

Weiterentwicklung der Präzisions-Hochspannungs-Messung für das KATRIN-Experiment

Diplomarbeit in Physik

von Frank Hochschulz

angefertigt im Institut für Kernphysik

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

17. September 2008

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

Ort, Datum

Unterschrift

Referent: Prof. Dr. C. Weinheimer

Koreferent: Prof. Dr. J. P. Wessels

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1. Neutrinophysik	4
1.1.1. Entdeckung des Neutrinos	4
1.1.2. Neutrino-Flavour-Oszillationen	6
1.1.3. Kinematische Neutrinomassen-Bestimmung	10
1.2. Das KATRIN-Experiment	12
1.2.1. Die Quelle	14
1.2.2. Die Pumpstrecke	15
1.2.3. Die Spektrometer	15
1.2.4. Der Detektor	17
1.3. Überwachung der Retardierungsspannung beim KATRIN-Experiment	17
1.3.1. Anforderungen an die Überwachung der Retardierungsspannung	18
1.3.2. Maßnahmen zur Überwachung der Retardierungsspannung	20
1.3.3. Der erste KATRIN-Spannungsteiler	24
1.4. Diese Arbeit	27
2. Elektrisches Design	29
2.1. Die primäre Teilerkette	30
2.2. Präzisions-Messstand	33
2.3. Untersuchung der Widerstands-Testmuster	37
2.3.1. Der Temperaturkoeffizient	40
2.3.2. Die Aufwärmabweichung	41
2.3.3. Kompensation von Aufwärmabweichungen	43
2.3.4. Langzeitstabilität der Widerstände	44
2.3.5. Spannungsabhängigkeit des Widerstands	47
2.3.6. Stabilität der Widerstände bei magnetischen Feldern	48
2.3.7. Stabilität der Widerstände bei elektrischen Feldern	49
2.3.8. Zusammenfassung der Untersuchungen und Spezifikation der Widerstände	49
2.4. Sekundäre Teilerkette	52
2.5. Tertiäre Teilerkette	52

3. Mechanisches Design	55
3.1. Überblick	56
3.2. Elektrodendesign	57
3.3. Temperatursteuerung	58
3.3.1. Komponenten der Temperatursteuerung	59
3.3.2. Simulationen der Temperatursteuerung	63
3.4. Der mechanische Aufbau	67
4. Eignung der KATRIN-Spannungsteiler für das BeTINa-Experiment	73
4.1. Überblick	74
4.2. Verhalten des ersten Spannungsteilers bei Wechselspannungen	75
4.3. Simulation des Wechselstromverhaltens des ersten Teilers	77
4.4. Eignung des ersten KATRIN-Spannungsteilers für das BeTINa-Experiment .	80
4.5. Eignung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers für das BeTINa-Experiment	81
4.6. Erste Testmessungen	82
4.7. Kapazitiver Messabgriff	83
5. Ausblick und Zusammenfassung	85
5.1. Realisierung des Designs	86
5.2. 5kV Spannungsteiler	87
5.3. Zusammenfassung	88
A. Vermessung der Testmuster	91
A.1. Steuerprogramm für den Präzisionsmessstand	92
A.1.1. Ablauf einer Messung	92
A.2. Aufwärmverhalten	94
A.2.1. Ergebnisse der Widerstände „x....“	99
A.2.2. Ergebnisse der Widerstände „b....“	99
A.2.3. Ergebnisse der Widerstände „b....“ bei 600 V	99
A.2.4. Ergebnisse der Widerstände „g....“	100
B. Baupläne und Aufbau der mechanischen Komponenten	101
B.1. Aufbau einer Ebene	102
B.2. Baupläne	103
C. AC Messung	123
C.1. Primärer Abgriff	124
C.2. Sekundärer Abgriff	126
Literaturverzeichnis	128
Danksagung	132

KAPITEL 1

EINLEITUNG

Das Neutrino wird im Standardmodell der Teilchenphysik als masseloses Teilchen behandelt, das einzig der schwachen Wechselwirkung und der Gravitation unterliegt. Das Standardmodell beschreibt drei Generationen (Flavours) von Neutrinos, die nach ihren schweren leptonischen Partnern mit ν_e , ν_μ und ν_τ bezeichnet werden. Da Neutrinos keine Ladung tragen, ist es prinzipiell möglich, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. In diesem Fall spricht man von Majorana-Teilchen.

