aus einem Wasserkreislauf mit zwei Wärmetauschern, einer Pumpe und einen Reservoir samt Schlauchleitungen. Durch den Wasserkreislauf können alle, an der Temperaturregelung beteiligten, elektrischen Greäte außerhalb des Kessels montiert werden. Dadurch werden elektrische Einkopplungen minimiert.

Der äußere Wärmetauscher ist an ein Peltierelement mit 102 W gekoppelt wodurch dem Wasser im System Wärme entzogen oder zugeführt werden kann. Das so temperierte Wasser wird durch eine Pumpe vom Typ 1046 der Firma Eheim durch das Schlauchsystem in das Innere des Spannungsteilers befördert. Bei Testmessungen an der Versorgungsspannung der

Gleichspannungsvariante der Pumpe fiel auf, dass die Schaltung welche die Wechselspannung aus der 12 V Gleichspannung erzeugt, sehr starke Störungen in das 12 V Versorgungsnetz des Spannungsteilers einstreut. Daher wurde die Pumpe durch die übliche 230 V Wechselspannungsvariante ersetzt. Ein weiterer Vorteil dieser Wechselspannungsvariante ist die sehr gute Verfügbarkeit, nahezu jeder Baumarkt oder Zoohandel führt diese Pumpe in seinem Programm.

Im Inneren des Spannungsteilers wird dem Wasser über den Gasstrom durch den inneren Wärmetauscher Wärme entnommen oder zugeführt. Der Gasstrom wird durch einen Gleichspannungslüfter vom Typ 8412NU der Firma Papst erzeugt. Dieser Lüfter hat einen kleineren Luftstrom von $69 \text{ m}^3/\text{h}$ im Vergleich zum ursprünglichen Lüfter vom Typ 8412NH der Firma Papst mit $79 \text{ m}^3/\text{h}$. Der neue Lüfter kommt zum Einsatz, da dieser eine durch ein Spezialharz vergossene Elektronik besitzt, wodurch bei einem Kurzschluss oder anderem Defekt die Gefahr der Emission von metallhaltigen Dämpfen reduziert wird.

Der temperierte Gasstrom wird durch das sogenannte Tunnelrohr an die Widerstände verteilt. Das Tunnelrohr besteht aus PMMA⁴, hat einen Durchmesser von 100 mm und besitzt seitliche Bohrungen als Gasauslass. Das Tunnelrohr ist maßgeblich für die Temperaturverteilung innerhalb des Spannungsteilers. Es steuert den Gasstrom der für die Temperierung der Präzisionswiderstände zuständig ist. Die Bohrungen des Tunnelrohrs wurden durch eine Simulation und anschließende Testmessungen optimiert (siehe Kapitel 4).

Die eigentliche Temperatursteuerung wird durch einen Compact Field Point Controller (cFP-2020) der Firma National Instruments geregelt auf dem ein „software“-PID-Regler (siehe Kapitel 4) implementiert ist. Dieser Regler steuert die durch die Pt100 gemessene Temperatur indem er die Ausgangsspannung des Lastnetzteils EA PS 3032-10B und somit die Leistung des Peltier-Element regelt.

2.4 Das Slow Control System

Das Slow Control System (SCS) steuert und misst alle für den Betrieb des Spannungsteilers notwendigen Parameter und stellt diese über eine Netzwerkschnittstelle für weitere Systeme wie die KATRIN Slow Control bereit. Alle gemessenen und ausgegebenen Parameter werden zusätzlich auf einer eingebauten 2 GB Compact Flash Karte gespeichert. Basis für das Slow Control System des zweiten KATRIN-Spannungsteilers ist ein Compact Field Point (cFP) System der Firma National Instruments. Es wird mit dem Programm LabView Realtime betrieben und ermöglicht so eine Echtzeitsteuerung des Systems. Das gesamte System wird aus einem 12 V Festspannungsnetzteil EA-PS 612-05A der Firma Elektro Automatik versorgt.

Die zentrale Steuerung wird von einem cFP-2020 Controller mit 75 MHz übernommen [cFP20]. Dieser Controller verfügt über einen internen Speicher von 64 MB und einen RAM-Speicher von 32 MB. Er besitzt drei RS-232, eine RS-485 und eine Netzwerkschnittstelle, welche durch einen externen Signalumsetzter in ein optisches Signal gewandelt und so von nachfolgenden Systemen galvanisch getrennt wird.

⁴Polymethylmethacrylat, auch bekannt unter dem Markennamen Plexiglas.

Der Controller kann über eine Backplane verschiedene Mess- und Steuerkarten ansteuern. Für das SCS wird eine cFP-RTD 124 Karte zum Einlesen von Temperatursensoren verwendet. Diese Karte ermöglicht es bis zu acht Temperatursensoren mit einer Auflösung von 16bit einzulesen [cFP12]. Für den Spannungsteiler werden Pt100 Sensoren jeweils mit einer Vier-Draht-Messung ausgelesen.

Für die Steuerspannung des Lastnetzteils und zur Messung der am Kontrollteiler anliegenden Spannung wird eine cFP-AIO 610 Karte verwendet. Die Karte ermöglicht es bis zu vier Spannungen bis ± 36 V einzulesen und bis zu vier Spannungen zwischen ± 10 V auszugeben. Dabei besitzen die Spannungseingänge eine Präzision von etwa 1 %₀[cFP61].

Alle gemessenen oder ausgegebenen Signale der Slow Control finden sich in Tabelle 2.4.

Parameter	Eingang	Ausgang	Signal	Kanal
Raumtemperatur	x		-125 - 850 °C	RTD Ch00
Temperatur erste Ebene west	x		-125 - 850 °C	RTD Ch01
Temperatur erste Ebene ost	x		-125 - 850 °C	RTD Ch02
Temperatur Abgriffebene	x		-125 - 850 °C	RTD Ch03
Temperatur Flansch innen	x		-125 - 850 °C	RTD Ch04
Temperatur Wasserreservoir	x		-125 - 850 °C	RTD Ch05
Spannung Kontrollteiler	x		-18 - +18V	AIO IN Ch00
Spannung Feuchtigkeitssensor	x		0 - 6 V	AIO IN Ch01
Steuerspannung Lastnetzteil		x	0 - 10 V	AIO OUT Ch00
+ Vorzeichen Steuerspannung		x	+5 V	AIO OUT Ch01
- Vorzeichen Steuerspannung		x	+5 V	AIO OUT Ch02

Tabelle 2.3: Parameter des SCS des zweiten KATRIN-Spannungsteilers. Aufgelistet sind die Parameter des SCS mit dem entsprechenden Signal und dem zugehörigen Kanal.

Das SCS des KATRIN-Spannungsteiler ermöglicht die Überwachung von Temperaturen, Luftfeuchtigkeit, Steuerspannung des Lastnetzteils und anliegende Spannung und stellt diese über ein Webinterface zur Verfügung. Die variable Programmierung des Systems stellt noch weitere Möglichkeiten des Datenaustausches zur Verfügung, wie zum Beispiel ein TCP/IP-Protokoll.

Für die spätere Anbindung an das KATRIN-SCS wird ein Array von Parametern über das Netzwerk zur Verfügung gestellt, welches dann abgerufen wird. Anders als bei vielen anderen SCS am KATRIN-Experiment stellen die Spannungsteiler nur Daten zur Verfügung. Der Spannungsteiler erhält keine Befehle von der KATRIN-SCS, da die einzige einstellbare Variable an den Spannungsteilern die Innentemperatur ist und diese immer auf 25 °C eingestellt sein muss. Die Einstellbarkeit wurde nur implementiert, um bei Kalibrierungen die Temperaturabhängigkeit des Spannungsteilers zu untersuchen.

KAPITEL 3

UNTERSUCHUNG DER ELEKTRISCHEN BAUTEILE

Um einen Hochspannungsteiler zu konstruieren dessen Maßstabsfaktoren eine Stabilität von mehr als 1 ppm über mehrere Jahre aufweisen, ist es unerlässlich jedes einzelne Bauteil genau zu untersuchen. Dazu müssen Widerstandsänderungen durch verschiedene bekannte Einflüsse mit einer Präzision im Bereich von 10^{-7} bestimmt werden. Für die Widerstände der beiden Spannungsteiler wurden folgenden Untersuchungen, in einen eigens für diesen Zweck aufgebauten Präzisions-Messstand, durchgeführt:

1. Vermessung des Aufwärmverhaltens der Widerstände
2. Vermessung der Temperaturkoeffizienten der Widerstände
3. Untersuchung von Stabilitäts- und Alterungsverhalten der Widerstände

Die Vermessung des Temperaturkoeffizientens von jedem einzelnen Widerstand ist aufwendig und sehr zeitintensiv, somit wurde diese Untersuchung nur stichprobenartig durchgeführt (Kapitel 3.2.2). Eine zeitlich wesentlich effizientere Methode alle Widerstände zu untersuchen ist es die Änderung des Widerstandes durch die innere Erwärmung (Aufwärmabweichung) zu messen (Kapitel 3.2.1). Diese Methode wurde schon von Th. Thümmel im Rahmen seiner Dissertation [Thu07] für die Untersuchung der Widerstände des ersten KATRIN-Hochspannungsteiler angewandt.

Dieses Kapitel erläutert den Aufbau und die Funktion des verwendeten Messstandes sowie die einzelnen Untersuchungen der Widerstände und deren Ergebnisse im Hinblick auf die Verwendung für den 65 kV-Spannungsteiler.

3.1 Präzisions-Messstand

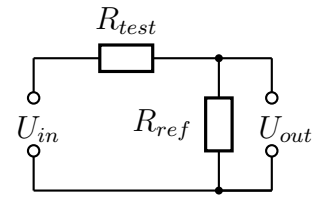
Die grundlegende Idee aller durchgeführten Widerstandsmessungen beruht auf einer Änderung des Maßstabsfaktors eines Spannungsteilers. Durch die Änderung eines Widerstandswertes innerhalb des Spannungsteilers, welcher aus zwei Widerständen aufgebaut ist, ändert sich dessen Maßstabsfaktor und somit die Ausgangsspannung. Verändert sich der Widerstandswert des zu vermessenden Widerstands von $R_{test} \rightarrow R'_{test}$ so bedeutet dies:

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_{ref}}{R_{test} + R_{ref}} \xrightarrow{R_{ref} \ll R_{test}} \frac{\Delta R_{test}}{R_{test}} = \frac{R'_{test}}{R_{test}} - 1 \approx \frac{U_{out}(t_{norm})}{U_{out}(t)} - 1 \quad (3.1.1)$$

Aus diesem Grund wird der zu vermessende Widerstand (R_{test}) mit dem Referenzwiderstand (R_{ref}) zu einem einfachen Spannungsteiler verschaltet (Abb. 3.1). Wie in Gleichung (3.1.1) gezeigt, ist die Ausgangsspannung des Messteilers ein direktes Maß für die Widerstandsänderung von R_{test} . Für alle Messungen wurde die relative Widerstandsänderung betrachtet. Da der erste Messwert aufgrund der Messelektronik mit einer größeren Unsicherheit behaftet ist, wird auf die Zeit des zweiten Messwertes (t_{norm}) normiert.

Um die Auswirkung von genau einem bestimmten Effekt auf den Widerstandswert zu untersuchen, ist es sehr wichtig alle anderen Störfaktoren so weit wie möglich zu unterdrücken. Aus diesem Grund ist der gesamte Messstand in einem abgeschirmten und klimatisierten

Abbildung 3.1: Schema der Messanordnung für die Widerstandsmessungen. An den Spannungsteiler wird eine konstante Spannung (U_{in}) angelegt und der Spannungsabfall über dem Referenzwiderstand (R_{ref}) gemessen. Die Änderung der gemessenen Spannung ist dann ein direktes Maß für die Änderung des Testwiderstandes (R_{test}) wenn $R_{ref} \ll R_{test}$.



Schaltschrank aufgebaut. Die Messschaltung befindet sich zusätzlich in einer temperaturstabilisierten Messbox, um die Auswirkung thermischer Schwankungen zu minimieren. Das für die Messung benötigte Voltmeter und die Spannungsquelle sind ebenfalls in diesem Schaltschrank untergebracht. Die Genauigkeit dieser Messungen ist durch die Stabilität von Referenzwiderstand, Spannungsquelle und Voltmeter gegeben.

Im folgenden soll ein Überblick über den Aufbau des Messstandes und wichtige Eigenschaften der Geräte gegeben werden. Eine detaillierte Beschreibung des Messstandes findet sich in der Arbeit von F. Hochschulz [Hoc08]. Eine Gesamtansicht des Messstandes zeigt Abbildung 3.2.

Der Schaltschrank ist mit einer Kompressorkühlung ausgestattet um die entstehende Abwärme der innenliegenden Geräte aufzunehmen. Die Kühlung arbeitet im Dauerbetrieb und es stellt sich ein Gleichgewicht bei einer Temperatur zwischen 21 und 24 °C ein. Die absolute Temperatur im Schaltschrank spielt eine untergeordnete Rolle solange sie über 20 °C und unter 25 °C ist. Die eingebauten Geräte zur Präzisionsmessung besitzen alle eine interne Temperaturstabilisierung. Wichtig ist die Obergrenze von 25 °C (bzw. 30 °C bei Messungen des Temperaturkoeffizienten) da sonst die Messtemperatur von 25 °C innerhalb der Messbox überstiegen wird. Die Ergebnisse von Messungen mit unterschiedlicher Referenztemperatur sind nicht miteinander vergleichbar und ermöglichen es nicht, eine bestmögliche Kompensation des Aufwärmverhaltens zu erreichen. Daher muss jede Messung bei gleicher Referenztemperatur stattfinden.

Der Spannungsteiler, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, wird in der Messbox (Abb. 3.3) aufgebaut. Die Box wird durch Heizwiderstände, welche sich auf der Rückwand im Inneren befinden, auf $25 \pm 0,1$ °C stabilisiert. Sie sind auf einem Kühlkörper zusammen mit einem Lüfter montiert, um für eine gute Wärmeverteilung innerhalb der Box zu sorgen.

Um die Temperatur innerhalb des Schaltschranks sowie der Messbox zu messen, wird ein Mess- und Steuermultiplexer vom Typ 34970A der Firma Agilent verwendet. Dieses Gerät ist in der Lage bis zu vier Temperatursensoren auszulesen und Analogspannungen zwischen 0 und 10 V auszugeben. Die Analogspannung wird zur Ansteuerung des Lastnetztes EA PS32-05 der Widerstandsheizung genutzt. Der Multiplexer kann wie die anderen Geräte über eine GPIB-Schnittstelle (IEEE 488) angesteuert werden. Die Verbindung zwischen dem Präzisions-Messstand und dem Messcomputer wird potentialfrei über eine Glasfaser-Leitung hergestellt.

Als Spannungsversorgung dient ein Fluke 5720A Calibrator welcher im Gleichspannungsbetrieb bis 1100 V eine absolute Unsicherheit von ± 5 ppm (99% C.L.) über 24 Stunden aufweist. Dabei darf die Temperatur bis zu ± 5 K um die Kalibrierungstemperatur schwanken

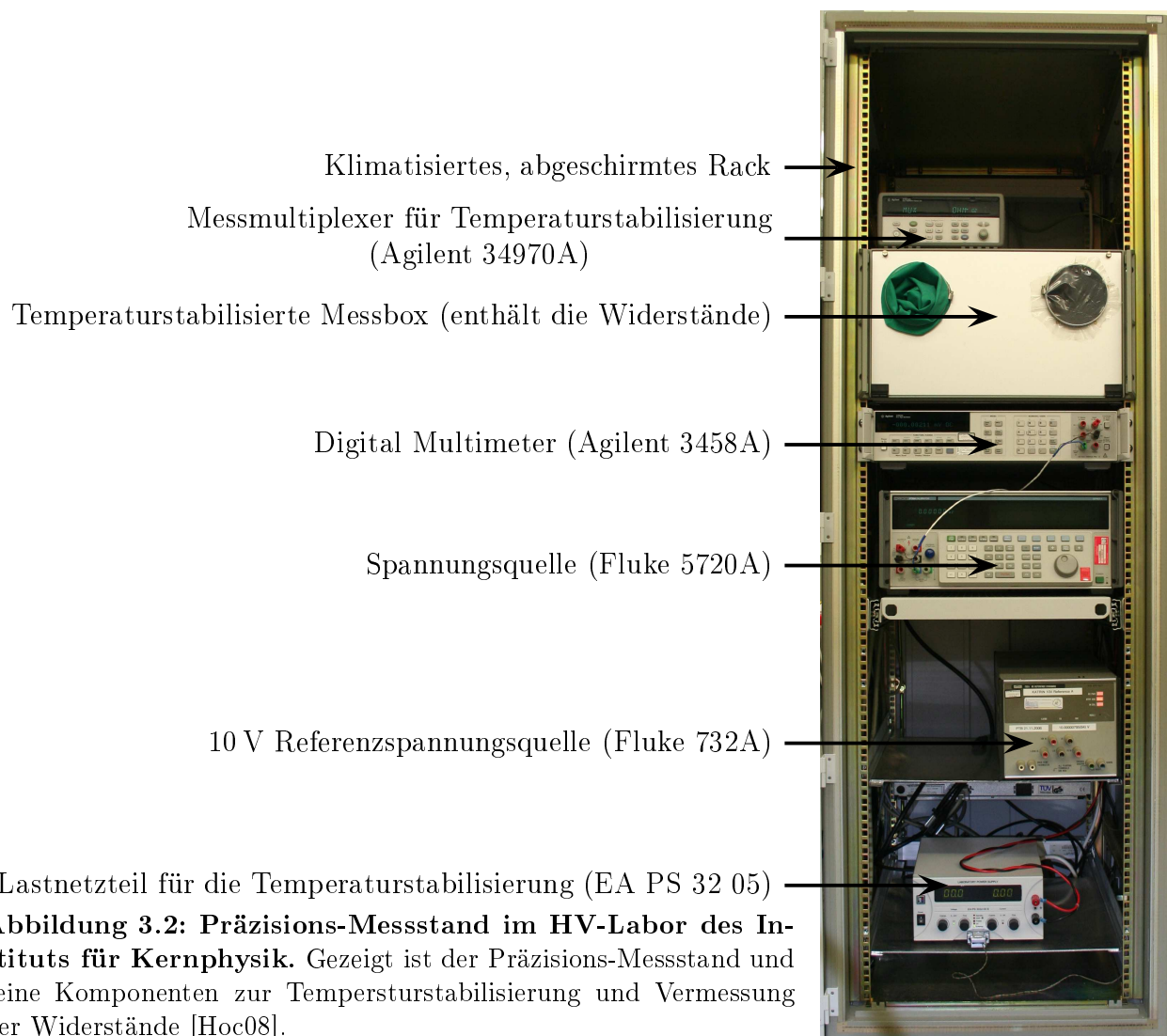


Abbildung 3.2: Präzisions-Messtand im HV-Labor des Instituts für Kernphysik. Gezeigt ist der Präzisions-Messtand und seine Komponenten zur Temperaturstabilisierung und Vermessung der Widerstände [Hoc08].

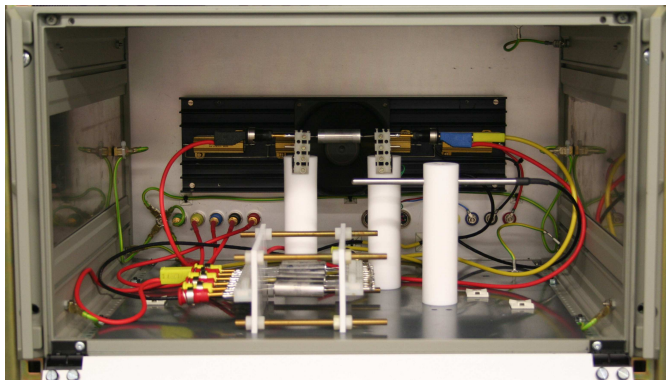


Abbildung 3.3: Innenansicht der Messbox. Im Inneren der Messbox ist der Spannungsteiler zur Messung von Widerstandsänderungen aufgebaut. Auf der Rückwand befinden sich die Heizwiderstände auf einem Kühlkörper und direkt davor der Referenzwiderstand auf zwei PTFE-Stützen. Im vorderen Teil ist ein Magazin mit sechs Testwiderständen zu sehen.

[Flu57]. Da bei der Vermessung der Widerstände die relative Änderung des Widerstandes untersucht werden soll, ist die Stabilität der Spannungsquelle der wichtigste Faktor innerhalb einer Messung. Diese wird in den Spezifikationen mit $\pm 0,65$ ppm innerhalb 24 Stunden bei Temperaturschwankungen um ± 1 °C um die Kalibrierungstemperatur angegeben.

Um eine möglichst hohe Stabilität zu gewährleisten, wird der Calibrator erst nach einer Warmlaufphase von etwa 24 Stunden für Präzisionsmessungen verwendet. Messungen ergaben, dass der Messstand nicht mehr die gewünschte Stabilität von besser als 0,1 ppm aufweist, wenn er länger als 15 Minuten im Standby-Modus war.

Das für die Messungen verwendete digitale Voltmeter ist ein 3458A der Firma Agilent, mit der Option „002 High Stability Reference“. Dies ermöglicht eine Reduzierung der Unsicherheiten bei Langzeitmessungen. Das Gerät besitzt im 10 V-Messbereich eine Unsicherheit von $< \pm 0,6$ ppm innerhalb von 24 Stunden bei Temperaturschwankungen von ± 1 K um die Kalibrierungstemperatur. Der Temperaturkoeffizient des Gerätes kann durch eine interne Selbstkalibration („ACAL DCV“) auf $\pm 0,16$ ppm reduziert werden. Diese Selbstkalibration kann zwischen zwei Messungen durchgeführt werden.

Auch bei diesem Gerät ist es wichtig, eine ausreichend lange Warmlaufphase einzuhalten und das Gerät so selten wie möglich abzuschalten.

Die 10 V Referenzspannungsquelle 732A der Firma Fluke dient der Absolutkalibrierung der Messgeräte. Die Spannungsquelle besitzt eine Stabilität von 0,24 ppm/Jahr zwischen den Kalibrierungen in 2008 und 2009 an der PTB.

Alle elektrischen Verbindungen, die der Präzisionsmessung dienen, werden auf Empfehlung der PTB durch PTFE-Kabel der Firma LEMO hergestellt. Der Vorteil der Verwendung dieser Kabel liegt darin, dass PTFE nicht benetzt und somit Kriechströme z.B. durch Hautfett reduziert werden. An diese Kabel wurden 4 mm Kupfer/Tellur-Bananenstecker vom Typ LS410-TS der Firma MultiContact montiert. Die Kupfer/Tellur Stecker zeichnen sich durch ihre niedrigen Thermospannungen aus.

Untersuchungen zeigten, dass der Messstand eine Tag/Nacht Drift von 2 ppm aufweist. Bei Messzeiten von weniger als einer Stunde ergibt sich eine systematische Unsicherheit von etwa 0,1 ppm [Hoc08].

Messsoftware

Die Messsoftware wurde in LabView (National Instruments) von Frank Hochschulz im Rahmen seiner Diplomarbeit geschrieben [Hoc08]. Sie steuert die Spannungsquelle, das Multimeter und den Multiplexer über eine GPIB Schnittstelle. Des weiteren ist ein PID-Regler zur Steuerung der Temperatur innerhalb der Messbox in dieser Software implementiert. Die Software stellt die Temperatur der Messbox und die relative Widerstandsänderung graphisch dar.

3.2 Widerstandsmessungen

Die Widerstände der VHA Serie von VISHAY wurden aufgrund ihres geringen Temperaturkoeffizienten (TCR) und ihrer hohen Langzeistabilität für den Bau des Spannungsteilers ausgewählt. Dass die Widerstände dieser Baureihe für einen Spannungsteiler mit der geforderten Stabilität geeignet sind, zeigt der erste KATRIN-Spannungsteiler.

Die Widerstände haben einen Durchmesser von 12,7 mm und eine Länge von 38,1 mm ohne Anschlussdrähte. Das Gehäuse besteht aus einem verzinnnten Messingröhrchen welches mit Öl gefüllt ist und eine Leiterplatte beinhaltet. Die Anschlüsse der Leiterplatte werden durch verzinnte Kupferdrähte nach Außen geführt. Auf der Leiterbahn befinden sich sogenannte Chips welche die zentralen Bauteile des Widerstandes sind. Die Chips bestehen aus einem Substrat auf dem eine Metallfolie aufgebracht ist. In diese Folie werden mit dem Auge nicht zu erkennende Leiterbahnen eingätzt. Der niedrige Temperaturkoeffizient (TCR) dieser Widerstände liegt im Zusammenspiel von Folie und Substrat begründet. Durch einen Temperaturanstieg der Folie ändert sich deren elektrischer Widerstand, gleichzeitig übt das Substrat einen mechanischen Druck auf die Folie aus und verändert somit die Geometrie der Leiterbahn. Da der Widerstand eines metallischen Leiters vom Material, der Temperatur und der Querschnittsfläche des Leiters abhängt, sorgt die hervorgerufene Änderung der Querschnittsfläche für die fast vollständige Kompensation der temperaturbedingten Widerstandsänderung. Daraus folgt ein sehr geringer Temperaturkoeffizient von 2 ppm/K über einen Temperaturbereich von -50 bis +125 °C [Vis05]. Für den Bereich zwischen 24 und 26 °C ist dieser jedoch bedeutend kleiner (Kapitel 3.2.2).

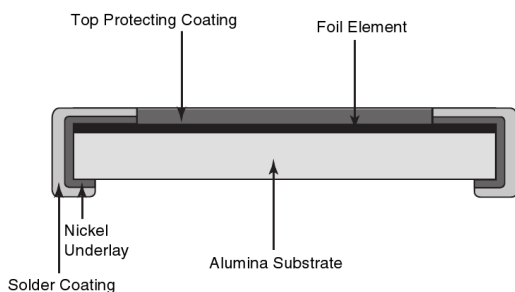


Abbildung 3.4: Querschnitt durch einen Widerstandschip. Die Abbildung zeigt einen Querschnitt durch einen Widerstandschip. Die Folie ist auf einer Aluminiumoxid-Keramik aufgebracht und wird durch eine Beschichtung geschützt (aus [Vis05]).

Der Betrag des Temperaturkoeffizienten ist bei jedem Widerstand anders und besitzt ein positives oder negatives Vorzeichen wodurch es unerlässlich ist, dass jeder einzelne Widerstand untersucht wird. Durch die genaue Kenntniss des Vorzeichen sowie des Betrages des TCR ist es möglich, gezielt Widerstände mit gleichem TCR aber unterschiedlichem Vorzeichen zusammen zu schalten. Dies bewirkt eine Kompensation der thermischen Verhalten dieser Widerstände, was es möglich macht, den Temperaturkoeffizienten des gesamten Spannungsteilers deutlich zu reduzieren.

Eine der wichtigsten Weiterentwicklungen durch die Firma Vishay, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Weineheimer, ist das gezielte Herstellen von Widerständen mit bestimmten Betrag und Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten. Bei diesem Verfahren werden die Chips auf die Leiterbahn montiert und der TCR vermessen. Um bestimmte Werte des TCR zu erreichen müssen eventuell nach der Vermessung einzelne Chips ausgetauscht werden und der Widerstand erneut vermessen werden. Erst wenn der Widerstand entsprechend der

Anforderungen konfektioniert ist, werden die Widerstände in das Gehäuse eingebracht und versiegelt [Fai09]. Dadurch ist es möglich Widerstände ab Werk intern zu kompensieren.

Durch die Anwendung des sogenannte pre-aging-Verfahren, bei dem die Widerstände einem künstlichen Alterungsprozess unterzogen werden, kann eine alterungsbedingte Drift der Widerstände stark reduziert werden (s. Kapitel 3.2.3).

In den folgenden Abschnitten werden einzelnen Methoden zur Untersuchung der Widerstände erläutert und deren Ergebnisse dargestellt.

3.2.1 Untersuchung der Aufwärmabweichung

Ursache

Wird ein elektrisches Bauteil von einem Strom durchflossen, so kommt es aufgrund des Jouleschen Gesetzes zur Wärmeentwicklung innerhalb des Bauteils. Diese Erwärmung wird als Joulesche Wärme bezeichnet und wird durch Wechselwirkung der Leitungselektronen mit Phononen und Störstellen des Leiters hervorgerufen.

Legt man nun eine konstante Spannung an einen der Widerstände an, so ändert dieser seine Temperatur und damit auch seinen Widerstand, bis er wieder im thermische Gleichgewicht mit der Umgebung ist. Dieses Einlaufverhalten wird auch als Aufwärmabweichung bezeichnet und gibt, aufgrund der inneren Erwärmung, einen indirekten Zugang zum Temperaturkoeffizienten.

Messprinzip

Die Aufwärmabweichung eines Widerstandes kann mit der in Abbildung 3.1 gezeigten Messschaltung bestimmt werden. Die einzelnen Widerstandswerte des Spannungsteiler müssen so dimensioniert sein, dass an dem Referenzwiderstand so gut wie keine Leistung abfällt. Dies ist wichtig, da sich sonst auch R_{ref} durch die innere Erwärmung ändern würde. Daher wird der Referenzwiderstand so klein wie möglich gewählt.

Es existieren zwei einschränkende Bedingungen für den Referenzwiderstand. Zum einen muss die Spannung, die über diesem Widerstand abfällt, immer kleiner als 12 V sein damit die Messspannung auf den präzisesten Messbereich des Digitalvoltmeters 3458A der Firma Agilent abgebildet werden kann. Zum anderen sollte der Messbereich des Multimeters möglichst weit ausgenutzt werden, um den Einfluss von Thermospannungen zu minimieren.

Als Referenzwiderstand wurde ein 25 k Ω Widerstand der selben Baureihe wie die Testwiderstände verwendet. Für die Verlustleistungen innerhalb der Widerstände bei einer angelegten Spannung von $U=255$ V gilt:

$$\begin{aligned}
U_{test} &= U_{in} \cdot \frac{R_{test}}{R_{test} + R_{ref}} & U_{ref} &= U_{in} \cdot \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R_{test}} \\
&= 247,96 \text{ V} & &= 7,04 \text{ V} \\
\Rightarrow P_{test} &= \frac{U_{test}^2}{R_{test}} & \Rightarrow P_{ref} &= \frac{U_{ref}^2}{R_{ref}} \\
&= 69,87 \text{ mW} & &= 1,98 \text{ mW}
\end{aligned}$$

Ändert sich der Widerstandswert des Testwiderstandes durch die innere Erwärmung von R_{test} zu R'_{test} so ändert sich der Maßstabsfaktor des Spannungsteiler gemäß Gleichung (3.1.1) und somit die gemessene Ausgangsspannung. Durch die Messung der Ausgangsspannung hat man die Möglichkeit, die Änderung des Widerstandes durch die innere Erwärmung zu bestimmen.

Messablauf

Vor der Messung werden alle Widerstände mit Ethanol gereinigt, um die Oberflächen zu säubern und Krieschströme, welche z.B. durch Hautfett verursacht werden, zu vermeiden.

Um den Messablauf zu beschleunigen, werden die Widerstände jeweils zu sechst in ein Magazin aus PTFE eingespannt. An diesen Magazinen sind Buchsenkontakte für 6mm Bananen-Stecker angebracht, so muss zwischen den Messungen einfach nur umgesteckt werden.

Vor der Messung müssen sich die Widerstände mindestens vier Stunden in der Messbox befinden damit sichergestellt ist, dass die Widerstände ihre Betriebstemperatur von 25 °C auch im Inneren erreicht haben. Es werden immer zwei Magazine verwendet, dadurch kann während der Vermessung von einem Magazin das zweite temperieren.

Eine Messung gliedert sich dann wie folgt:

1. Der 5720A Calibrator wird in den Standby-Betrieb geschaltet und der zu vermessende Widerstand angeschlossen.
2. Das Messprogramm wird gestartet.
3. Der 5720A wird durch das Programm eingeschaltet und nach 5 s wird der erste Wert gemessen und verworfen. Dies ist nötig, weil das Multimeter über 2 s integriert und beim ersten Messwert oft ein fehlerhafter Messwert angezeigt wird.
4. Nach weiteren 5 s wird ein weiterer Wert gemessen. Dieser dient als Referenzwert $U_{out}(t_{norm})$ für alle weiteren Messwerte.
5. Es wird alle 10 s ein Messwert genommen.
6. Nach insgesamt 30 Minuten ist die Messung abgeschlossen und der Calibrator wird manuell in den Standby-Modus gestellt und der Widerstand gewechselt.

Ergebnisse

Misst man die Aufwärmabweichung der Widerstände, so erhält man Ergebnisse wie in Abbildung 3.5 und 3.6 gezeigt. Deutlich zu erkennen ist das Aufwärmverhalten bis zu einem thermischen Gleichgewicht zwischen den Widerstandschips und der Ölfüllung nach etwa 10 Minuten. Die Datenpunkte wurden mit einer Konstanten zwischen 15 und 30 min mit dem Programm GnuPlot angefitet und so die Aufwärmabweichung bestimmt. Die Unsicherheit ist bei allen Fits $<0,01$ ppm und die Reproduzierbarkeit liegt bei 0,1 ppm, was der Unsicherheit des Messstandes entspricht. Der Wert der Konstanten wird als Aufwärmabweichung bezeichnet und dient später der Kompensation. Die Ergebnisse aller Messungen sind im Anhang A aufgeführt.

Für die Kompensation der Aufwärmabweichung werden zwei oder mehr Widerstände mit gleichem Betrag der Aufwärmabweichung aber unterschiedlichem Vorzeichen zusammenschaltet. Da die Temperatur innerhalb des Spannungsteilers einen Gradienten aufweisen kann, müssen Paare oder Triple gefunden werden die sich gegenseitig kompensieren und diese räumlich so nah wie möglich zusammen montiert werden.

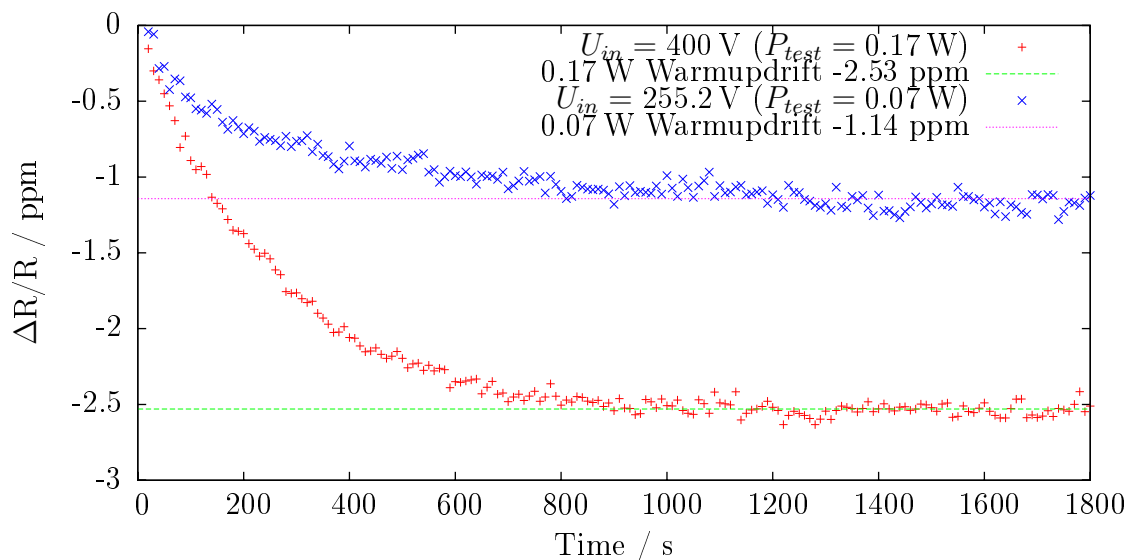


Abbildung 3.5: Aufwärmabweichung des Widerstandes M5295 bei unterschiedlichen Leistungen. Gezeigt ist die Aufwärmabweichung eines Widerstandes mit negativem Aufwärmverhalten bei einer Verlustleistung von 0,17 W und bei 0,07 W, welche durch die angelegte Spannung eingestellt wird. Sowie die entsprechenden Graden zur Bestimmung der Aufwärmabweichung. Die Messtemperatur betrug $T_{box}=25^\circ\text{C}$ und es wurde auf $t_{norm}=10$ s normiert.

Alle Widerstände wurden bei 255,2 V vermessen, da dies dem von Vishay spezifizierten Arbeitspunkt von 0,07 W entspricht. Weiterhin wurden 70 der 184 Widerstände auch bei einer Spannung von 400 V, was einer Leistung von 0,17 W entspricht, vermessen. Trägt man die Ergebnisse der Messungen bei 0,07 W und 0,17 W gegen einander auf (Abb. 3.7), so zeigt sich ein annähernd lineares Verhalten zwischen Aufwärmabweichung und Leistung. Die Steigung von 2,62 stimmt annähernd mit der relativen Leistungsänderung von $2,43 = \frac{0,17\text{W}}{0,07\text{W}}$ überein. Dies lässt sich durch die proportionale Abhängigkeit zwischen Leistung und Joulescher Wär-

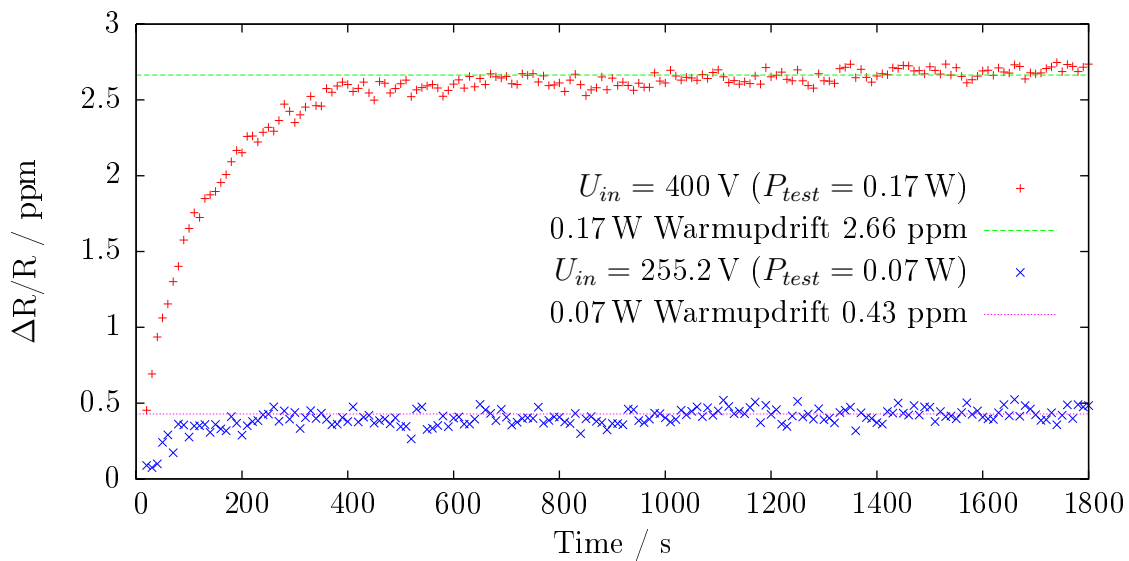


Abbildung 3.6: Aufwärmabweichung des Widerstandes N7980 bei unterschiedlichen Leistungen. Gezeigt ist die Aufwärmabweichung eines Widerstandes mit positivem Aufwärmverhalten bei einer Verlustleistung von 0,17 W und bei 0,07 W, welche durch die angelegte Spannung eingestellt wird. Sowie die entsprechenden Gradienten zur Bestimmung der Aufwärmabweichung. Die Messtemperatur betrug $T_{box}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es wurde auf $t_{norm}=10\text{ s}$ normiert.

me erklären, denn die Temperaturänderung des Widerstandes leistet den größten Beitrag zur Widerstandsänderung.

Das Ergebnis der Vermessung aller 184 Widerstände bei 255,2 V ($P_{test}=0,07\text{ W}$) ist in Abbildung 3.8 gezeigt. Betrachtet man das Histogramm, so ist zu erkennen, dass die Widerstände mit einem negativen Aufwärmverhalten einen kleineren Betrag haben und weniger gestreut sind als die Widerstände mit positivem Aufwärmverhalten.

Bildet man die Summe aus allen 184 gemessenen Aufwärmabweichungen so, erhält man 73 ppm und damit eine durchschnittliche Aufwärmabweichung von +0,2 ppm pro Widerstand. Die Widerstände N7965 und N7966 der 184 Widerstände werden in der Abgriffebene benötigt und der Widerstand N7984 wurde nach einer Messung am Gehäuse beschädigt, so dass dieser zur Sicherheit nicht verwendet wird. Somit stehen für die Hauptkette noch 181 Widerstände zur Verfügung. Wenn wie geplant 170 dieser Widerstände verbaut werden erhält man bei bester Selektion eine Gesamtaufwärmabweichung von 43 ppm was einer durchschnittlichen Aufwärmabweichung von 0,25 ppm entspricht.

Die Werte des ersten Spannungsteilers hingegen liegen bei 0,3 ppm für die Gesamtaufwärmabweichung und 0,003 ppm Aufwärmabweichung pro Widerstand. Somit würde der zweite Spannungsteiler ein deutlich schlechteres Aufwärmverhalten zeigen als der erste Spannungsteiler.

Um das Aufwärmverhalten zu verbessern, wurde die Eignung von sechs vorliegende Testmuster dieser Widerstandsserie durch erneute Vermessung unter gleichen Bedingungen überprüft. Die Testmuster sind nach Aussage der Firma Vishay ebenfalls dem pre-aging unterzogen

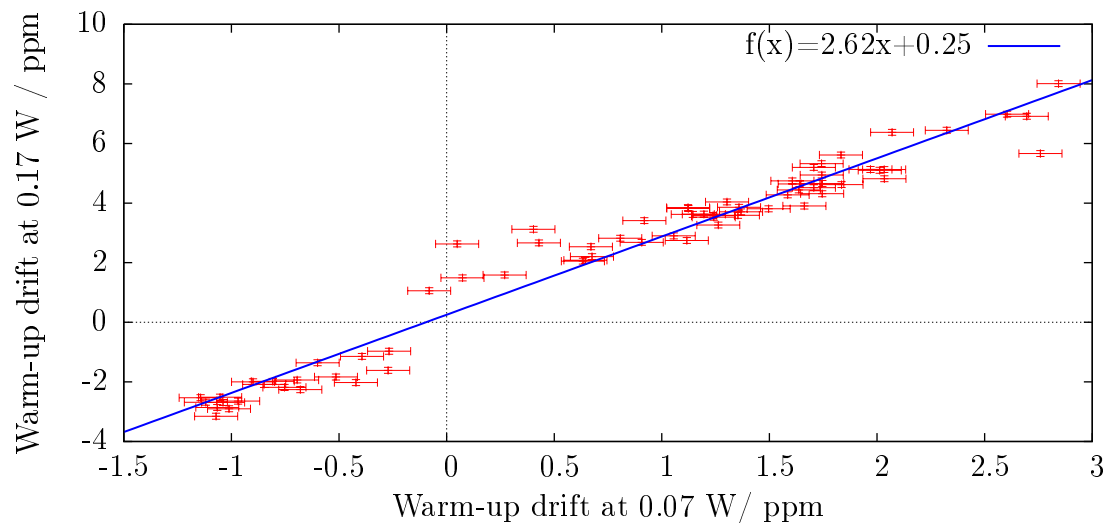


Abbildung 3.7: Leistungsvergleich von 70 der 880 k Ω Widerstände. Die Aufwärmabweichung von 70 Widerständen bei 0,17 W wurde gegen die Aufwärmabweichung bei 0,07 W aufgetragen. Der annähernd lineare Zusammenhang zwischen Leistung und Aufwärmabweichung ist durch den linearen Zusammenhang zwischen Leistung und Joulescher Wärme zu erklären. Die Messtemperatur betrug $T_{box}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es wurde auf $t_{norm}=10\text{ s}$ normiert.