Durch die Entdeckung der Neutrino-Flavour-Oszillation konnte eine verschwindende Neutrinomasse ausgeschlossen werden. Seitdem bemühen sich Theoretiker um Erweiterungen des Standardmodells und neue Theorien zur Erklärung der Neutrinomasse, während sich Experimentatoren mit der Messung der Neutrinomasse beschäftigen. Bisher existiert jedoch weder eine anerkannte Theorie, um die Neutrinomasse zu erklären, noch ein konsistenter Wert aus Messungen der Neutrinomasse.

Die genaue Bestimmung der Neutrinomasse lässt eine Beurteilung der Theorien zu, die entwickelt wurden, um die endliche Neutrinomasse zu erklären und ist eine der ersten Messgrößen für Physik jenseits des Standardmodells. Durch die hohe Anzahl von Neutrinos im Universum ($336/\text{cm}^3$) liegt der Anteil der Masse aller Neutrinos an der Gesamtenergiedichte des Universums, je nach Neutrinomasse, zwischen ca. 0,1 % und mehreren Prozent. Der Anteil der Masse aller Neutrinos übersteigt damit möglicherweise den der Baryonen. Sie bilden einen Teil der heißen Dunklen Materie und beeinflussen auf kosmologischen Skalen vor allem die Strukturbildung im Universum. Eine genaue Bestimmung der Neutrinomasse ermöglicht eine genauere Bestimmung von anderen kosmologischen Parametern. Eine Einordnung der Neutrinomasse in die Gesamtenergie des Universums zeigt Abb. 1.1. Bisherige Messungen zur Neutrinomasse basieren auf einem der folgenden Konzepte [Ott08]:

- Kosmologie

Das Universum ist ausgefüllt mit einer Hintergrundstrahlung aus Neutrinos, ähnlich der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung, die beide vom Urknall stammen. In derzeitigen kosmologischen Modellen repräsentieren die Neutrinos sogenannte heiße Dunkle Materie, welche wegen ihrer geringen Masse, nicht an lokale Gravitationsfelder während der Strukturbildung gebunden war. Heiße Dunkle Materie führt zu einer Aufweichung von lokalen Fluktuationen der Massenverteilung. Nicht statistische Fluktuationen der Massenverteilung im Universum wurden zu verschiedenen Zeiten nach dem Urknall mit großer Präzision anhand der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung und der Verteilung von Galaxien untersucht. Aus diesen Untersuchungen kann mit Hilfe eines kosmologischen Modells der Anteil an heißer Dunkler Materie und damit die Masse des Neutrinos bestimmt werden. Aus der Vermessung der Mikrowellenhintergrundstrahlung folgt eine modellabhängige obere Grenze für die Summe der drei Neutrinomasseneigenzustände von $\sum m_\nu < 0,61 \text{ eV}/c^2$ [WMAP08].

- Astrophysik

Eine Supernova vom Typ II stellt eine starke Neutrinoquelle dar. Falls eine solche Supernova in unserer oder einer benachbarten Galaxie stattfindet, können deren Neutrinos auf der Erde nachgewiesen werden. Aus den Laufzeitunterschieden der Neutrinos und einem physikalischen Modell der Supernova kann die Masse des Neutrinos bestimmt werden. Bisher konnte erst ein Neutrinoseignal einer Supernova gemessen

werden (SN1987A). Die aktuellste Analyse dieser Daten ergibt eine Obergrenze für die Neutrinomasse von $m_{\nu_e} < 5,7 \text{ eV}/c^2$ [Lor02].

- Neutrinoloser-Doppelbetazerfall

Wird ein Doppelbetazerfall ohne Aussendung von Neutrinos beobachtet, ist das Neutrino ein Majorana-Teilchen. Wird dieser Zerfall durch den Austausch von Neutrinos ermöglicht, kann die effektive Majorana-Masse des Neutrinos aus der Zerfallsrate bestimmt werden. Sind für diesen Zerfall andere Prozesse jenseits des Standardmodells verantwortlich, folgt über das Black Box Theorem [Sch98] zwar eine endliche Neutrinomasse, der Wert der Neutrinomasse lässt sich in diesem Fall jedoch nicht aus der Zerfallsrate des Neutrinolosen-Doppelbetazerfalls bestimmen. Bisher hat lediglich eine Teilgruppe eines Experiments ein Signal gefunden, das zu einem Neutrinolosen-Doppelbetazerfall passt und folgert daraus eine effektive Majoranamasse des Neutrinos von $0,1 \text{ eV}/c^2 \leq m_{ee} \leq 0,9 \text{ eV}/c^2$ [Kla04]. Derzeit werden neue Experimente aufgebaut, die auf diesem Konzept beruhen und das Ergebnis überprüfen können. Bis dahin muss dieses Ergebnis kritisch betrachtet werden. Alle anderen Experimente, die auf diesem Konzept basieren, konnten bisher nur Obergrenzen angeben, die aber nicht im Widerspruch zur oben genannten Evidenz stehen.

- Kinematik

Die Ruheenergie des Neutrinos steht beim β -Zerfall nicht als kinetische Energie zur Verfügung. Dadurch wird der Endpunkt und die Form des β -Spektrums beeinflusst. Die aktuellsten Experimente zu dieser Methode lieferten bisher lediglich Obergrenzen für die Neutrinomasse:

$$\text{Mainz-Experiment} \quad m_{\nu_e} \leq 2,3 \text{ eV}/c^2 \text{ (95\% C.L.)} \quad [\text{Kra05}]$$

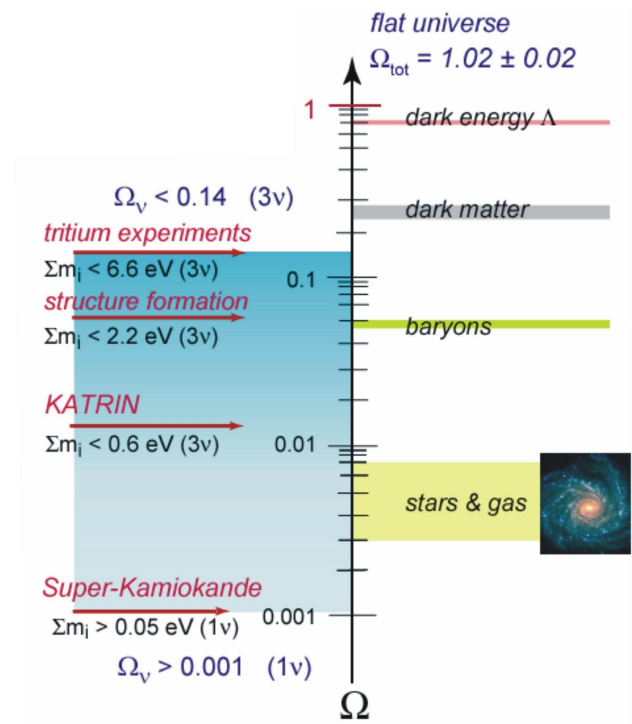
$$\text{Troitsk-Experiment} \quad m_{\nu_e} \leq 2,1 \text{ eV}/c^2 \text{ (95\% C.L.)} \quad [\text{Lob03}]$$