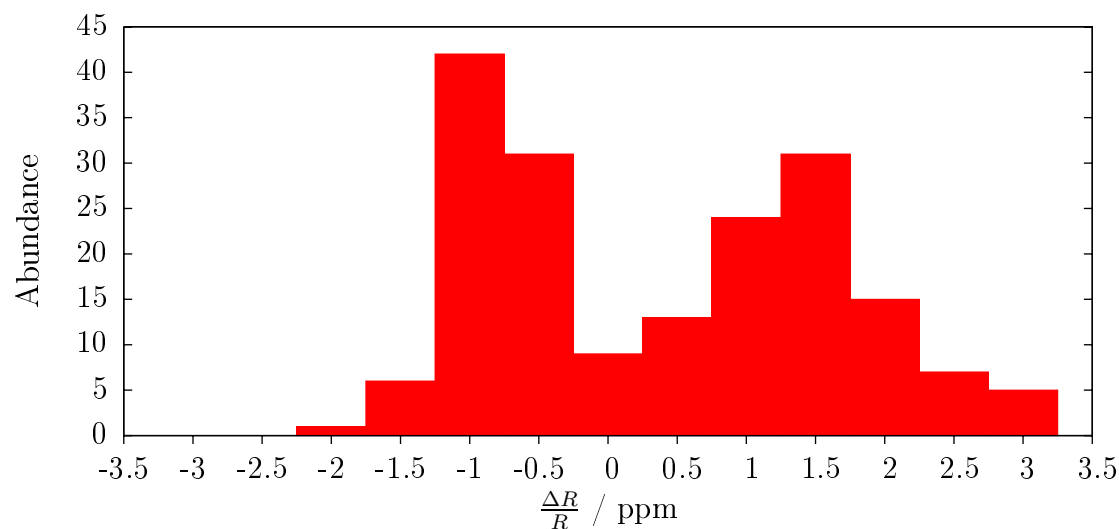


Abbildung 3.8: Ergebnisse der Messungen der Aufwärmabweichungen. Alle Widerstände wurden bei einer Leistung von $P_{test}=0,07\text{ W}$ und einer Temperatur von $T_{box}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ vermessen. Der Referenzwert wurde nach $t_{norm}=10\text{ s}$ genommen. Auffällig ist eine breitere Streuung und größere Absolutwerte bei den Widerständen mit positivem Aufwärmverhalten

worden und können somit im Spannungsteiler ohne eventuelle Nachteile aufgrund unterschiedlichem Alterungsverhalten eingesetzt werden.

Die Ergebnisse der Testmuster sind in Abbildung 3.9 dargestellt. Auch hier ist zu beobachten, dass die Widerstände mit negativen Aufwärmverhalten eine betragsmäßig kleinere Aufwärmabweichung aufweisen als die mit positivem Verhalten. Die Gesamtaufwärmabweichung aller sechs Testmuster beträgt 0,36 ppm was einer durchschnittlichen Aufwärmabweichung von 0,06 ppm pro Widerstand entspricht. Der Einsatz dieser Testmuster im zweiten Spannungsteiler ermöglicht es, sechs der deutlich positiven Widerstände zu ersetzen und die Gesamtaufwärmabweichung deutlich zu reduzieren.

Berücksichtigt man die Ergebnisse der sechs Testmuster so erhält man eine Gesamtaufwärmabweichung von 29,9 ppm. Die beste Kompensation des Aufwärmverhaltens erhält man mit dieser Auswahl an Widerständen indem man eine Widerstandskette mit 153 Widerständen aufbaut. Dadurch lässt sich die Gesamtaufwärmabweichung auf 0,01 ppm reduzieren. Durch diese Konfiguration erhält man eine sehr geringe Aufwärmabweichung aber es gibt auch einige Komplikationen mit dieser Konfiguration.

Durch die nicht durch fünf teilbare Anzahl an Widerständen kann nicht in jeder Ebene die gleiche Anzahl an Widerständen eingebaut werden. Dies führt zu Problemen bei der thermischen Verteilung innerhalb des Teilers (siehe Kapitel 4). Durch die Reduzierung von 170 auf 153 Widerstände wird die Last pro Widerstand um 23% erhöht und wäre damit nur 11% niedriger als beim ersten Spannungsteiler. Dabei sollte gerade die höhere Anzahl an Widerständen im Vergleich zum ersten Spannungsteiler (100 Widerstände) zu einer Reduzierung der Last um 28% und somit zu einer geringeren Spannungsabhängigkeit führen.

Nach Abschluss der Widerstandsuntersuchungen im Hinblick auf die Aufwärmabweichung und den Temperaturkoeffizienten (s. Kapitel 3.2.2) wurden die Ergebnisse mit der Firma Vishay diskutiert. Nach wiederholter Überprüfung der Daten der Qualitätskontrolle von Vishay konnte keine Erklärung für die nicht erreichte Kompensation gefunden werden. Daraufhin wurde die Einigung getroffen, dass die Firma Vishay im Mai 2009 zehn neue Widerstände mit leicht negativen Verhalten nachliefert.

Die im Mai eingetroffenen Widerstände tragen als Bezeichnung ein Y gefolgt von vier Ziffern in der Form "Yxxxx". Die Ergebnisse der Vermessung der neuen Widerstände zeigt, dass acht der zehn Widerstände eine Aufwärmabweichung zwischen -0,14 und -0,47 ppm aufweisen. Ein weiterer Widerstand weist im Rahmen unserer Messunsicherheiten keine Aufwärmabweichung auf und der letzte besitzt eine Aufwärmabweichung von -0,76 ppm. Die gesamten für die Auswertung genutzten Daten der Vermessung finden sich im Anhang. Alles in allem handelt es sich bei diesen zehn Widerständen um sehr gute und uneingeschränkt einsetzbare Exemplare.

Betrachtet man nun die sechs Testmuster, die 181 Widerstände aus der eigentlichen Bestellung und die zehn nachgelieferten Widerstände so erhält man eine Gesamtaufwärmabweichung von 8,2 ppm bei der Verwendung von 170 Widerständen. Dies ist immernoch um den Faktor 27 schlechter als der Wert des ersten Spannungsteilers. Nutzt man für den Aufbau des zweiten Spannungsteilers fünf Widerstände weniger so ist die Last pro Widerstand gerade einmal 6% höher als im geplanten Aufbau. Im Vergleich zum ersten Spannungsteiler ist die Last pro Widerstand im Betrieb um 23 % niedriger. Durch die Verwendung von 165

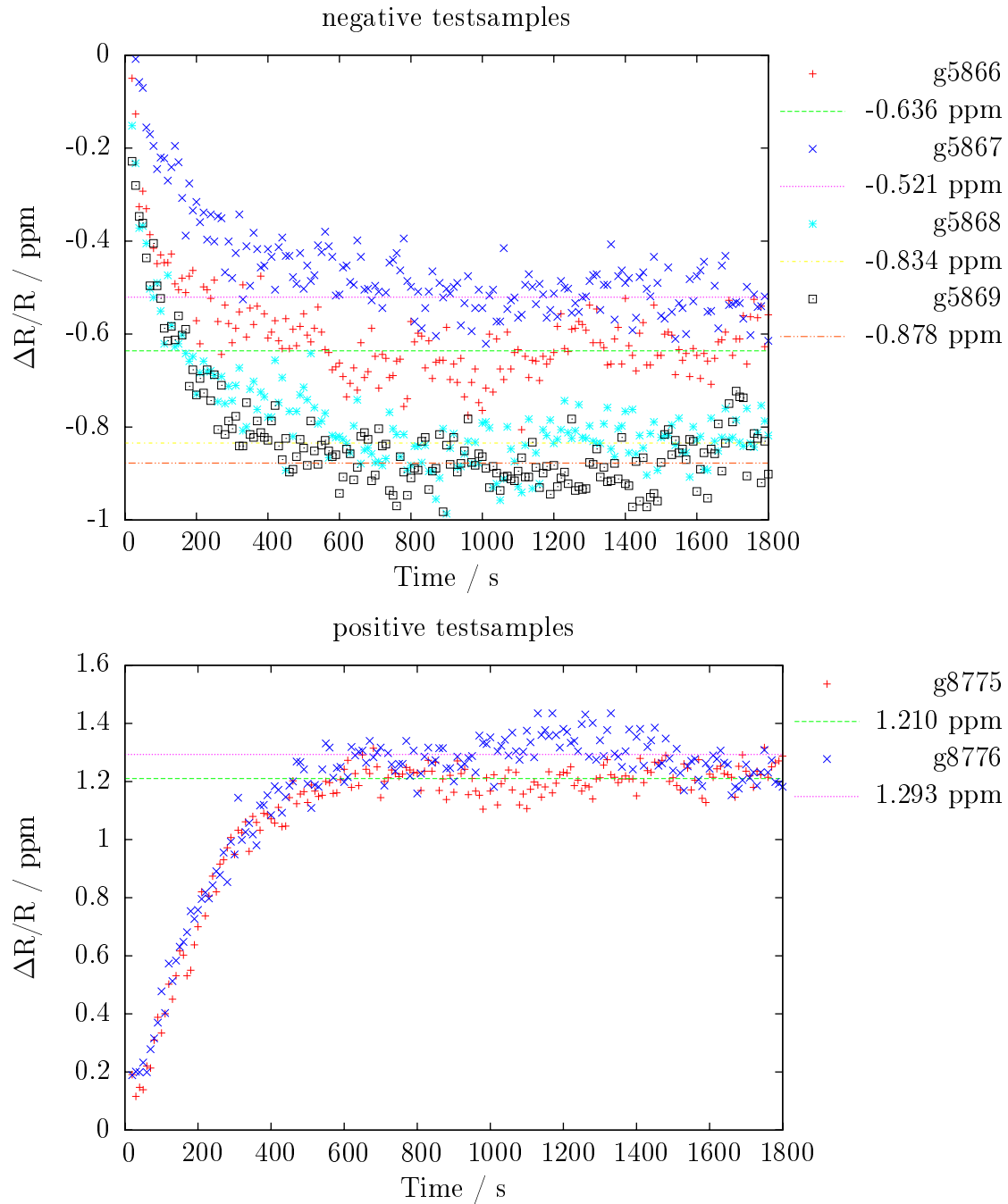


Abbildung 3.9: Aufwärmabweichung der Testmuster Die Testmuster wurden unter identischen Bedingungen vermessen wie die für die Primärkette bestellten 184 Widerstände ($P_{test}=0.07W$, $t_{norm}=10s$ und $T_{box}=25^{\circ}C$)

Widerständen wird eine Gesamtaufwärmabweichung des Teilers von -0,46 ppm und somit eine durchschnittliche Aufwärmabweichung pro Widerstand von -0,003 ppm erreicht. Dieser Wert entspricht dem Wert des ersten KATRIN-Spannungsteilers.

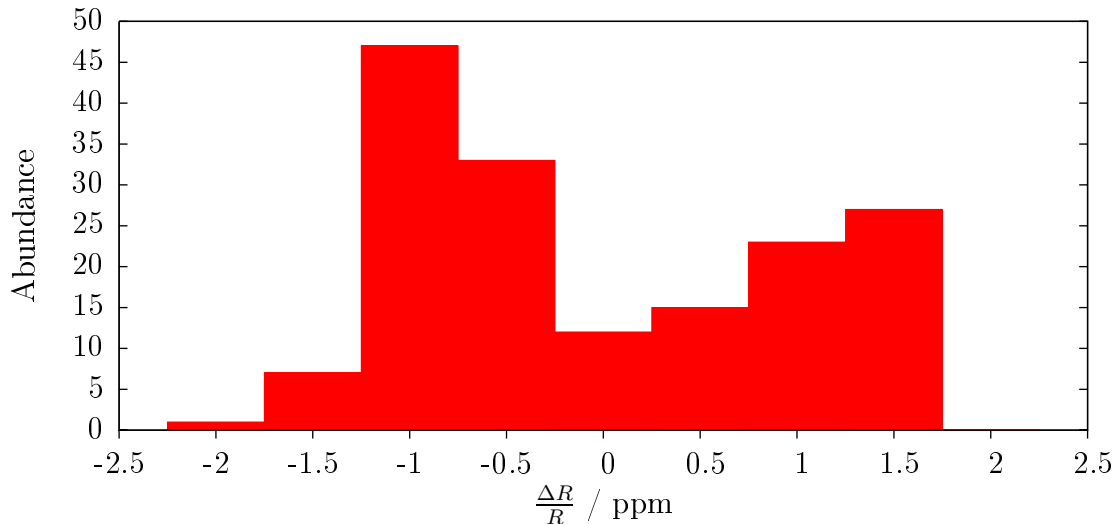


Abbildung 3.10: Ergebnisse der Messungen der Aufwärmabweichungen für die 165 endgültigen Widerstände. In diesem Histogramm werden die Ergebnisse der Messungen der Aufwärmabweichungen, der 165 verbauten Widerstände, dargestellt. Alle Widerstände wurden bei einer Leistung von $P_{test}=0,07$ W und einer Temperatur von $T_{box}=25$ °C vermessen. Der Referenzwert wurde nach $t_{norm}=10$ s genommen.

Kompensation der Aufwärmabweichung

Die bei den Messungen der Aufwärmabweichung gewonnenen Werte dienen der späteren Kompensation als Maß. Es werden Widerstände als Paare oder als Triple so zusammengeschaltet, dass ihre aufsummierte Aufwärmabweichung sich möglichst zu Null kompensiert. Die beste Konfiguration zur Reduzierung der Aufwärmabweichungen ergab sie bei der Bildung von 42 Paaren und 27 Triplen. Die Widerstände der Paare bzw. Triple wurden möglichst nah zusammen in die Ebenen eingebaut, um sicher zu gehen, dass die Widerstände die selbe Temperatur haben.

Da die Kompensation auch rechnerisch nicht Null für jedes Paar/Triple ergibt, blieben Restaufwärmabweichungen von wenigen hundertstel ppm pro Paar/Triple. Bei der Untersuchung der thermischen Eigenschaften des Spannungsteiler zeigte sich, dass die Temperatur der einzelnen Ebenen sich um wenige hundertstel Kelvin unterscheiden. Daher wurde darauf geachtet, dass die Restaufwärmabweichungen der einzelnen Ebenen sich so gut wie möglich gegenseitig eliminieren.

Das Resultat der Kompensation eines Widerstandspaares ist in Abbildung 3.11 zu sehen. Durch die Serienschaltung dieser beiden Widerstände ist es möglich eine Aufwärmabweichung zu erhalten, welche um eine Größenordnung niedriger ist als die der einzelnen Widerstände.

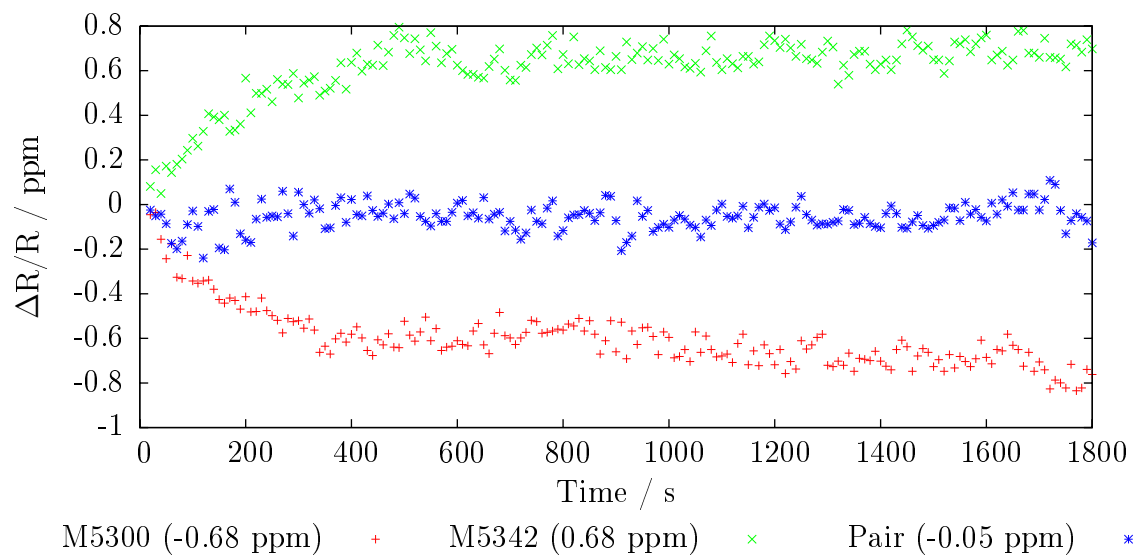


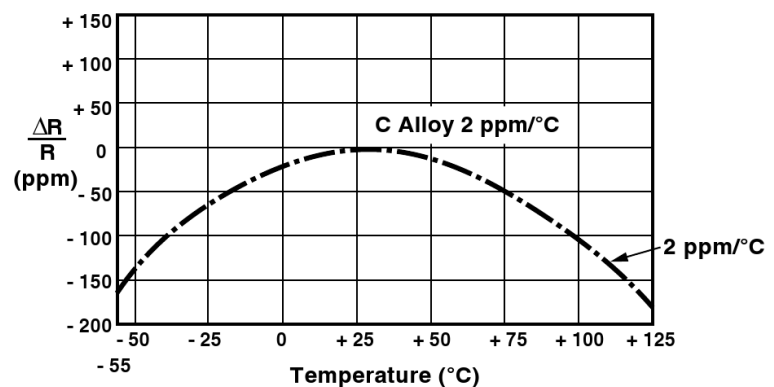
Abbildung 3.11: Aufwärmabweichung eines kompensierten Paares. Gezeigt ist die Aufwärmabweichung eines Widerstandspaares bei $U_{\text{mess}}=510,4 \text{ V}$ sowie die Aufwärmabweichungen der einzelnen Widerstände bei $U_{\text{mess}}=255,2 \text{ V}$. Damit stellt sich bei beiden Messungen eine Verlustleistung von $0,07 \text{ W}$ ein. ($t_{\text{norm}}=10 \text{ s}$, $T_{\text{box}}=25^\circ \text{C}$)

Eine Übersicht über die Resultate der Vermessung der Aufwärmabweichung sowie die Auflistung der Paare und Triple und deren Positionen im Spannungsteiler befindet sich im Anhang A.

3.2.2 Untersuchung des Temperaturkoeffizienten

Der Temperaturkoeffizient (TCR) beschreibt die rein temperaturabhängige Widerstandsänderung. Laut Datenblatt ist der Verlauf des TCR bei den verwendeten Widerständen parabelförmig, wobei der Scheitelpunkt der Parabel bei 25°C liegt [Vis07]. Laut Spezifikationen soll der Betrag des TCR, zwischen 24 und 26°C , bei jedem Widerstand kleiner $0,3 \text{ ppm/K}$ sein.

Abbildung 3.12: Temperaturkoeffizient der Vishay-VHA Widerstände. Gezeigt ist die relative Widerstandsänderung der Widerstände vom Typ VHA in Abhängigkeit der Temperatur [Vis07]. Die Angabe von $2 \text{ ppm}/^\circ \text{C}$ gilt für den weiten Temperaturbereich von -50 bis 125°C und ist im Bereich des Scheitelpunktes deutlich geringer.



Messmethode

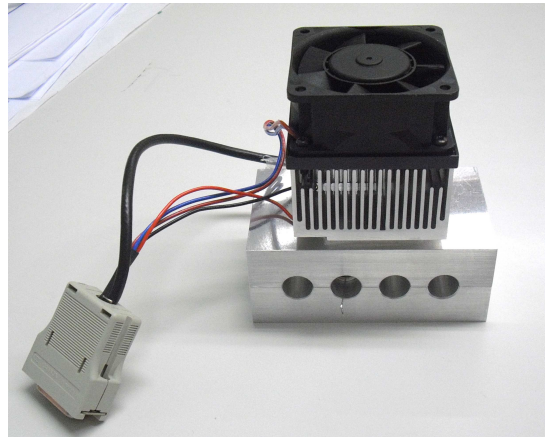
Um den Temperaturkoeffizient zu bestimmen, wird derselbe Messaufbau wie bei den Messungen der Aufwärmabweichung verwendet. Zusätzlich müssen folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Die im Widerstand erzeugte Joulesche Wärme muss sehr gering aber dennoch muss die Spannung hoch genug sein um den 10 V Bereich des Multimeters (auch hier Agilent 3458A mit Option 002) möglichst voll auszunutzen. Beides wird erreicht, indem als Teilerwiderstand ein gleicher Widerstand wie der zu testende eingesetzt wird. An diesen Spannungsteiler werden dann 20 V angelegt. Somit erhält man 10 V als Messsignal und die Joulesche Wärme beträgt lediglich 0,1 mW.
2. Die angelegte Spannung muss konstant sein und schon mehr als 15 min vor der eigentlichen Messung anliegen. Dies muss sichergestellt sein damit man keine Aufwärmabweichung bzw. keine Spannungsabhängigkeit misst. Dies wird durch die Verwendung des Fluke 5720A Calibrators sichergestellt. Dieser hält seine Spannung im hier benötigten 20 V Bereich auf 0,65 ppm über 24 Stunden. Die Spannung kann schon beim Abkühlen des Widerstandes angelegt werden bzw. die Messwerte der ersten 15 min werden verworfen.
3. Die Temperatur der Messbox muss auf 30 °C erhöht werden, da die Abwärme des Peltierelements im Kühlbetrieb die Boxtemperatur sonst auf über 25 °C erhöht. Stellt man die Soll-Temperatur auf 25 °C, so würde die Temperatur im Kühlbetrieb über 25 °C und im Heizbetrieb des Peltierelement bei 25 °C liegen. Dadurch ändert sich die Temperatur des Referenzwiderstandes und dadurch auch sein Widerstandswert.
4. Die Temperatur im Innern des Widerstandes muss möglichst genau bekannt sein. Da eine Messung im Inneren des Widerstandes nicht möglich ist, muss die Temperatur möglichst in unmittelbarer Umgebung des Widerstandes gemessen werden.

Um die Temperatur des zu testenden Widerstandes möglichst genau zu steuern, wurde in der Feinmechanischen-Werkstatt des IKP ein zweigeteilter Aluminiumblock mit vier Bohrungen vom Durchmesser 12,7 mm, entsprechend des Durchmessers der Widerstandsgehäuse, angefertigt. Damit ein möglichst guter Kontakt zwischen Block und Widerstand und somit ein guter Wärmeaustausch sichergestellt wird, wurde von jeder der beiden Hälften auf der Innenseite 0,1 mm abgefräst. Dies ermöglicht, dass die Widerstände mit leichtem Druck eingespannt werden können. Des weiteren wurde sehr nahe an eine der Bohrungen für die Widerstände eine Bohrung zur Aufnahme eines Pt1000-Sensors zur Temperaturmessung und Gewindebohrungen zur Befestigung eines Peltierelementes sowie eines Kühlkörpers angebracht (siehe Abbildung 3.13). Die Verwendung von Aluminium liegt in der guten Wärmeleitfähigkeit des Materials begründet.

Die gleichzeitige Aufnahme von bis zu vier Widerständen ermöglicht es auch den TCR der kompensierten Widerstandsgruppen in der Abgriffebene zu untersuchen. Der Referenzwiderstand befindet sich innerhalb der Messbox, aber außerhalb des Aluminiumblocks, daher bleibt seine Temperatur konstant bei 30 °C.

Abbildung 3.13: Aluminiumblock zur TCR-Messung. Der Aluminiumblock ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme von bis zu vier Widerständen. Die beiden Hälften werden durch sechs Schrauben zusammen gehalten. Auf der Oberseite befindet sich ein CPU-Kühler und darunter das Peltierelement. Alle elektrischen Verbindungen wurden auf einem Sub-D Stecker zusammengeführt.



Die Temperatursteuerung mittels Peltierelement ermöglicht es die Temperatur des Blocks auf gewünschte Werte zu regulieren und selbst die Erwärmung pro Stunde kann bestimmt werden. Durch eine langsame Erwärmung wird gewährleistet, dass die Temperatur des Widerstandes der des Aluminiumblocks entspricht. Für die folgenden Messungen wurde eine Erwärmung von 10 K/h, eine Starttemperatur von 10 °C und eine Endtemperatur von 40 °C gewählt. Die Steuerung wird durch eine um einen zweiten PID-Rgler erweiterte Version der Messsoftware zur Messung der Aufwärmabweichung realisiert.

Ergebnisse

Zunächst wurde überprüft wie lange der Temperatenausgleich zwischen Aluminiumblock und Widerstand dauert. Dazu wurde die relative Widerstandsänderung während der Kühlphase von etwa 30 °C auf 10 °C untersucht. In Abbildung 3.14 ist deutlich zu sehen, dass der Widerstandswert ab Erreichen der Starttemperatur von 10 °C konstant bleibt. Somit ist eine gute thermische Kopplung zwischen Widerstand und Aluminiumblock gegeben. Zur Sicherheit wurde die Temperatur nach Erreichen der Starttemperatur von 10 °C für 30 Minuten konstant gehalten, bevor mit der Aufwärmphase begonnen wurde.

Typische Ergebnisse für positive und negative TCR's sind in den Abbildungen 3.15 und 3.16 gezeigt. Die Untersuchungen zeigten, dass nur die Widerstände mit negativem TCR einen eindeutig parabelförmigen Verlauf aufweisen. Der Scheitelpunkt war bei allen Messungen unterhalb von 25 °C.

Der Verlauf der Widerstände mit positivem TCR kann als annähernd linear beschrieben werden.

Aus den Messungen des TCR lassen sich die Resultate der Messung der Aufwärmabweichungen erklären. Bei Widerständen mit negativen TCR befindet man sich bei 25 °C im Scheitelpunkt einer Parabel und somit haben Temperaturänderungen ausgelöst durch die innere Erwärmung einen kleinen Einfluss. Die Widerstände mit positiven TCR hingegen zeigen einen fast linearen Verlauf mit Steigungen bis zu 0,7 ppm. Dies führt zu der Annahme, dass bei der Herstellung von Widerständen mit positivem TCR andere Materialien oder ein anderer Herstellungsprozess, als bei Widerständen mit negativen TCR verwendet wird.

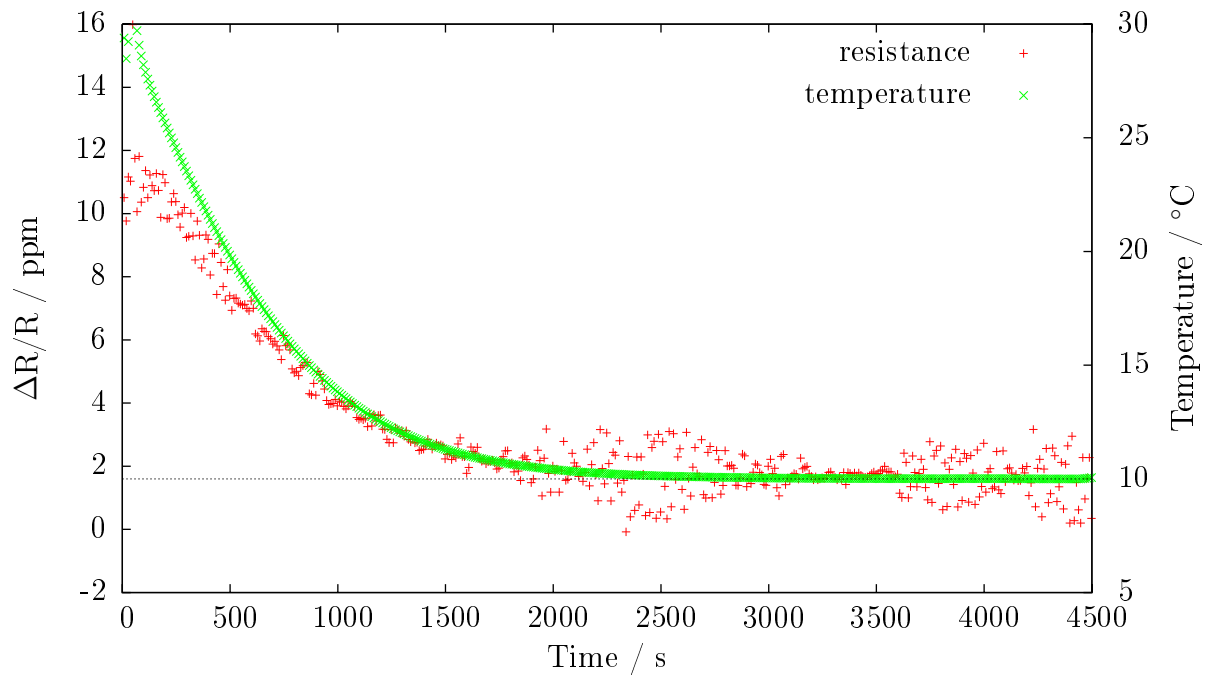


Abbildung 3.14: Überprüfung der Temperaturmessung innerhalb des Aluminiumblocks. Gezeigt sind Blocktemperatur und relative Widerstandsänderung gegen die Zeit. Deutlich zu sehen ist, dass sich der Widerstandswert nach Erreichen der Starttemperatur von 10 °C nicht mehr ändert.

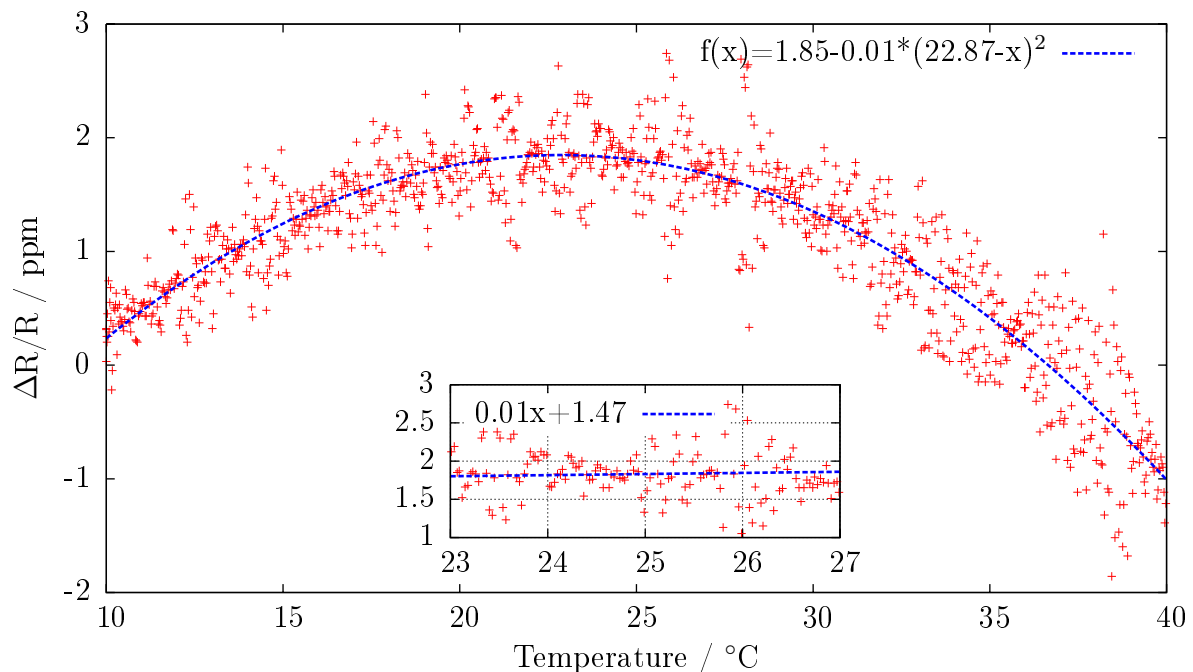


Abbildung 3.15: Temperaturkoeffizient des Widerstands M6483. Gezeigt ist die relative Widerstandsänderung des Widerstands M6483 in Abhängigkeit der Temperatur. Es handelt sich um einen Widerstand mit negativem TCR. Die Aufwärmabweichung beträgt -0,6 ppm.

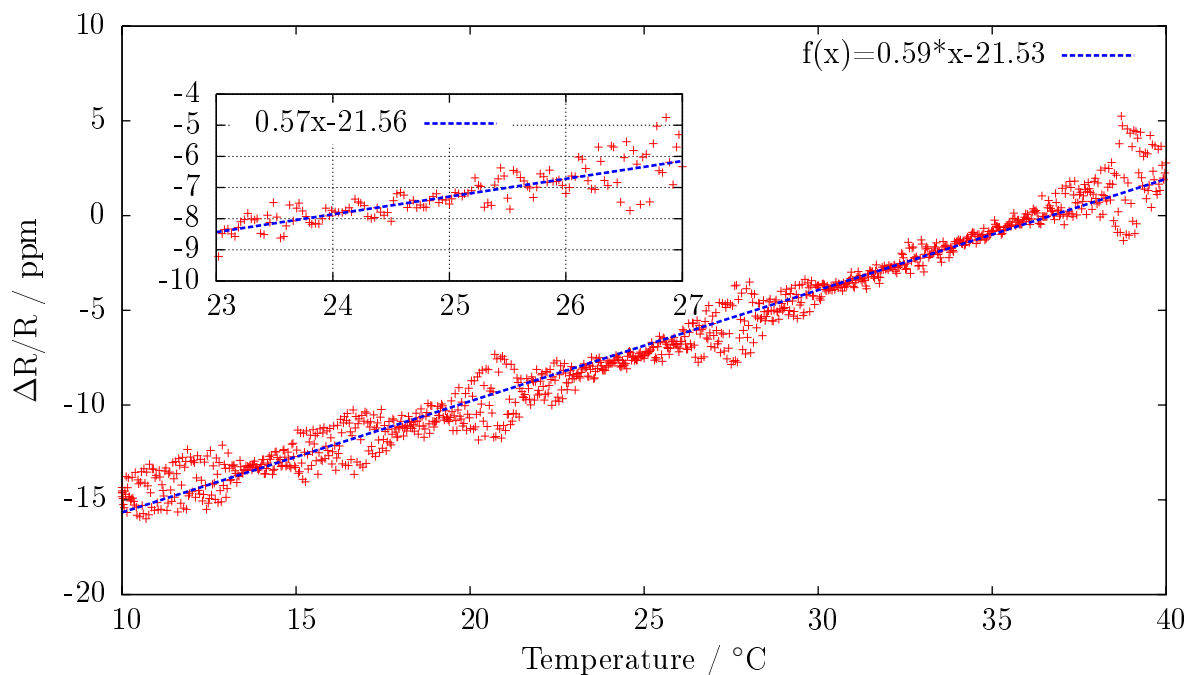


Abbildung 3.16: Temperaturkoeffizient des Widerstands M6293. Gezeigt ist die relative Widerstandsänderung des Widerstands M6293 in Abhängigkeit der Temperatur. Es handelt sich um einen Widerstand mit positivem TCR. Die Aufwärmabweichung beträgt 2,6 ppm.

Neben der stichprobenhaften Untersuchung des Temperaturkoeffizienten der Widerstände aus der Primärkette wurden alle Widerstände der Abgriffebene untersucht.

Die für den 100:1 Abgriff verwendeten Widerstände weisen in ihrer endgültigen Schaltung (zwei parallel geschaltete Widerstandspaare in Reihe geschaltet) einen sehr niedrigen Temperaturkoeffizienten von $<0,05$ ppm/K über 30 K auf. Betrachtet man den Bereich zwischen 24 und 26 °C so beträgt der TCR dort $<\pm 0,01$ ppm/K. Diese sehr gute Kompensation der 1,2 MΩ Widerstände, wie auch für alle anderen Abgriffwiderstände, ist äußerst wichtig, da hier Spannungen unter 20 V gemessen werden und schon kleine Effekte das Ergebnis deutlich verfälschen können.

Die Widerstände der Abgriffebene wurden als kompensierte Gruppe gekauft.

Der Temperaturkoeffizient der Widerstandsgruppe des 500:1 Abgriffs beträgt zwischen 24 und 26 °C $\pm 0,02$ ppm/K.

Die beiden Gruppen für den 1818:1 und 3636:1 Abgriffe bestehen jeweils aus drei parallel geschalteten 121 kΩ Widerständen. Wie in Abbildung 3.19 gezeigt besitzen sie den niedrigsten Temperaturkoeffizienten in der Abgriffebene. Für den Block des 1818:1 Abgriffs beträgt dieser $\pm 0,004$ ppm/K und für den 3636:1 Abgriff $\pm 0,002$ ppm/K (jeweils zwischen 24 und 26 °C).

Der Einfluss der Abgriffwiderstände auf den Gesamttemperaturkoeffizienten des Spannungsteilers liegt aufgrund der Temperaturstabilisierung von $\pm 0,1$ K bei etwa 10^{-9} und ist daher von untergeordneter Rolle.

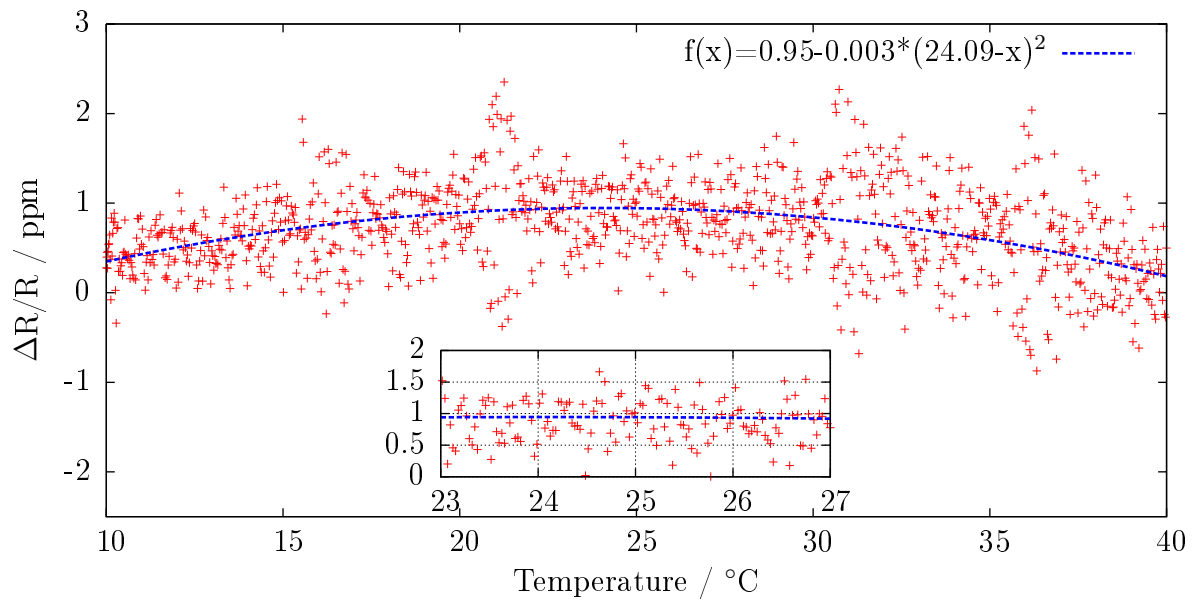


Abbildung 3.17: Temperaturkoeffizient der Widerstände des 100:1 Abgriffs. Für die Messung wurden die Widerstände entsprechend ihrem späteren Einsatz verschaltet und dann der TCR gemessen. Die relative Widerstandsänderung beträgt über den gesamten Temperaturbereich lediglich $\pm 0,8$ ppm.

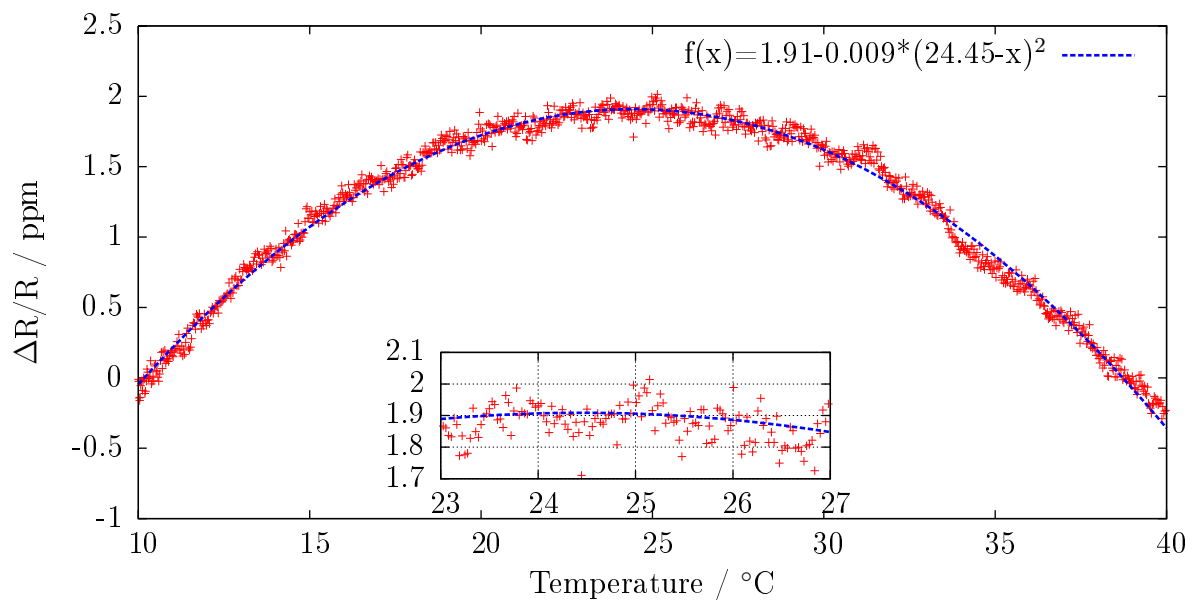


Abbildung 3.18: Temperaturkoeffizient der Widerstände des 500:1 Abgriffs. Für die Messung wurden die Widerstände entsprechend ihrem späteren Einsatz verschaltet und dann der TCR aufgezeichnet. Die relative Widerstandsänderung beträgt über den gesamten Temperaturbereich etwa ± 2 ppm.

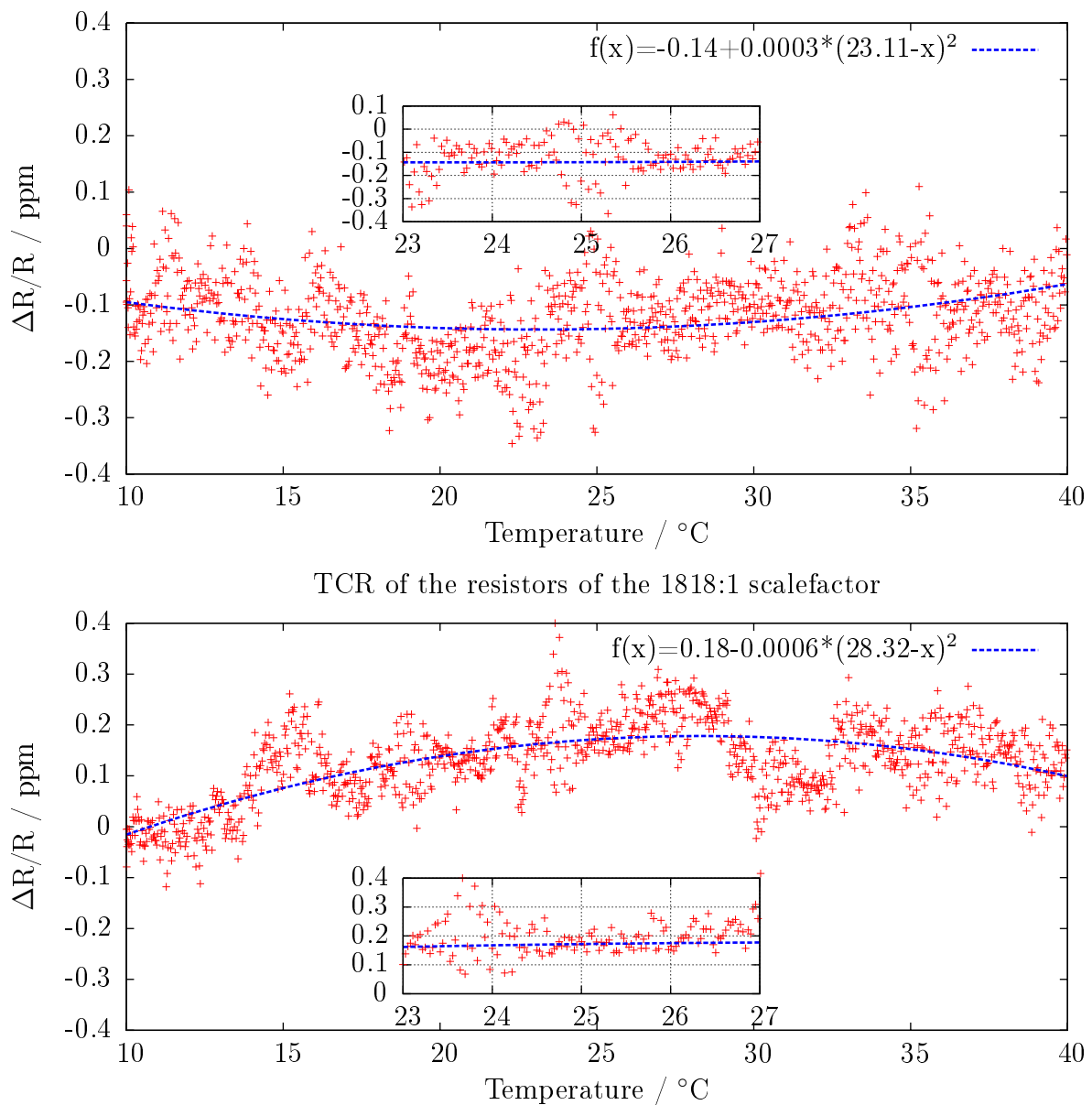


Abbildung 3.19: Temperaturkoeffizient der Widerstände des 3636:1 und des 1818:1 Abgriffs. Gezeigt sind die Temperaturkoeffizienten der Widerstandsgruppe für die Präzisionsabgriffe des Teilers. Sie besitzen den niedrigsten Temperaturkoeffizienten in der Abgriffebene.