Versucht man aus den verschiedenen Konzepten einen konsistenten Wert für die Neutrinomasse abzuleiten, stößt man auf verschiedene Schwierigkeiten. Die Bestimmung der Neutrinomasse aus der Kosmologie hängt empfindlich von der Selektion der Daten und dem zugrundeliegenden kosmologischen Modell ab. Die Bestimmung der Neutrinomasse aus einer Supernova hängt stark vom physikalischen Modell der Supernova ab. Außerdem wurde seit dem Beginn der Vermessung von Neutrinoströmen erst ein Neutrinosignal einer Supernova identifiziert. Ergebnisse aus dem Neutrinolosen-Doppelbetazerfall hängen vom Übergangsmatrixelement von Mutter- und Tochterkern ab. Die Bestimmung dieses Matrixelements ist noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Möchte man die in Neutrinolosen Doppelbetazerfalls-Experimenten bestimmte effektive Majorana Masse mit der in den anderen Konzepten bestimmten Masse vergleichen, müssen unbekannte, CP verletzende Phasen berücksichtigt werden. Außerdem lieferten Experimente zum Neutrinolosen-Doppelbetazerfall bisher erst ein Ergebnis, das noch nicht durch andere Experimente überprüft werden konnte. Einzig die kinematische Bestimmung der Neutrinomasse kommt ohne zusätzliche, teilweise unbekannte Modellannahmen aus und eignet sich daher besonders, um die Ergebnisse der anderen Methoden zu überprüfen. Kinematische Experimente konnten bisher lediglich Obergrenzen für die Neutrinomasse angeben. Dies legt die Entwicklung eines neuen kinematischen Neutrinomassen-Experiments nahe, dessen Sensitivität ausreicht, um die Ergebnisse der anderen Experimente zu überprüfen. Ein solches Experiment wird derzeit in Karlsruhe aufgebaut.

Das Karlsruhe Tritium Neutrino- (KATRIN-) Experiment strebt eine Sensitivität auf die Neutrinomasse von $0,2 \text{ eV}/c^2$ (90% C.L.) an.

Das KATRIN-Experiment untersucht das Spektrum des Tritium Beta Zerfalls mit Hilfe eines elektrostatischen Gegenfeldspektrometers vom Typ MAC-E Filter. Eine wichtige Messgröße des Experiments ist die Spannung, die das elektrostatische Gegenfeld erzeugt. Die Weiterentwicklung der Präzisions-Spannungsüberwachung des elektrostatischen Gegenfeldes ist Teil dieser Arbeit. Im folgenden wird zunächst eine Einführung in die Neutrinophysik gegeben, um anschließend über das KATRIN-Experiment und die bisherigen Anstrengungen auf dem Gebiet der Präzisions-Spannungsüberwachung auf den Inhalt dieser Arbeit überzuleiten.

Abbildung 1.1.: Einordnung der Neutrinomasse in die Energiedichte des Universums. Gezeigt ist die Einordnung der Neutrinomasse Ω_ν in die Energiedichte des Universums Ω_{tot} . Eingezeichnet sind außerdem die bisherigen Grenzen für die Neutrinomasse aus Tritium-Experimenten und kosmologischen Untersuchungen sowie die Sensitivität des KATRIN-Experiments [KAT04].



1.1. Neutrinophysik

1.1.1. Entdeckung des Neutrinos

Die Geschichte des Neutrinos beginnt am Ende des 19. Jahrhunderts mit der Entdeckung der Radioaktivität durch A. H. Becquerel [Bec03]. 1899 und 1900 wurde die beobachtete Strahlung durch E. Rutherford und P. U. Villard nach ihrem Durchdringungsvermögen mit α , β und γ bezeichnet [Rut08]. In den folgenden Jahren wurde die α -Strahlung als Strom von Heliumkernen [Rut08], die β -Strahlung als Strom von Elektronen [Kau98] und die γ -Strahlung als hochenergetische elektromagnetische Strahlung identifiziert [Ger99]. Aber während die Beschreibung von α - und γ -Strahlung als Zwei-Körper-Zerfall gelang, fand J. Chadwick bei seinen Untersuchungen zum β -Spektrum ein kontinuierliches Energiespektrum [Cha14],

was im Rahmen einer Beschreibung als Zwei-Körper-Zerfall die Erhaltungssätze für Energie, Drehimpuls und Spin verletzen würde.

Um dieses Problem zu lösen, postulierte W. Pauli in seinem berühmten Brief vom 4.Dez.1930 ein neutrales Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$, das beim β -Zerfall gleichzeitig mit dem Elektron entstehen sollte, jedoch damals nicht detektiert wurde. 1934 gelang E. Fermi die quantenfeldtheoretische Beschreibung des β -Zerfalls als Drei-Körper-Zerfall [Fer34]. E. Fermi prägte in seiner Arbeit außerdem den Namen Neutrino für das neue Teilchen.