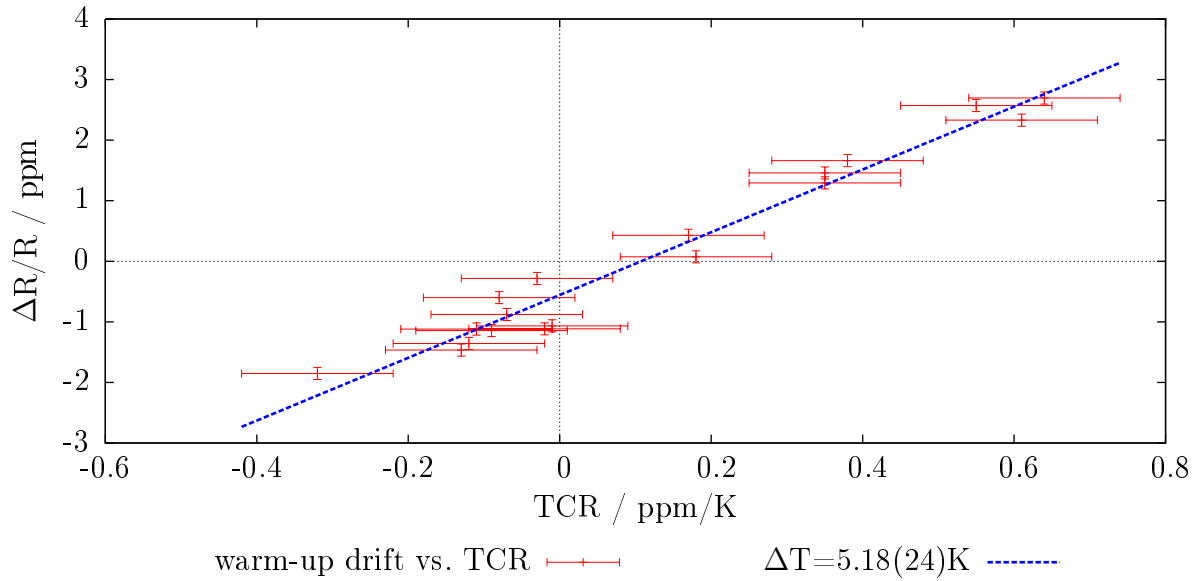


Abbildung 3.20: Aufwärmabweichung und Temperaturkoeffizient. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen Aufwärmabweichung ($\Delta R/R$) und Temperaturkoeffizienten (TCR). Die Anpassung der Geraden ergibt eine mittlere, innere Erwärmung der Widerstände von $(5,18 \pm 0,24) \text{ K}$. Bei den Messungen des Aufwärmverhalten wurde durch die angelegte Spannung eine Verlustleistung von $0,07 \text{ W}$ eingestellt.

Um ein Maß für die innere Erwärmung des Widerstandes während der Messung der Aufwärmabweichungen zu bekommen, wird das Verhältnis von Aufwärmabweichung zu TCR betrachtet. Die innere Erwärmung der Widerstände wird nur durch die elektrische Verlustleistung induziert. Diese ist bei der Messung der Aufwärmabweichung für alle Widerstände konstant und wird durch den Spannungsabfall über den Widerstand bestimmt. Aus diesem Grund ist die innere Erwärmung bei Messungen der Aufwärmabweichung, mit identischer Verlustleistung bei allen Widerständen gleich.

Damit lässt sich die Aufwärmabweichung ($\frac{\Delta R}{R}$) in Abhängigkeit der inneren Erwärmung (ΔT) und des Temperaturkoeffizienten ($\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T}$) wie folgt darstellen:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} \cdot \Delta T \quad (3.2.1)$$

Bei dieser Betrachtung wird der Temperaturkoeffizient des Widerstandes als linear angenommen. Da der Verlauf des Temperaturkoeffizienten der Widerstände mit negativen aufwärmverhalten nicht linear ist, stellt diese Betrachtung nur eine Näherung dar.

Trägt man die Aufwärmabweichung gegen den Temperaturkoeffizienten auf, so kann die mittlere, innere Erwärmung der Widerstände bei einer bestimmten Verlustleistung bestimmt werden. In Abbildung 3.20 ist dies, für 18 Widerstände bei einer Verlustleistung von $0,07 \text{ W}$ gezeigt. Aus der Geradensteigung lässt sich die innere Erwärmung zu $(5,18 \pm 0,24) \text{ K}$ bestimmen. Die mittlere, innere Erwärmung der Widerstände des ersten KATRIN-Spannungsteilers wurden, bei einer Verlustleistung von $0,2 \text{ W}$, zu $(8,53 \pm 0,17) \text{ K}$ bestimmt [Thu07]. Der in

Abbildung 3.7 gezeigte Leistungsvergleich zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Aufwärmverhalten und demnach auch zwischen Verlustleistung und innerer Erwärmung. Aus diesem Grund würde eine innere Erwärmung der Widerstände bei einer Verlustleistung von 0,2 W von etwa 14,8 K erwartet. Da die Methode zur Bestimmung der inneren Erwärmung eine Näherung darstellt und der Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Aufwärmabweichung nicht vollständig linear ist, ist ein Vergleich der von Th. Thümmeler bestimmten inneren Erwärmung mit den hier gewonnenen Daten schwierig. Des weiteren ist der innerer Aufbau der untersuchten Widerstände unterschiedlich, da durch die unterschiedlichen Widerstandswerte auch eine unterschiedliche Anzahl von Widerstandschips verbaut ist. Dies kann zu einem unterschiedlichen thermischen Verhalten führen.

3.2.3 Weitere Untersuchungen

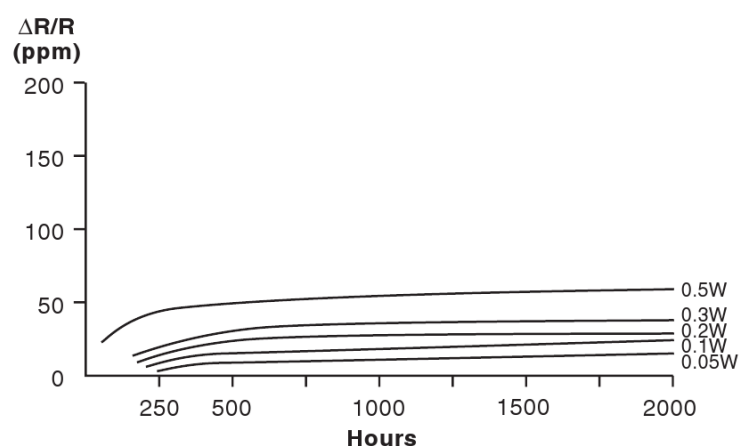
Die folgenden Untersuchungen wurden durch F. Hochschulz im Rahmen seiner Diplomarbeit durchgeführt und werden hier der Vollständigkeit halber zusammengefasst. Sie dienen der Überprüfung der Eignung der neuen Vishay-Widerstände vor der Bestellung der 184 Widerstände.

Langzeitstabilität

Eine wichtige Weiterentwicklung bei der Herstellung der Widerstände für den zweiten KATRIN-Spannungsteiler ist das sogenannte pre-aging. Bei diesem Verfahren werden die Widerstände künstlich gealtert und somit schneller in einen stabilen Zustand gebracht. Ohne dieses Verfahren zeigen die Widerstände ein Alterungsverhalten welches von der Betriebsdauer, der angelegten Last abhängt und der Temperatur abhängt [Vis05]. Dieses Verhalten ist für verschiedenen Belastungen bei 25 °C in Abbildung 3.21 dargestellt.

Das Alterungsverhalten der Widerstände zeigt sich beim ersten Spannungsteiler durch eine Langzeitdrift von 0,6 ppm/Monat zwischen den Kalibrierungen 2005 und 2006 an der PTB.

Abbildung 3.21: Langzeitstabilität der Vishay-VHA Widerstände. Gezeigt ist die relative Widerstandsänderung der Widerstände vom Typ VHA bei unterschiedlichen Belastungen und einer Temperatur von 25 °C [Vis05].



Die Auswirkungen des pre-aging wurden durch F. Hochschulz anhand von fünf Testmustern über einen Zeitraum von 4,5 Monaten überprüft. Dabei wurden drei Widerstände bei 0,24 W und zwei Lastfrei gelagert. Über diesen Zeitraum konnte keine lastabhängige Langzeitdrift festgestellt werden [Hoc08].

Eine Bestimmung der Langzeitdrift des zweiten KATRIN-Spannungsteilers kann erst nach wiederholten Kalibrierungen des Teilers an der PTB erfolgen.

Stabilität der Widerstände bei magnetischen Feldern

Am KATRIN-Experiment traten an verschiedene Stellen starke Magnetfelder auf und diese beeinflussen den Widerstandswert von Widerständen aufgrund der auf die Ladungsträger wirkenden Lorentzkraft. Aus diesem Grund wurde auch die Wirkung von magnetischen Feldern auf die Widerstände untersucht [Hoc08]. Das Ergebniss ist eine Abhängigkeit von $-0,005 \text{ ppm/Gs}$ und somit kann der Einfluss von magnetischen Feldern am Aufstellungsort des Spannungsteilers am KATRIN-Experiment auf insgesamt weniger als $0,02 \text{ ppm}$ abgeschätzt werden.

3.2.4 Auswertung der Widerstandsmessungen

Nach abschließender Untersuchung aller vorhandenen Widerstände zeigt sich, dass bei der Verwendung von 165 Widerständen der Aufbau eines Spannungsteilers mit sehr gutem thermischen Verhalten möglich ist. Die maximal zulässige Spannung der primären Teilerkette beträgt 99 kV und liegt damit um 52% höher als die gewünschte maximale Betriebsspannung von 65 kV.

Die stichprobenartige Messung des Temperaturkoeffizienten der Widerstände zeigte deutlich unterschiedliche in den Signaturen für Widerstände mit positivem und negativem Aufwärmverhalten. Die Widerstände mit negativem Aufwärmverhalten weisen einen kleinere Absolutwerte sowie eine kleinere Streuung des Aufwärmverhaltens, aufgrund des parabelförmigen Verlaufes der TCR, auf.

Die Kompensation der Aufwärmabweichung der Primärkette ist vergleichbar mit der des ersten Spannungsteilers. Die sehr gute Kompensation der Temperaturkoeffizienten innerhalb der Abgriffebene sorgt dafür, dass die temperaturbedingte Widerstandsänderung der Abgriffwiderstände einen verschwindend kleinen Einfluss auf die Maßstabsfaktoren hat. Diese Eigenschaft ist sehr wichtig bei der Temperaturverteilung und -steuerung innerhalb des Teilers (siehe Kapitel 4).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den VHA518-11 Widerständen der zweiten Generation, ein mit dem ersten KATRIN-Spannungsteiler vergleichbarer, Hochspannungsteiler aufgebaut werden kann. Die Primärkette des zweiten Spannungsteilers besitzt jedoch einige Weiterentwicklungen, wie die Reduzierung der Last pro Widerstand, die hervorragende Kompensation der Abgriffwiderstände und die verbesserte Langzeitstabilität aufgrund des pre-aging Verfahrens, die eine höhere Präzision und Stabilität versprechen.

3.3 Kondensatormessungen

Für den zweiten KATRIN-Spannungsteiler wurden Hochspannungs-Folienkondensatoren mit 2,5 nF Kapazität und einer Spannungsfestigkeit von 20 kV verwendet. Diese Kondensatoren wurden von der Firma Fischer und Tausche speziell nach den Anforderungen des Spannungsteilers hergestellt. Wichtig war dabei, dass die Kondensatoren eine axiale Bauform aufweisen damit sie direkt zwischen den Elektroden verbaut werden können. Übliche Kondensatoren mit gleicher Kapazität und Spannungsfestigkeit sind in radialer Bauform verfügbar. Diese Bauform hätte allerdings zu einer weiteren nicht ganz unkomplizierten Halterung innerhalb des Teilers geführt.

Aus Erfahrungen der Mitarbeiter der Elektronischen-Werkstatt des Institut für Kernphysik in Münster war bekannt, dass Kondensatoren entweder nach wenigen hundert oder aber nach einigen 10.000 Betriebsstunden ausfallen. Aus diesem Grund wurden die Kondensatoren für zehn Tage bei 14 kV betrieben. Vor und nach dem Testbetrieb wurden die Kapazitäten der Kondensatoren bestimmt und es konnte bei keinem der Kondensatoren ein auffälliger Unterschied festgestellt werden.

KAPITEL 4

THERMISCHE TESTS

Wie schon in Kapitel 2.3 beschrieben wird die interne Temperaturverteilung maßgeblich durch das Tunnelrohr beeinflusst. Um eine möglichst gute interne Temperaturverteilung zu ermöglichen, wurden zwei Schritte durchlaufen. Zum einen wurden verschiedene Füllgase und Konfigurationen des Tunnelrohrs von F. Hochschulz simuliert und zum anderen wurde ein thermisches Modell des Spannungsteilers im Rahmen dieser Diplomarbeit aufgebaut und vermessen.

Basierend auf der Simulation der Temperatursteuerung wurde das Tunnelrohr für den zweiten Spannungsteiler mit 24 Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm pro Ebene versehen sowie Stickstoff als Füllgas gewählt. Um die Temperaturverteilung oberhalb der obersten Elektrode zu verbessern, wurde diese mit vier 5 mm Bohrungen versehen. Dies ermöglicht eine Gaszirkulation oberhalb der Elektrode und sorgt somit für eine bessere Temperaturverteilung innerhalb des Spannungsteilers [Hoc08].

Der folgende Teil der Arbeit zeigt die Schritte zur Überprüfung der Simulation bis hin zur Optimierung der Temperatursteuerung und -verteilung innerhalb des zweiten Spannungsteilers.

4.1 Aufbau des thermischen Modells

Der Aufbau eines thermischen Modells des Spannungsteilers benötigt keine Präzisionswiderstände, da es nicht auf die Maßstabsfaktoren sondern nur auf die von der Primärkette erzeugte Wärme ankommt. Aus diesem Grund wurden herkömmliche $1/4$ -Watt Widerstände verwendet. Der Widerstandswert wurde so gewählt, dass die anzulegende Spannung um den Faktor 20 reduziert werden konnte. Dadurch ist es möglich Pt100-Sensoren zur Temperaturmessung auch in den oberen Ebenen des Spannungsteilers zu montieren ohne dass es zu Entladungen kommt. Im Hochspannungsbetrieb ist es nicht möglich, Sensoren mit erd-nahem Potential in die Nähe von hochspannungsführenden Teilen zu bringen, da es sonst zu Entladungen kommt. Das für die Tests verwendete Netzteil besitzt eine maximale Ausgangsspannung von 3 kV und einen maximalen Strom von 10 mA. Dadurch ist es möglich die erzeugte Wärme der Primärkette des Spannungsteilers bis zu einer Spannung von 60 kV zu simulieren.

Für die Wahl des Widerstandswertes bedeutet die Spannungsreduzierung:

$$P = const = \frac{U^2}{R_{prim}} \stackrel{!}{=} \frac{(U/20)^2}{R_{therm}} \Rightarrow R_{therm} = \frac{R_{prim}}{400} \quad (4.1.1)$$

Daher wurde das thermische Modell mit 170 Widerständen mit $2,2\text{ k}\Omega$ und entsprechenden Abgriffwiderständen aufgebaut. Das Modell wurde mit 170 Widerständen aufgebaut, da abschließende Untersuchungen der Präzisionswiderstände und Gespräche mit der Firma Vishay parallel zu den thermischen Untersuchungen durchgeführt wurden und es noch nicht absehbar war, dass der Spannungsteiler mit 165 Widerständen aufgebaut wird. Die Reduktion um ein Widerstand pro Ebene hat für die thermische Verteilung innerhalb des Spannungsteiler keinen wesentlichen Einfluss (s.u.).

Die Widerstände des Kontrollteilers sowie die Kondensatoren wurden wie im endgültigen Aufbau verwendet. Da es bei diesen Untersuchungen nicht auf die Präzision der Teilerkette ankommt ist es nicht nötig, dass die Widerstände sich im selben Potential befinden welches an ihnen anliegt. Bei diesem Vorgehen wird die thermische Last des Kontrollteiler, im thermischen Modell nicht berücksichtigt. Da die Temperaturverteilung über den Gasstrom gesteuert wird, ist ein Ausgleich der thermischen Last des Kontrollteilers nur möglich, wenn an dessen Position mehr Gas geleitet wird. Ein lokal erhöhter Gasfluss führt aber zu einer inhomogenen Temperaturverteilung der Primärkette und könnte den Präzisionsteiler beeinflussen. Der unvermeidliche Einfluss des Kontrollteilers auf die Temperaturverteilung soll durch die lokale Kompensation des Aufwärmverhaltens der Präzisionswiderstände minimiert werden.

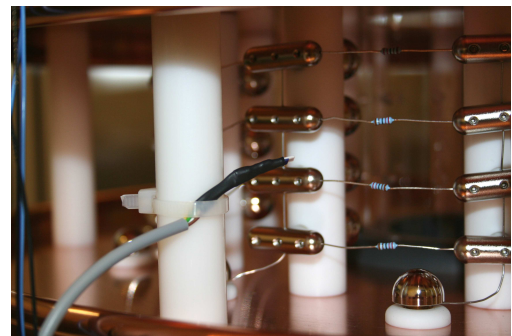
Der Einbau all dieser Komponenten diene zusätzlich noch als Kontrolle aller mechanischen Bauteile und zur Übung aller nötigen Handgriffe für den Einbau der Präzisionswiderstände. Wären beim Aufbau des thermischen Modells Probleme auftreten, so hätten sich diese vor dem endgültigen Aufbau beheben bzw. berücksichtigen lassen.

Um die Temperatur innerhalb des Spannungsteilers zu überwachen, wurden an folgenden Punkten Pt100 montiert:

- Zwei Fühler in der Abgriffebene (je 180° versetzt) („low voltage“)
- Ein Fühler in der ersten Ebene („first plane“)
- Ein Fühler in der mittleren Ebene („middle plane“)
- Ein Fühler in der obersten Ebene („top plane“)
- Ein Fühler über der obersten Ebene
- Ein Fühler unter dem inneren Wärmetauscher („bottom“)
- Ein Fühler außerhalb des Spannungsteilers als Raumtemperaturfühler

Alle Sensoren wurden über die 8-Kanal RTD-Karte des CompactField-Points ausgelesen und gespeichert.

Abbildung 4.1: Pt100 Temperatursensor in einer Widerstandsebene Gezeigt ist ein Pt100 Sensor in der Abgriffebene. Alle Sensoren wurden so nah wie möglich an die Widerstände gebracht, um die Temperatur in unmittelbarer Nähe der Widerstände zu messen.



Vor Beginn der eigentlichen Tests zur Überprüfung der Simulationen war es nötig, die Parameter des PID-Reglers auf das System einzustellen und anzupassen.

4.2 PID-Regler

Ein PID-Regler betrachtet zwei Größen, zum einen den festen Soll-Wert (hier 25 °C) und den aktuellen Ist-Wert. Die Differenz der beiden Werte wird als Fehler $e(t)$ oder Regelabweichung bezeichnet und der Regler berechnet seine Ausgangsvariable $U(t)$ (hier Steuerspannung des Peltierelements) anhand des Fehlers und der eingestellten Proportional-, Integral- und Differentialterme (PID-Terme).

1. Proportionalterm:

Bei dem Proportionalterm handelt es sich um einen linearen Verstärkungsfaktor (K_c) welcher mit dem Fehler multipliziert wird:

$$U_P(t) = K_c \cdot e(t)$$

2. Integralterm:

Der Integralterm eines PID-Reglers sieht wie folgt aus:

$$U_I(t) = \frac{K_c}{T_I} \int_0^t e(t') dt'$$

Dabei ist T_I die Integrationszeit, sie bestimmt die Zeit bis die Ausgangsvariable den Wert der Regelabweichung annimmt (bei einem reinen I-Regler).

3. Differentialterm:

Dieser Term steuert schnellen Änderungen der Regelabweichung entgegen, z.B. bei plötzlichem Temperaturanstieg beim Anlegen einer hohen Spannung.

$$U_D(t) = K_c \cdot T_D \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Dieser Term reagiert nicht auf den Betrag der Regelabweichung sondern nur auf dessen Änderung, wobei T_D die Vorhaltzeit des Reglers ist. Diese bewirkt, dass der Regler bei einer Temperaturänderung von zum Beispiel $\Delta T = 1 \text{ K/min}$ und einer Vorhaltzeit $T_D = 15 \text{ s}$ sein Differentialverhalten $0,25 \text{ K}$ ($\Delta T \cdot T_D$) vor Erreichen des Sollwertes abschaltet [PID02].

Die Ausgangsvariable des PID-Reglers setzt sich wie folgt zusammen:

$$U(t) = K_c \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t') dt' + T_D \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.2.1)$$

Weitere Details hierzu und zur folgenden Anpassung der PID-Parameter finden sich in [PID01].

Die Optimierung der Werte für K_c , T_I und T_D wurden nach der Methode von Ziegler und Nichols durchgeführt. Zunächst wurde die Verstärkung des Reglers (K_c) so weit erhöht, dass das System bei 25 °C zu schwingen begann. Dieser Wert wurde als kritische Verstärkung ($K_{c,krit}$) sowie die Periodendauer der Schwingung (T_{krit}) festgehalten. Für den zweiten Spannungsteiler stellten sich folgende Werte ein:

- $K_{c,krit} = 180$
- $T_{krit} = 4,5 \text{ min}$

Aus diesen Werten berechnen sich die PID-Parameter der Regelung wie folgt [PID01]:

- Der Verstärkungsfaktor des Reglers: $K_c = 0,15 \text{ bis } 0,6 \cdot K_{c,krit}$
Je größer der Verstärkungsfaktor ist um so schneller ist die Regelung. Eine schnelle Regelung führt zu Überschwingern bei der Regelung.
- Die Integrationszeit des Reglers: $T_I = 0,5 \cdot T_{krit}$
- Die Differentiationszeit des Reglers: $T_D = 0,12 \cdot T_{krit}$

Diese Werte bildeten die Basis für weitere Untersuchungen des Verhaltens der Regelung. Während der Testmessungen wurden die Parameter immer wieder angepasst, um das zeitliche Verhalten des Systems zu optimieren. Dabei wurde eine schnelle Regelung gewählt, welche maximale Überschwinger in der Regelung von weniger als 0,1 K aufweist. Außerdem wurde der PID-Regler auf anliegende Spannungen zwischen 15 und 35 kV optimiert, da sich gezeigt hat, dass die Regelung nicht über den gesamten Spannungsbereich gleich gut ist. So wurde auf den für das KATRIN-Experiment wichtigsten Spannungsbereich optimiert und eine leicht schlechtere Regelung bei Spannungen über 55 kV toleriert.

Für den Regler zeigten sich folgende Werte als idealste Lösung:

- Der Verstärkungsfaktor des Reglers: $K_c = 85$
- Die Integrationszeit des Reglers: $T_I = 2,8 \text{ min}$
- Die Differentiationszeit des Reglers: $T_D = 0,25 \text{ min}$

Als Verstärkungsfaktor wurde $0,47 \cdot K_{c,krit}$, als Integrationszeit $0,6 \cdot T_{krit}$ und für die Differentiationszeit $0,06 \cdot T_{krit}$ gewählt. Die Integrationszeit wurde etwas länger und die Differentiationszeit deutlich kürzer gewählt. Dadurch wurde eine weitaus ruhigere Regelung mit geringeren Regelabweichungen erzielt.

4.3 Test mit ursprünglichem Tunnelrohr

Zunächst wurde die Regelung auf ihre Stabilität und der Spannungsteiler auf einen Temperaturgradienten untersucht. Dazu wurde die Regelung auf 25 °C eingestellt und der Spannungsteiler ohne angelegte Spannung betrieben (Abb. 4.2). Nach einer von der Anfangstemperatur abhängigen Einlaufphase stehen die Temperaturen innerhalb der Ebenen sehr stabil. Man erkennt eine symmetrische Abweichung um die eingestellte Temperatur, aufgrund einer Mittelwertbildung der Temperaturen und einer noch nicht durchgeführten Kalibrierung der Sensoren.

Die Kalibrierung der Temperatursensoren erfolgte nach Abschluß aller Test und wird bei Untersuchungen, bei denen die absolute Temperatur entscheidend ist, berücksichtigt.

Die Bereiche unterhalb und oberhalb der Elektroden zeigen eine Abhängigkeit von der Außentemperatur (Abb. 4.2 und 4.6), welche durch weitere thermische Isolation mit Armaflex

reduziert wird. Da diese Abhängigkeit nicht in den Ebenen zu erkennen ist, ist diese auch von untergeordneter Bedeutung.

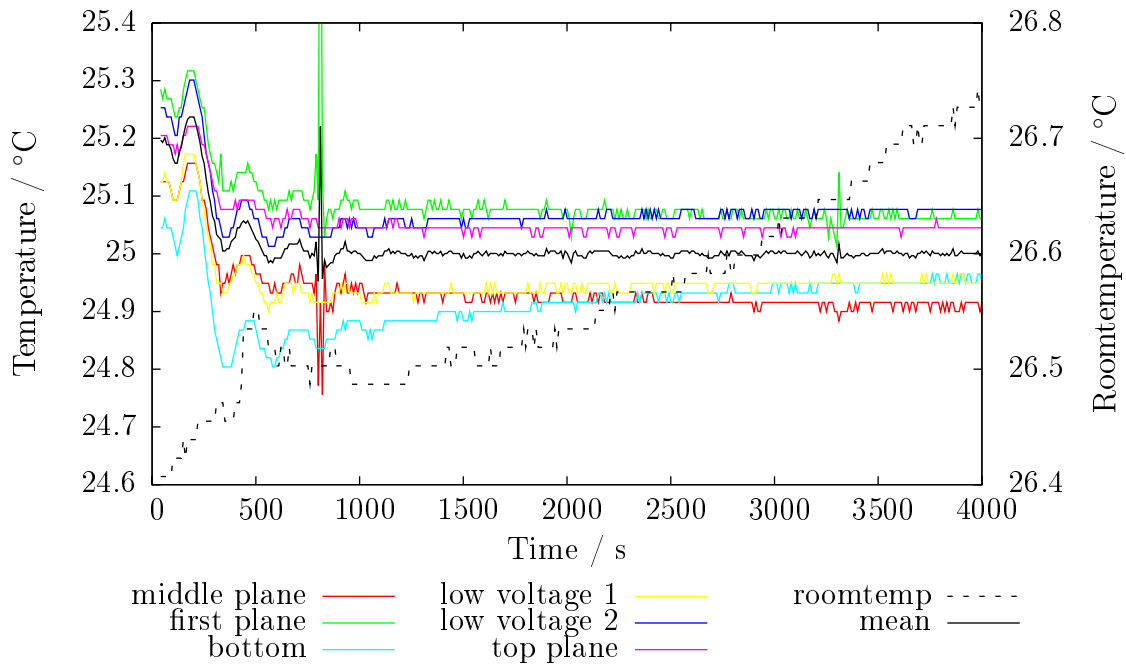


Abbildung 4.2: Temperaturverteilung ohne angelegte Spannung. Die obige Abbildung zeigt die Temperaturverteilung innerhalb des Spannungsteilers ohne angelegte Spannung. Die Regelung erfolgte auf den Mittelwert der Temperatur in der ersten, der mittleren und der Abgriffebene.

Betrachtet man die Ebenen selbst, so ist die Temperatur innerhalb der Ebenen auf $\pm 0,05$ K stabil. Die Temperatur zwischen den Ebenen weist keinen nennenswerten Gradienten auf, lediglich die oberste Ebene liegt in ihrer Temperatur um 0,1 K höher als die restlichen (Abb. 4.3). Dies kann auf die hohe Raumtemperatur von etwa 26 °C und die in dieser Konfiguration noch fehlende thermische Isolierung des Flansches der HV-Zuführung zurückgeführt werden.

Legt man an den Spannungsteiler eine Spannung an, muss die durch die Verlustleistung entstandene Wärme durch die Temperatursteuerung ausgeglichen werden. Dies geschieht in dem die zirkulierende Luft über den inneren Wärmetauscher abgekühlt wird. Das Verhalten des Spannungsteilers bei einer angelegten Spannung von 2 kV (entspricht 40 kV im endgültigen Aufbau) ist in Abbildung 4.4 gezeigt. Sobald die Spannung angelegt wird ist ein deutliches Abkühlen der Abgriffebene um über 0,5 K zu sehen. Nach dem Abschalten der Spannung wärmt sich die Abgriffebene wieder auf.

Das Abkühlen der Abgriffebene lässt sich durch die unterschiedlichen Verlustleistungen von Haupt- und Abgriffebene erklären. Die Verlustleistung in einer Hauptebene beträgt bei 2 kV (40 kV) 2,1 W und in der Abgriffebene 0,1 W. Da das Tunnelrohr in allen Ebenen die gleiche Anzahl an Bohrungen aufweist, wird bei einer Regelung der Temperatur auf den Sensor der mittleren Ebene, die Leistung von 2,1 W pro Ebene ausgeglichen. Dieser Unterschied in der Verlustleistung der Ebenen wurde bei den vorangegangenen Simulationen nicht berücksichtigt.

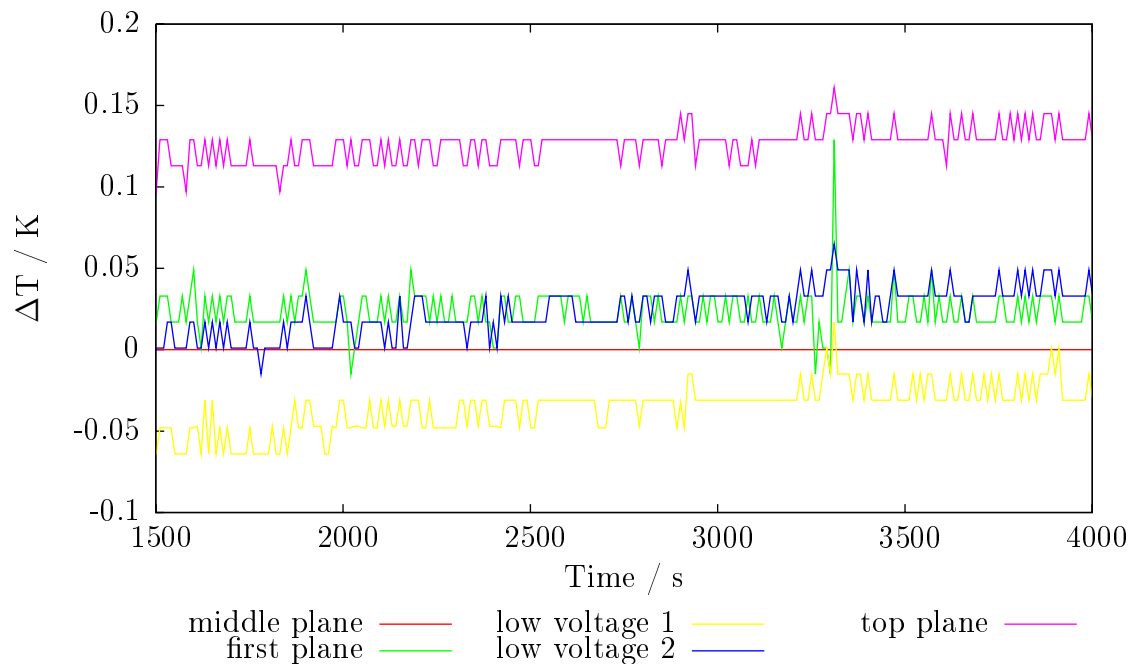


Abbildung 4.3: Temperaturverteilung zwischen den Ebenen. Die obige Abbildung zeigt die Temperaturverteilung innerhalb des Spannungsteilers zwischen den Ebenen ohne angelegte Spannung. Die Regelung erfolgte auf den Mittelwert der Temperatur der ersten, der mittleren und der Abgriffebene. Die Kalibrierung der Temperatursensoren auf den Sensor „middle plane 1“ wurde hier berücksichtigt.

Der Anteil der Abgriffebene am Gesamtwiderstand der Primärkette beträgt lediglich 1% und somit fallen auch nur 1% der Gesamtverlustleistung in der Abgriffebene ab. Die Verlustleistung pro Hauptebene ist etwa 20 mal größer als die der Abgriffebene. Durch den gewollten Staudruck innerhalb des Tunnelrohr ist bei gleicher Anzahl der Bohrungen pro Ebene auch die Kühl- bzw. Heizleistung pro Ebene identisch. Daher kann die zu geführten Kühl-/Heizleistung nur durch die Größe und Anzahl der Bohrungen in einer Ebene beeinflusst werden.

Um einen möglichst hohen Gasstrom innerhalb der Hauptebenen und somit eine verbesserte Temperaturverteilung zu erreichen, wurde bei der Neuberechnung des Tunnelrohrs die Bohrungsoberfläche in den Hauptebenen unter Einhaltung des Staudrucks erhöht. Dies war möglich, da durch die reduzierte Bohrungsoberfläche innerhalb der Abgriffebene die Gesamtauslassfläche des Rohrs verkleinert wurde.

Um einen Staudruck zu gewährleisten, muss die Querschnittsfläche des Rohrs größer als die Bohrungsoberfläche sein. Die neuen Daten des Tunnelrohrs sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Der Unterschied der Leistung zwischen Haupt- und Abgriffebene von 20 lässt sich nicht direkt auf die Bohrungsoberfläche übertragen, da die Widerstände der Abgriffebene nur in einer Hälfte der Elektrode untergebracht sind. Somit müsste mit einer um den Faktor 10 kleineren Leistung als in den Hauptebenen gerechnet werden, was einen Bohrungsdurchmesser von etwa 2,5 mm bedeuten würde. Vorangegangene Tests zeigten keinen nennenswerten Unterschied zwischen einer 2 mm und einer 2,5 mm Bohrung. Aus diesem Grund wurde das neue

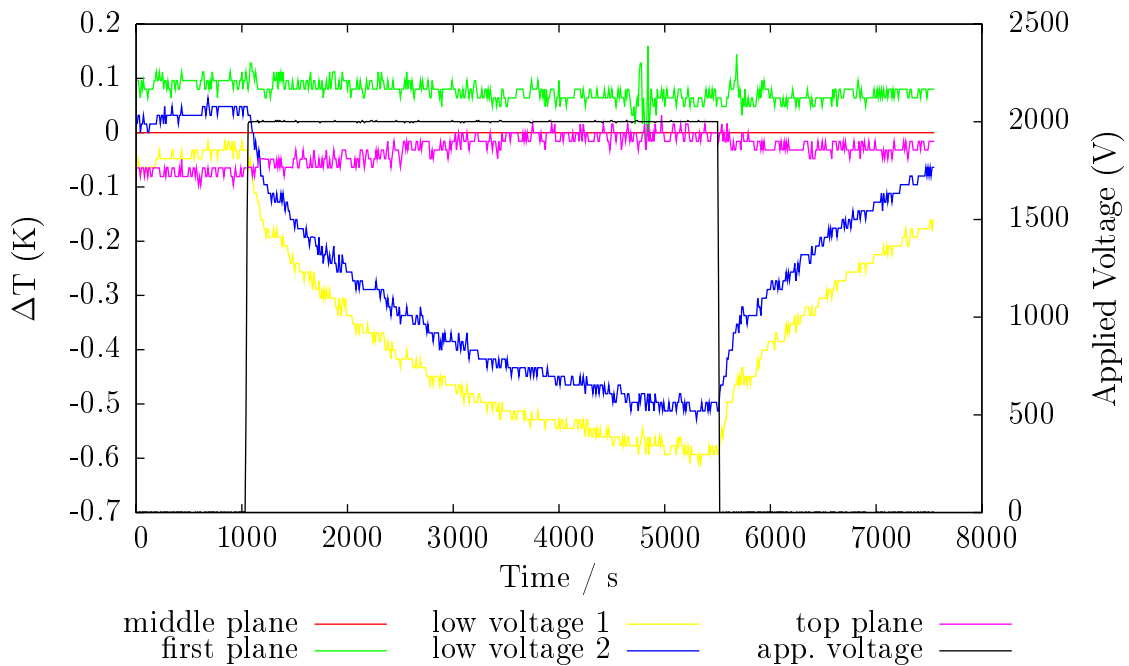


Abbildung 4.4: Temperaturverteilung mit 2kV angelegter Spannung. Gezeigt ist die Abweichung der Temperaturen innerhalb der Ebenen von der mittleren Ebene. Die Regelung erfolgte auf den Temperatursensor in der mittleren Ebene und die Kalibrierung der Sensoren wurde berücksichtigt.

	Hauptebene	Abgriffebene	Gesamt
Anzahl Bohrungen	36	12	192
Bohrungsdurchmesser	5 mm	2 mm	—
Bohrungsoberfläche	706,5 mm ²	37,7 mm ²	3648,7 mm ²
% der Querschnittsfläche	11,1	0,6	57,4

Tabelle 4.1: Parameter des neuen Tunnelrohrs. Dargestellt sind Bohrungsdurchmesser, Anzahl der Bohrungen sowie deren Oberfläche für die Hauptebenen und die Abgriffebene.

Tunnelrohr mit 2 mm Bohrungen versehen, da ein nachträgliches Erweitern der Bohrungen kein Problem darstellt.

Des weiteren wurde festgestellt, dass die oberste Elektrode im Betrieb mit hohen Lasten stark abkühlte. Der Grund dafür war das nach oben offene Tunnelrohr welches im Kühlbetrieb permanent kalte Luft an die oberste Elektrode leitete. Aufgrund der gute Wärmeleitfähigkeit von Kupfer wirkte diese als sehr gute Wärmetauscher mit großer Oberfläche. Dieses Verhalten konnte durch eine 2 mm dicke Silikonfolie zwischen Tunnelrohr und oberster Elektrode stark verbessert werden. Die Folie weist an den gleichen Stellen 5 mm Bohrungen auf wie die Elektrode so dass ein Gasaustausch oberhalb der Elektrode weiter stattfinden kann. Für den späteren Aufbau wurde ein Deckel mit passenden Bohrungen für das Tunnelrohr angefertigt (siehe Kapitel 5.1.5).

4.4 Die endgültige Version des Tunnelrohrs

Um das thermische Verhalten des Spannungsteiler mit dem neu geplanten Tunnelrohr zu testen, wurden die erforderlichen Löcher in das ursprüngliche Tunnelrohr gebohrt und die 24 alten Löcher in der Abgriffebene durch Stopfen verschlossen. So war es möglich, die Konfiguration zu testen bevor ein neues Rohr angefertigt wurde.

Auch hier wurden verschiedene Spannungen angelegt und auch das Verhalten beim Wechsel von einer auf die andere Spannung. In Abbildung 4.5 ist zum einen ein Wechsel von 1 kV auf 2 kV bei etwa 71000 s und das Abschalten der Spannung aufgezeichnet.

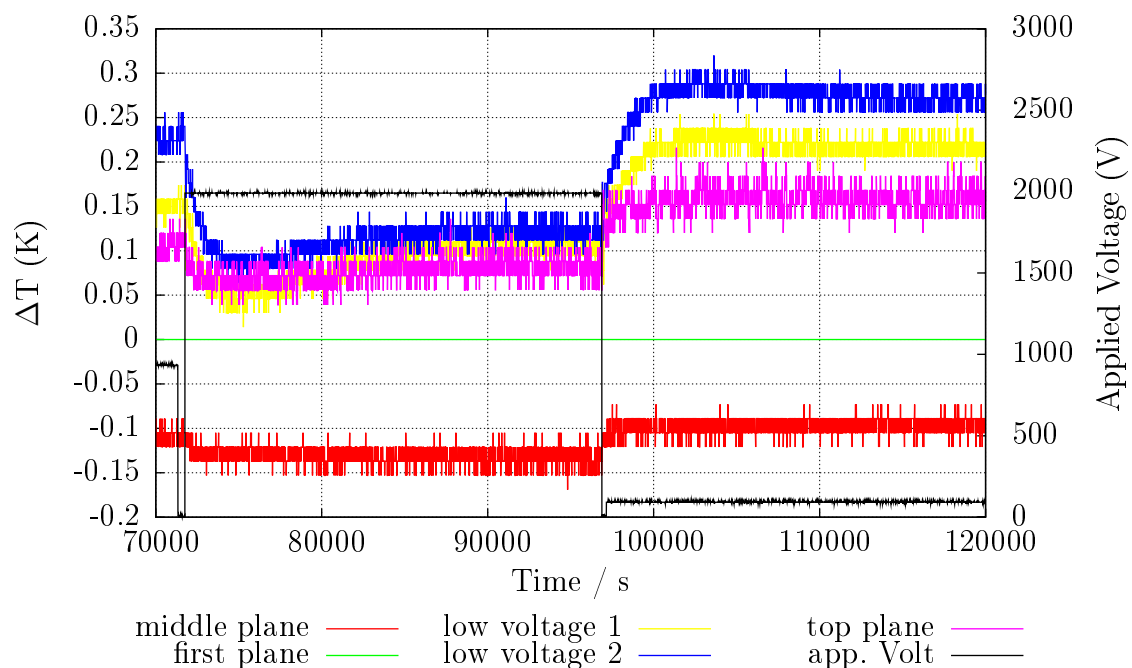


Abbildung 4.5: Abweichung von der Regeltemperatur bei 2mm Löchern in der Abgriffebene. Gezeigt ist das thermische Verhalten des Teilers bei einem Wechsel von 1 kV auf 2 kV bei 71000 s und nach dem Abschalten der Spannung bei etwa 97000 s. Geregelt auf die erste Ebene wie auch im späteren Aufbau möglich.

Nach dem Wechsel von 1 kV (20 kV) auf 2 kV (40 kV) fällt die Temperatur in der Abgriffebene um etwas mehr als 0,1 K und in den anderen Ebenen bleibt die Temperatur auf 0,05 K stabil. Nach dem Abschalten der Spannung steigt die Temperatur in der Abgriffebene um etwa 0,15 K, was über den geforderten 0,1 K liegt. Da die Widerstände der Abgriffebene außerordentlich gut kompensiert sind (vgl. Kapitel 3.2.2) hat dies kaum einen Einfluss auf die Stabilität des Teilers. Bei noch höheren Spannungen ist die Temperaturänderung entsprechend größer.

Nach dem Abschalten der Spannung steigt die Temperatur in den restlichen Ebenen um 0,05 K. Damit bleibt die Tempertur innerhalb der Primärkette bei angelgten Spannungen bis 40 kV auf weniger als 0,1 K stabil.

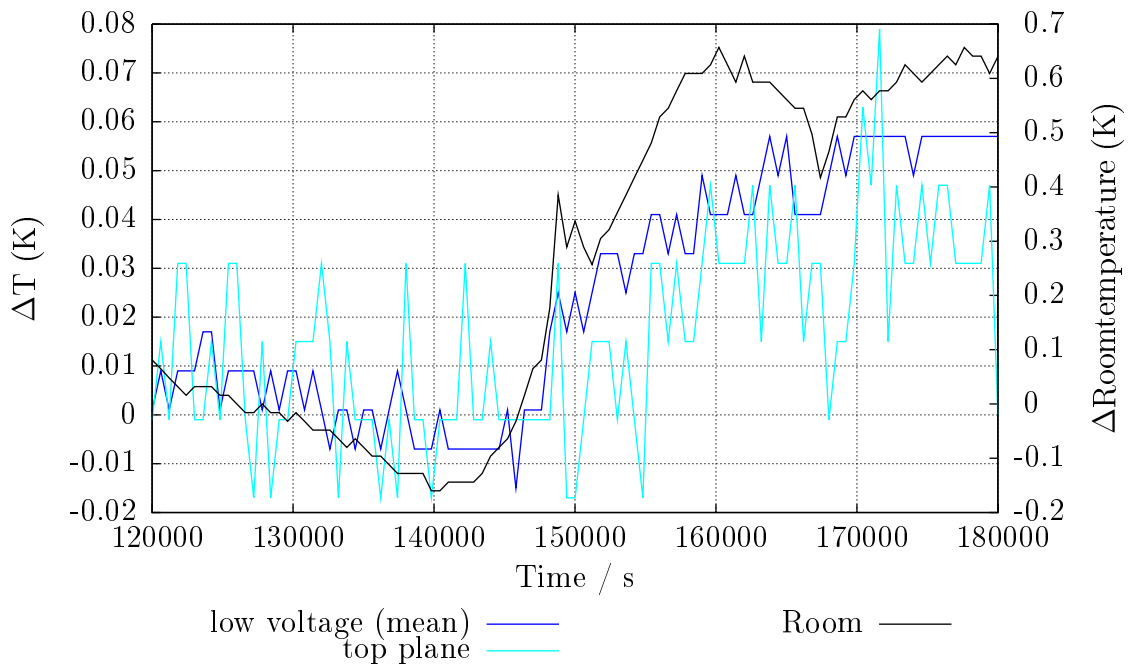


Abbildung 4.6: Abhängigkeit der obersten und der Abgriffebene von der Außentemperatur. Dargestellt ist die Änderung des Mittelwerts der beiden Sensoren in der Abgriffebene, die Änderung der Temperatur in der obersten Ebene sowie die Änderung der Raumtemperatur. Geregelt wird auf die erste Ebene wie auch im späteren Aufbau möglich. Raumtemperatur 27-28 °C.

Betrachtet man den Spannungsteiler ohne angelegte Spannung bei hohen Raumtemperaturen, so fällt eine Abhängigkeit der Abgriffebene und der obersten Ebene von der Außentemperatur auf. Bei einem Anstieg der Raumtemperatur um etwa 1 K steigt die mittlere Temperatur in der Abgriffebene um etwa 0,06 K und die Temperatur der obersten Ebene um etwa 0,03 K (Abb. 4.6). Derartiges Verhalten tritt in dem Maße nur auf, wenn die Raumtemperatur über 26 °C liegt. Bei einer Raumtemperatur oberhalb von 29 °C arbeitet die Temperatursteuerung nicht mehr zuverlässig. Unterschiedliche Messungen haben eine Regelabweichung von bis zu +0.3 K ergeben, was durch eine unzureichende Kühlung des Peltierelements bei hoher Raumtemperatur zu erklären ist.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Teiler in der Lage ist Schwankungen in der Raumtemperatur in einem gewissen Umfang zu tolerieren, es aber sinnvoller ist, ihn in einem Raum zu betreiben dessen Temperatur unter 26 °C liegt. Auch die PTB empfiehlt, dass die Raumtemperatur unterhalb der Arbeitstemperatur des Spannungsteilers (25 °C) liegt. Dadurch muss die Temperatursteuerung in erster Linie heizen, was ein Peltierelement wesentlich effizienter kann als kühlen.

Auch eine Temperaturstabilisierung des Messraums auf etwa ± 1 K ist bei Messungen mit hoher Präzision sehr zu empfehlen.

All diese Bedingungen sind in der KATRIN-Halle ($T=23\pm 1$ °C) erfüllt, was eine hohe Zuverlässigkeit und hohe Präzision der Messungen unterstützt.

4.5 Zusammenfassung der thermischen Tests

Die hier gezeigten Untersuchungen mit einem sehr realistischen thermischen Modell zeigen:

1. Dass viele Temperatursensoren Aufschluss über etwaige Unzulänglichkeiten geben können.
2. Weiter Optimierungen des Systems nötig sein können.

Messungen mit der ursprünglichen Version des Tunnelrohrs zeigten eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Hauptebenen wie sie durch die vorhergegangenen Simulationen vorausgesagt wurden [Hoc08]. Die Temperatur in der Abgriffebene sank jedoch im Betrieb mit hohen Lasten über 0,5 K ab.

Die neue Version des Tunnelrohrs brachte eine deutliche Verbesserung dieses Verhaltens mit sich. Durch die reduzierte Austrittsfläche in der Abgriffebene sinkt die Temperatur bei gleicher Last nur noch um 0,15 K. Die restlichen Ebenen sind dabei auf 0,05 K stabil.

Für den ersten KATRIN-Spannungsteiler wurden weder Simulationen noch Testmessungen an einem thermischen Modell durchgeführt. Dies kann eine Erklärung für eine sichtbare, kleine Nichtlinearität im Verhalten des Spannungsteilers sein. Aus diesem Grund stellen die Messungen am thermischen Modell des zweiten KATRIN-Spannungsteilers eine deutliche Optimierung der Präzision des Spannungsteilers und somit der Hochspannungsüberwachung des KATRIN-Experiments dar.

Messungen an der PTB zeigten, dass durch die erhöhte Anzahl der Widerstände und die Optimierungen der Temperatursteuerung, die Spannungsabhängigkeit der Maßstabsfaktoren, von 0,03 ppm/kV beim ersten Spannungsteiler, auf 0,02 ppm/kV reduziert werden konnte. Die Reduktion der Spannungsabhängigkeit (um $\frac{1}{3}$) ist kleiner ausgefallen als die stark verbesserte Temperatursteuerung und die erhöhte Anzahl der sehr gut kompensierten Widerstände vermuten ließen. Eine mögliche Ursache hierfür kann der unbekannte Einfluss des Kontrollteilers darstellen. Da dieser durch seinen Gesamtwiderstand von etwa 180 M Ω eine leicht höhere thermische Last in den Spannungsteiler einbringt als die Primärkette mit etwa 145 M Ω . Des weiteren ist die thermische Last des Kontrollteilers auf einen kleinen Raum begrenzt, da dieser aus einem senkrecht verbauten Widerstand pro Ebene besteht.

Eine weitere Möglichkeit der Optimierung wäre an dieser Stelle die Widerstände des Kontrollteilers aufzuteilen, so dass in jeder Ebene vier Widerstände, um je 90° versetzt, verbaut sind und somit die thermische Last besser verteilt ist. Durch die gleichzeitige Erhöhung des Gesamtwiderstands des Kontrollteiler wird die thermische Last zusätzlich auf ein Viertel reduziert. Alternativ könnte der Widerstandswert zum Beispiel um den Faktor 10 erhöht und damit die thermische Last auf ein Zehntel reduziert werden. Der Idealfall würde eine Kombination aus beiden Möglichkeiten darstellen. Für den fertig montierten Spannungsteiler würde dies jedoch eine völlige Demontage bedeuten, um die Kupferelektroden mit neuen Bohrungen für die Widerstandshalter zu versehen. Die technisch einfacher zu realisieren Lösung wäre die Erhöhung der Widerstandswerte. Dies könnte nachträglich geschehen ohne den Spannungsteiler zu demontieren. Sollte eine kommende Wartung es nötig machen den Kessel des Spannungsteiler abzuheben, wäre dies eine Möglichkeit, die Spannungsabhängigkeit des Spannungsteilers zu verbessern.

Eine Erhöhung der Widerstandswerte im Kontrollteiler würde die Grenzfrequenz des Tastkopfes noch weiter verringern und in den Bereich von 22 Hz bringen. Dadurch ist die Untersuchung von Frequenzen um 50 Hz noch genauer möglich. Der Maßstabsfaktor des Kontrollteiler im Gleichspannungsfall bleibt unverändert, da alle Widerstände gleichermaßen erhöht werden.

Damit zeigt sich, dass auch am zweiten Spannungsteiler neue Erkenntnisse und Möglichkeiten der Optimierung gewonnen wurden.

KAPITEL 5

AUFBAU UND INBETRIEBNAHME DES SPANNUNGSTEILERS

In diesem Kapitel soll der endgültige Aufbau des zweiten KATRIN-Spannungsteilers sowie erste Testmessungen dargestellt werden. Da der prinzipielle Aufbau des Spannungsteilers schon im Kapitel 2.2 beschrieben wird, folgt an dieser Stelle eine Beschreibung von besonderen Schwierigkeiten und deren Lösungen sowie des Umbaus auf den 820 mm Kessel. Die Auflistung erfolgt in chronologischer Reihenfolge.

Die Bauteilzeichnungen aller, im endgültigen Aufbau, verwendeten Bauteile sind im Anhang B abgedruckt.

5.1 Aufbau des Spannungsteilers

Der Spannungsteiler wurde im Hochspannungslabor des Instituts für Kernphysik montiert. Bei allen Arbeiten wurde auf die im Institut für Kernphysik gewonnene Erfahrung mit der Reinigung von Bauteilen für das Ultrahochvakuum (UHV) zurückgegriffen. Alle Bauteile wurden zuvor gründlich gereinigt, zum Beispiel die Widerstandshalterungen im Ultraschallbad mit einer alkalischen Reinigungslösung. Bei der Handhabung der einzelnen Komponenten, sowie beim Aufbau des Spannungsteilers, wurden Handschuhe getragen damit kein Hautfett auf die Bauteile gelangt. Des Weiteren wurde der Raum sowie die Tische gründlich gereinigt und alle Flächen, die mit den Bauteilen in Berührung kamen, mit UHV-tauglicher Aluminiumfolie ausgelegt.

Durch den Aufbau für die thermischen Tests wurden alle Komponenten schon einmal montiert und viele konnten vormontiert bleiben, was den endgültigen Aufbau erleichterte. Zuvor wurde die bestmögliche Zusammenstellung von Widerstandspaaren und Tripeln bestimmt und deren Platz im Spannungsteiler festgelegt. Eine Auflistung der Paare und Tripel und deren Platzierung im Spannungsteiler befindet sich im Anhang A.

5.1.1 Hochspannungszuführung

Die Hochspannungszuführung wurde, anders als beim ersten KATRIN-Spannungsteiler durch eine Spiralfeder mit einer Halbkugel am unteren Ende realisiert. Diese Feder ist in einem PTFE-Ring eingeklemmt welcher an der Hochspannungsbuchse befestigt ist (Abb. 5.1.1). Der elektrische Kontakt zur Halbkugel wird durch ein, mit der Buchse und der Halbkugel verschraubtes, Kupfergeflecht hergestellt. Auf der obersten Elektrode des Spannungsteilers sitzt das passende Gegenstück zur Aufnahme der Halbkugel.

Die Feder besteht, wie auch die Halbkugel und das Gegenstück, aus vergoldetem Edelstahl. Die Vergoldung sorgt für eine Reduzierung von Thermospannungen und verhindert Oxidation an den Kontaktteilen. Die Thermospannung (U_{therm}) ist von der Temperaturdifferenz der Kontaktstellen und den verwendeten Metallen abhängig. In Tabelle 5.1 sind Thermospannungen (bezogen auf Kupfer) für einige Metalle bei einer Temperaturdifferenz von 100 K gezeigt.

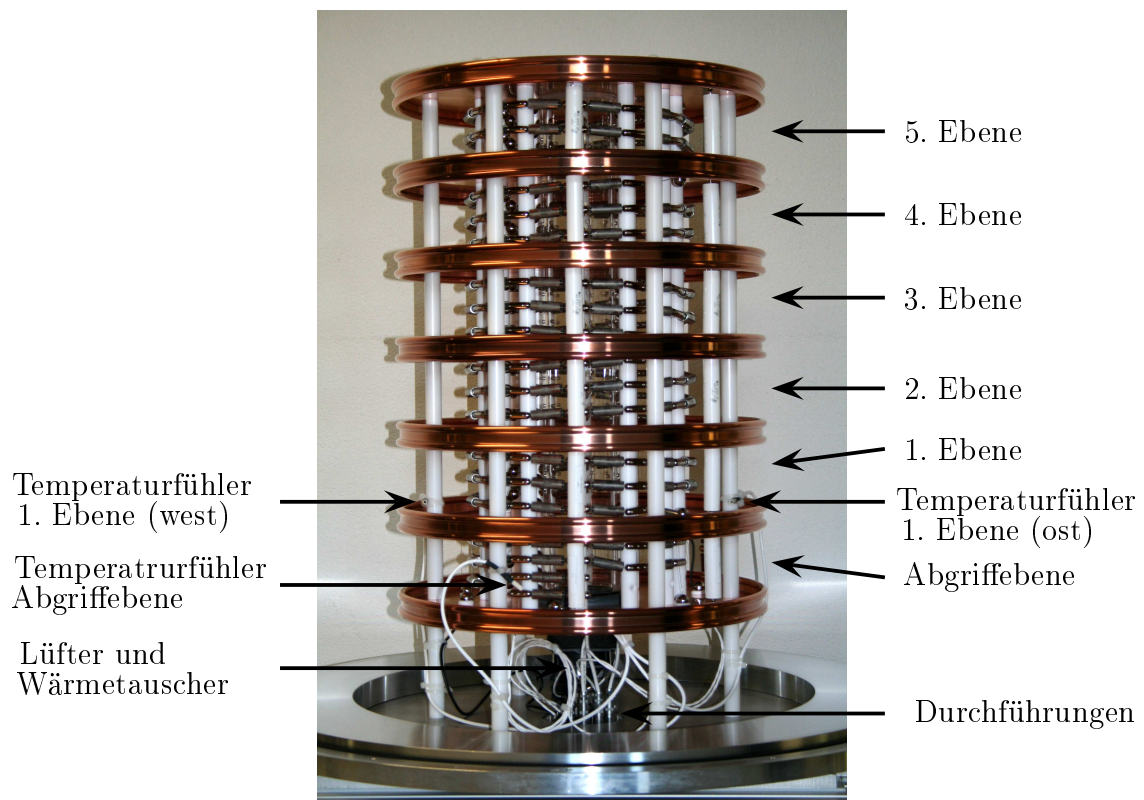


Abbildung 5.1: Spannungsteiler ohne Gehäuse. Gezeigt ist der Spannungsteiler ohne den Edelstahlkessel. Der Mittelwert der Temperaturfühler in der ersten Ebene dient dem PID-Regler als Ist-Wert für die Regelung. Zur Kontrolle befinden sich ein weiterer Temperatursensor in der Abgriffebene und einer bei den Durchführungen.



Abbildung 5.2: Hochspannungszuführung. Abgebildet ist die Spiralfeder mit der montierten Halbkugel und dem innenliegenden Kupfergeflecht. Die Hochspannungszuführung ist fertig an der Hochspannungsbuchse (nicht vollständig sichtbar) montiert.

Ein großer Vorteil dieser Hochspannungszuführung gegenüber der Bronzefeder im ersten Spannungsteiler ist, dass mechanische Bewegungen durch die Spiralfeder besser ausgeglichen werden, da diese viel elastischer und somit ist ein besserer Kontakt gewährleistet ist.

Während einer Wartung des ersten Spannungsteilers zeigte sich, dass die verwendete Bronzefeder nicht mehr elastisch genug war um einen sicheren Kontakt herzustellen. Daher wurde auch die Hochspannungszuführung des ersten Teiler auf dieses System umgerüstet [Ros10].

	Fe	Cu	Ag	Au	Al
U_{therm} in mV	+1,08	0,00	-0,02	-0,05	-0,39

Tabelle 5.1: Thermospannung verschiedener Metalle. Gezeigt sind die Thermospannungen verschiedener Metalle bezogen auf 0 °C und Kupfer als zweites Metall, bei einer Temperaturdifferenz von 100 K [Sto94].

5.1.2 Konfiguration der Abgriffwiderstände des Steuerteilers

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, war es nötig, zwei verschiedene Abgriffwiderstände für den Steuerteiler zu realisieren. Dies wird durch die in Abbildung 5.3 gezeigte Konfiguration erreicht. Wird der Kurzschlussstecker gesteckt, so wird der mittlere Verbinder geerdet und der Abgriffwiderstand des Steuerteilers beträgt 45 kΩ, anderenfalls 545 kΩ. Um dies zu ermöglichen, wurden Verbinder aus Messing geplant und in der Feinmechanischen Werkstatt hergestellt. Diese Verbinder besitzen drei Durchgangsbohrungen zu denen jeweils orthogonal eine 2,5 mm Gewindebohrung angebracht ist (siehe Abb. 5.3).

So ist es möglich, die vier Widerstände aufzunehmen, den elektrischen Kontakt zwischen den Elektroden herzustellen und die Kabel für den Abgriff (weiß) und den Erdungspunkt (schwarz) anzuschließen.



Abbildung 5.3: Konfiguration der Abgriffwiderstände des Steuerteilers. Gezeigt sind die Abgriffwiderstände des Kontrollteilers mit dem durch den externen Schalter erdbaren Punkt zwischen den zwei parallelen Paaren. Das weiße Kabel ermöglicht den Abgriff sowohl für den Steuerteiler als auch für den Tastkopf. Das schwarze Kabel kann über den Kurzschlussstecker mit der Erde kurzgeschlossen werden.

5.1.3 Erdungsblock

Das Bezugspotential für die Messabgriffe des zweiten Spannungsteilers ist das Potential des Abgriffflansches. Von diesem Punkt aus wird die gesamte unterste Elektrode geerdet. Dies geschieht durch ein Kabel, mit einer Querschnittsfläche von $2,5\text{ mm}^2$, welches in den in Abbildung 5.4 gezeigten Kupferanschlussblock geschraubt ist.

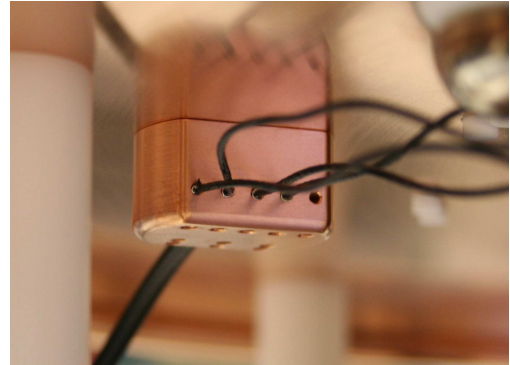


Abbildung 5.4: Zentraler Erdungsblock der Präzisionsabgriffe. Der Erdungsblock erfüllt zwei Aufgaben, zum einen die Erdung der untersten Elektrode und zum anderen als Sternpunkt für das Bezugspotential der Präzisionsabgriffe.

Dieser Block liegt flächig an der Elektrode an und ist fest mit ihr verschraubt. Von hier aus wird das Bezugspotential an die Durchführungen der einzelnen Abgriffe weitergegeben. Das Bezugspotential für den Steuerteiler wird an anderer Stellen von der untersten Elektrode zur entsprechenden Durchführung geführt.

Bei dem zweiten Spannungsteiler ist zu beachten, dass dieser elektrisch von seinem Transportrahmen und der Slow Control isoliert ist. Dies ermöglicht es den Spannungsteiler in einem gewissen Rahmen potentialfrei zu betreiben. Das heißt, dass sich die Erde der zu vermessenden Hochspannung und die Schutz Erde der Slow Control um einige 10 V unterscheiden dürfen. Es ist daher zwingend erforderlich, dass der Spannungsteiler entweder über den Schirm des Hochspannungskabels oder über eine der Gewindebohrungen im Abgriffflansch, mit einem zusätzlichem Kabel, ausreichend geerdet ist. Anderenfalls könnte an den Abgriffen die volle Hochspannung anliegen.

5.1.4 Durchführungen für die Präzisionsabgriffe

Für die Durchführung der Präzisionsabgriffe durch den Flansch sollten vakuumtaugliche Steckerdurchführungen der Firma LEMO zum Einsatz kommen. Diese zweipoligen Durchführungen besitzen auf beiden Seiten eine Buchse, wodurch eine Demontage des Flansches erleichtert werden sollte.

Eine solche Durchführung sollte auch für den nachgerüsteten 100:1 Abgriff des ersten Spannungsteilers zum Einsatz kommen. Bei Testmessungen an diesem Abgriff zeigte sich jedoch, dass die Ausgangsspannung einen falschen Wert und Schwankungen im Bereich 10^{-4} aufwies. Eine Überprüfung zeigte, dass die Kontakte der Durchführungen durch den Verguss mit vakuumtauglichem Harz einen Übergangswiderstand zwischen $0,1\text{ G}\Omega$ und $10\text{ G}\Omega$ besitzen [Ros10].

Ein Übergangswiderstand von $10\text{ G}\Omega$ an einer Abgriffbuchse würde den Eingangswiderstand des genutzten Multimeters auf unter $10\text{ G}\Omega$ verringern, da diese parallel geschaltet sind. Dadurch würde der Abgriff stärker belastet, was zu einer Änderung des Maßstabsfaktors führt. Bei konstantem Übergangswiderstand kann dieser Einfluss mit kalibriert werden. Eine Konstanz des Übergangswiderstandes kann aber nicht gewährleistet werden.



Abbildung 5.5: Durchführungen der Präzisionsabgriffe. Gezeigt sind die zweipoligen Durchführungen der Präzisionsabgriffe. Oben die vakuumtaugliche Variante als Durchführung (beidseitige Aufnahme für Stecker). Unten die im Spannungsteiler verwendeten Gerätebuchsen (eine Steckeraufnahme+Lötkontakte)

Weitere Untersuchungen zeigten, dass die nicht vakuumtauglichen, zweipoligen Gerätebuchsen von LEMO zusammen mit einer O-Ringdichtung eine ausreichende Dichtigkeit aufweisen, damit das Stickstoffgas nicht übermäßig schnell aus dem System entweicht. Der Übergangswiderstand zwischen den Kontakten war selbst bei einer Prüfspannung von 2 kV größer als $1\text{ T}\Omega$.

Da alle Untersuchungen positiv ausgefallen sind, wurden für die Präzisionsabgriffe des Spannungsteilers die nicht vakuumtauglichen Gerätebuchsen verwendet.

5.1.5 Endgültiges Tunnelrohr

Während der Kalibrierung des ersten Spannungsteilers an der PTB nutzte M. Zboril den zweiten Hochspannungsteiler am ehemaligen Mainzer Neutrinoexperiment, um die Stabilität von implantierten Kr-Quellen zu untersuchen [Zbo10]. Bei diesen Messungen war der Spannungsteiler in dem 600 mm Kessel montiert.

Durch den Transport zwischen Mainz und Münster hat sich die Silikondichtung, zwischen Lüfterhalterung und Tunnelrohr verschoben. Dies fiel bei der Montage des neuen Kessels am zweiten Spannungsteiler (Kap. 5.1.7) auf und aus diesem Grund wurde das Tunnelrohr erneut überarbeitet.

Im unteren Teil wurde ein Ring aus PMMA eingeklebt, welche einen O-Ring aufnimmt (Abb. 5.6 links). Dadurch wird das Tunnelrohr nach unten abgedichtet. Durch den innenliegenden Ring kann der O-Ring nicht verrutschen.

Auf Grund der Demontage des Tunnelrohrs, wurde beschlossen, dass auch die in Kapitel 4.3 beschriebene Silikonfolie am oberen Ende des Tunnelrohrs durch einen fest verklebten Deckel aus PMMA ersetzt wird. Dieser Deckel (Abb. 5.6 rechts) schließt das Tunnelrohr nach oben

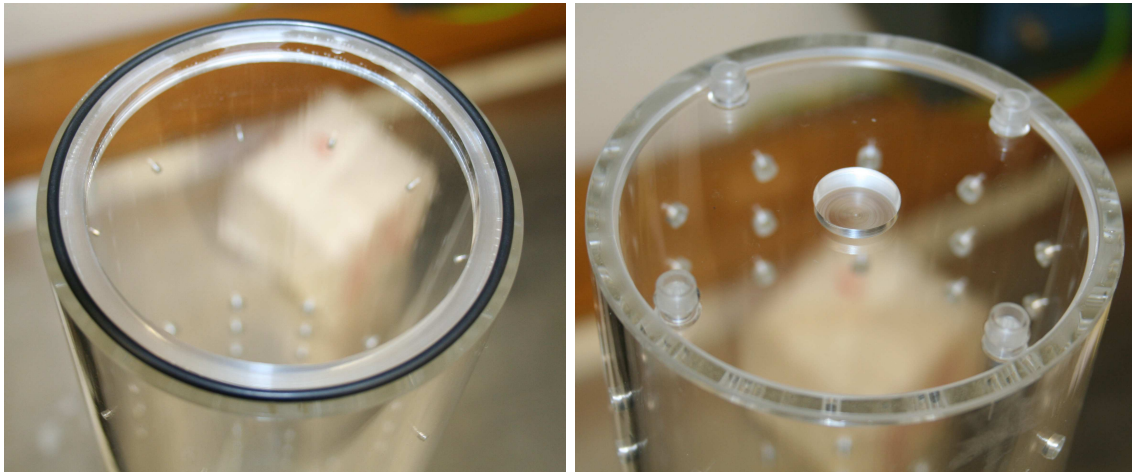


Abbildung 5.6: Modifikationen am Tunnelrohr. Im linken Bild ist die O-Ringdichtung am unteren Ende des Tunnelrohrs gezeigt. Das rechte Bild zeigt den, mit dem Tunnelrohr verklebten, PMMA Deckel mit die Röhren für die Gaszirkulation oberhalb der Elektrode.

ab und weist Röhren mit einem Innendurchmesser von 5 mm auf, um die Gaszirkulation oberhalb des Spannungsteilers aufrecht zu halten.

5.1.6 Hochspannungskontakt der Primärkette

Für die Demontage des Tunnelrohrs, nach dem Transport von Münster nach Mainz und zurück, musste die oberste Elektrode von Spannungsteiler abgenommen und damit der Anschluss der Primärkette gelöst werden. Dabei fiel auf, dass die Befestigung auffallend locker war. Die Verbindung besteht aus einem kurzen Gewindebolzen der oben und unten Querbohrungen zur Aufnahme eines Anschlussdrahtes aufweist. Senkrecht zu diesen Bohrungen befinden sich 2,5 mm Gewindebohrungen um den Draht mittels Madenschrauben festzuschrauben. Der Gewindebolzen selbst wird durch zwei Scheiben mit entsprechendem Gewinde in die Elektrode eingeschraubt (s. Abb. 5.7). Diese Verbindung zur Elektrode hatte sich gelöst.

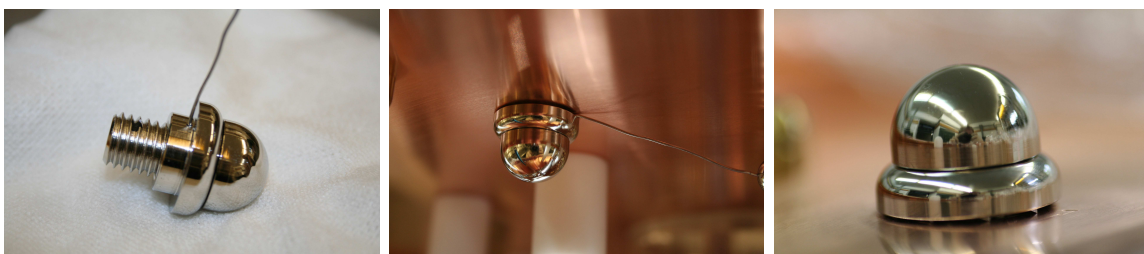


Abbildung 5.7: Überarbeiteter Hochspannungskontakt der Primärebene. Im linken Bild ist die neue Bohrung mit eingestecktem Draht zu sehen. Die Mitte zeigt wie der Draht gegen die Kupferelektrode gepresst wird. Im rechten Bild ist zu sehen, wie die modifizierte Scheibe den Federring überdeckt.

Um ein erneutes Lösen der Verbindung zu verhindern, wurde unter die obere Scheibe ein Federring gelegt und die Scheibe so angepasst, dass sie den Federring überdeckt (Abb. 5.7 rechts). Zusätzlich wurde eine weitere Querbohrung eingebracht, welche es ermöglicht, den Draht direkt gegen die Elektrode zu pressen (Abbildung 5.7 links und mitte). Dieses Vorgehen hat zwei Vorteile, zum einen wird ein metallischer Übergang umgangen und zum anderen wird der Draht nur bis zur Mitte des Bolzen eingesteckt und sorgt so für eine leichte Verkipfung des Bolzen und somit für mehr mechanische Spannung bei der Befestigung.

5.1.7 Kessel und Transportrahmen

Erste Tests des Spannungsteilers mit Hochspannung zeigten, dass es trotz theoretisch ausreichender Isolationsabstände und einer elektrischen Isolierung aus etwa 4 mm Polyethylen (PE) zu Überschlägen ab etwa 50 kV kam. Die Durchschlagsspannungen verschiedener Materialien sind in Tabelle 5.1.7 gezeigt. Diese Überschläge traten nicht plötzlich auf, sondern erst nach 15 bis 30 Minuten. Das ist auf die PE-Isolierung zurück zu führen, da diese einen direkten Überschlag verhinderte. Während des Betriebs mit Hochspannung wurde jedoch Ladungen auf den Kunststoff aufgesprüht, was zu einer verzögerten und starken Entladung führte.

Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Überschläge im oberen Teil des Spannungsteilers lokalisiert waren. Damit Überschläge innerhalb des Spannungsteilers ausgeschlossen werden konnten, wurde der Spannungsteiler ohne Kessel bis zur Maximalspannung an Raumluft betrieben. Bei diesen Tests wurden keine Überschläge innerhalb des Spannungsteilers beobachtet. Diese Untersuchungen bestätigten, dass alle Abstände innerhalb des eigentlichen Spannungsteilers ausreichen dimensioniert sind.

Um die Primärkette bei weiteren Untersuchungen nicht durch Überschläge zu zerstören, wurde die oberste Elektrode demontiert und auf einen Isolator platziert. Dieser Isolator besitzt dieselbe Höhe wie der Spannungsteiler, so dass der Kessel über die Elektrode gestellt werden kann und die gleichen Abstände, wie im Spannungsteiler, vorliegen. Da an der obersten Elektrode die höchste Spannungs anliegt, war es so möglich die Spannungsfestigkeit zu untersuchen ohne die Präzisionswiderstände zu beschädigen. An jeder nachfolgenden Elektrode reduziert sich die Spannung, durch den Kontrollteiler, um ein fünftel der am Spannungsteiler anliegenden Spannung.

Bei den ersten Versuchen mit dem Testaufbau zeigte sich dasselbe Verhalten wie zuvor. Zunächst wurde der Abstand zwischen Elektrode und dem Deckel des Kessels verändert indem der Kessel um etwa 25 mm erhöht wurde. Nach weiteren Überschlägen wurde die PE-Isolierung aus dem Kessel entfernt, was die Intensität der Überschläge merklich reduzierte.

Da die oben genannten Untersuchungen unter Luft mit hoher Luftfeuchtigkeit ($>50\%$) durchgeführt wurde, wurde die Elektrode wieder montiert und der Spannungsteiler, ohne die PE-Isolierung, geschlossen. Anschließend wurde mit trockenem CO_2 -Gas gespült bis die Luftfeuchtigkeit innerhalb des Spannungsteilers unterhalb von 5% lag. Stickstoff und Luft haben eine sehr vergleichbare Durchschlagfestigkeit welche, wie bei allen Gasen, von der Feuchte des

Mediums abhängt. Kohlenstoffdioxid hat eine 20% höhere Durchschlagsfestigkeit als Stickstoff (Tabelle 5.1.7), daher wurde versucht die Spannungsfestigkeit über den Gebrauch von CO_2 als Füllgas zu erreichen.

Die Verwendung von CO_2 steigert die Durchschlagsfestigkeit des Spannungsteilers auf etwa 60 kV. Des weiteren zeigte sich, dass nach einem Überschlag die Spannungsfestigkeit deutlich herabgesetzt war. Nach einem Überschlag bei etwa 65 kV erfolgte der nächste Überschlag, nach erneutem Hochfahren der Spannung, schon bei etwa 57 kV. Dies lässt sich auf eine Ioinisierung des Gases durch den Überschlag zurückführen.

Weitere Überlegungen führten zu Schwefelhexafluorid (SF_6), ein Gas mit sehr guten, isolierenden Eigenschaften. Die Durchschlagsfestigkeit von SF_6 ist fünffach höher als die von Stickstoff. Daher wird es in Hochspannungsschaltanlagen verwendet um die Dimensionen dieser Anlagen gering zu halten. Da dieses Gas aber sehr umweltschädigend ist, ist der Einsatz nicht unumstritten. Daher sollte dieses Gas nur eingesetzt werden, wenn die Möglichkeit zur Rückgewinnung besteht.

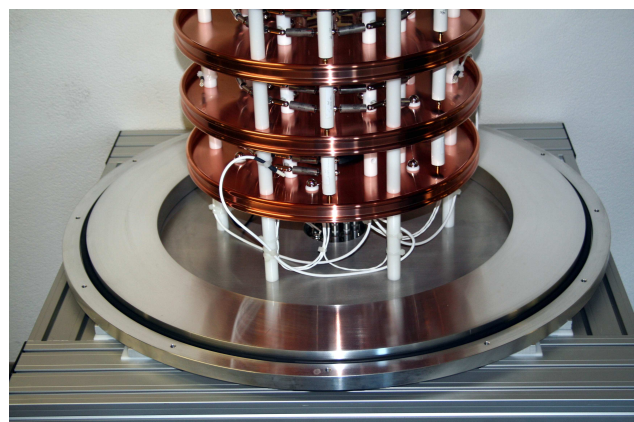
	Luft	CO_2	N_2	SF_6	Polyethylen
U_{Durch} in kV/mm	2-3	2,4	2,0	10	100

Tabelle 5.2: Durchschlagspannungen verschiedener Materialien. Aufgelistet sind die Durchschlagsspannungen (U_{Durch}) für verschiedene Gase und Polyethylen [Bog07].

Um den Spannungsteiler ohne den Einsatz spezieller Gase betreiben zu können, wurde die Fertigung eines neuen Kessels mit 820 mm Durchmesser und einer Höhe von 980 mm, in Auftrag gegeben. Auch der Flansch für die Hochspannungszuführung wurde in seinem Durchmesser von 100 mm auf 200 mm erweitert, um mehr Raum zwischen der Hochspannungsbuchse und dem geerdeten Kessel zu schaffen.

Damit der Spannungsteiler selbst nicht demontiert werden musste, wurde die Grundplatte aus Aluminium beibehalten und ein Adapterring für die Aufnahme des größeren Kessels entworfen und hergestellt (s. Abbildung 5.8). Um eine bestmögliche Dichtung des Systems zu gewährleisten wurden alle Kontaktflächen durch O-Ringe aus Nitrilkautschuk gedichtet.

Abbildung 5.8: Adapterring zur Aufnahme des größeren Kessels. Der Adapterring ermöglicht es, die alte Grundplatte auch für den größeren Kessel zu nutzen. Dadurch konnte der Spannungsteiler montiert bleiben.



Da der neue Kessel an jeder Seite um 100 mm über den alten Transportrahmen heraussagte, wäre eine Befestigung in einem Transporter oder LKW nur schwer möglich. Deshalb wurde

ein neuer Transportrahmen gebaut, welcher eine Kantenlänge von 900 mm und eine Höhe von 1775 mm aufweist. Durch die größeren Ausmaße war es möglich, Wärmequellen wie das Lastnetzteil für das Peltierelement und das 12 V Netzteil zur Spannungsversorgung des SCS weiter nach Außen zu setzen. Dadurch wird die Erwärmung und damit verbundene Thermospannungen der Durchführungen für die Präzisionsabgriffe weiter verhindert.

Abschließend wurde der Kessel des Spannungsteilers mit Armaflex, einer Wärmeisolierung aus synthetischem Vinylkautschuk, ummantelt. Der fertige Spannungsteiler ist in Abbildung 5.9 gezeigt.

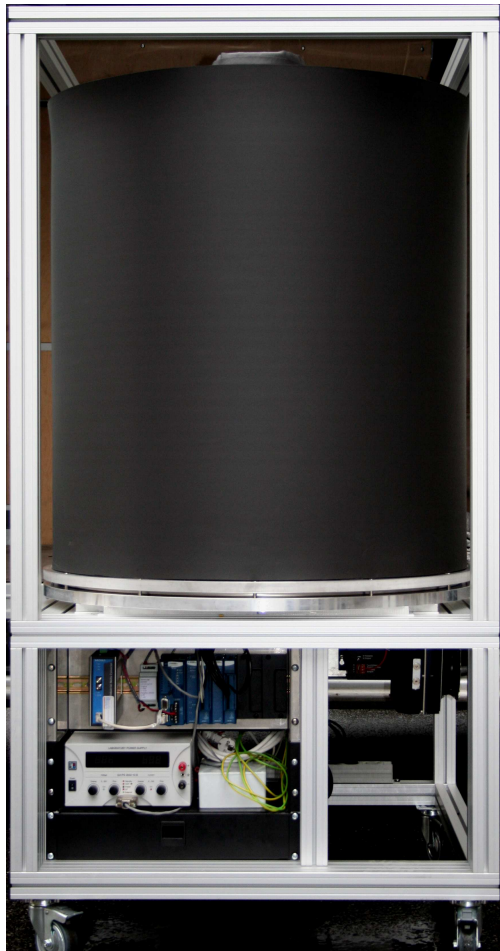


Abbildung 5.9: Der fertige Spannungsteiler. Gezeigt ist der fertige Spannungsteiler vor seinem Transport an die PTB.

5.2 Inbetriebnahme und Testmessungen

Vor der erneuten Inbetriebnahme¹ wurde zunächst mit Stickstoff gespült, bis die Luftfeuchtigkeit im Kessel unter 20% lag. Danach wurde die Hochspannung langsam hochgefahren und mit einem Handmultimeter am 3636:1 Abgriff überwacht. Die Maximalspannung bei diesem Test betrug -75 kV für etwa 15 min. Diese um 10 kV höhere Spannung diente dem Test, ob der Teiler sicher die 65 kV hält.

¹Inbetriebnahme nach der Erweiterung auf den 820mm Kessel

Nach diesem erfolgreichen Test wurde der Spannungsteiler weiter mit Stickstoff gespült und dadurch getrocknet. Um die Trocknung zu beschleunigen, wurde die interne Temperatursteuerung auf 40 °C eingestellt und an den Kessel zwei Heizbänder mit je 750 W maximaler Heizleistung befestigt. Diese wurden durch einen Regeltrafo in ihrer Leistung reguliert. Nach Erreichen der Innentemperatur von 40 °C wurde die interne Steuerung abgestellt und die Temperatur durch die Leistung der Heizbänder konstant gehalten. Nach etwa 20 Stunden blieb die Luftfeuchtigkeit im Inneren des Teilers ungefähr 1% und die Trocknung wurde beendet.

Ein weiterer Test über eine Stunde bei -75 kV und 15 min bei +75 kV verlief problemlos.

5.2.1 Langzeitmessungen

Messung bei 18kV gegen den ersten KATRIN-Spannungsteiler

Um eine erste Einschätzung der Stabilität des zweiten Spannungsteilers zu machen, wurden beide Spannungsteiler parallel an einer FuG HCP 18-35000 Spannungsquelle bei 18 kV betrieben. Diese hat laut Hersteller eine Stabilität von 2 ppm/8h und 2 ppm/K [Fug18].

Um die Stabilität der Teiler zu untersuchen, wurde die Ausgangsspannung der beiden Teiler gegeneinander aufgetragen. Dadurch kürzen sich alle Effekte durch die Spannungsquelle raus und es wird nur das Verhältnis der beiden Maßstabsfaktoren betrachtet. Da die Drift des ersten Spannungsteiler im sub-ppm-Bereich liegt, kann eine Abschätzung über die Drift des zweiten Spannungsteilers getroffen werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil dieser Messung ist, dass eventuelle Defekte am Spannungsteiler aufgedeckt werden können. Ein fehlerhafter Kontakt zum Beispiel kann eine Drift von mehreren ppm auslösen. Eine solche Drift ist bei dieser Messung schnell festzustellen. Eine eindeutige Aussage über die absoluten Driften der beiden Spannungsteiler kann erst nach wiederholter Kalibration an der PTB erfolgen.

In Abbildung 5.10 ist die relative Änderung des Verhältnisses der Maßstabsfaktoren über 66 Stunden aufgetragen, die Drift des Verhältnisses der Maßstabsfaktoren beträgt dabei 0,11 ppm/24h. Das ist mehr als die zwischen den Jahren 2005 und 2006 bestimmte Drift des ersten Spannungsteilers von 0,02 ppm/24h.

Messungen von M. Zboril am Aufbau des ehemaligen Mainzer Neutrinoexperiments zeigten im Rahmen der Messunsicherheiten eine Stabilität des zweiten Spannungsteilers von besser 3,5 ppm über 50 Tage, was einer Stabilität von 0,07 ppm/24h entspricht [Zbo10]. Diese hohen Werte liegen in der Messmethode begründet, da die Kalibrierspannung von 1 kV direkt mit einem Fluke Multimeter gemessen wurde.

Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass die Drift in einer unterschiedlichen Drift der verwendeten Multimeter (baugleich) begründet ist, was innerhalb der Toleranzen der verwendeten Fluke 8508A Multimeter liegt [Flu85].

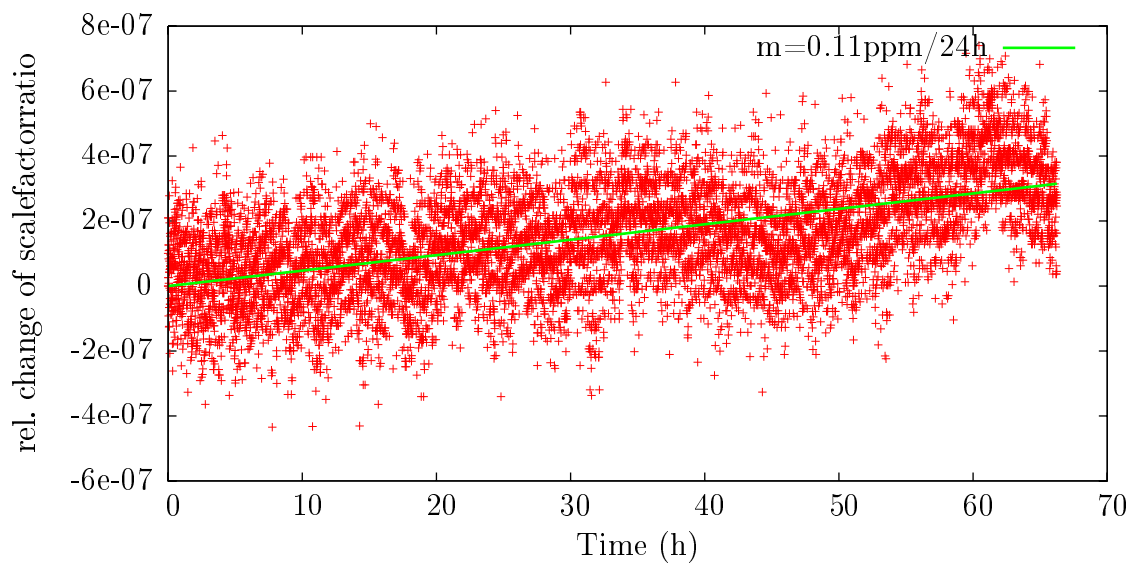


Abbildung 5.10: Relative Änderung des Verhältnisses der Maßstabsfaktoren. Bei einer Langzeitmessung über 66 h zeigte sich eine Drift des Verhältnisses der Maßstabsfaktoren von 0,11 ppm/24h.

Messung bei 65kV

Um den Betrieb bei hohen Spannungen zu untersuchen, wurde der Spannungsteiler für 17 h bei -65 kV, an einer 100 kV-Spannungsquelle vom Typ HCN 100000-1 der Firma Heinzinger, betrieben. Bei dieser Messung können zwei Eigenschaften des Teilers untersucht werden. Zum einen kann überprüft werden, ob der Spannungsteiler seine Maximalspannung auch wirklich über längere Zeit ohne Probleme halten kann und zum anderen kann die Temperatursteuerung überprüft werden. Wie schon im Kapitel 4 erwähnt wurde eine schlechtere Temperatursteuerung bei Spannungen über 50 kV beobachtet. Durch diese Messung kann diese Einschätzung genauer quantifiziert werden.

Der Spannungsteiler hat während der gesamten Messung die geforderte Innentemperatur von $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ gehalten. Nach dem Anlegen der -65 kV ist eine leichte Temperaturerhöhung von etwa 0,08 K zu erkennen (Abbildung 5.11). Die Temperatursteuerung benötigt etwa 10 min um diese Erhöhung auszugleichen. Nach dem Abschalten der Spannung fällt die Temperatur kurzzeitig um den selben Wert unter die eingestellte Temperatur.

Dies zeigt, dass die Temperatursteuerung auch bei hohen Spannungen einwandfrei arbeitet. Das bessere Verhalten gegenüber den thermischen Test kann durch die niedrigere Raumtemperatur begründet werden. Während der Messungen lag die Raumtemperatur bei etwa 21°C , dadurch musste die Steuerung nur sehr wenig kühlen. Auch hier bestätigt es sich, dass es von Vorteil ist, wenn die Raumtemperatur wenige Grad unterhalb der Arbeitstemperatur des Spannungsteilers liegt. Einen weiteren Vorteil kann die bessere Positionierung des Peltier-Elementes im neuen Transportrahmen gebracht haben. Hier ist bauartbedingt eine bessere Luftzirkulation möglich.

Durch diesen Test konnte auch die verwendete Spannungsquelle näher untersucht werden.

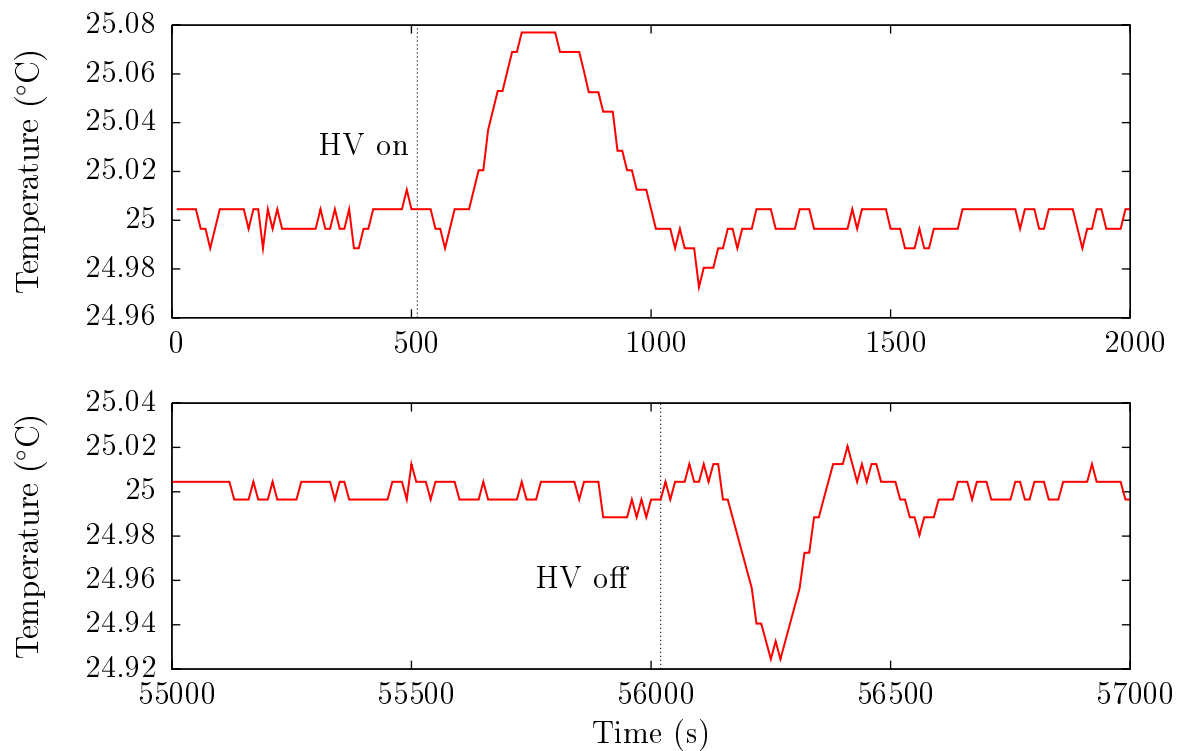


Abbildung 5.11: Innentemperatur des Spannungsteilers bei 65 kV. Nach dem Anlegen von 65 kV zeigt sich eine kurzzeitige Erwärmung des Spannungsteilers von 0,08 K (oben) und nach dem Abschalten (unten). Beide Abweichungen wurden durch die Temperatursteuerung nach 10min wieder ausgeglichen.