Die Entwicklung von Atomreaktoren, welche starke $\bar{\nu}_e$ -Quellen darstellen, ermöglichte F. Reines und C. L. Cowan den experimentellen Nachweis des Neutrinos im Jahre 1956 [Rei59]. Sie verwendeten den Einfang von Reaktor-neutrinos durch Protonen und detektierten die frei werdenden Positronen und Neutronen durch koinzidente Signale von Positronenvernichtungs- und Neutroneneinfangsreaktionen.

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

Nach der Entdeckung des Myons 1937 [Ned37] fanden L. M. Lederman und M. Schwartz 1962 erste Hinweise auf die Existenz des Myonneutrinos bei der Untersuchung des Pion-Zerfalls am Brookhaven AGS (engl. „Alternating Gradient Synchrotron“) [Led62]. Sie konnten bei Pion-Zerfällen die Entstehung von Neutrinos nachweisen, die ihrerseits Myonen, aber keine Elektronen produzieren konnten. Sie folgerten daraus, dass sich die gefundenen Neutrinos von den bisher bekannten Elektron-neutrinos unterscheiden.

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

Nach der Entdeckung des Tauons 1975 [Per75] fanden sich zahlreiche indirekte Hinweise auf das Tauonneutrino. Aber erst im Jahre 2000 konnten am Fermilab direkte Hinweise gewonnen werden [DON00]. Dort wurde ein Protonenstrahl in einem Strahlvernichter gestoppt. Die entstandenen Teilchen mussten verschiedene Abschirmungen passieren, bevor sie in einem Detektor untersucht wurden. Im Detektor konnten Tauonen nachgewiesen werden, die nur durch einfallende ν_τ erzeugt werden konnten, da keine anderen Teilchen Tauonen erzeugen und gleichzeitig die Abschirmungen hätten überwinden können.

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

Durch die Entdeckung des Z^0 -Bosons [Has73] konnte der Frage nach der Anzahl der Neutrino-Generationen nachgegangen werden. Das Z^0 Boson zerfällt mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten in Hadronen, Lepton - Anti-Lepton Paare oder Neutrino - Antineutrino Paare. Die Masse des Z^0 beträgt 91 GeV [PDG07], bei einem Zerfall des Z^0 in ein Neutrino - Antineutrino Paar beträgt die maximale Masse der Neutrinos die halbe Ruhemasse des Z^0 . Neutrinos, die leichter als die halbe Ruhemasse des Z^0 sind, nennt man leichte Neutrinos.

Die Zerfallsbreite des Z^0 in Neutrinos kann zwar nicht direkt gemessen, jedoch aus den übrigen partiellen Zerfallsbreiten und der gesamten Zerfallsbreite berechnet werden. Gleich vier Experimente gingen so der Frage nach der Anzahl der leichten Neutrino-Generationen am CERN (Europäisches Labor für Teilchenphysik¹) nach. Das kombinierte Ergebnis der vier Experimente zur Anzahl der leichten Neutrino-Generationen (Flavour-Eigenzustände) beträgt $N_\nu = 2,994 \pm 0,012$ [PDG07].

Es sind also alle Flavour-Eigenzustände von leichten Neutrinos (e , μ , τ) entdeckt. Ob Neutrinos jedoch überhaupt eine Masse tragen, blieb lange unbekannt. Denn während sie im Standardmodell der Teilchenphysik als masselos betrachtet werden und experimentell zunächst nur Obergrenzen für die Neutrinomasse bestimmt werden konnten, erbrachte die Entdeckung der im folgenden beschriebenen Neutrino-Flavour-Oszillation den Beweis einer endlichen Neutrinomasse.

1.1.2. Neutrino-Flavour-Oszillationen

In den späten sechziger Jahren entwarf R. Davis das Homestake Experiment, dessen Ziel die Vermessung des Neutrinoflusses aus der Sonne war [Dav96]. Der Aufbau in der Homestake-Goldmine bestand aus einem Tank, der mit 615 t C_2Cl_4 gefüllt war. Zum Nachweis der solaren Neutrinos wurde folgende Reaktion benutzt:



Aus der Anzahl der nachgewiesenen ${}^{37}\text{Ar}$ -Atome ließ sich der Neutrinofluss aus der Sonne berechnen. Unter Berücksichtigung der Nachweiseffizienz des Detektors war dieser gemessene Neutrinofluss jedoch um einen Faktor drei kleiner als die Erwartung aus Modellrechnungen des Standard-Sonnen-Modells (SSM), die von J. N. Bahcall durchgeführt worden waren. Diese Diskrepanz wurde als Solares Neutrinoproblem bekannt. Auch spätere Experimente, wie GALLEX, SAGE, Kamiokande und Super-Kamiokande, beobachteten Neutrinoflüsse aus der Sonne, die niedriger als die Modellerwartungen waren. Das Solare Neutrinoproblem konnte erst durch die Entdeckung von Neutrino-Flavour-Oszillationen gelöst werden. Neutrino-Flavour-Oszillation bedeutet, dass die solaren Neutrinos auf dem Weg von der Sonne zur Erde zwischen ihren Flavour-Eigenzuständen oszillieren. In der Sonne entstandene ν_e -Neutrinos können die Erde also als ν_μ oder ν_τ erreichen.

Dieser Effekt wurde erstmals 1998 von der Super Kamiokande Kollaboration an Neutrinos beobachtet, die beim Beschuss der Erd-Atmosphäre mit kosmischer Strahlung entstehen. Dazu wurde ein zylindrischer Tank ($\varnothing=39$ m, $h=41$ m) mit 50 kt ultrareinem Wasser gefüllt und von über 13000 Sekundärelektronenvervielfachern beobachtet. Ein einfallendes Neutrino erzeugt beim Einfang im Detektor ein Lepton der gleichen Generation, das durch Tscherenkow-Licht identifiziert werden kann.

¹Die Abkürzung CERN leitet sich von „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“ ab

2001 zeigte die SNO-Kollaboration, dass auch das Solare Neutrinoproblem durch Neutrino-Flavour-Oszillationen erklärt werden kann. Dazu nutzte die SNO-Kollaboration einen kugelförmigen Detektor aus 1000 t D₂O, der zur Abschirmung von kosmischer Strahlung in einer über 2 km tiefen Miene nahe Sudbury in Kanada aufgebaut wurde. Durch die Wahl von D₂O anstelle von H₂O ist dieser Detektor auf alle Neutrino-Flavours sensitiv gemäß folgenden Reaktionen ($\alpha = e, \mu, \tau$):

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \xrightarrow{\text{charged current}} \Phi_{CC} = \Phi_e \quad (1.1.5)$$

$$\nu_\alpha + d \rightarrow p + n + \nu_\alpha \xrightarrow{\text{neutral current}} \Phi_{NC} = \Phi_e + \Phi_{\mu\tau} \quad (1.1.6)$$

$$\nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- \xrightarrow{\text{elastic scattering}} \Phi_{ES} = \Phi_e + 0,16\Phi_{\mu\tau} \quad (1.1.7)$$

Die Detektion der Reaktionen erfolgte durch fast 10000 Sekundärelektronenvervielfacher, die das Detektorvolumen beobachteten. Die Reaktionen des geladenen Stroms und der elastischen Streuung lassen sich über ihr charakteristisches Tscherenkov-Licht identifizieren. Bei Reaktionen des neutralen Stroms kommt es zu einem Einfang des freiwerdenden Neutrons, was durch ein charakteristisches Licht-Signal identifiziert werden kann. Die gemessenen Flüsse des geladenen und neutralen Stroms sowie aus elastischer Streuung haben charakteristische Anteile von Elektronenneutrinos sowie von Myon- und Tauonneutrinos. Trägt man den Myon- und Tauonneutrinofluss gegen den Elektronenneutrinofluss auf, so definieren die drei gemessenen Flüsse Geradengleichungen in diesem Diagramm (Abb. 1.2) [SNO02]. Aus der Überlagerung der drei gemessenen Flüsse lässt sich der absolute Elektronenneutrinofluss sowie der Myon- und Tauonneutrinofluss bestimmen. Diese sind kompatibel mit den Vorhersagen aus dem Standard-Sonnen-Modell, wenn man Materie-induzierte Oszillationen in der Sonne und Vakuum-Oszillationen auf dem Weg von der Sonne zur Erde berücksichtigt.