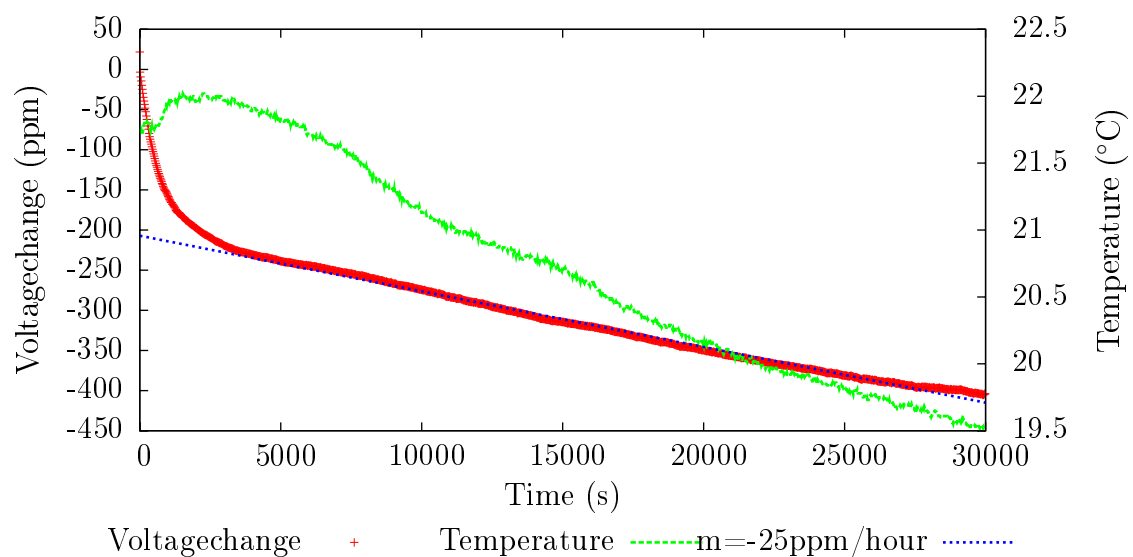


Abbildung 5.12: Stabilität des Heinzinger HCN 100000-1 Netzteils bei 65 kV. Nach einer Einlaufphase ändert sich die Ausgangsspannung des Netzteils linear mit 25 ppm/h.

In Abbildung 5.12 ist die Änderung der Ausgangsspannung mit der Zeit dargestellt. Da sich die Temperatur an der Spannungsquelle über die Messung um etwa 2,5 K geändert hat, kann nur eine Aussage über die Gesamtdrift des Netzteils über die gesamte Messdauer getroffen werden. Einzelaussagen z.B. über das Temperaturverhalten sind so nicht möglich.

Es zeigt sich, dass das Netzteil, nach einer einstündigen Aufwärmphase, seine Ausgangsspannung um 25 ppm/h ändert.

5.2.2 Selbstkalibrierung bei Niederspannung

Um die Stabilität und Reproduzierbarkeit des zweiten Spannungsteilers abschätzen zu können, wurde die von der PTB vorgeschlagene Methode zur Selbstkalibrierung, vor der Kalibrierungsphase an der PTB, in Münster durchgeführt. Eine Beschreibung der Methode findet sich im Kapitel 6.4. Bei dieser Methode wird der Maßstabsfaktor des 100:1 Abgriff bei 1 kV absolut bestimmt und danach die Unterteilerverhältnisse, indem 350 V an den 100:1 Abgriff angelegt werden.

Bei dieser Messung wurde der erste Spannungsteiler parallel kalibriert was den Vorteil hat, dass die Werte der PTB für diesen Teiler schon bekannt sind. Dadurch hat man eine sehr gute Kontrollmöglichkeit für die angewandte Messmethode. Die Kalibrierung wurde am 19.10.2009 und am 22.10.2009 in unterschiedlichen Labors durchgeführt. Die Ergebnisse des zweiten Spannungsteilers zeigt Tabelle 5.2.2. Berechnet man die Unsicherheit der Messung nach der in Kapitel 6.1 gezeigten Methode, bei einer Unsicherheit des Referenzteilers von 0,5 ppm, so ergibt sich für die Messungen eine Unsicherheit von etwa 0,6 ppm.

Maßstab	Polarität	19.10.2009	22.10.2009	Abweichung
M100	positiv	100,514849	100,514879	$3,0 \cdot 10^{-07}$
	negativ	100,514918	100,514924	$0,6 \cdot 10^{-07}$
	Mittel	100,514884	100,514901	$1,8 \cdot 10^{-07}$
M20	positiv	18,087995	18,088001	$3,5 \cdot 10^{-07}$
	negativ	18,088005	18,088003	$-0,8 \cdot 10^{-07}$
	Mittel	18,088000	18,088002	$1,4 \cdot 10^{-07}$
M40	positiv	36,176532	36,176543	$3,2 \cdot 10^{-07}$
	negativ	36,176549	36,176542	$-2,0 \cdot 10^{-07}$
	Mittel	36,176540	36,176543	$0,6 \cdot 10^{-07}$

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung des zweiten Spannungsteilers. Dargestellt sind die Ergebnisse der Niederspannungskalibrierung der beiden Messtage. Es wurde jeweils mit positiver und negativer Polarität gemessen und anschließend der Mittelwert aus beiden Messungen gebildet.

Die am 19.10.2009 gewonnen Daten konnten trotz Laborwechsel, welcher einen kompletten Abbau des Messtandes nötig machte, im sub-ppm-Bereich reproduziert werden. Sollten diese Ergebnisse auch bei den Messungen an der PTB im November 2009 bestätigt werden können, so bestätigt sich die gleichbleibend gute Einsatzmöglichkeit an unterschiedlichen Orten und eine Reproduzierbarkeit im sub-ppm Bereich.

5.2.3 Testmessungen am kapazitiven Tastkopf

Der kapazitive Tastkopf wurde mit einem Tektronix AFG 3102 Funktionsgenerator und einem Tektronix MSO 4054 Oszilloskop ausgemessen. Dabei wurden Sinusspannungen verschiedener Frequenz auf den Hochspannungseingang des zweiten Spannungsteilers gegeben und das Ausgangssignal am Abgriff des Kontrollteilers bei gezogenem Kurzschlussstecker gemessen.

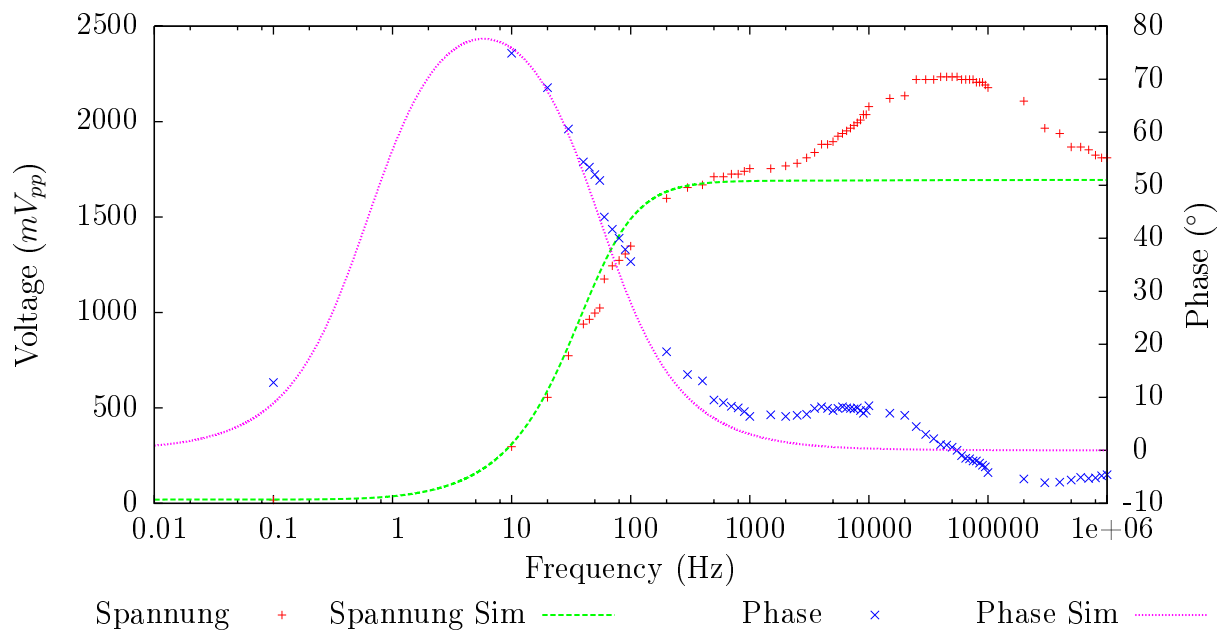


Abbildung 5.13: Überprüfung der Simulation des Tastkopfes. Gezeigt sind die Messpunkte zusammen mit den Daten der Simulation (Linien) bei einer Eingangsspannung von 10 V_{pp} und unterschiedlicher Frequenz.

Die Ergebnisse der Messung im Vergleich zur Simulation aus Kapitel 2.1.3 bei sinusförmiger Eingangsspannung von 10 V_{pp} sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Messungen bestätigen die Simulation des Frequenzgangs von Phase und Ausgangsspannung bis zu einer Frequenz von 1 kHz. Die aus dem Messwerten ermittelte Grenzfrequenz beträgt 60 Hz und liegt somit um 6 Hz höher als in der Simulation.

Oberhalb von 1 kHz zeigt die Messung eine höhere Ausgangsspannung als durch die Simulation vorausgesagt. Da im Bereich über 1 kHz die Kondensatoren für die Wechselspannung als Spannungsteiler mit einem Verhältnis von 1:6 arbeiten, sollte die Ausgangsspannung einen Wert von 1,6 V_{pp} nicht überschreiten. Bei der Messungen wurden Spannungen bis 2,2 V_{pp} gemessen (Abb. 5.13).

Diese Überhöhung der Ausgangsspannung bedarf einer näheren Untersuchung nach der Kalibrierung des Spannungsteilers an der PTB.

5.2.4 Zusammenfassung des Aufbaus und der Inbetriebnahme

Für den Aufbau des zweiten KATRIN-Spannungsteiler wurden einige Verbesserungen gegenüber dem ursprünglichen Design sowie gegenüber dem ersten Teiler vorgenommen. So wurde eine neue Hochspannungszuführung realisiert und besser geeignete Durchführungen für die Präzisionsabgriffe eingesetzt.

Durch einen Testbetrieb in Mainz und den damit verbundenen Transport, wurden wichtige Mängel aufgedeckt und beseitigt wie z.B. die Abdichtung des Tunnelrohrs und die Überarbeitung des Hochspannungskontaktes der Primärkette.

Die Hochspannungstests mit dem ursprünglichen Kessel zeigten, dass die theoretischen Isolationsabstände nicht ausreichen um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Dies zeigt, dass bei der Konstruktion eines solchen Aufbaus auf eine größere Reserve bei den Isolationsabständen geachtet werden muss.

Nach dem Umbau auf den neuen Kessel konnte der Hochspannungsteiler problemlos mit Spannungen bis 75 kV betrieben werden. Langzeitmessungen bei 65 kV zeigten dass die Temperatursteuerung auch bei der Maximalspannung ohne starke Abweichungen arbeitet. Daher kann die geforderte Temperaturstabilität von $\pm 0,1$ K über den gesamten Spannungsbereich eingehalten werden.

Die Überprüfung der Temperatursteuerung bei 65 kV zeigte, dass bei niedrigen Raumtemperaturen ($T < 25^\circ\text{C}$) die Stabilitätsgrenze von $\pm 0,1$ K eingehalten wurde. Vorausgegangene Test am thermischen Modell zeigten, dass die Temperatursteuerung bei hohen Raumtemperaturen ($T > 27^\circ\text{C}$) nicht einwandfrei arbeitet. Aus diesen Gründen wurde im Hochspannungslabor des Instituts für Kernphysik eine Klimaanlage installiert. Durch eine konstante Temperatur von $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$ soll eine Verbesserung der Messmethoden erreicht werden.

Erste Testmessungen zeigten, dass der Spannungsteiler einwandfrei funktioniert und Niederspannungskalibrierungen zeigten eine sehr gute Reproduzierbarkeit des Spannungsteilers.

Messungen am kapazitiven Tastkopf, vor der Kalibrierung an der PTB, beweisen die Funktion des Tastkopfes, zeigten aber auch eine deutliche Abweichung zur Simulation ab 1 kHz. Die Abweichung muss durch weitere Untersuchungen nach der Kalibrierung weiter untersucht werden.

KAPITEL 6

SELBSTKALIBRIERUNG DER KATRIN SPANNUNGSTEILER

Es existieren verschiedene Möglichkeiten einen Spannungsteiler zu kalibrieren, zum einen kann eine sehr genaue Spannung an einen Spannungsteiler angelegt werden und die am Abgriff anliegende Spannung gemessen werden. Aus Eingangs- und Ausgangsspannung ergibt sich dann der Maßstabsfaktor M . Die Unsicherheiten dieser Methode sind die Unsicherheiten der Spannungsquelle und des Voltmeters. Die direkte Methode kann nur angewandt werden, wenn eine ausreichend genaue Spannungsquelle bzw. ein ausreichend genauer Referenzteiler vorhanden ist. Für die Kalibrierung der KATRIN Spannungsteiler an der PTB steht der MT100 als Referenzteiler zur Verfügung, um Spannungen bis 100 kV auf ein Präzisionsvoltmeter abzubilden.

Um zum Beispiel den MT100 der PTB zu kalibrieren, muss jedoch eine andere Methode angewandt werden, da kein weiterer Referenzteiler mit dieser Präzision zur Verfügung steht. Diese zweite Methode zur Kalibrierung von Spannungsteilern benötigt einen Spannungsteiler oder eine sehr präzise Spannungsquelle bis 1 kV dessen Eigenschaften ausreichend genau bekannt sind und einen Hochspannungsteiler mit gleicher oder höherer Spannungsfestigkeit. Der Hochspannungsteiler muss eine ausreichende Stabilität der Maßstabsfaktoren über die Messdauer aufweisen.

Eine weitere Methode ist die Kalibrierung mit Niederspannungen bis 1 kV wobei der kleinste Maßstabsfaktor direkt bestimmt wird. Danach wird die Spannung an den Abgriff angelegt, welche bei der eigentlichen Kalibrierspannung z.B. 35 kV an diesem Abgriff gemessen wird.

Die drei genannten Methoden um einen Spannungsteiler zu kalibrieren, werden im Folgenden genauer beschrieben und die nötigen Aufbauten in Form von Blockschaltbildern dargestellt. Vorab sollen grundlegende Anforderungen an die Geräte und Messmethoden dargestellt werden. Abschließend werden die einzelnen Methoden im Hinblick auf die KATRIN-Spannungsteiler bewertet und deren Nutzen diskutiert.

6.1 Anforderungen an Methoden und Geräte

Im Rahmen dieser Arbeit wird in der Hauptsache von den Anforderungen des KATRIN Experimentes ausgegangen, welches eine Präzision von 3 ppm und besser fordert. Daher werden alle Schritte so ausgelegt, dass eine höchstmögliche Präzision erreicht wird. Im Verlauf der Methodenbeschreibung werden Möglichkeiten aufgezeigt, die Messungen mit geringerer Präzision durchzuführen.

Die Bestimmung der Maßstabsfaktoren muss wiederholt möglichst an verschiedenen Tagen erfolgen, um zufällige Fehler der Messung auszuschließen.

Um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, ist es nötig, die Messungen immer identisch aufzubauen und wenn möglich immer dieselben Kabel und Geräte für die Messungen zu verwenden sowie vergleichbare Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit einzuhalten.

Da im Hochspannungslabor des Instituts für Kernphysik ein vollständiger Präzisionsmessstand zur Verfügung steht, werden im Folgenden die Methoden mit diesen Geräten beschrieben. Es ist möglich diese Messungen auch mit vergleichbaren Geräten anderer Hersteller durchzuführen.

Als Spannungsquellen dienen zum einen der Fluke 5720A Calibrator [Flu57] für Spannungen bis 1 kV und das FuG HCP 18-35000 für Spannungen bis 35 kV mit einer Spannungsstabilität von $<\pm 2$ ppm/8h. Alle Kalibrierungen können nur bis 35 kV in Münster durchgeführt werden, da weder ein zweiter Hochspannungsteiler noch ein ausreichend genaues Netzteil bis 65 kV zur Verfügung steht. Das für die Testmessungen verwendete 100 kV Netzteil der Firma Heinzinger weist keine ausreichende Stabilität, für eine Kalibrierung ohne zweiten Spannungsteiler, auf.

Als Voltmeter dienen zwei Fluke 8508A Referenzmultimeter [Flu85] und ein Agilent 3458A Multimeter [Agi34] welche ausschließlich im 20 V (Fluke) bzw. 10 V Messbereich (Agilent) verwendet werden. Durch die Verwendung dieser Messbereiche, kann die Verstärkung der Multimeter mittels Fluke 10 V-DC-Referenzspannungsquelle (732A) korrigiert werden. Die 10 V-Referenzspannungsquelle zeigt eine Stabilität von 0,24 ppm/Jahr zwischen 2008 und 2009. Die Verstärkung der Voltmeter wird wie folgt bestimmt [Thu07]:

$$K = \frac{U_{10V}^{ref}}{(U_{10V}^{meas} - U_{0V})} \quad (6.1.1)$$

Dabei ist U_{10V}^{ref} die Spannung der Referenzspannungsquelle, U_{10V}^{meas} die mit dem Voltmeter gemessene Spannung der Referenzquelle und U_{0V} der Offset des Voltmeters bei kurzgeschlossenem Kabel.

Der gemessene Wert (U_{meas}) muss anschließend mit dem Offset und der Verstärkung des Messgerätes, wie in Gleichung (6.1.2), korrigiert werden.

$$U_{meas}^{korr} = (U_{meas} - U_{0V}) \cdot K \quad (6.1.2)$$

Die Unsicherheit der korrigierten Spannung ist dann:

$$\Delta U_{meas}^{korr} = \sqrt{((U_{meas} - U_{0V}) \cdot \Delta K)^2 + (K \cdot \sigma_{meas})^2 + (K \cdot \sigma_{0V})^2} \quad (6.1.3)$$

Wobei ΔK die Unsicherheit der zuvor bestimmten Verstärkung ist. Da die Fehler der einzelnen Messgrößen unkorreliert sind, wird die Unsicherheit nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet:

$$\Delta K = K \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{10V}^{ref}}{U_{10V}^{ref}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{10V}}{(U_{10V} - U_{0V})}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{0V}}{(U_{10V} - U_{0V})}\right)^2} \quad (6.1.4)$$

Verstärkung und Offset aller beteiligten Multimeter muss bei kurzen Messzeiten (<1 h) vor oder nach der eigentlichen Messung geschehen und bei längeren Messungen (>1 h) vor und nach der Messung.

Als Referenzteiler bis 1 kV dient der Fluke 752A dessen Maßstabsfaktor des 100:1 Abgriffs, nach durchgeführter Selbstkalibrierung, einen Genauigkeit von 0,5 ppm aufweist. Dieser Spannungsteiler sollte an jedem Messtag einmal seine Selbstkalibrierungsprozedur laut

Manual [Flu75] durchlaufen. Der 752A ist ein gutes Beispiel für einen kommerziell erhältlichen Spannungsteiler der die KATRIN Anforderungen erfüllt, aber diese Geräte haben eine maximale Eingangsspannung von 1 kV und sind daher nicht für den Messbetrieb mit Tritium geeignet.

Sofern auf die, über den Referenzteiler ermittelte, Quellspannung zurück gerechnet wird, muss die Unsicherheit des Maßstabsfaktors des Referenzteilers berücksichtigt werden. Dies ist zum Beispiel bei den Niederspannungskalibrierungen der Fall. Damit ergibt sich die Quellspannung und deren Unsicherheit zu:

$$U_{Quell}^{korr} = ((U_{meas} - U_{0V}) \cdot K) \cdot M \quad (6.1.5)$$

$$\Delta U_{Quell}^{korr} = \sqrt{(U \cdot M \cdot \Delta K)^2 + (K \cdot M \cdot \sigma_{meas})^2 + (K \cdot M \cdot \sigma_{0V})^2 + (U \cdot K \cdot \sigma_M)^2} \quad (6.1.6)$$

Dabei ist $U = (U_{meas} - U_{0V})$, M der Maßstabsfaktor des Referenzteilers und σ_M dessen absolute Unsicherheit.

Um den Maßstabsfaktor des zu vermessenden Spannungsteiler zu bestimmen, muss die Quellspannung durch die am Abgriff des Spannungsteiler gemessenen Spannung geteilt werden (Gl. (6.1.7)).

$$M = \frac{U_{Quell}^{korr}}{U_{meas}^{korr}} \quad (6.1.7)$$

Die systematische Unsicherheit des Maßstabsfaktor M ergibt sich aus den Unsicherheiten von Quell- und Ausgangsspannung:

$$\Delta M = M \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{Quell}^{korr}}{U_{Quell}^{korr}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{out}^{korr}}{U_{out}^{korr}}\right)^2} \quad (6.1.8)$$

6.2 Direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren

Die direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren ist sicherlich die am einfachsten anzuwendende Methode zur Kalibrierung, welche jedoch einen sehr präzisen Referenzteiler (z.B. MT100 der PTB, Abb. 6.1) im selben Spannungsbereich benötigt. Das Schaubild (Abb. 6.2) zeigt die für die Messung bei 1 kV nötige Anordnung der Geräte. Je nach gewünschter Präzision kann ein Referenzteiler zur Überwachung der Spannungsquelle eingesetzt werden. Dies ist bei der ppm-Präzision der KATRIN Spannungsteiler zwingend erforderlich. Sollte für andere Anwendungen die Genauigkeit der Spannungsquelle ausreichen, kann darauf verzichtet werden.



Abbildung 6.1: Referenzspannungsteiler MT100 der PTB. Gezeigt ist der Referenzspannungsteiler bis 100 kV mit der Bezeichnung MT100. Der eigentliche Spannungsteiler ist in einem, mit SF₆-Gas gefülltem, Druckbehälter untergebracht. Um linken unteren Bereich ist die Temperaturanzeige und Steuerung zu sehen. Rechts daneben befinden sich die Anschlüsse der Präzisionsabgriffe. Die Maßstabsfaktoren sind 100:1, 3333:1 und 10000:1.

Bei der Kalibrierungsspannung ist zu beachten, dass die angelegte Spannung ein ausreichend hohes Messsignal zulässt. So liefert ein 1:100 Abgriff bei einer Kalibrierspannung von 1 kV ein Ausgangssignal von 10 V aber ein 1:2000 Abgriff lediglich 0,5 V. Diese kleine Spannung führt zu einem großen Einfluss von Thermospannungen. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, ist es daher erforderlich mit ausreichend hohen Spannungen am Eingang zu arbeiten. Dies schränkt die Möglichkeiten einer Kalibrierung deutlich ein, da kommerzielle Referenzteiler entweder nur für Spannungen bis 1000 V (Fluke 752A) ausgelegt sind oder aber eine Präzision von einigen zehn ppm und schlechter aufweisen.

6.3 Wechselseitige Kalibrierung mit zwei Präzisions-Spannungsteilern

Die Wechselseitige Kalibrierung mit zwei Präzisions-Spannungsteilern gliedert sich in drei Schritte. Sie ist nötig um einen Referenzspannungsteiler wie zum Beispiel den MT100 oder einen der KATRIN-Spannungsteiler zu kalibrieren. Zunächst wird der 100:1 Abgriff des zu kalibrierenden Teilers kalibriert. Dazu wird 1 kV aus dem Fluke Calibrator auf den Kalibriersteiler und auf den Fluke 752A Referenzsteiler geschaltet und dadurch das 100:1 Maßstabsverhältnis bestimmt (Abbildung 6.2).

Nun wird an den zu kalibrierenden Hochspannungsteiler und an einen weiteren Spannungsteiler (Normalsteiler) mit ausreichender Spannungsfestigkeit die Kalibrierspannung von z.B. 35 kV angelegt (Abb. 6.3). Die tatsächlich anliegende Spannung wird durch eine Kompensationsmessung mit einem Fluke 8508A und dem Fluke Calibrator bestimmt. Die vom Fluke

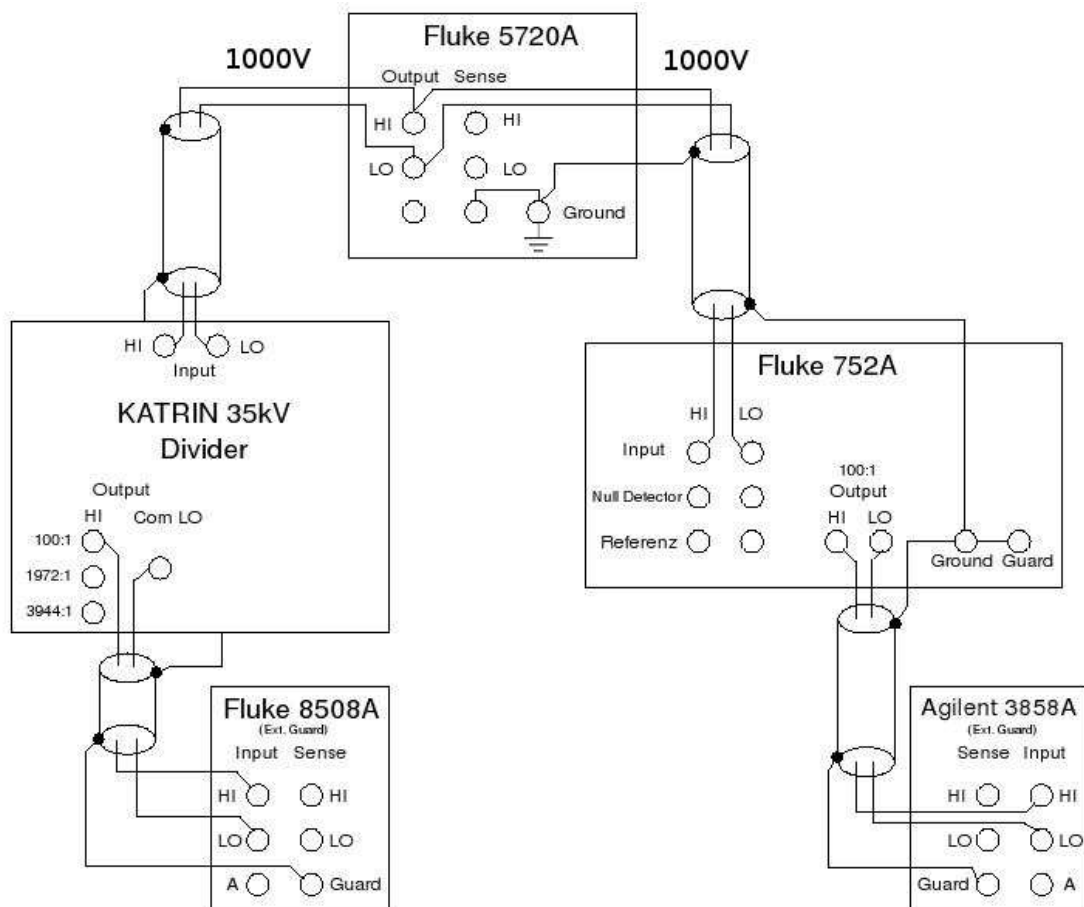


Abbildung 6.2: Direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren bei 1 kV. Das Blockschaltbild zeigt die Geräteanordnung für die direkte Bestimmung der Maßstabsfaktoren. Für eine Messung mit mehr als 1 kV wird eine andere Spannungsquelle und ein anderer Referenz-/Normalteiler verwendet.

Calibrator erzeugte Spannung wird mittels 752A Referenzteiler und Agilent Multimeter überwacht. Gleichzeitig wird die Ausgangsspannung am nächst höheren Maßstabsverhältnis (z.B. 2000:1) des Normalteilers bestimmt.

Durch die Kenntnis des Maßstabsfaktors des Normalteilers, auf etwa 1 ppm, ist es möglich die höheren Maßstabsfaktoren des zu kalibrierenden Spannungsteilers zu bestimmen. Dazu wird bei anliegender Spannung vom 100:1-Abgriff des kalibrierteilers auf den nächst höheren Abgriff (z.B. 2000:1) gewechselt. Durch den vorher ermittelten Maßstabsfaktor des Normalteilers, kann nun der Maßstabsfaktor des Kalibrierteilers bestimmt werden. Um eine Möglichkeit der selbstüberwachung zu haben, wird die gesamte Prozedur anschließend mit vertauschter Rolle der beiden Spannungsteiler erneut durchgeführt. Wichtig ist bei dieser Methode die Spannungsabhängigkeit des Spannungsteilers zu berücksichtigen, da der erste Schritt bei 1 kV und alle weiteren Schritte bei 35 kV durchgeführt werden.

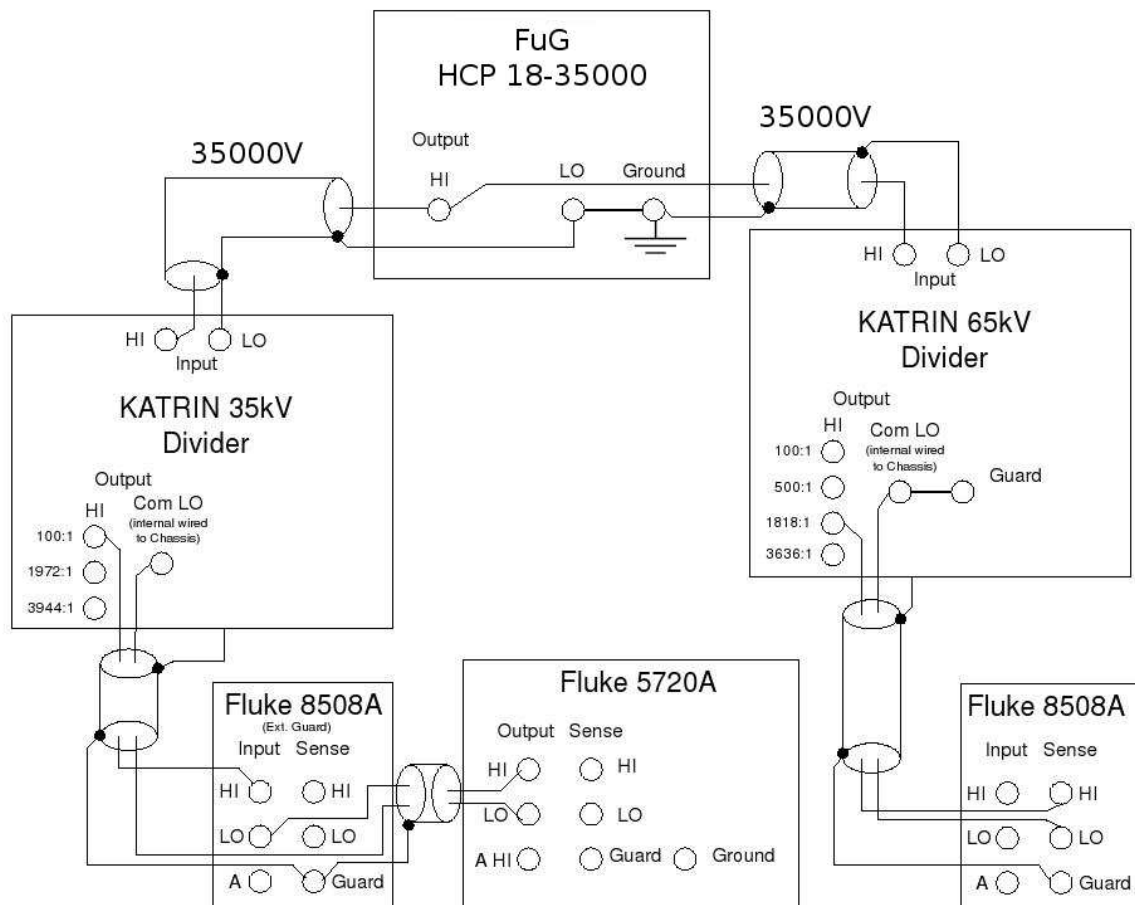


Abbildung 6.3: Bestimmung der Kalibrierspannung durch Nullvoltmessung. Es werden zwei Spannungsteiler aus dem selben Hochspannungsnetzteil versorgt. Die tatsächliche Spannung wird durch Nullvoltmessung durch Gegenspannung aus dem Fluke 5720A ermittelt. Die erzeugte Gegenspannung muss zusätzlich mit einem Referenzspannungsteiler und einem weiteren Multimeter überwacht werden. Die Ausgangsspannung des zweiten Spannungsteilers wird direkt gemessen.

6.4 Kalibrierung mit Niederspannungen bis 1000 Volt

Für die Selbstkalibrierung der KATRIN Spannungsteiler wurde von R. Marx und M. Schmidt von der PTB eine Methode vorgeschlagen, um die Spannungsteiler mit Spannungen von 1 kV und weniger zu kalibrieren. Bei dieser Methode benötigt man nur den zu kalibrierenden Hochspannungsteiler und einen Fluke 752A Referenzspannungsteiler einschließlich des Fluke Calibrators und der Digitalvoltmeter.

1. Der Maßstabsfaktor des 100:1 Abgriff des Hochspannungsteilers wird durch das Anlegen von 1 kV aus dem Fluke Calibrator, wie oben beschrieben, bestimmt (siehe Abb. 6.2).
2. An den 100:1 Abgriff des Spannungsteilers wird eine Spannung von 350 V aus dem Fluke Calibrator angelegt. Wichtig ist den Schirm dieser Leitung nur am Spannungsteiler anzuschließen, da beim Spannungsteiler Low und Guard intern fest verdrahtet sind!

diese Methode nur bei Spannungsteiler mit sehr geringem thermischen Verhalten bzw. Spannungsabhängigkeit angewendet werden.

Da diese Methode primär als Überwachungsmöglichkeit gedacht ist, eignet sie sich hervorragend um eine alterungsbedingte Drift des Spannungsteilers zu Dokumentieren. Diese Drift wirkt sich unabhängig von der momentanen Belastung aus und kann somit auch bei Niederspannung untersucht werden.

6.5 Zusammenfassung und Diskussion der Methoden

Die drei genannten Methoden zu Kalibrierung eines Hochspannungsteilers können nicht direkt miteinander verglichen werden, da sie nicht alle den selben Zweck haben. So ist die Direktmessung bei Hochspannung die einfachste Methode um einen Spannungsteiler zu kalibrieren der eine vergleichbare oder geringere Präzision aufweist als der Referenz-/Normalteiler. Diese Methode kann daher angewandt werden um die KATRIN Spannungsteiler am MT100 der PTB zu kalibrieren oder um mit den KATRIN Spannungsteilern weitere Spannungsteiler zu kalibrieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der MT100 und die beiden KATRIN Spannungsteiler die einzigen Spannungsteiler mit dieser hohen Präzision sind! Weiterhin lässt sich beim direkten Vergleich der beiden KATRIN-Spannungsteiler feststellen ob beide ordentlich arbeiten, oder ob einer der beiden Teiler eine Fehlfunktion aufweist.

Bei der zweiten Methode ist es zwingend erforderlich beide KATRIN Spannungsteiler vor Ort zu haben, wenn man die Kalibrierung ohne die PTB durchführen möchte. Da die Messungen bei dieser Methode aufeinander aufbauen, ist diese Methode recht kompliziert und erfordert viel Erfahrung und Kenntnis im Umgang mit der Messelektronik und den möglichen Fehlerquellen. Diese Methode stellt die einzige Methode dar um den Spannungsteiler unabhängig von anderen Institutionen absolut zu kalibrieren. Die so gewonnenen Kalibrierdaten können dann mit den Daten der direkten Messung mit dem MT100 verglichen werden. Diese Methode sollte daher vor allem vor den Kalibrierungsphasen an der PTB durchgeführt werden.

Die Methode der Niederspannungskalibrierung ist speziell auf die Bedürfnisse der KATRIN Spannungsteiler zugeschnitten. Sie ist als Kontrollmöglichkeit gedacht und ersetzt nicht die Kalibrierungsphasen an der PTB. Durch eine regelmäßige Durchführung dieser Messungen kann zum einen die Langzeit-Drift der Spannungsteiler überprüft werden und zum anderen hat man eine Möglichkeit zur Fehlersuche sollte der Spannungsteiler unerwartete Werte ausgeben. Sind in diesem Fall die Untermaßstabsfaktoren unverändert, so ist der Fehler auf die Primärkette zurück zu führen. Die Überprüfung der Langzeit-Drift ermöglicht es die Abstände der Kalibrierungsphasen an der PTB zu erhöhen, was einen deutlich reduziert Aufwand und Kostenersparnis mit sich führt.

Alle Methoden haben auch einen unterschiedlichen Aufwand, so kann zum Beispiel eine vollständige wechselseitige Kalibrierung nur in längeren Messpausen erfolgen. Die Selbstkalibrierung bei Niederspannung ist mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden und sollte daher so oft wie möglich durchgeführt werden.

Wichtig ist es alle drei Methoden so oft wie möglich durchzuführen, um ein Gefühl für den gesamten Messapparat und mögliche Fehlerquellen zu bekommen. Des weiteren kann nur so eine lückenlose Kalibrierungshistorie aufgebaut werden. Es bleibt abzuwarten welche Methode die zuverlässigste ist und die beste Reproduzierbarkeit zeigt. Wichtig ist es alle Methoden stets miteinander zu vergleichen da die Ergebnisse der unabhängigen Methoden übereinstimmen müssen. Durch die genannten Methoden ist es möglich mit beiden KATRIN Spannungsteilern eine Kalibrierung von Hochspannungsgeräten auf dem Niveau der PTB durchzuführen.

KAPITEL 7

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Ziel des KATRIN-Experiments ist es die Masse des Elektronantineutrinos mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ zu bestimmen. Zu diesem Zweck wird das Tritium- β -Spektrum in der Endpunktsregion mittels MAC-E-Filter Spektrometer untersucht. Um die Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ zu erreichen, ist es notwendig die Retardierungsspannung mit einer Präzision von 3 ppm zu überwachen. Um diese Präzisionsüberwachung der Hochspannung zu realisieren wurde von Th. Thümmeler in Zusammenarbeit mit der PTB ein Präzisions-Hochspannungsteiler entwickelt, welcher die hohen Anforderungen des KATRIN-Experiments erfüllt. Eine Weiterentwicklung des KATRIN-Hochspannungsteilers stellt der von F. Hochschulz entwickelte zweite KATRIN-Hochspannungsteiler dar.

Das Design des zweiten Spannungsteilers basiert auf dem des ersten Spannungsteilers. Dabei wurden einige Verbesserungen vorgenommen, welche aus den am ersten Spannungsteiler gewonnenen Erfahrungen resultierten. So wurden die Widerstände für die Messabgriffe in eine eigene Ebene eingebaut und eine neue Hochspannungszuführung realisiert. Des weiteren wurde die Frequenzabhängigkeit des Maßstabsfaktor des Kontrollteilers als Hochfrequenz-Tastkopf optimiert. So ist es möglich Restwelligkeiten und andere Störungen auf Hochspannungen zu untersuchen. Um die maximal Spannung von 65 kV sicher anlegen zu können, wurde ein Kessel mit 820 mm Durchmesser über dem Spannungsteiler montiert.

Die Vermessung der Widerstände zeigt, dass bei der Verwendung von 165 Widerständen eine mit dem ersten Spannungsteiler vergleichbare Kompensation der Aufwärmabweichung erreicht wird. Hinzu kommt, dass beim zweiten KATRIN-Spannungsteiler eine Reduzierung der Last pro Widerstand erreicht wurde und die Widerstände in der Abgriffebene sehr gut kompensiert sind. Einer der wichtigsten Vorteile gegen über dem ersten Spannungsteiler ist die Anwendung des „pre-aging-Verfahren“ an den Widerständen seitens des Herstellers. Dadurch soll erreicht werden, dass die Widerstände eine stark reduzierte alterungsbedingte Drift bei Belastung zeigen. Dieser Vorteil muss sich durch mehrfache Kalibrierung erst beweisen.

Der Aufbau eines thermischen Modells machte es möglich, das thermische Verhalten des Spannungsteiler zu untersuchen und die Temperatursteuerung zu optimieren. Während der Tests zeigte sich, dass die Abgriffebene nicht ideal temperiert und aus diesem Grund das Tunnelrohr entsprechend abgeändert wurde. Nach dieser Änderung zeigt sich die Temperatursteuerung als sehr stabil und zuverlässig. Die Messungen am thermischen Modell und die Optimierungen der Temperatursteuerung sind sicherlich eine Verbesserung der Stabilität gegenüber dem ersten KATRIN-Spannungsteiler. Die an der PTB bestimmte Spannungsabhängigkeit zeigt, dass noch weitere Möglichkeiten der Optimierung verbleiben, wie die Reduzierung der thermischen Last des Kontrollteiler bzw. dessen räumliche Verteilung.

Die verschiedenen Methoden zur Selbstkalibrierung stellen eine gute Überwachungsmöglichkeit dar. Besonders hervorzuheben seien hier die Aufbaumessung, welche durch das Vorhandensein von zwei Spannungsteilern ermöglicht wird und die Kalibrierung bei Niederspannung welche eine sehr geeignete Methode zur Überwachung der Kalibrierung darstellt. Um eine gute Kalibrierungshistorie für beide Spannungsteiler aufzubauen, ist zum einen eine gute Software nötig, welche in Grundzügen besteht und eine lückenlose Dokumentation der Messergebnisse sowohl von der PTB als auch die Ergebnisse der Selbstkalibrierung.

Eine Verbesserung der Messgenauigkeit kann durch die Verwendung von Steckadaptern an den Multimetern erreicht werden. Dabei handelt es sich um rechteckige Aluminiumboxen, welche auf das Multimeter gesteckt werden. Am unteren Ende befindet sich eine geschirmte zweipol Buchse. Dieses Vorgehen hat zwei bedeutende Vorteile, erstens werden Thermospannungen reduziert, da die Stecker selbst nicht mehr angefasst werden müssen und die Anschlüsse werden durch das Aluminiumgehäuse besser vor thermischen Änderungen geschützt sind. Zweitens ist durch die Box der gesamte Anschlussbereich des Multimeters elektrisch besser geschirmt als bei der Verwendung von einfachen 4 mm Bananen-Steckern. Diese Boxen werden an der PTB mit großem Erfolg eingesetzt und werden zur Zeit im Institut für Kernphysik entworfen und in Kürze in der Feinmechanischen Werkstatt gebaut.

Erste Testmessungen mit dem Spannungsteiler zeigten, dass der Betrieb bis 65 kV problemlos möglich ist und sogar Spannungen bis 75 kV angelegt werden konnten. Die Niederspannungskalibrierung zeigte eine sehr gute Reproduzierbarkeit im sub-ppm Bereich. Bei niedrigen Raumtemperaturen kann die Temperatur des Spannungsteilers, bei Spannungen von 65 kV, auf $\pm 0,1$ K stabil gehalten werden. Bei Raumtemperaturen über 23 °C kommt es kurzzeitig zu einer Überschreitung der 0,1 K, welche aber von der Temperatursteuerung wieder ausgeglichen wird.

Erste, vorläufige Ergebnisse der PTB bestätigen die Testmessungen und zeigen, dass der Spannungsteiler die Eigenschaften des ersten Spannungsteilers sogar übertrifft. Um eine endgültige Aussage zu treffen muss die Endgültige Auswertung der PTB abgewartet werden. Direkt nach der Kalibrierung wurde der Spannungsteiler zum CERN gebracht um dort Hochspannungsnetzteile für die BeTINA-Kollaboration zu Kalibrieren.

	PTB Mittel	Münster Mittel	Rel. Abweichung zur PTB [ppm]
M100	100,51484	100,51489	0,57
M20	18,0879965	18,0880011	0,25
M40	36,1765110*	36,1765415	0,84

Tabelle 7.1: Vergleich der Niederspannungskalibrierungen. Gezeigt sind die Mittelwerte, des Maßstabsfaktor 100:1 (M100) und der Untermaßstabsfaktoren der 1818:1 und 3636:-Abgriffe (M20/M40), aus den Niederspannungskalibrierungen an der PTB und im HV-Labor in Münster. (*) Dabei ist anzumerken, dass die Messungen für den M40 Untermaßstabsfaktor an der PTB bei 650 V durchgeführt wurden.

Vergleicht man die Mittelwerte der Niederspannungskalibrierung an der PTB mit den in Münster gewonnene Daten, so zeigt sich, eine Reproduzierbarkeit im sub-ppm Bereich (Tabelle 7.1). Die leicht größere Abweichung bei der Messung des M40 Untermaßstabsfaktor lässt sich durch eine unterschiedliche Kalibrierspannung erklären. Bei der PTB wurden 650 V für die Messung verwendet und in Münster 350 V.

In Abbildung 7.1 sind die Werte der Kalibrierung der einzelnen Maßstabsfaktoren bei positiver bzw. negativer Polarität dargestellt. Die in Münster gemessenen Werte stimmen im Rahmen der Unsicherheiten mit den Daten der PTB überein. Dabei ist anzumerken, dass bei der Messung des Untermaßstabsverhältniss des 3636:1-Abgriffs (M40) die Messspannung an der PTB 650 V und in Münster 350 V betrug. Die in Abbildung 7.1 gezeigten Fehlerbalken

ergeben sich aus der quadratischen Addition von systematischer und statistischer Unsicherheit. Dabei wurde die systematische Unsicherheit der PTB Daten konservativ mit 1 ppm angegeben. Für die in Münster gewonnenen Daten wurde die nach Kapitel 6.1 berechnete systematische Unsicherheit quadratisch mit der statistischen Unsicherheit addiert.

Es zeigt sich eine größere Abweichung zwischen den bei negativer Polarität aufgezeichneten Daten als bei denen mit positiver Polarität. Auffällig ist auch die Abweichung zwischen dem ersten und dem letzten Wert der PTB für den M40 Maßstabsfaktor bei negativer Polarität der Spannung. Die Werte weichen um etwa 2,9 ppm voneinander ab.

Neben der unterschiedlichen Messspannung beim M40-Untremaßstabsfaktor, ist ein weiterer Unterschied der, dass die an der PTB gewonnen Daten an einem Tag gewonnen wurden. Die in Münster gewonnen Daten wurden an zwei verschiedenen Tagen in unterschiedlichen Laboren (mit derselben Messausrüstung) aufgenommen.

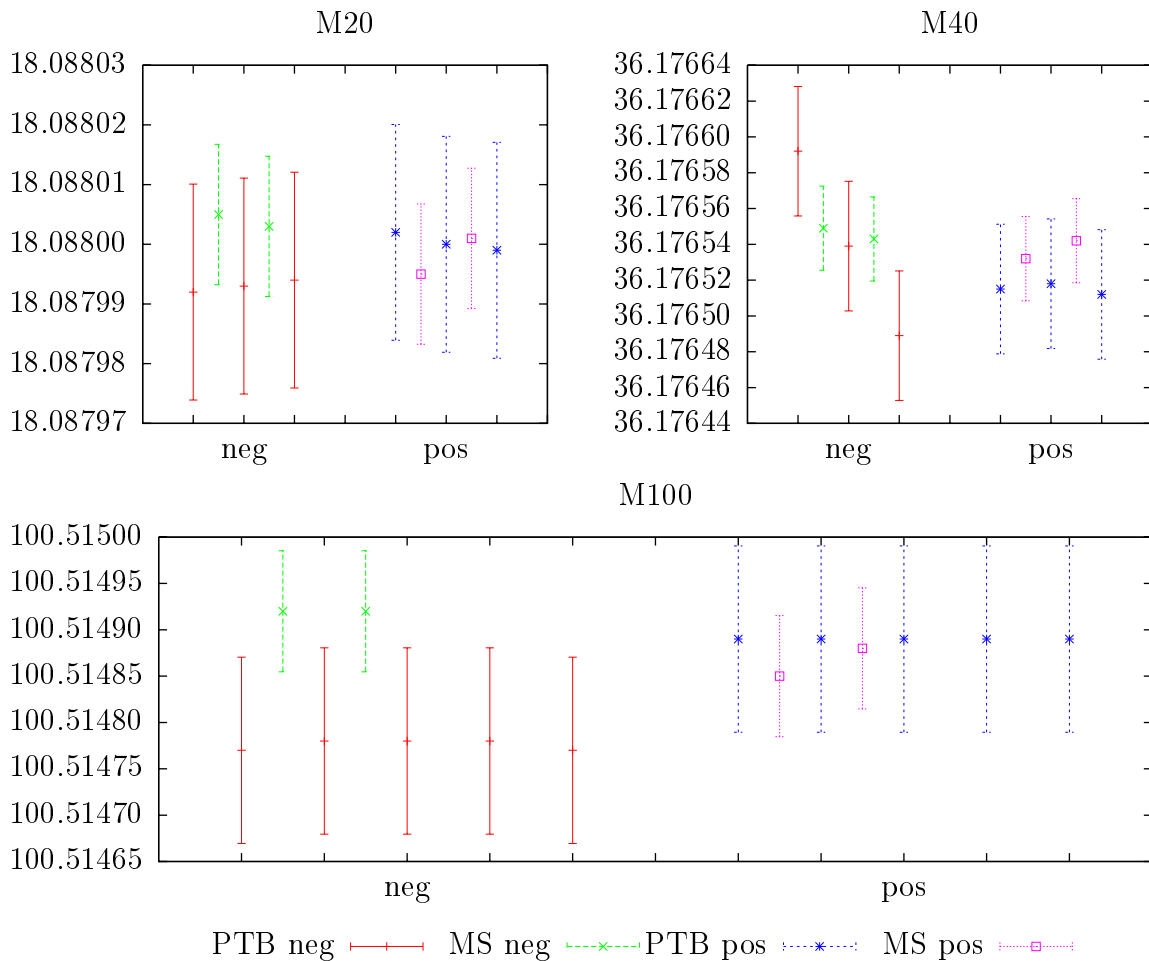


Abbildung 7.1: Vergleich der Niederspannungskalibrierungen an der PTB und im HV-Labor. Gezeigt sind die Werte der einzelnen Messungen bei unterschiedlicher Polarität der Spannung. Für den 100:1-Abgriff (M100) wurde mit 1 kV und für den Untermaßstabsfaktor des 1818:1-Abgriffs (M20) mit 350 V gemessen. Bei dem Untermaßstabsfaktor des 3636:1-Abgriffs (M40) wurde in Münster mit 350 V und an der PTB mit 650 V gemessen.

Die von M. Zboril in Mainz vorgenommenen Kalibrierungen des zweiten Spannungsteilers sind in Abbildung 7.2 dargestellt. Für dieser Messung wurde eine FuG HCP 18-35000 Netzteil, bei einer Spannungs von 1 kV betrieben und mit einem Fluke 8508A Multimeter überwacht. Ein zweites Fluke 8508A Multimeter wurde zur Spannungsmessung an den Abgriffen des Spannungsteilers eingesetzt. Die so bestimmten Maßstabsfaktoren weichen um 1,1 ppm für den 1818:1-Abgriff und 3,3 ppm für den 3636:1-Abgriff von den Werten der PTB (gemessen bei 35 kV) ab. Dabei ist zu beachten, dass bei dieser Kalibrierung die Kalibrierspannung von 1 kV direkt mit einem Fluke Multimeter gemessen wurde, da kein Referenzspannungsteiler zur Verfügung stand. Durch den internen Spannungsteiler des Fluke 8508A ergibt sich ein größerer Fehler als zum Beispiel durch einen Fluke 752A Referenzteiler. Des weiteren wurden die Maßstabsfaktoren direkt bestimmt, was für den 3636:1-Abgriff Ausgangsspannungen von lediglich 0,28 V bedeutet. Bei diesen niedrigen Spannungen haben Thermospannungen einen sehr großen Einfluss auf die Messergebnisse. Alles in allem zeigten diese Messungen eine gute Reproduzierbarkeit und stellten eine Möglichkeit dar, den Spannungsteiler noch vor der Kalibrierung an der PTB ausgiebig, z.B. auf eine übermäßige Drift oder andere Fehlfunktionen, zu testen.

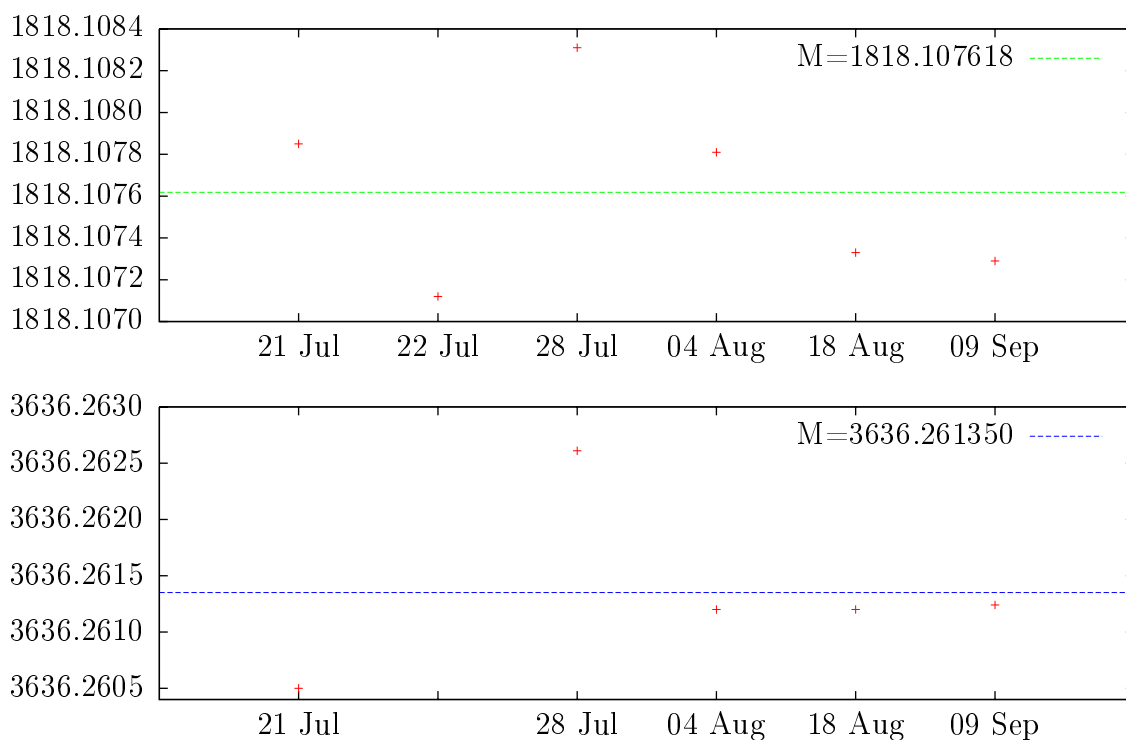


Abbildung 7.2: In Mainz bestimmte Maßstabsfaktoren des zweiten Spannungsteilers. Gezeigt sind die in Mainz gemessenen Maßstabsfaktoren. Die gestrichelte Linie zeigt dabei den Mittelwert der Messungen an.

Der Beitrag der Multimeter zur absoluten Unsicherheit beträgt laut der Spezifikationen etwa 6 ppm, womit auch bei diesen Messungen die Ergebnisse der PTB im Rahmen der Unsicherheiten bestätigt werden konnten. Die quadratische Summe der Stabilität der beiden Multimeter beträgt 3,5 ppm über 90 Tage und damit ist Drift des Spannungsteilers über einen Zeitraum von 50 Tagen kleiner 0,07 ppm/24h.

Erste Ergebnisse der Kalibrierung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Unsicherheiten der Maßstabsfaktoren sind seitens der PTB mit 1 ppm angegeben (vgl. [Thu09]). Die angegebene Unsicherheit der Spannungsabhängigkeit ist eine rein statistische Unsicherheit. Die Spannungsabhängigkeit des zweiten Spannungsteilers ist mit $1,9(2) \cdot 10^{-8}$ ppm/kV um etwa ein Drittel kleiner als die des ersten Spannungsteilers (etwa $3,0(2) \cdot 10^{-8}$ ppm/kV). Dies kann größtenteils auf die reduzierte Last pro Widerstand und die Optimierungen der Temperatursteuerung am thermischen Modell zurück geführt werden.

Parameter	100:1-Abgriff	1818:1-Abgriff	3636:1-Abgriff
Maßstabsfaktor	100,51484(10) : 1	1818,1096(18) : 1	3636,2743(36) : 1
Temperaturschwankung	<0,1 K		
Spannungsabhängigkeit	0,019(2) ppm/kV		

Tabelle 7.2: Erste Kalibrierungsergebnisse des zweiten Spannungsteilers an der PTB (2009). Angegeben sind die Kalibrierungsergebnisse der Maßstabsfaktoren und der Spannungsabhängigkeit des zweiten KATRIN-Spannungsteilers aus dem Jahr 2009.

Mit dem zweiten Spannungsteiler gelang es an die Erfolge des ersten Spannungsteilers anzuknüpfen und bekannte Schwachpunkte zu korregieren. Auf diesem Weg wurde ein noch präziserer und vermutlich noch stabilerer Hochspannungsteiler aufgebaut. Damit gehört der zweite KATRIN-Spannungsteiler zu den präzisesten Spannungsteiler weltweit und kann, unter anderem durch die erhöhte Maximalspannung von 65 kV, auch über das KATRIN-Experiment hinaus eingesetzt werden. In naher Zukunft werden die KATRIN-Spannungsteiler dazu beitragen, die Neutrinomasse zu bestimmen oder aber eine um eine Größenordnung kleinere Obergrenze der Neutrinomasse zu finden.

ANHANG A

ERGEBNISSE DER MESSUNGEN ZUR AUFWÄRMABWEICHUNG

A.1 Abgriffebene

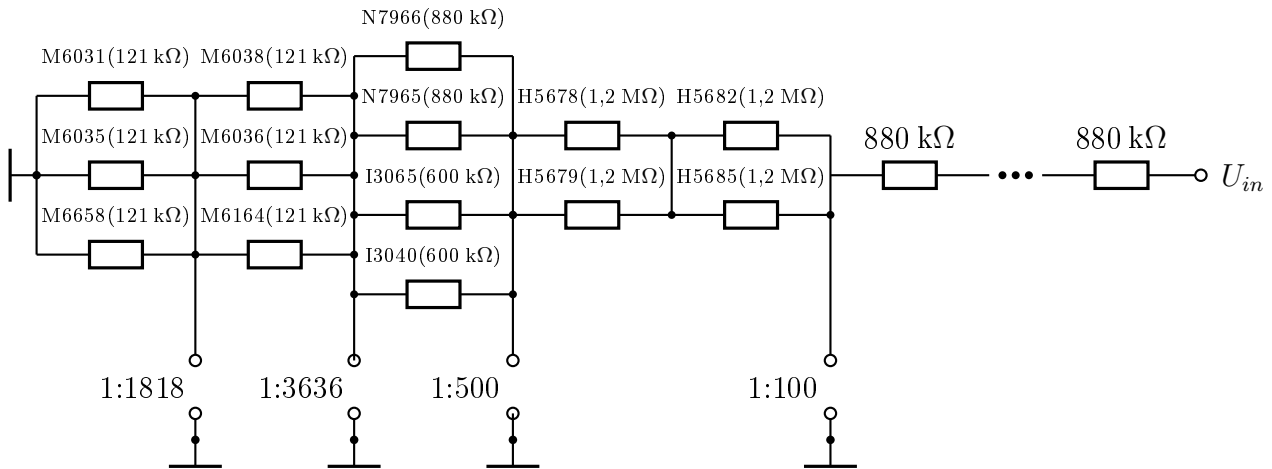


Abbildung A.1: Widerstände der Abgriffebene. Gezeigt sind die Bezeichnungen der Widerstände in der Abgriffebene und deren Widerstandswerte.

In Abbildung A.1 sind die Bezeichnungen der Abgriffwiderstände und deren Position gezeigt. Die Ergebnisse der Messungen des Temperaturkoeffizienten für jeden Abgriff sind in Kapitel 3.2.2 dargestellt. Die Kondensatoren in dieser Ebene tragen die Nummern 1, 3 und 5 und besitzen eine Gesamtkapazität von $(7,2 \pm 0,1)$ nF.

A.2 Hauptebenen

Im Folgenden werden die Bezeichnungen der Präzisionswiderstände des Teilerwiderstandes und deren Position in den Ebenen aufgelistet.

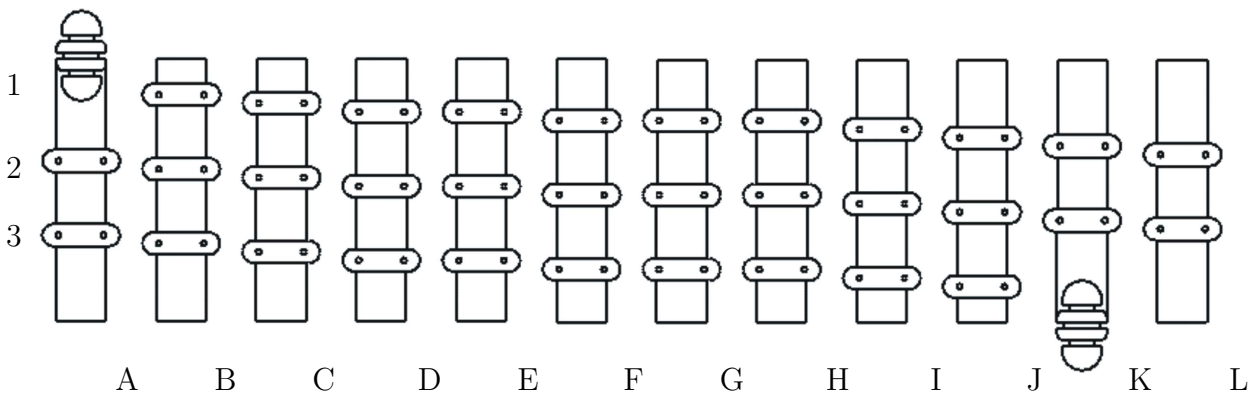


Abbildung A.2: Nummerierung der Widerstandspositionen. Bei der Nummerierung werden die Spalten mit Buchstaben und die Zeilen mit Zahlen benannt.

Die Nummerierung der Position erfolgt nach folgendem Muster:

1. Die erste Zahl der Position gibt die Ebene an in der er verbaut ist z.B. 3
2. Der darauf folgende Buchstabe gibt die Spalte an z.B. C (s. Abb. A.2)
3. Die letzte Zahl gibt die Zeile an z.B. 2 (s. Abb. A.2)

Dadurch ergibt sich als Beispiel die Position „1C2“, demnach ist der Widerstand in der dritten Ebene, auf der Position A im zweiten Umlauf verbaut. In jeder Ebene befindet sich auf Position XA1 ein Draht und kein Widerstand, da 165 anstelle von 170 Widerständen verbaut wurden.

Die folgenden Tabellen zeigen die Positionen der Paare/Triple in jeder Ebene, sowie deren Aufwärmabweichung. Die rechnerische Aufwärmabweichung der gesamten Ebenen, die verbaute Kondensatoren und deren Gesamtkapazität sind unter den Tabellen vermerkt.

1. Ebene

Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung	Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung
m5319	1A2	-0,982	m2909	1F2	1,230
m2813	1A3	0,979	m7841	1G2	-1,192
		-0,003			0,038
y7424	1B1	-0,136	m6292	1F3	0,109
m7865	1B2	-1,066	y7417	1G3	-0,174
m2844	1B3	1,238			-0,065
		0,036			
			m2903	1H1	1,353
m7847	1C1	-1,127	m7867	1H2	-1,011
m6481	1C2	-0,272	n7974	1H3	-0,316
m2893	1C3	1,368			0,026
		-0,031			
			m6475	1I1	-0,837
m7836	1D1	-0,990	m2827	1I2	-0,829
m2802	1E1	0,919	m6173	1I3	1,641
		-0,072			-0,025
m5309	1D2	-0,931	n7975	1J1	-0,342
m2809	1E2	0,861	m7862	1J2	-0,969
		-0,071	m2839	1J3	1,263
					-0,048
m2804	1D3	0,270			
y7409	1E3	-0,206	y7408	1K1	-0,192
		0,064	n7973	1K2	0,164
					-0,029
m5322	1F1	1,138			
m7838	1G1	-1,173	n7970	1L1	-0,511
		-0,035	m2825	1L2	0,483
					-0,027

Tabelle A.1: Aufwärmabweichung und Positionen der Widerstände in Ebene 1

Aufwärmabweichung der Ebene -0,21 ppm

Kondensatoren 6, 8 und 9 mit insgesamt $(7,2 \pm 0,1)$ nF

2. Ebene

Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung	Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung
m7856	2A2	-1,228	n7983	2G1	-0,081
g8775	2A3	1,210	y7407	2H1	0,037
		-0,017			-0,044
g5868	2B1	-0,835	m2821	2G2	-0,938
n7972	2B2	-0,830	m2843	2H2	0,907
m2892	2B3	1,662			-0,031
		-0,002			
			m2828	2G3	-0,625
m7846	2C1	-0,954	m2812	2H3	0,653
m6282	2C2	1,530			0,028
m5298	2C3	-0,514			
		0,061	m6483	2I1	-0,600
			m5341	2I2	1,116
n7978	2D1	-0,401	y7425	2I3	-0,473
m2901	2D2	1,496			0,044
m7852	2D3	-1,156			
		-0,060	m5317	2J1	-0,900
			n7976	2J2	-0,781
m6175	2E1	1,706	m5339	2J3	1,637
n7982	2E2	0,074			-0,044
m2830	2E3	-1,852			
		-0,073	m7842	2K1	-1,153
			m6478	2K2	1,170
m6269	2F1	1,439			0,017
m5300	2F2	-0,680			
m6171	2F3	-0,694	m5335	2L1	1,122
		0,065	m7857	2L2	-1,071
					0,051

Tabelle A.2: Aufwärmabweichung und Positionen der Widerstände in Ebene 2

Aufwärmabweichung der Ebene -0,01 ppm

Kondensatoren 15, 16 und 18 mit insgesamt $(7, 2 \pm 0, 1)$ nF

3. Ebene

Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung	Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung
m6485	3A2	-0,421	m2911	3G1	0,925
n7971	3A3	0,496	m2835	3H3	-0,948
		<u>0,074</u>			<u>-0,023</u>
m6474	3B1	1,599	m7835	3G3	-1,164
m7861	3B2	-0,848	m2811	3H1	1,123
m7848	3B3	-0,803			<u>-0,041</u>
		<u>-0,053</u>			
			m7839	3G2	-1,192
m5303	3C1	-0,592	m2846	3H2	1,195
m5331	3C2	1,303			<u>0,003</u>
m2824	3C3	-0,656			
		<u>0,055</u>	m2840	3I1	0,404
			y7413	3I2	-0,142
m2837	3D1	1,260	n7968	3I3	-0,335
m7833	3E1	-1,271			<u>-0,073</u>
		<u>-0,011</u>			
			y7426	3J1	-0,416
m7831	3D2	-1,278	m5318	3J2	-1,088
m5327	3E2	1,268	m6288	3J3	1,565
		<u>-0,010</u>			<u>0,060</u>
m2902	3D3	1,144	n7964	3K1	-0,157
m7851	3E3	-1,189	n7963	3K2	0,175
		<u>-0,046</u>			<u>0,018</u>
m6289	3F1	1,473	m6272	3L1	0,738
m6472	3F2	-0,479	m2833	3L2	-0,755
m7854	3F3	-0,998			<u>-0,017</u>
		<u>-0,004</u>			

Tabelle A.3: Aufwärmabweichung und Positionen der Widerstände in Ebene 3

Aufwärmabweichung der Ebene -0,07 ppm

Kondensatoren 7, 10 und 11 mit insgesamt $(7,1 \pm 0,1)$ nF

4. Ebene

Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung	Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung
m7832	4A2	-1,248	m6265	4G1	-0,585
m2805	4A3	1,247	m2814	4G2	0,576
		-0,001			-0,009
m6268	4B1	-1,115	m5344	4G2	0,633
m2820	4B2	-0,510	g5866	4H2	-0,636
m2905	4B3	1,585			-0,003
		-0,041			
			n7979	4G3	-0,643
m6277	4C1	-1,047	m2900	4H3	0,645
m2838	4C2	1,370			0,002
m6176	4C3	-0,267			
		0,055	m6271	4I1	-0,498
			m5305	4I2	-0,774
m7840	4D1	-1,247	m2912	4I3	1,291
m2845	4E1	1,241			0,019
		-0,005			
			m5342	4J1	0,675
g8776	4D2	1,293	y7428	4J2	-0,357
m7864	4E2	-1,295	m6471	4J3	-0,340
		-0,002			-0,022
m5340	4D3	0,807	m2831	4K1	0,741
m5290	4E3	-0,808	m7868	4K2	-0,754
		-0,001			-0,012
m2913	4F1	1,647	m5337	4L1	1,359
m2829	4F2	-0,791	m7844	4L2	-1,357
g5869	4F3	-0,878			0,002
		-0,022			

Tabelle A.4: Aufwärmabweichung und Positionen der Widerstände in Ebene 4

Aufwärmabweichung der Ebene -0,04 ppm

Kondensatoren 2, 4 und 19 mit insgesamt $(7,2 \pm 0,1)$ nF

5. Ebene

Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung	Widerstand	Pos	Aufwärmabweichung
m5308	5A2	-0,709	m5330	5G1	0,935
m5324	5A3	0,716	m7863	5H1	-0,979
		0,007			-0,044
m6267	5B1	-0,783	m2823	5G2	1,490
m2808	5B2	1,607	m7860	5H2	-1,466
m5293	5B3	-0,899			0,023
		-0,075			
n7969	5C1	0,416	m2898	5G3	1,055
m2848	5D1	-0,393	m7858	5H3	-1,053
		0,023			0,003
m6473	5C2	-0,851	m6480	5I1	1,580
m5329	5D2	0,820	m5297	5I2	-1,119
		-0,031	m6290	5I3	-0,489
					-0,028
m7837	5C3	-1,191	m5295	5J1	-1,143
m5328	5D3	1,207	m6266	5J1	1,680
		0,016	m2822	5J3	-0,551
					-0,014
g5867	5E1	-0,521			
m6278	5E2	1,530	n7980	5K1	0,429
m5299	5E3	-1,039	m2826	5K2	-0,419
		-0,030			0,009
n7977	5F1	-0,297	m5323	5L1	0,767
m2897	5F2	0,671	y7418	5L2	-0,758
n7985	5F3	-0,352			0,009
		0,022			

Tabelle A.5: Aufwärmabweichung und Positionen der Widerstände in Ebene 5

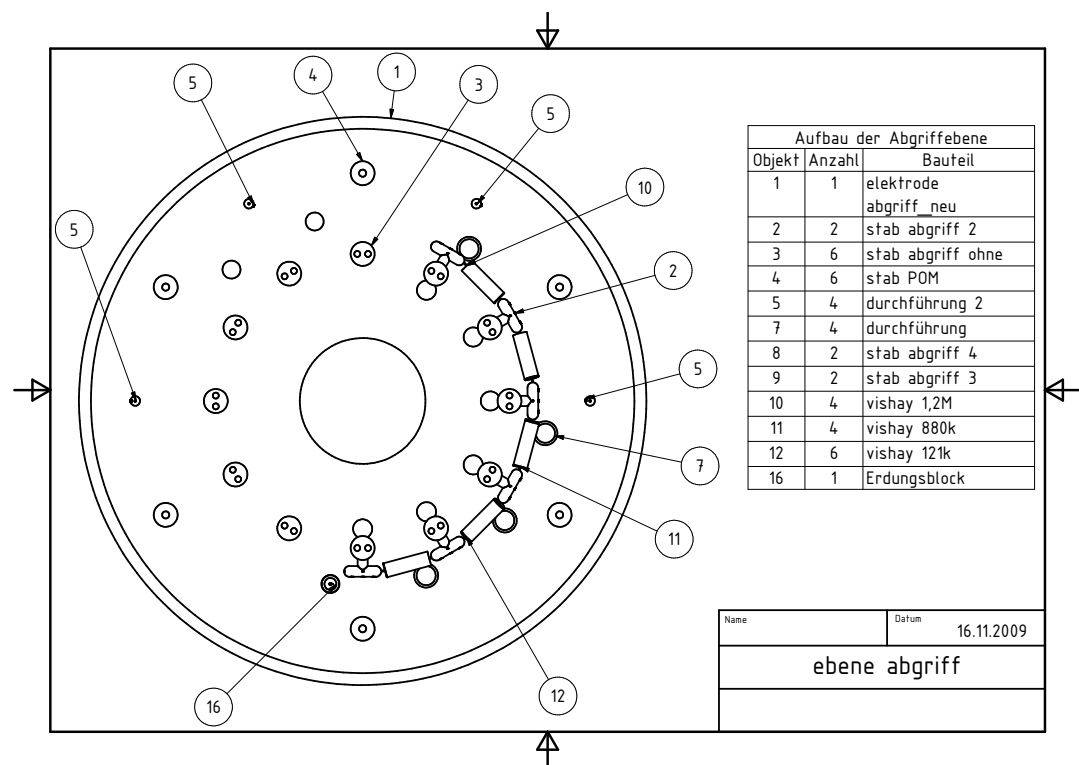
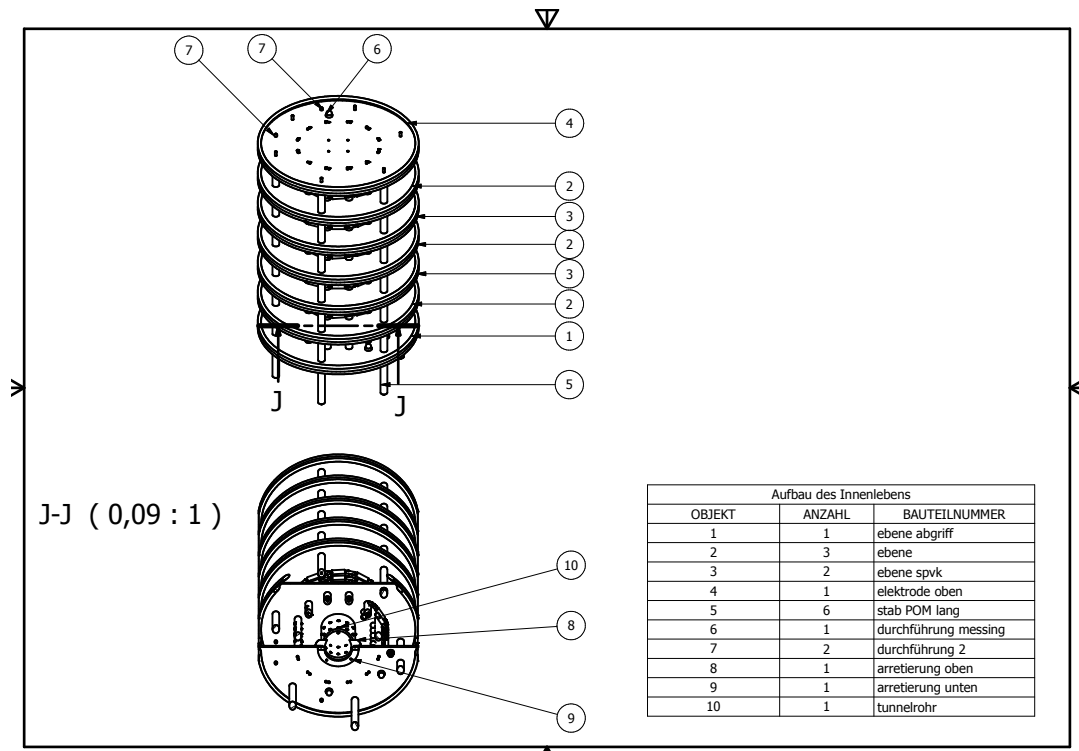
Aufwärmabweichung der Ebene -0,11 ppm

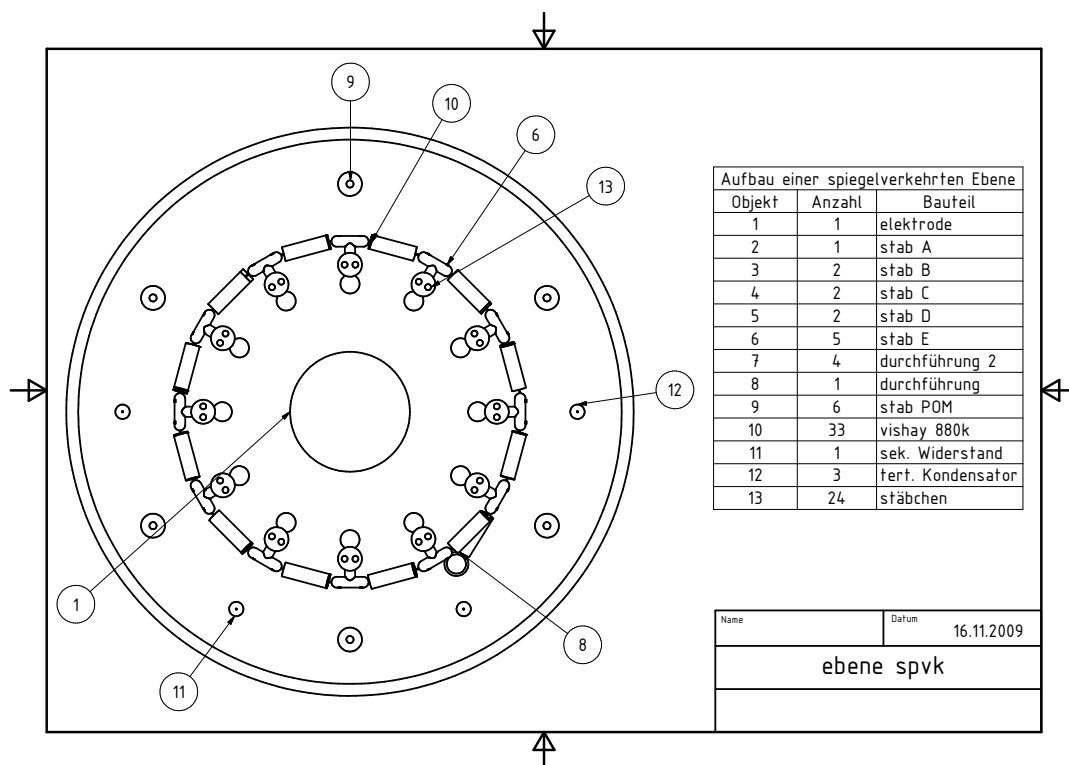
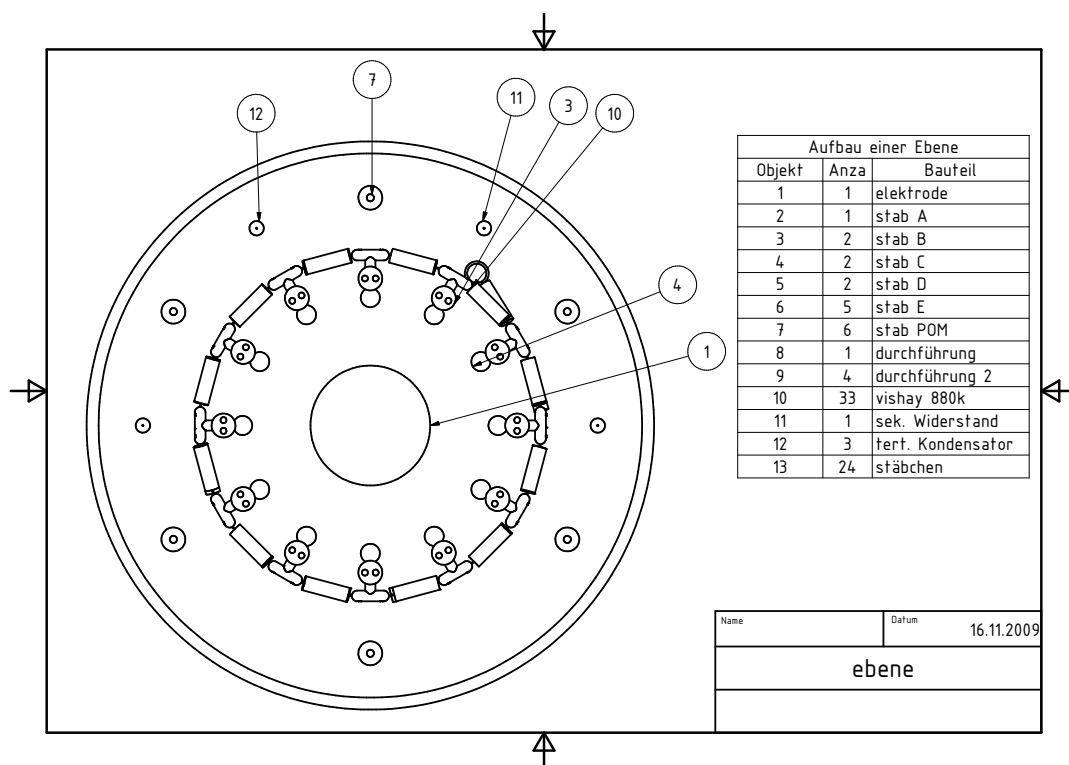
Kondensatoren 12, 13 und 14 mit insgesamt $(7,1 \pm 0,1)$ nF

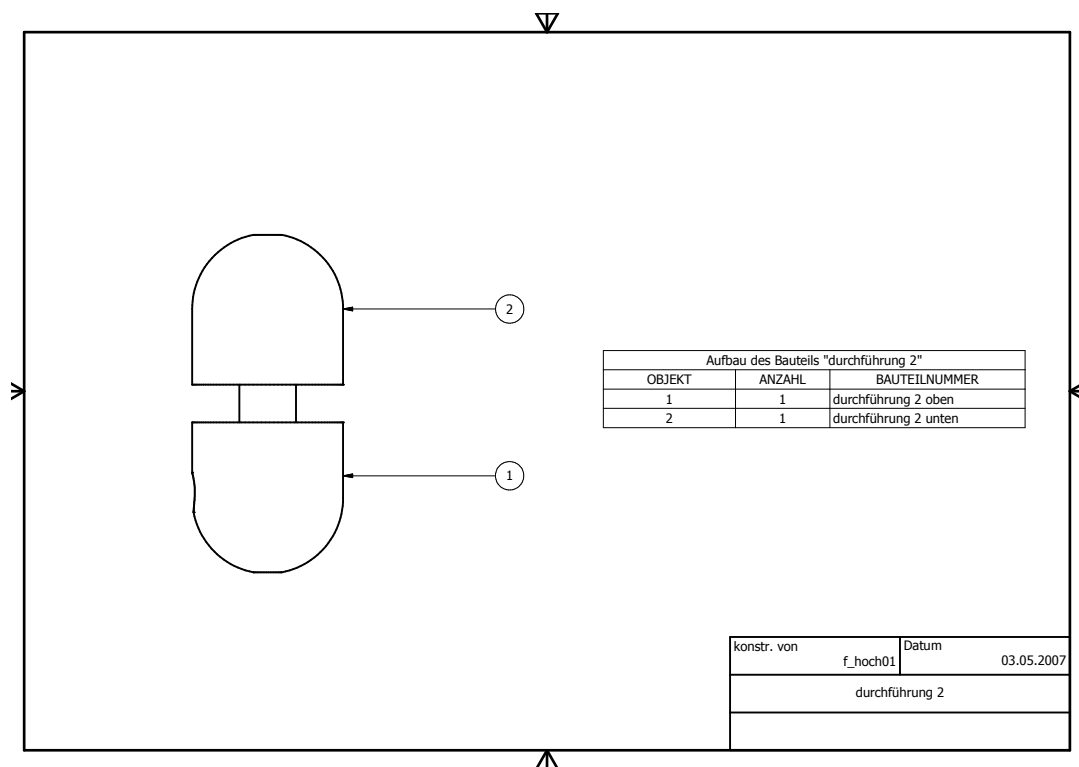
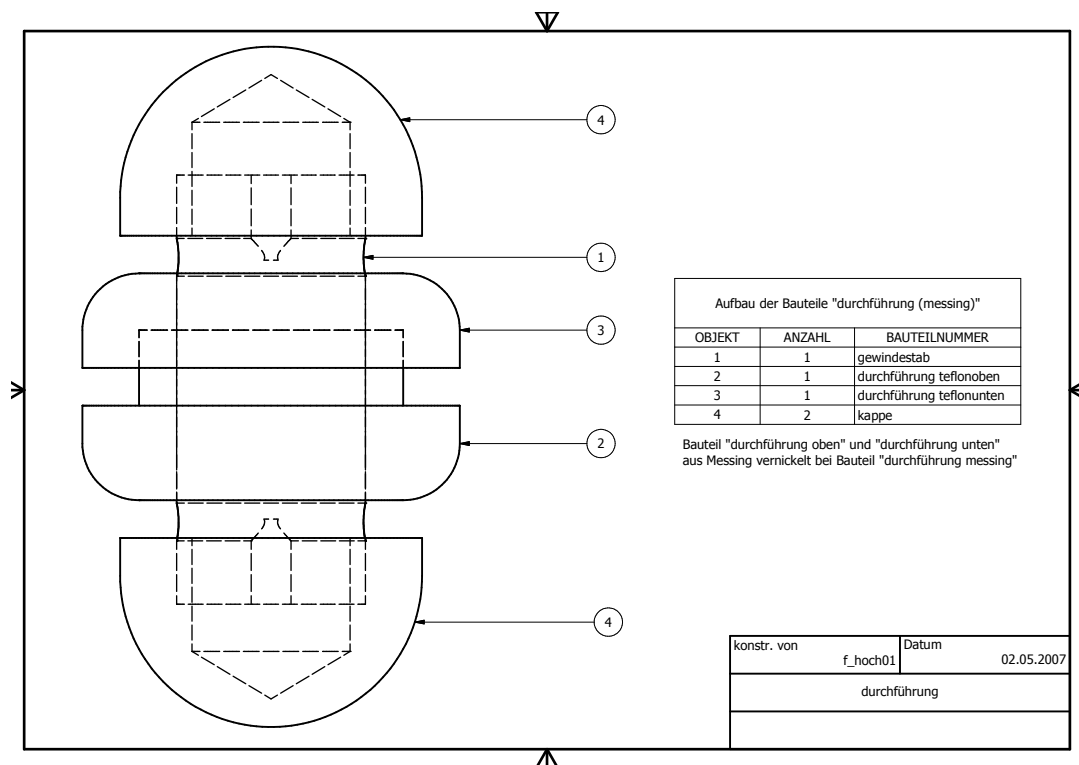
ANHANG B