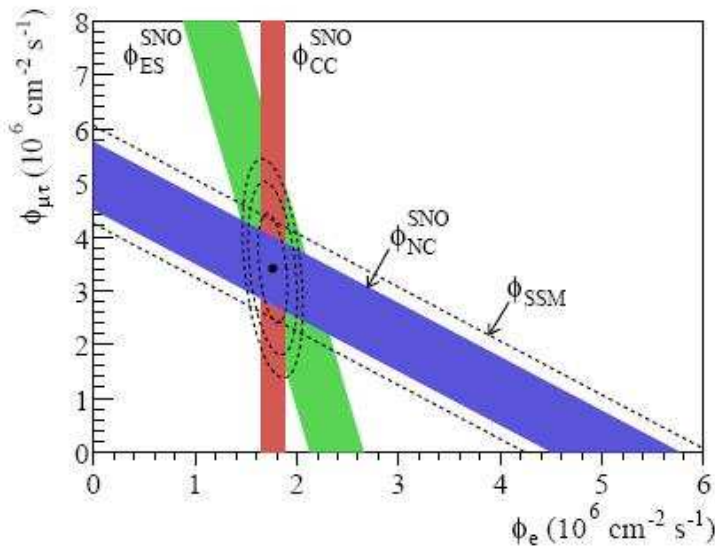


Abbildung 1.2.: Ergebnisse des SNO-Experiments. Gezeigt sind die gemessenen Flüsse von Elektronenneutrinos (ϕ_e) sowie von Myon- und Tauonneutrinos ($\phi_{\mu\tau}$) beim SNO-Experiment. Die farbigen Bänder kennzeichnen Reaktionen aus dem geladenen Strom (ϕ_{CC}), der nur auf Elektronenneutrinos sensitiv ist, aus dem neutralen Strom (ϕ_{NC}) und aus der elastischen Streuung (ϕ_{ES}), die auf alle Neutrino-Flavours sensitiv sind. Eingezeichnet sind außerdem die Vorhersage des Standard-Sonnen-Modells ϕ_{SSM} sowie ein Fit aller SNO-Daten (beide gestrichelt) [SNO02].

Neutrino-Flavour-Oszillation wird theoretisch möglich, wenn die Eigenzustände der schwachen Wechselwirkung (Flavour-Eigenzustände) keine Eigenzustände des Massen-Operators sind. In diesem Fall ergeben sich die drei Flavour-Eigenzustände ($\alpha = e, \mu, \tau$) aus einer Überlagerung der drei Massen-Eigenzustände ($i = 1, 2, 3$) mittels einer unitären 3×3 -Matrix $U_{\alpha i}$ (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix).

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1.8)$$

Berücksichtigt man Neutrino-Flavour-Oszillation bei der Vermessung von Neutrino-Flüssen, so ergibt sich folgender Ablauf der Messung [Giu07]: Das Neutrino wird in einem Prozess der schwachen Wechselwirkung α erzeugt und propagiert gemäß der Schrödingergleichung:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_\alpha\rangle \quad (1.1.9)$$

Der Nachweis erfolgt wiederum über einen Prozess der schwachen Wechselwirkung β . Die Wahrscheinlichkeit P nach einer Zeit t ein Neutrino mit dem Flavour β nachzuweisen ist gegeben durch:

$$P_{\alpha \rightarrow \beta}(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \quad (1.1.10)$$

$$= \left| \left\langle \nu_i \left| \sum_i U_{\beta i}^* e^{-E_i t} U_{\alpha i} \right| \nu_i \right\rangle \right|^2 \quad (1.1.11)$$

$$= \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} \right|^2 \quad (1.1.12)$$

$$= \sum_{i,j} U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* U_{\beta j} e^{-i(E_i - E_j)t} \quad (1.1.13)$$

wobei:

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2E} \approx E + \frac{m_i^2}{2E} \quad \text{für } p \gg m_i \quad (1.1.14)$$

$$(E_i - E_j)t \approx \frac{m_i^2 - m_j^2}{2} \frac{L}{E} = \frac{\Delta m_{ij}^2}{2} \frac{L}{E} \quad \text{für } L = t \quad (1.1.15)$$