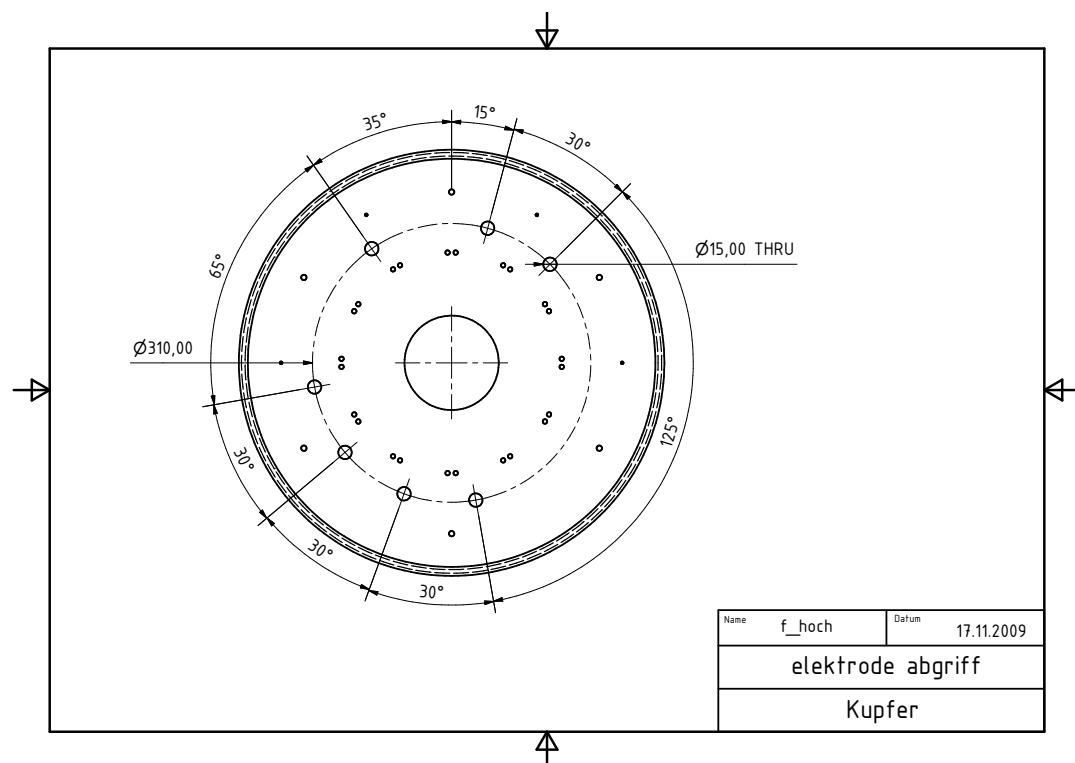
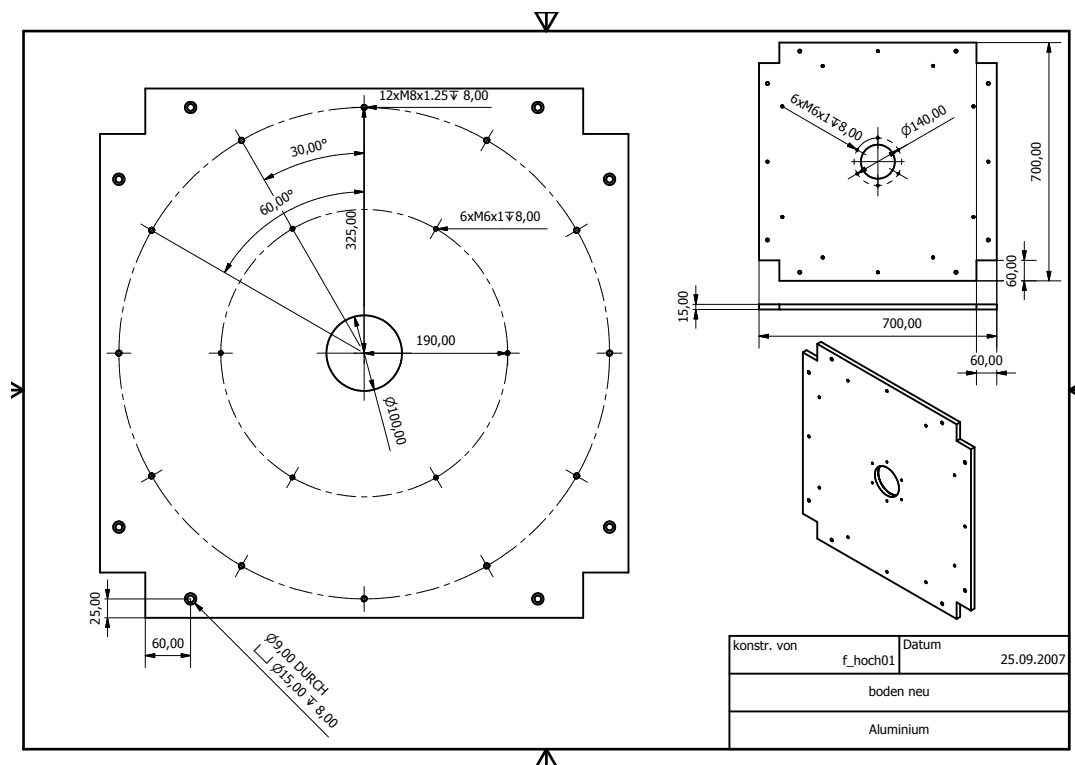
BAUPLÄNE DER MECHANISCHEN KOMPONENTEN

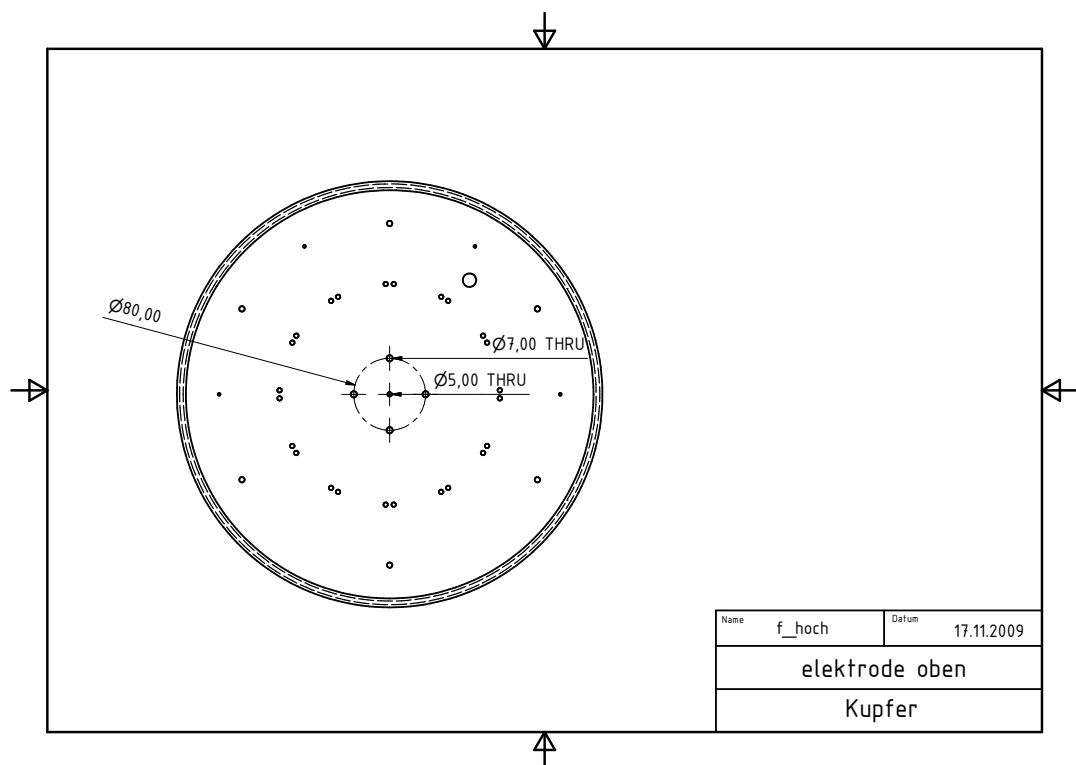
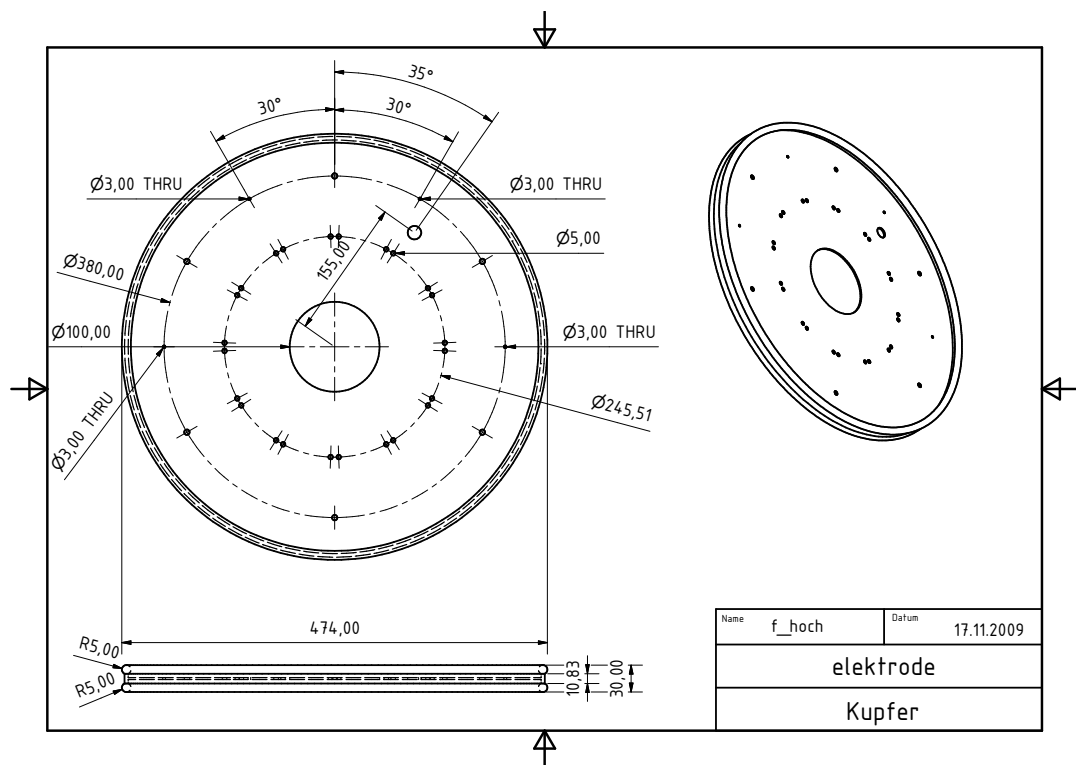
B.1 Innere Bauteile des Spannungsteilers

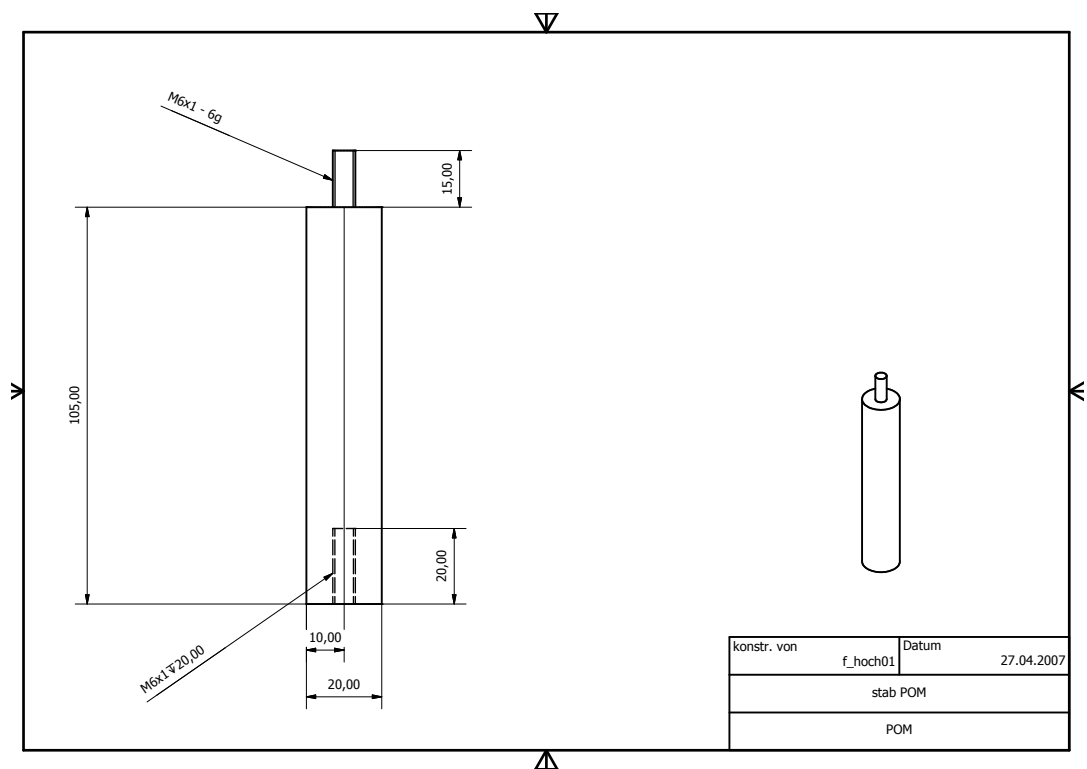
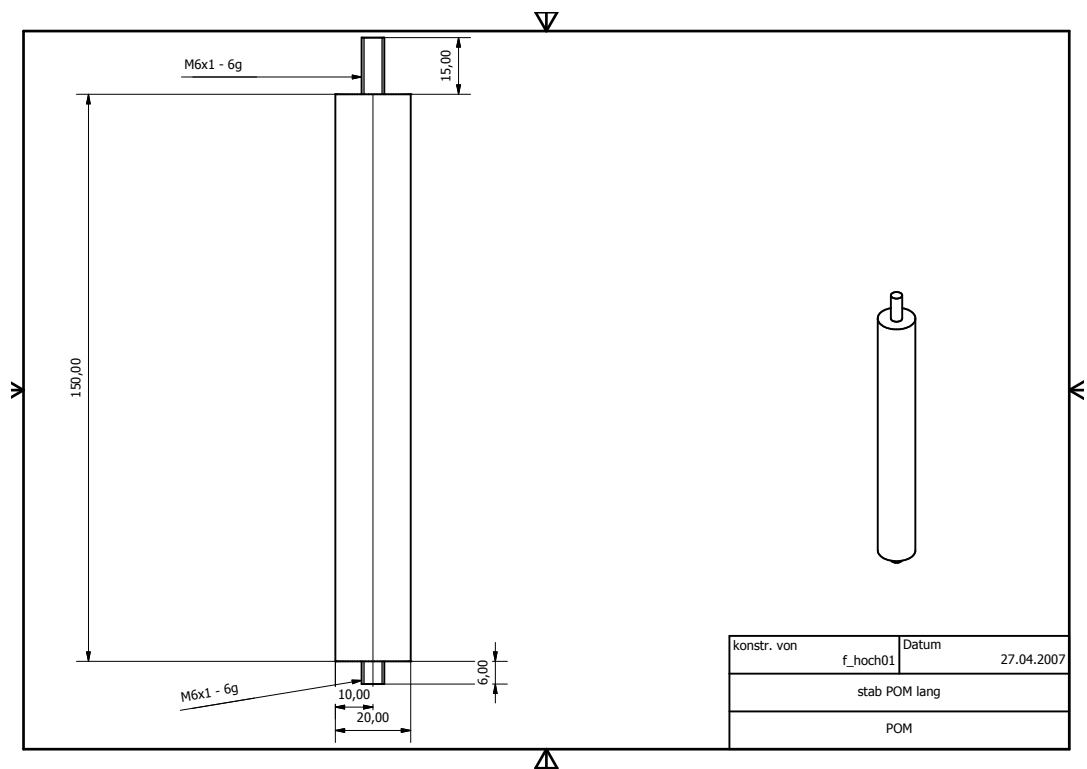


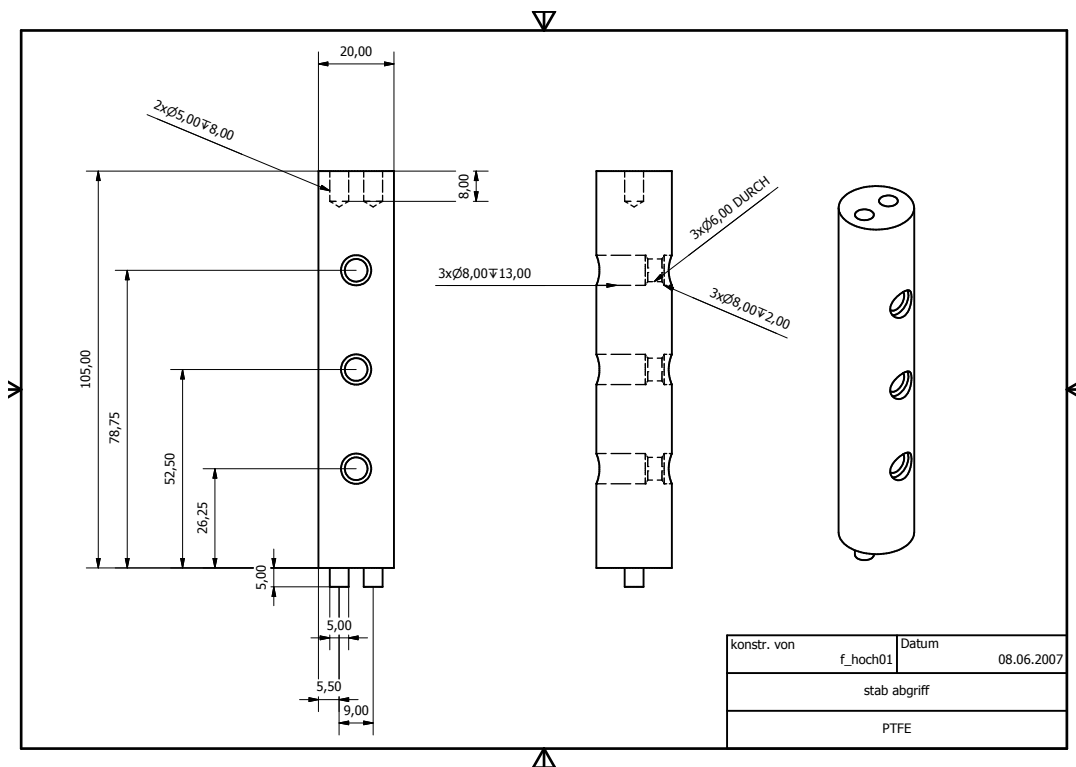
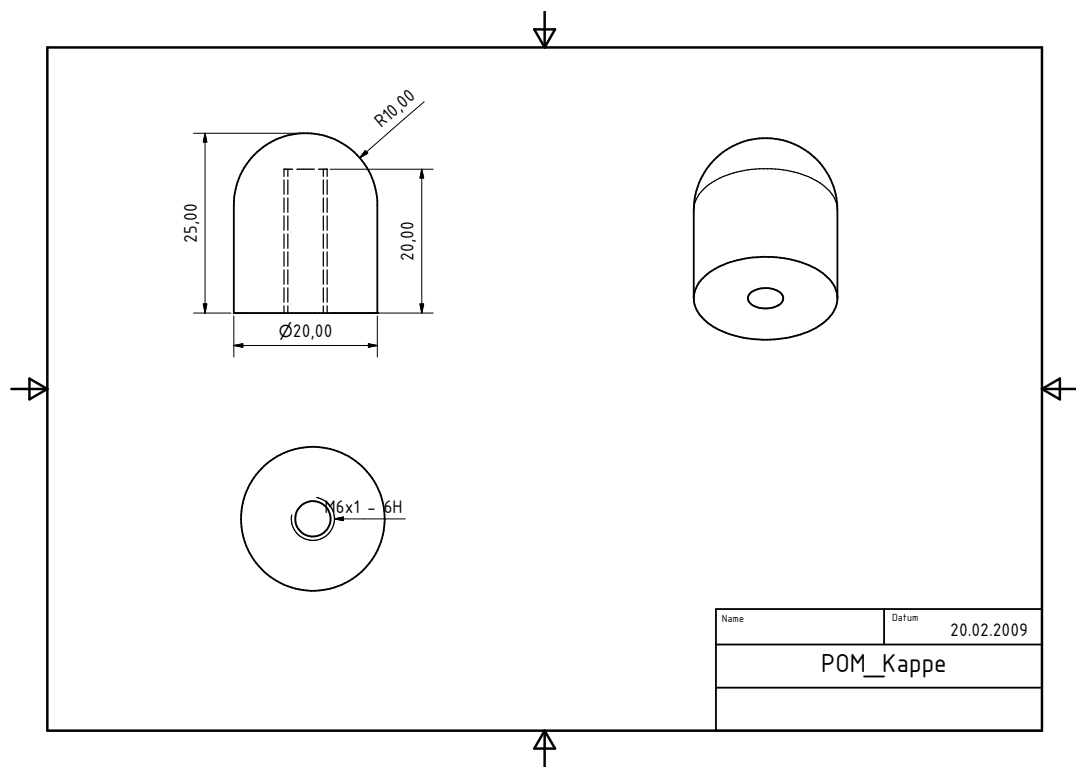


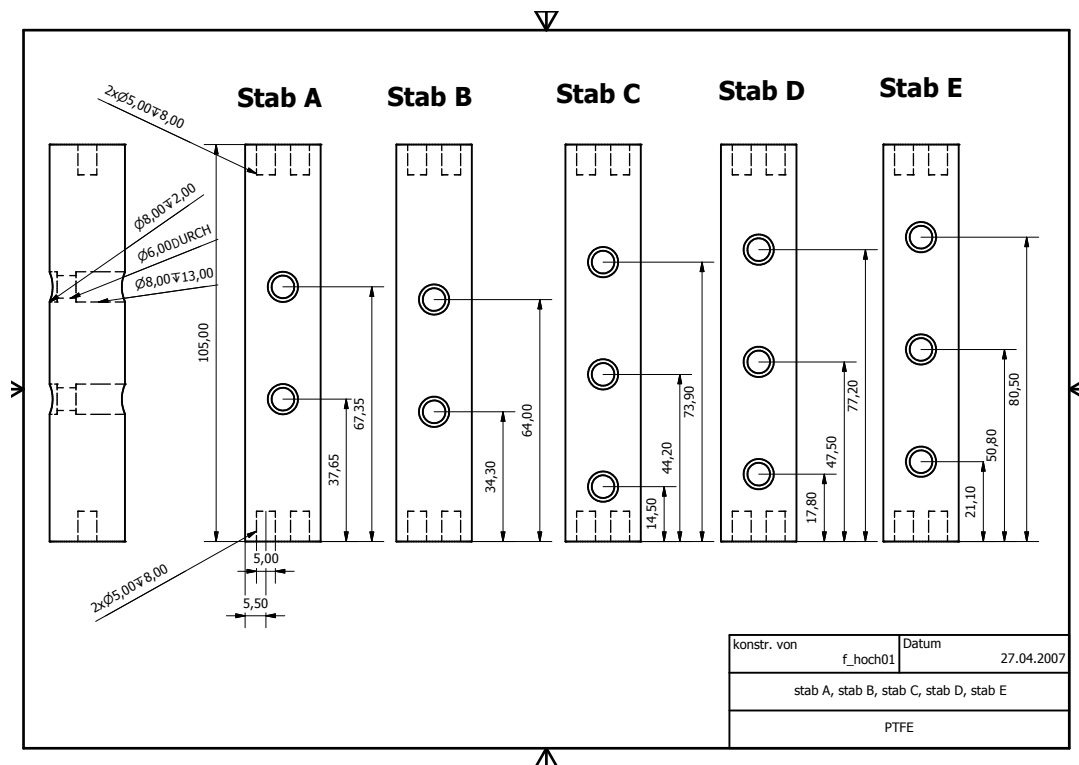
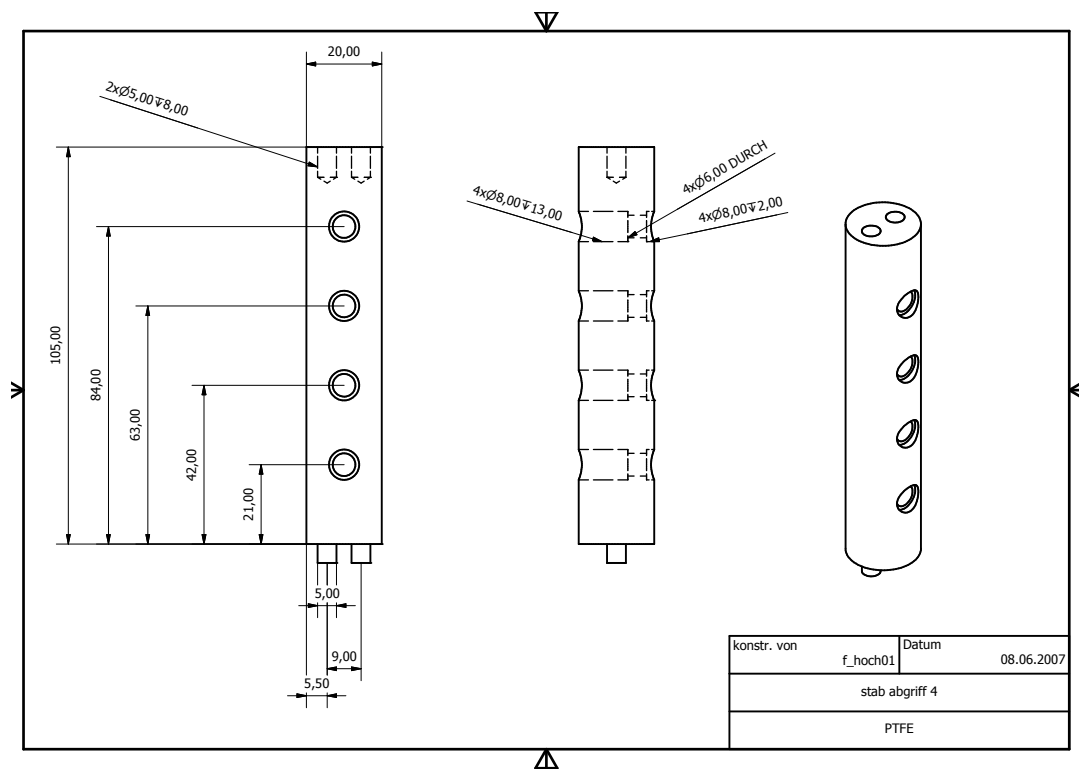




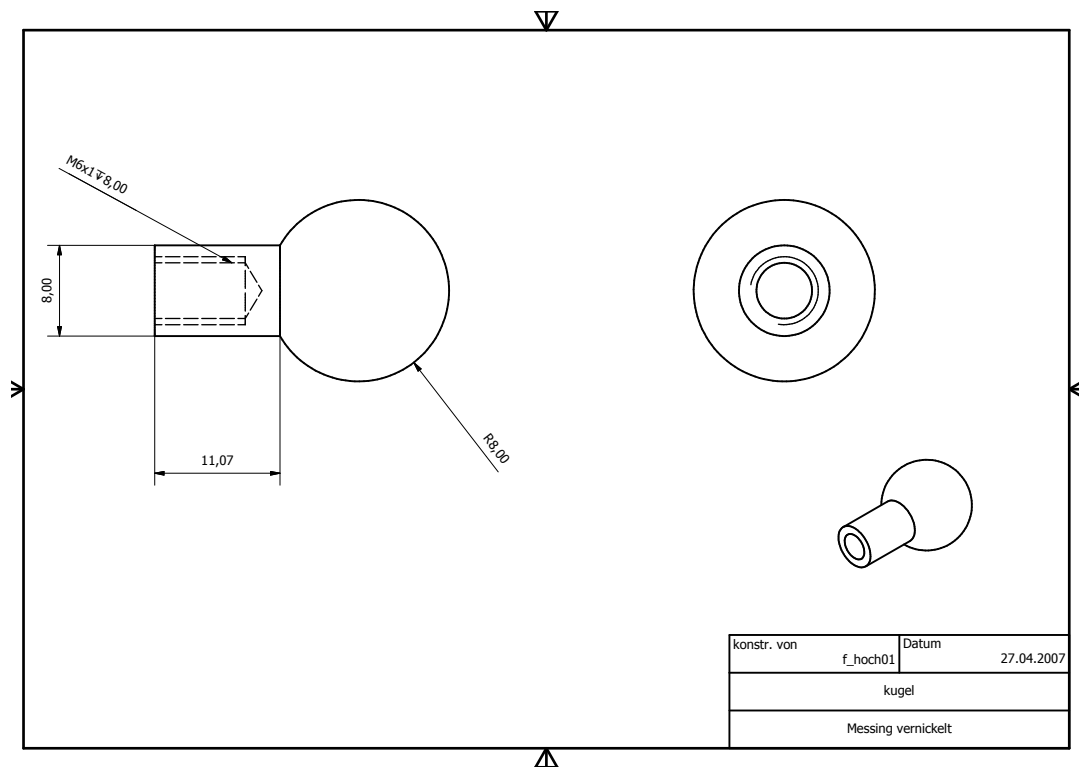
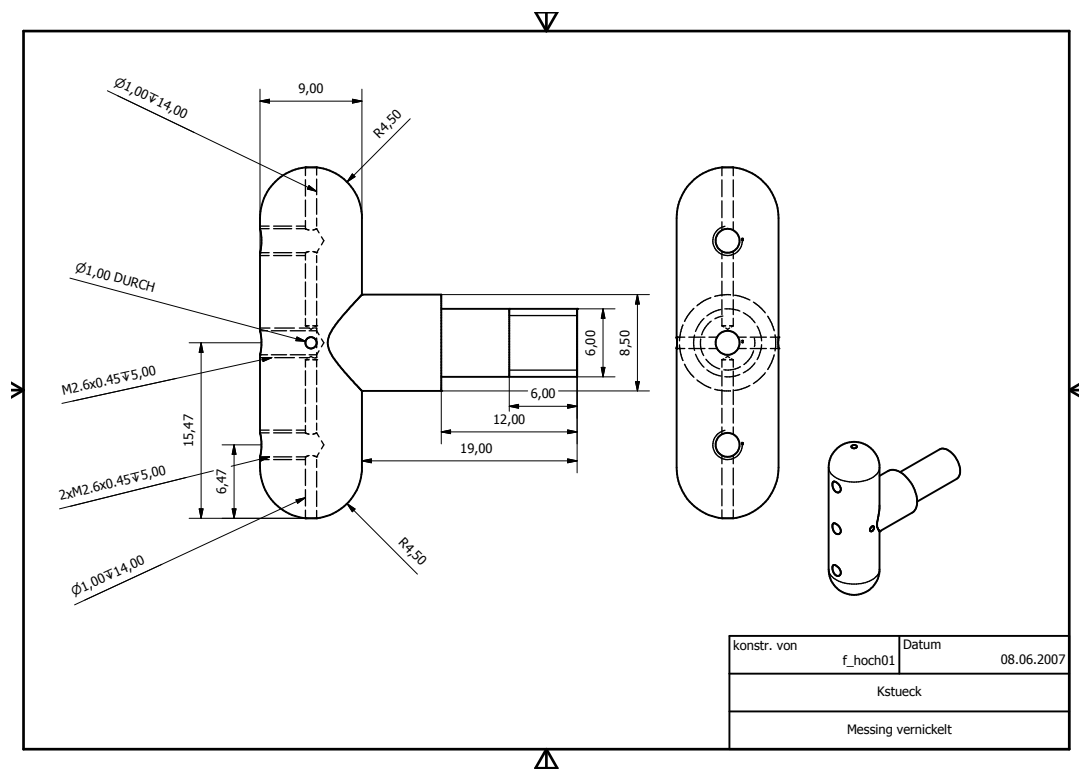


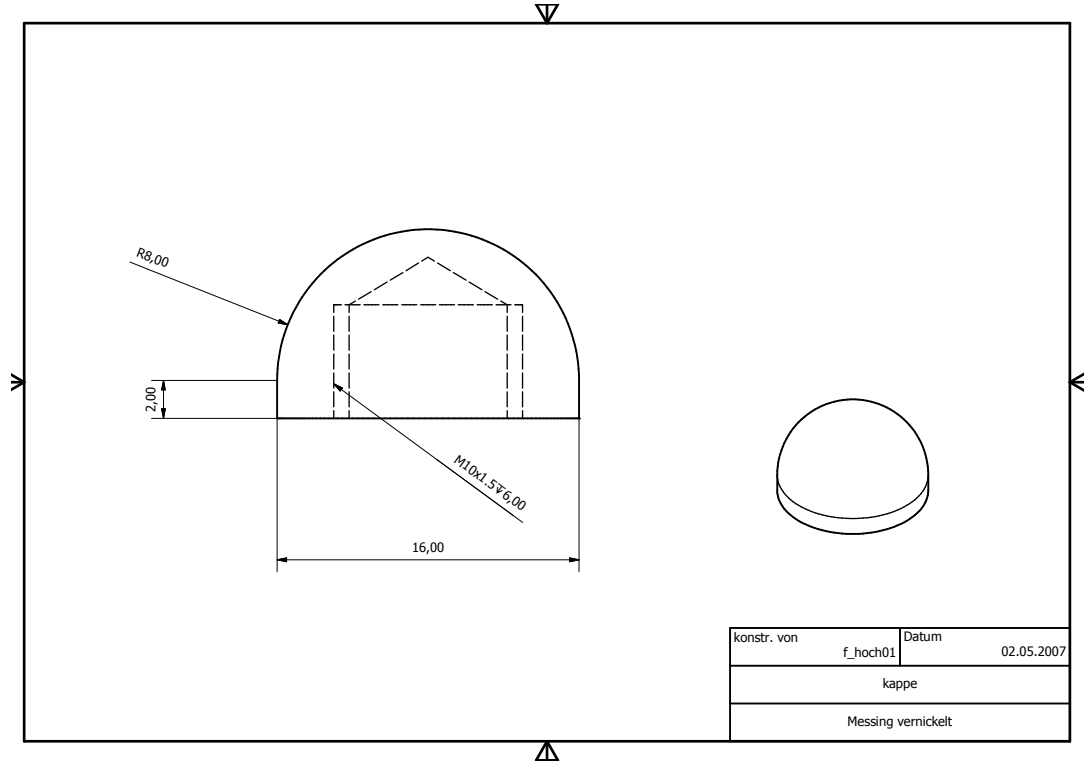
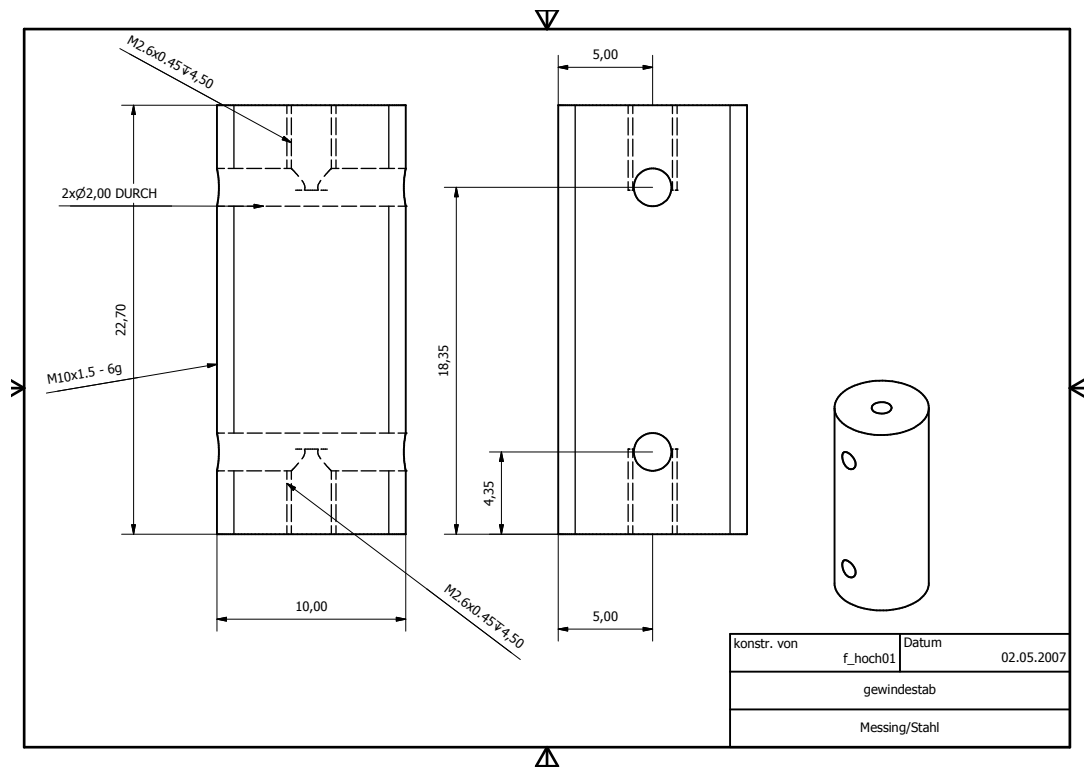


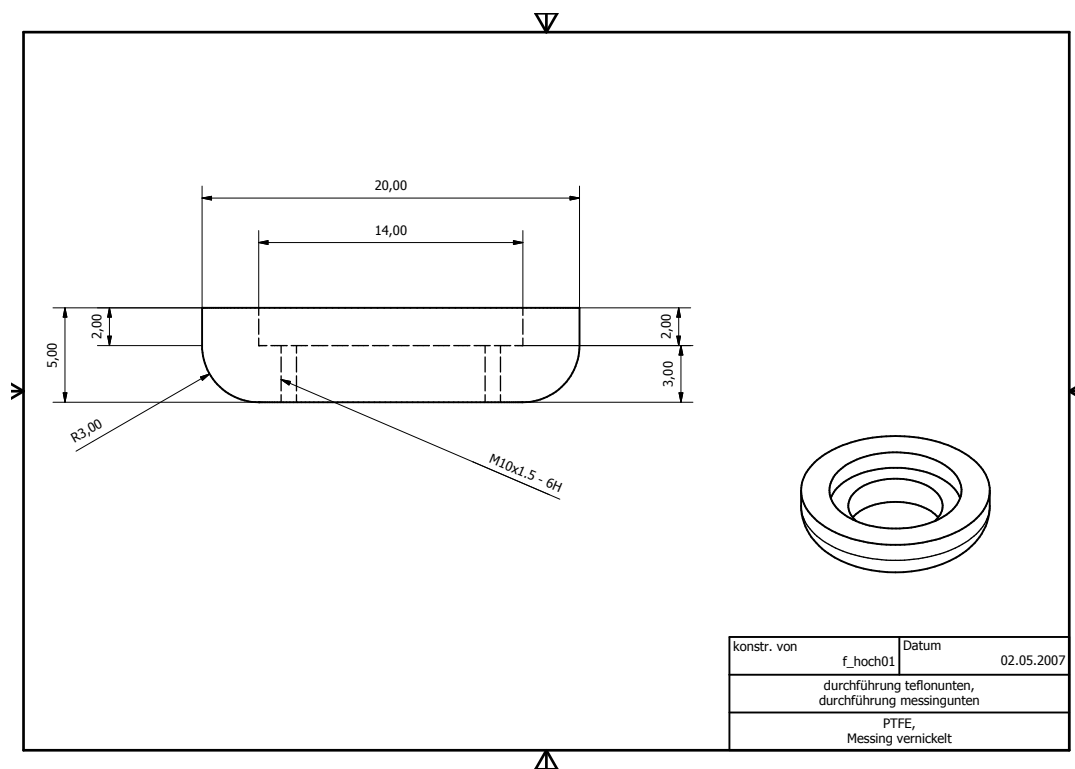
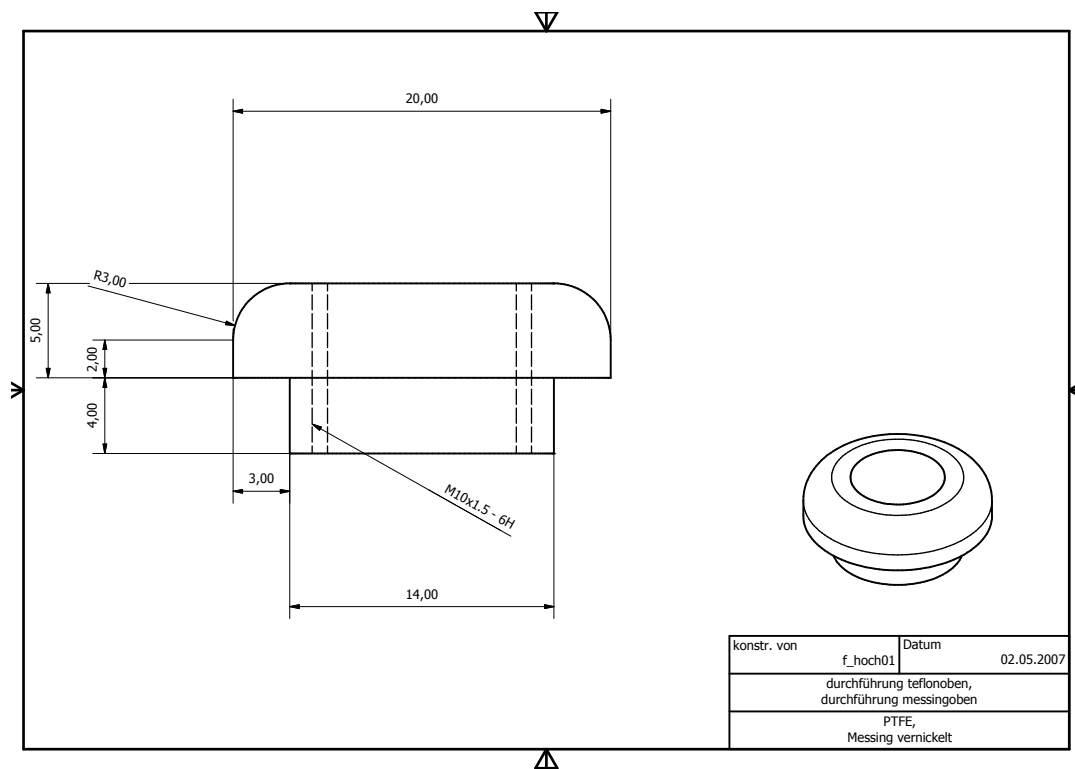


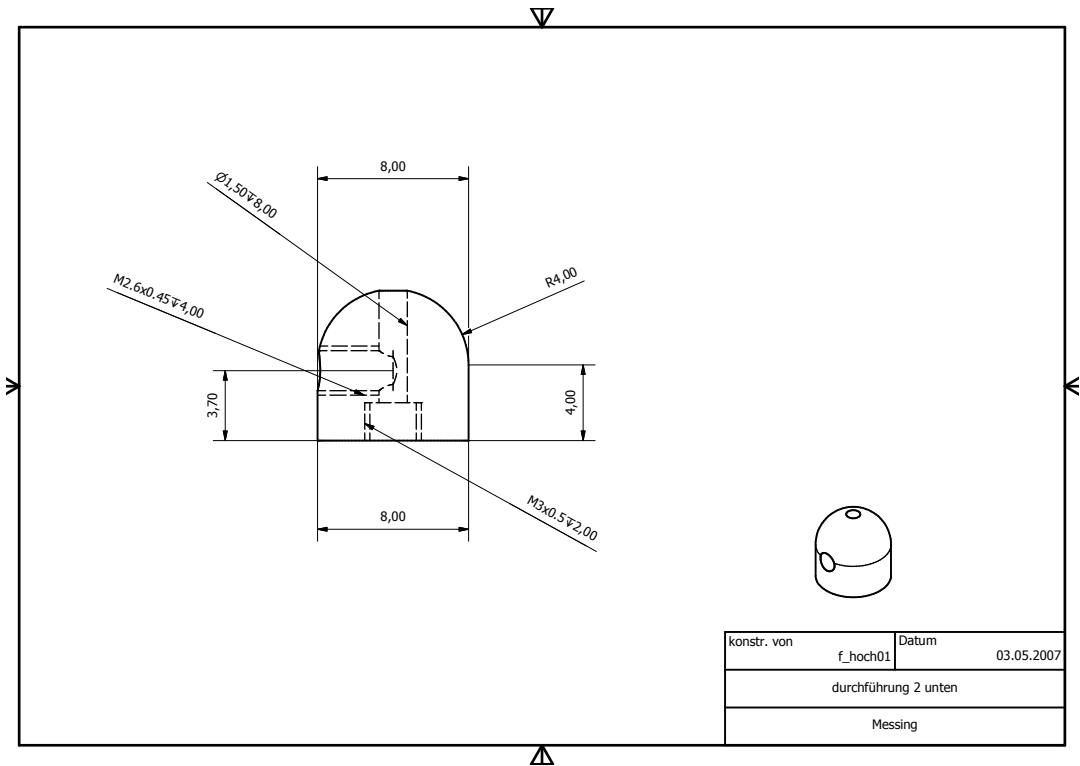
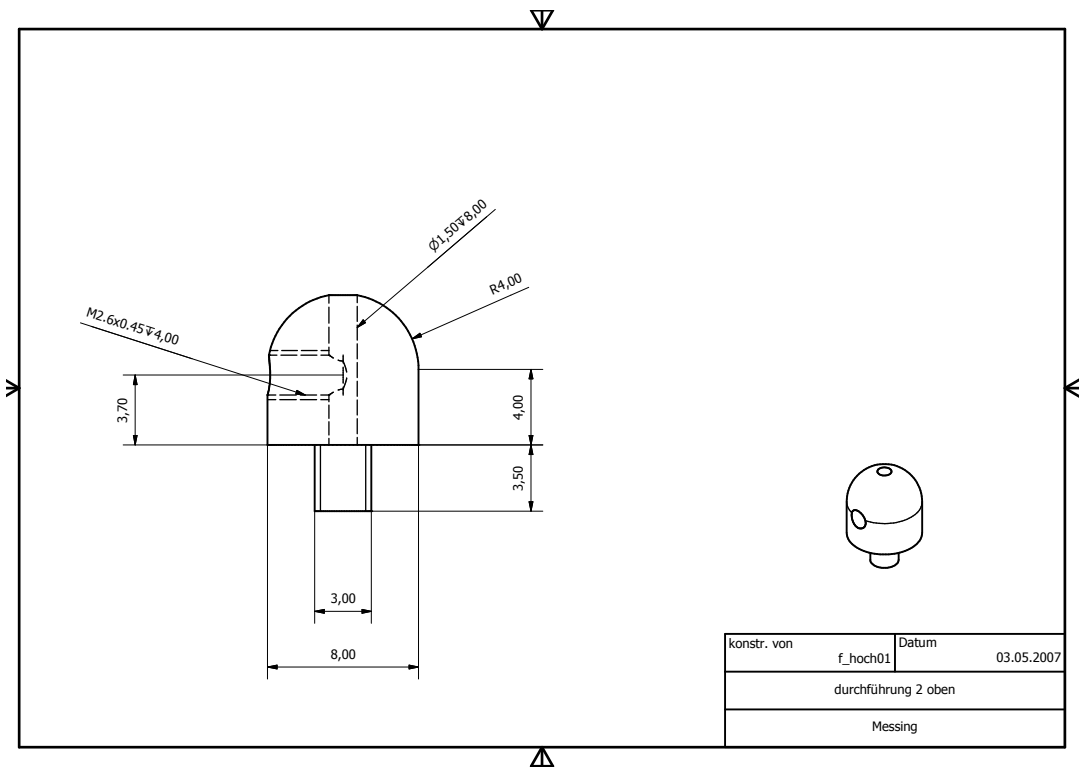


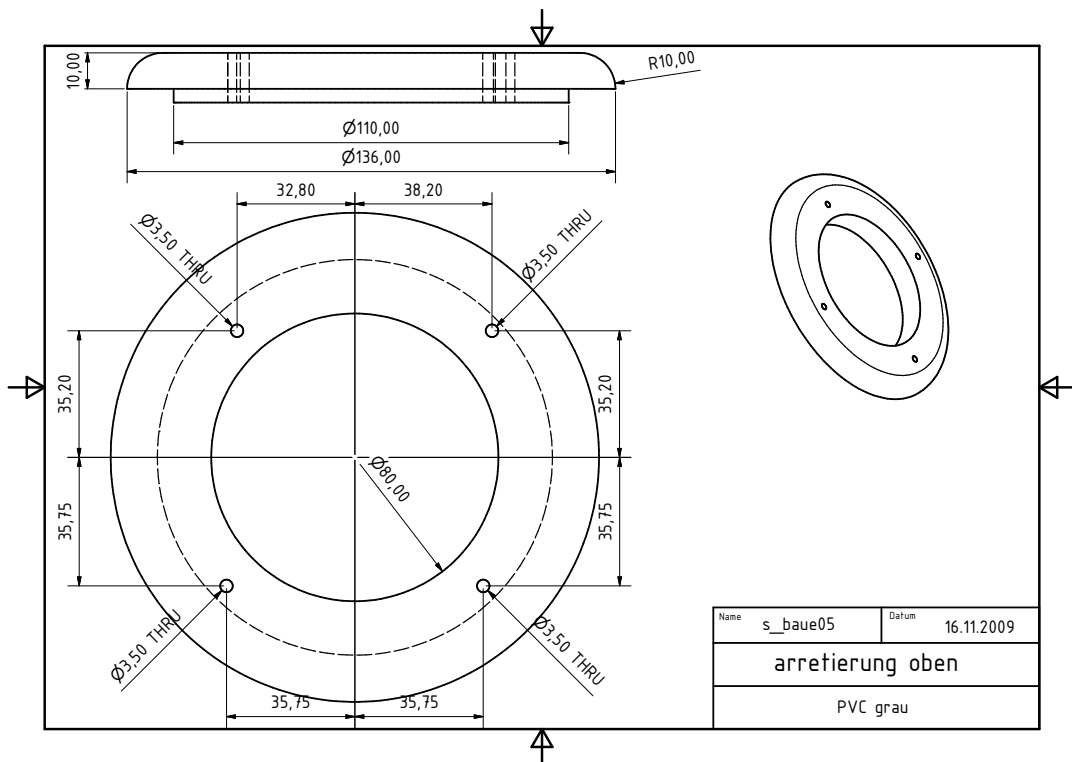
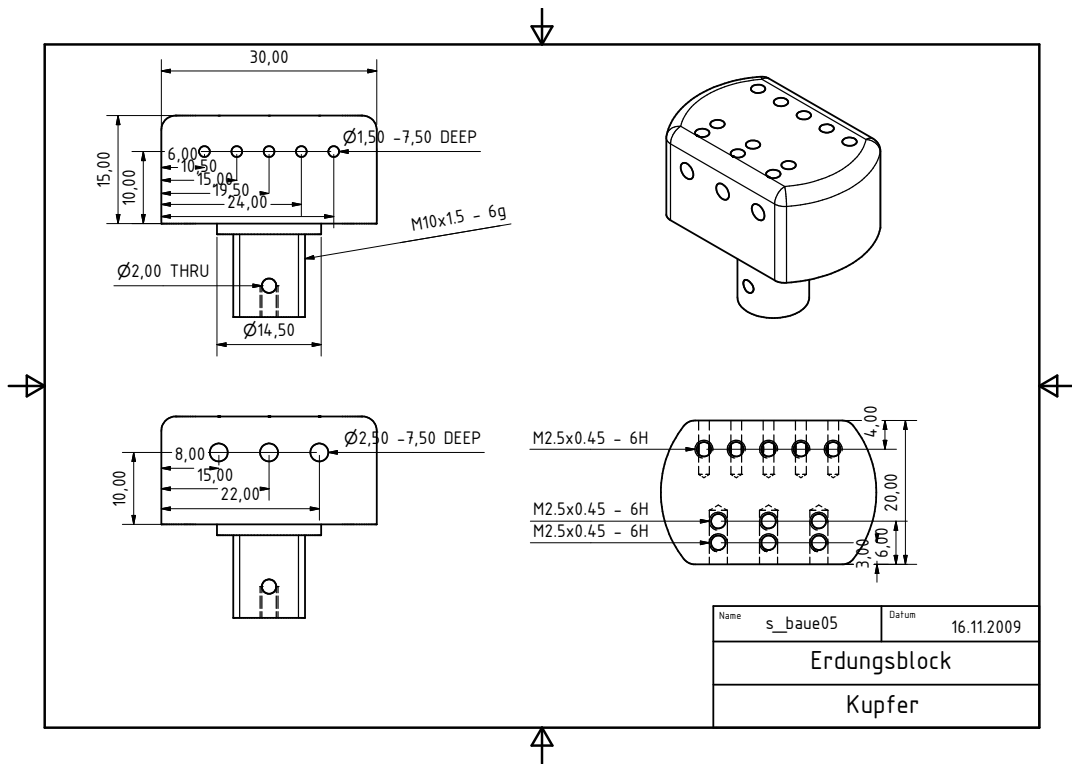


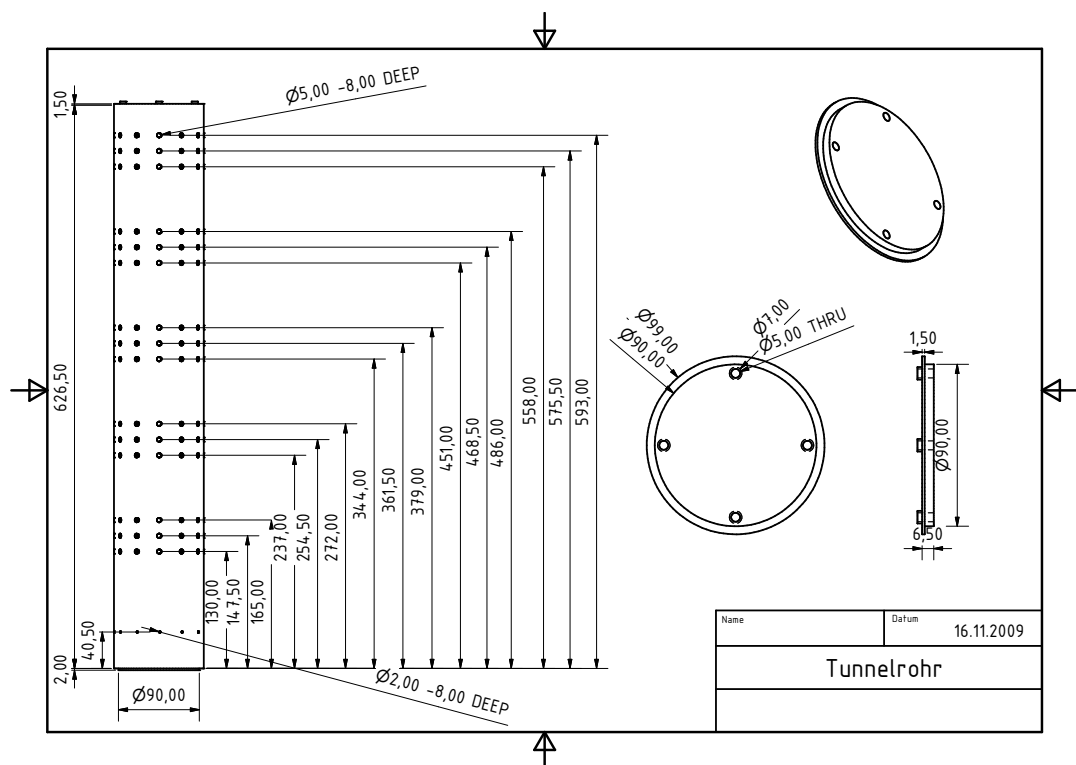
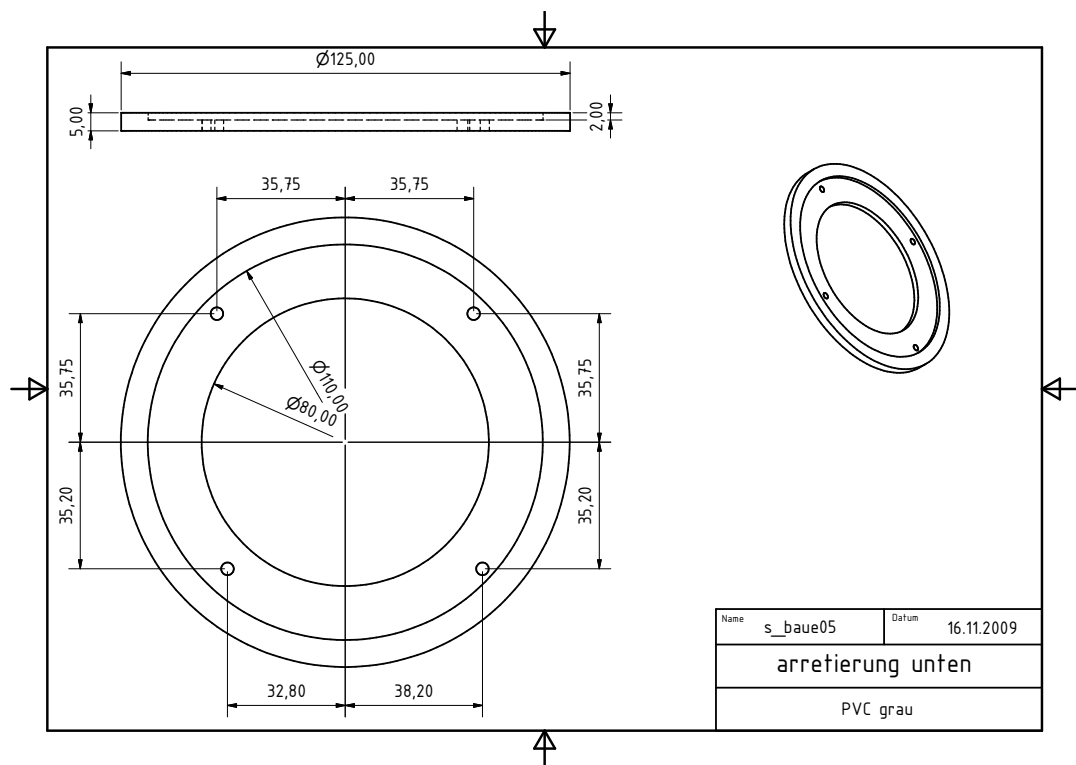




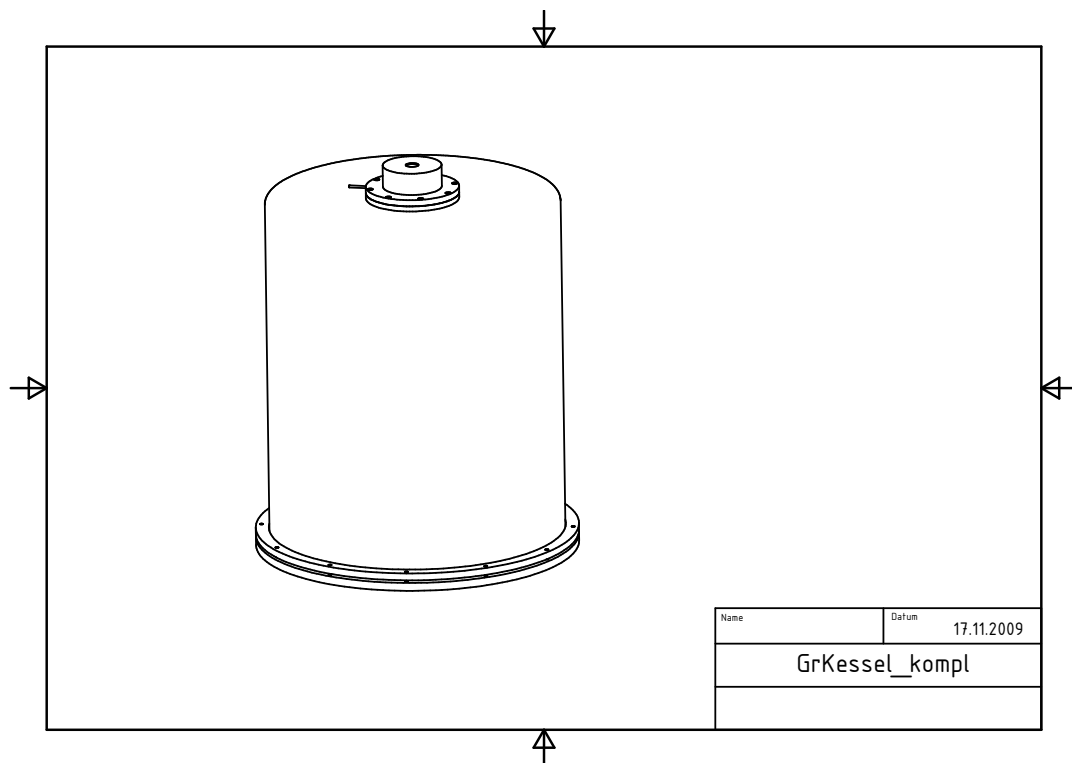
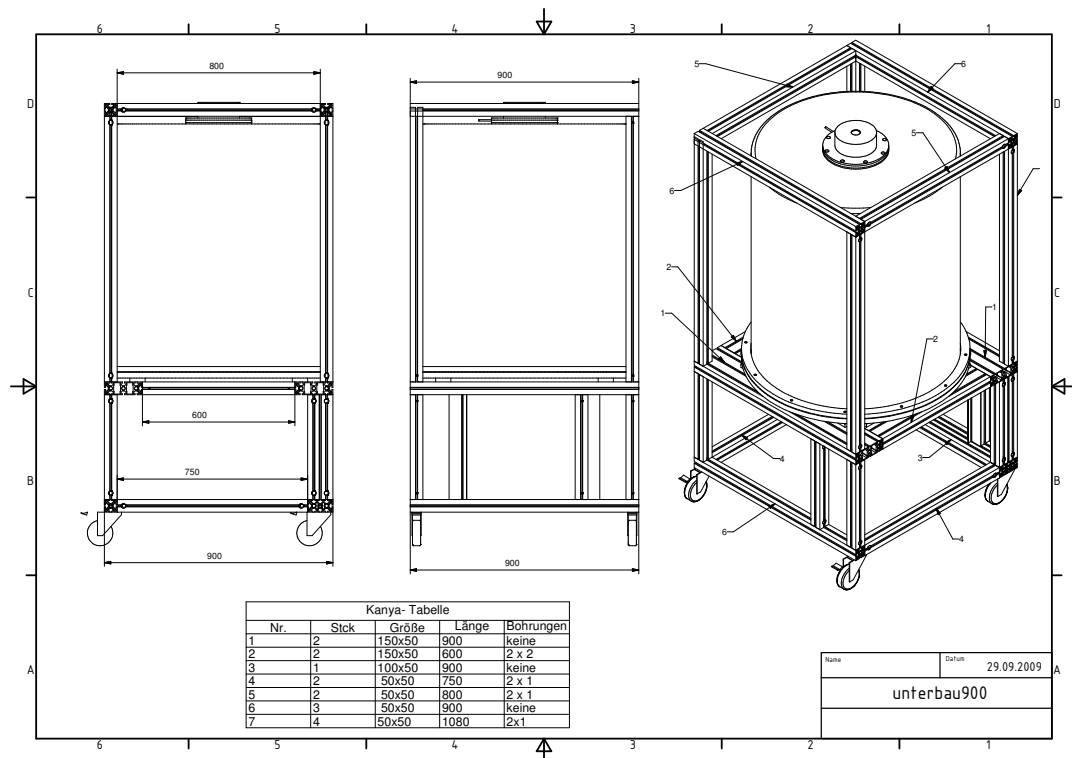


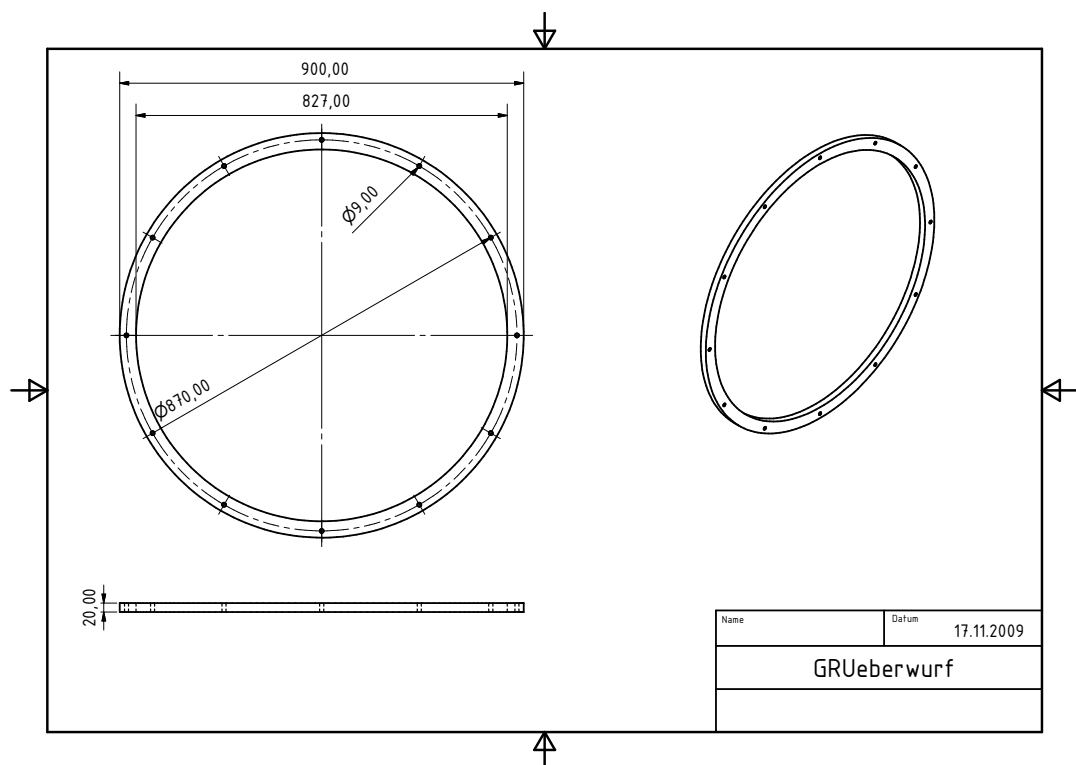
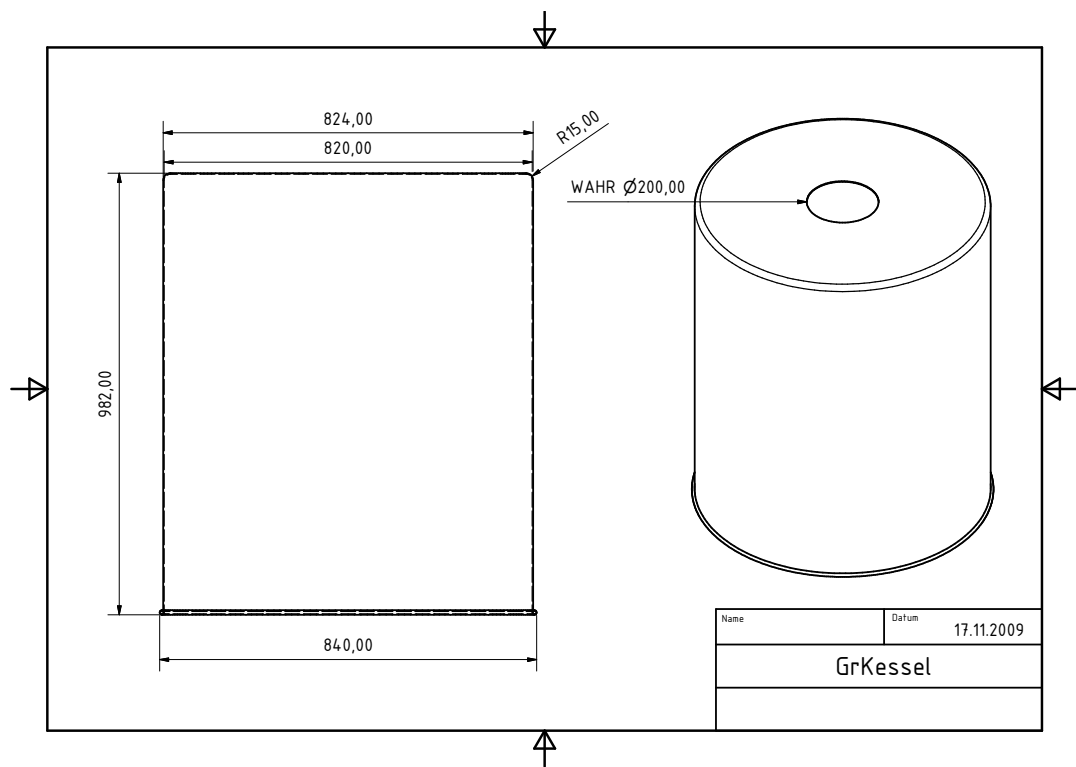


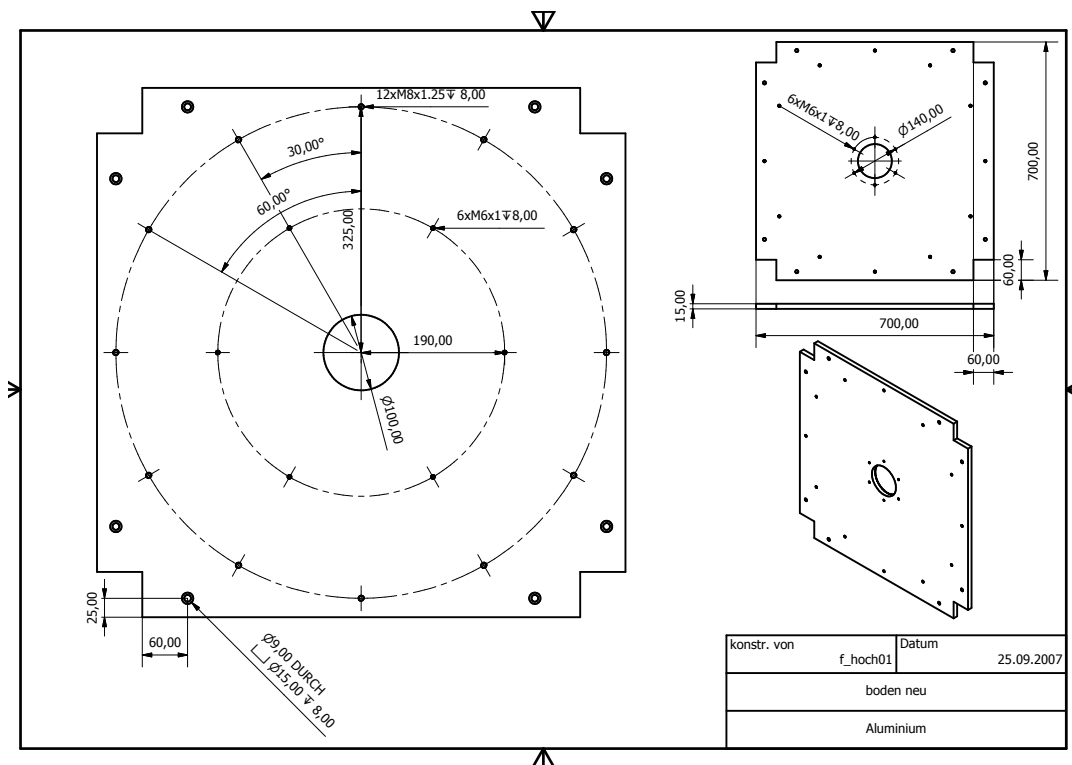
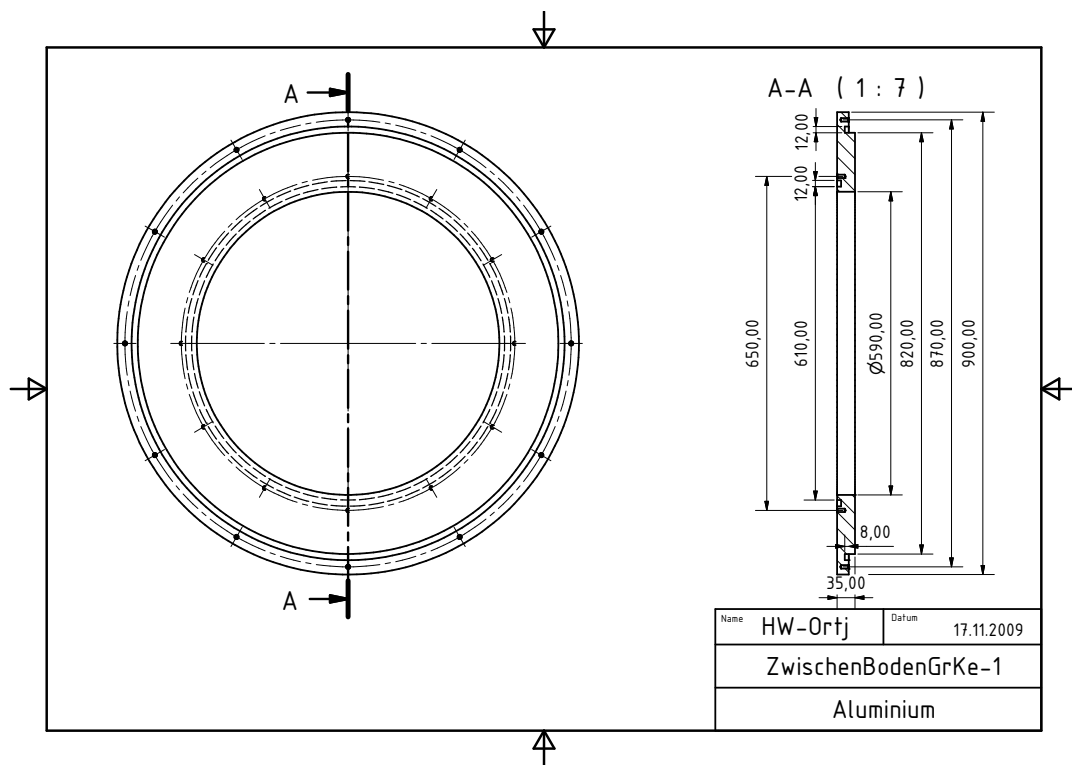


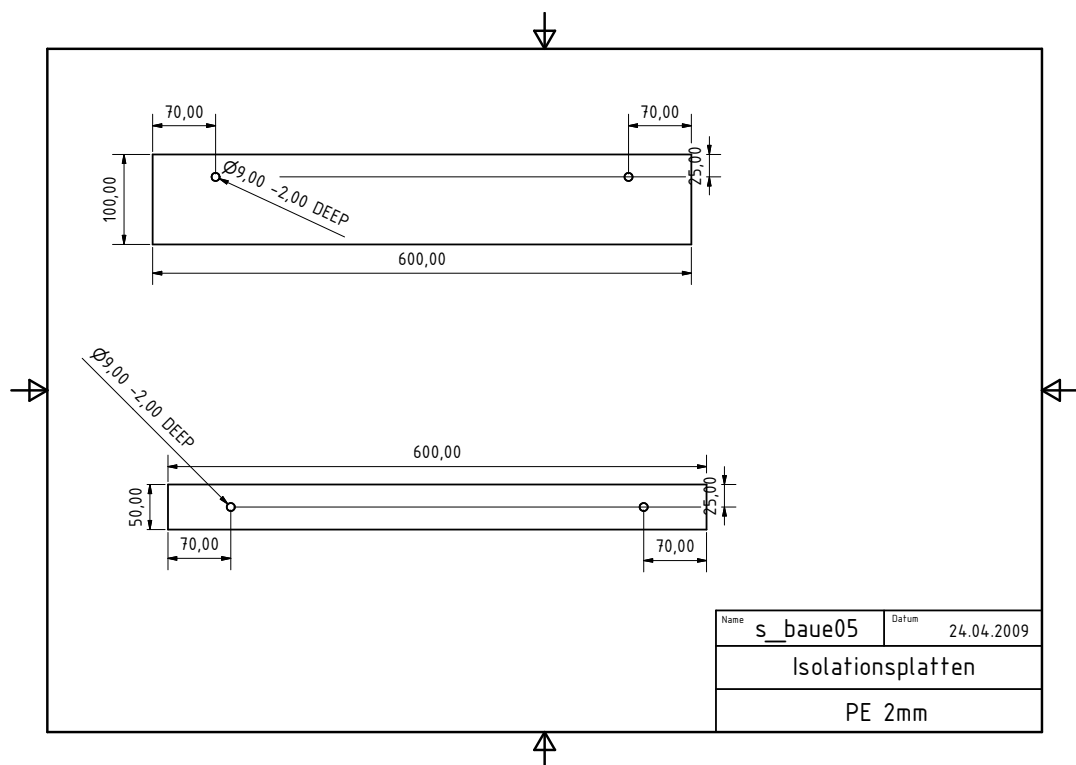
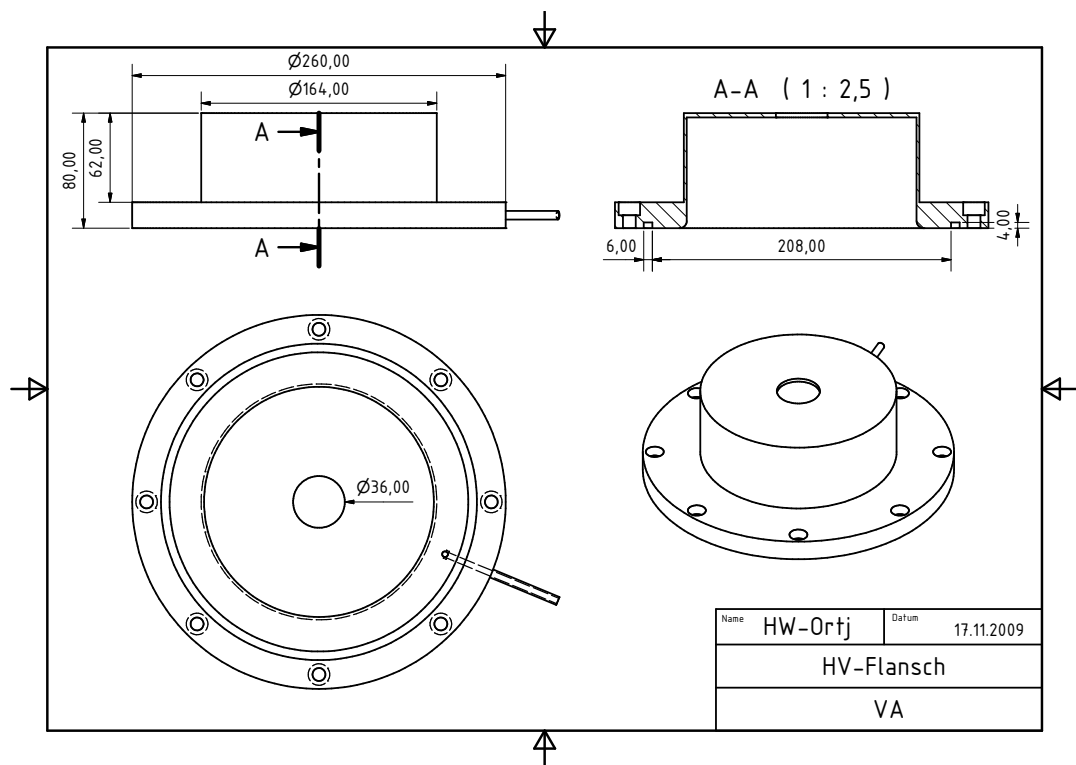


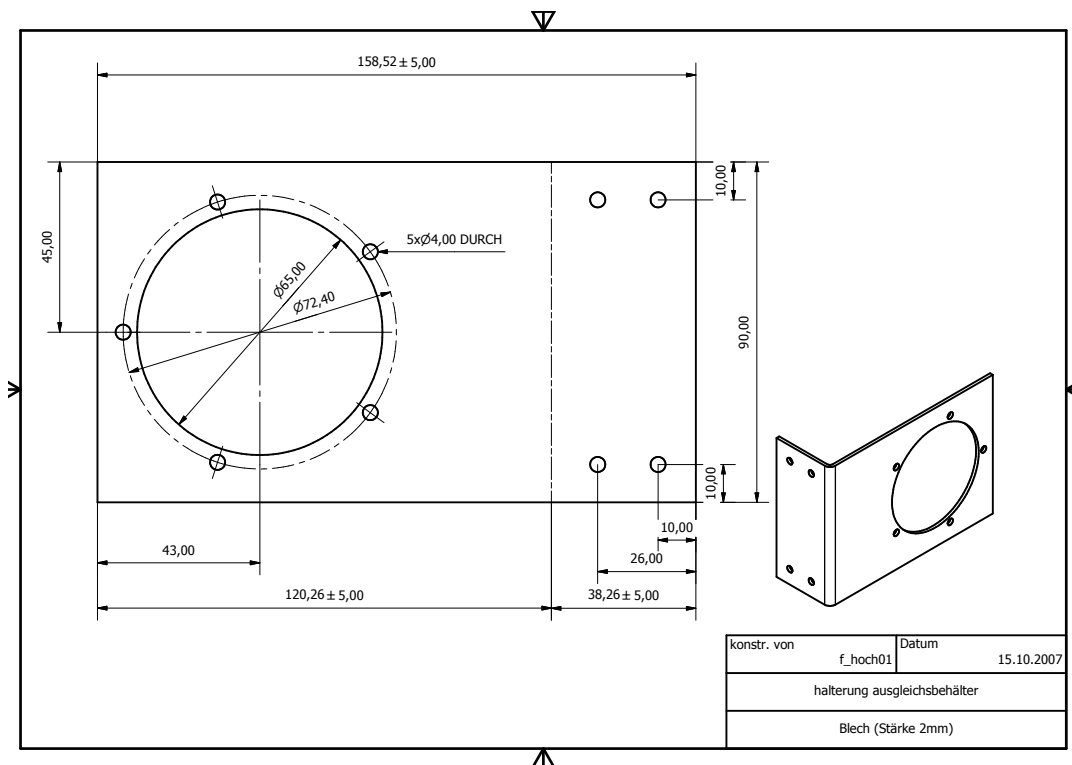
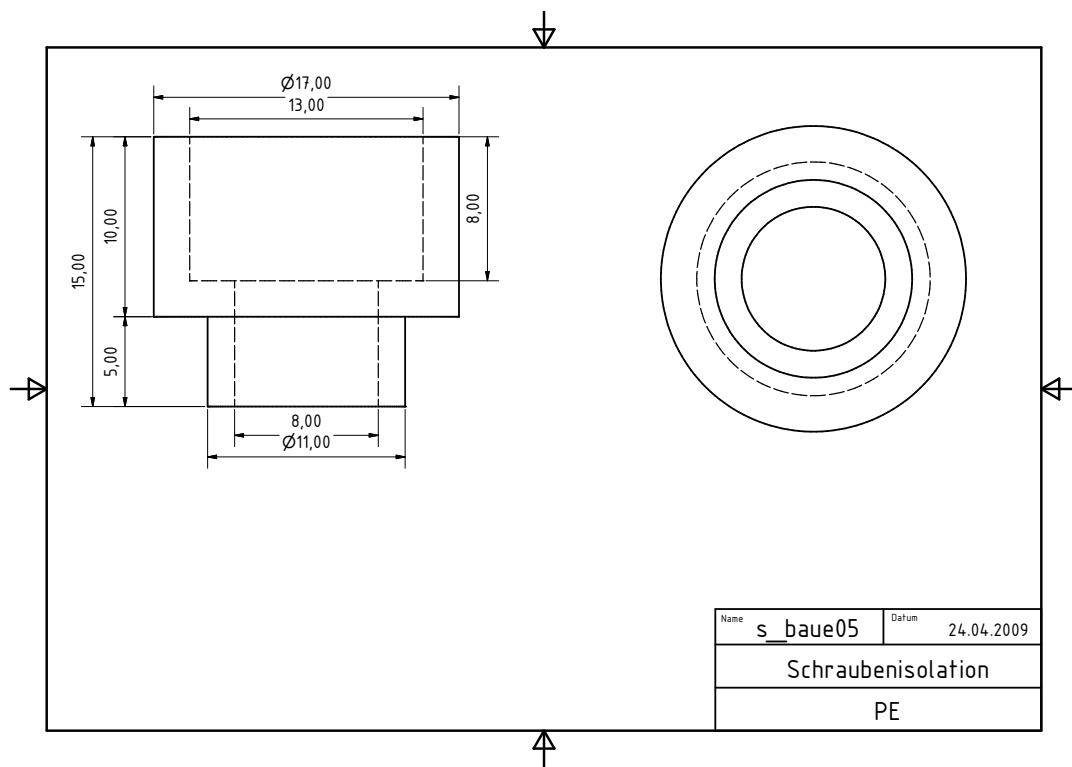
B.2 Transportrahmen und weitere Bauteile des Spannungsteilers













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
- [Bet06] „Nuclear Charge Radius Measurements of Radioactive Beryllium Isotopes“, CERN-INTC-2006-024+INTC-P-214, Apr. 06
- [Bog07] „Vieweb Handbuch Elektrotechnik“, Bögen und Plaßmann (Hrsg.), Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, 4. Auflage 2007
- [CAD04] “Type MS Power Film Resistors“ , CADDOCK Electronics, Inc.,
http://www.caddock.com/Online_catalog/Mrktg_Lit/TypeMS.pdf
abgerufen am 09.07.2009
- [CAD08] „Type MX Precision High Voltage Resistors“
http://www.caddock.com/Online_catalog/Mrktg_Lit/TypeMX.pdf
abgerufen am 09.07.2009
- [cFP12] „FP-RTD-124 AND CFP-RTD-124“ , National Instruments Oktober 2002
- [cFP20] „Compact Field Point (TM), cFP-20xx and cFP-BP-x User Manual“ , National Instruments April 2004 Edition
- [cFP61] „FieldPoint (TM) Operating Instructions FP-AIO-610 and cFP-AIO-610“ , National Instruments 2003-2006
- [Cha14] „Intensitätsverteilung im magnetischen Spektrum der β -Strahlen von Radium B + C“, J. Chadwick, Verh. d. D. Phys. Ges. 16 (1914), 383-391
- [Dav96] „A Review of Measurements of the Solar Neutrino Flux and their Variation.“, R. Davis Jr., Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 48, 284-298 (1996)
- [DON00] „Observation of Tau Neutrino Interactions“, DONUT Collaboration, Phys. Lett. B 504, 218-224 (2001)
- [Fai09] Persönliche Mitteilung des Vishay Mitarbeiter Hero Faienstein, März 2009
- [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 ReferenceDivider Instruction Manual“, Fluke, Mai 1983 Rev. 1 4/84 incl. Manual Supplement 6/99
 - [Flu85] „8508A Digital Reference Multimeter User Manual“, Fluke, July 2002
 - [Fug18] "FuG HCP 18M-35000", FuG-Elektronik Rosenheim
 - [Ger04] „The GERmanium Detector Array for the search of neutrinoless $\beta\beta$ decays of ^{76}Ge at LNGS“, GERDA-Kollaboration, Proposal to the LNGS P38/04, 2004
 - [Giu07] „Neutrino Flavor States and the Quantum Theory of Neutrino Oscillations“, C. Giunti, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34 (2007) R93-R109, arXiv:hep-ph/0608070
 - [Hir89] „Observation of $B8$ solar neutrinos in the Kamiokande-II detector“ K. S. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 63, 16-19 (1989)
 - [Hil10] Dissertation B. Hillen, voraus. 2010
 - [Hoc08] „Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungs-Messung für das KATRIN-Experiment“, F. Hochschulz
 - [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
 - [KAT04] „KATRIN Design Report 2004“, KATRIN Collaboration, FZK Scientific 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
 - [Kra05] „Final results from phase II of the Mainz neutrino mass search in tritium β decay“, C. Kraus, B. Bornschein, L. Bornschein, J. Bonn, B. Flatt, A. Kovalik, B. Ostrick, E.W. Otten, J.P. Schall, T.Thümmel, C. Weinheimer, Eur.Phys.J.C **40** (2005)
 - [Led62] „Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos“, L. M. Lederman et. al., Phys. Rev. Lett. 9, 36 - 44 (1962)
 - [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 to 100 kV“, R. Marx, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume 50, Issue 2, Pages: 426 - 429 (2001)
 - [Mar06] „MARE Microcalorimeter Arrays for a Rhenium Experiment“, MARE-Kollaboration, Mai 2006
 - [Pau30] „Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereinstagung zu Tübingen“, wiedergegeben in: R.Kronis and V.Weisskopf (Eds.), Wolfgang Pauli, Collected Scientific Papers, Vol. 2, New York (1964) 1316-1317

- [PDG08] „Particle Physics Booklet“, C Amsler et al. (Particle Data Group), extracted from the Review of Particle Physics, Physics Letter B 667 (2008)
- [Per75] „Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation“, M. L. Perl et al., Phys. Rev. Lett. 35, 1489 - 1492 (1975)
- [PID01] „LabView PID Control Toolset User Manual“, National Instruments, November 2001 Edition
- [PID02] „Praktische Regeltheorie“, TECON AG
- [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)
- [Ros10] Diplomarbeit von Stephan Rosendahl voraussichtlich 2010
- [Sch10] Diplomarbeit T. Schäfer voraussichtlich 2010
- [Smo08] „Titel“, J. Smollich 2008
- [SNO02] „Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory“, SNO Collaboration, Phys. Rev. Lett. 89, No. 1, 011301 (2002)
- [Sto94] „Taschenbuch der Physik“, Horst Stöcker, Verlag Harri Deutsch, Auflage 1994
- [Thu07] „Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment“, T. Thümmeler, 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. Thümmeler et al., arXiv:0908.1523v1, 11 August 2009
- [Val09] „Spectrometer-related background processes and their suppression in the KATRIN experiment“, Dissertation K. Valerius, 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 ± 2 ppm/K, Tolerance of ± 0.001 % and Load Life Stability of ± 0.005 %“, Vishay
<http://www.vishay.com/docs/63006/hmetlab.pdf> (abgerufen am 17.04.2008)
- [Wol78] „Neutrino oscillations in matter“, L. Wolfenstein, Physical Review D, Volume 17, Issue 9, Pages 2369-2374 (1978)
- [Zbo10] Dissertation von M. Zboril, voraussichtlich 2010

Danksagung

Ich möchte mich bei der gesamten Arbeitsgruppe von Prof. Weinheimer für eine wunderbare Zeit während meiner Diplomarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt Prof. Weinheimer für die Vergabe des sehr interessanten und spannenden Themas meiner Diplomarbeit und dafür dass er sich auch an stressigen Tagen immer Zeit für ein Gespräch genommen hat.

Ich danke Prof. Khoukaz, dass er sich als Koreferent zur Verfügung gestellt hat.

Ein besonderer Dank gilt der gesamten Hochspannungsgruppe aus Thomas, Stephan, Marcus und Matthias. Dabei möchte ich mich besonders bei Stephan für seine ständige Hilfsbereitschaft und seine Unterstützung beim Aufbau und Transport des Spannungsteilers, bedanken.

Ich möchte mich bei Frank bedanken für die sehr gute Betreuung, auch nach seiner Tätigkeit in dieser Arbeitsgruppe.

Ich danke Hans-Werner Ortjohann, Herr Bourichter und der gesamten Feinmechanischen Werkstatt für die Hilfe bei der Planung und Fertigung vieler Bauteile. Besonders möchte ich Ralf Tombrock für die sehr aufwendige Fertigung der Kupferelektroden danken.

Ich danke Roland Berendes und der gesamten Elektronischen Werkstatt für die schnelle Anfertigung vieler Kabel und der kurzfristigen Reparatur von Geräten. Auch möchte ich mich für die ständige Diskussionsbereitschaft rund um Fragen der Elektrotechnik bedanken.

Ich danke Rainer Marx und Matthias Schmidt von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für die viele Geduld und ständige Hilfsbereitschaft während des Umbaus und der Kalibrierung der Spannungsteiler.

Ich bedanke mich bei Sebastian, Cyrano und allen netten Menschen die mich durch mein Studium begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern die mich immer unterstützt und ermutigt haben auf all meinen Lebenswegen.

Den größten Dank möchte ich meiner Frau Melanie, für ihr Verständniss und ihre fortwährende Unterstützung im gesamten Studium, aussprechen. Besonders in stressigen Zeiten half sie mir nach vorne zu schauen und schaffte es mich zu motivieren.