Für $P_{\alpha \rightarrow \beta}(L)$ folgt:

$$P_{\alpha \rightarrow \beta}(L) \sim \sum_{j>i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2}{2} \frac{L}{E}}. \quad (1.1.16)$$

Die Wahrscheinlichkeit ein Neutrino, das in einem Flavour-Eigenzustand α erzeugt wurde, als Neutrino mit dem Flavour-Eigenzustand β nachzuweisen, hängt also von der quadratischen Differenz der Masseneigenzustände Δm_{ij}^2 , der Energie E und der zurückgelegten Strecke L des Neutrinos ab. Aus der Beobachtung von Neutrinooszillationen von solaren Neutrinos und von Neutrinos, die beim Beschuss der Atmosphäre mit kosmischer Strahlung entstehen, lässt sich jeweils eine quadratische Massendifferenz zwischen den Masseneigenzuständen bestimmen. Dies bedeutet, dass mindestens zwei Neutrino-Massen-Eigenzustände einen von Null verschiedenen Wert haben. Da Neutrinooszillations-Experimente jedoch generell nur auf den Betrag einer quadratischen Massendifferenz sensitiv sind, bleibt die absolute Skala der Neutrino-Massen-Eigenzustände weiter unbekannt. Die Anordnung und Skala der Neutrino-Massen-Eigenzustände wird auch als Neutrino-Massenszenario bezeichnet.

Da das SNO-Experiment das Verschwinden von ν_e aus dem solaren Neutrinofluss untersuchte, war es auf die Massendifferenz Δm_{12}^2 sensitiv². Das kombinierte Ergebnis aller Experimente zu Neutrinooszillationen von solaren Neutrinos lautet [PDG07]:

$$\Delta m_{\text{solar}}^2 = \Delta m_{12}^2 = 8,0^{+0,4}_{-0,3} \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.1.17)$$

Aus Experimenten mit atmosphärischen Neutrinos lässt sich dagegen der Parameter Δm_{23}^2 bestimmen, da es bei dem Beschuss der Erd-Atmosphäre mit kosmischer Strahlung zur Entstehung von geladenen Mesonen kommt, die wiederum in Myonen und Myonneutrinos zerfallen. Das kombinierte Ergebnis aller Experimente zu Neutrinooszillationen atmosphärischer Neutrinos lautet [PDG07]:

$$\Delta m_{\text{atm}}^2 = \Delta m_{23}^2 = (1,9 - 3,0) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2/\text{c}^4 \quad (1.1.18)$$

Bei Experimenten zu Neutrinooszillationen muss der Einfluss der Materie auf die Oszillation berücksichtigt werden. Durch den Austausch von W^\pm -Bosonen koppeln Elektroneneutrinos stärker an Materie als andere Neutrino-Flavours, bei denen nur ein Z^0 -Austausch möglich ist. Dieser Effekt wird nach seinen Entdeckern S. Mikheyev, A. Smirnov und L. Wolfenstein als MSW-Effekt bezeichnet und wurde bei solaren Neutrinooszillationsexperimenten bestätigt [Wol78]. Auf eine theoretische Formulierung soll hier verzichtet werden, eine wichtige Voraussetzung für den MSW-Effekt ist jedoch $m_2^2 > m_1^2$. Da aus Neutrinooszillations-Experimenten generell nur der Betrag einer quadratischen Massendifferenz zwischen den Massen-Eigenzuständen bestimmt werden kann, ist der MSW-Effekt bisher die einzige Möglichkeit, die Massen-Eigenzustände der Neutrinos zu ordnen. Für die endgültige Bestimmung des Neutrino-Massenszenarios fehlen daher noch die direkte Messung einer Neutrino-Masse, auch Massenskala genannt, sowie die Festlegung des Vorzeichens von Δm_{23} . Im Fall von $m_3 > m_2$ spricht man von einem normalen Massenszenario, im Fall von $m_3 < m_2$ von einem invertierten Massenszenario. Desweiteren spricht man von einem hierarchischem Massenszenario, falls die $\Delta m_{ij}^2 \gg m_i^2$ sind, und von einem degenerierten Massenszenario, falls die $\Delta m_{ij}^2 \ll m_i^2$ sind.

²natürlich auch auf den Mischungswinkel θ_{12} , dieser soll aber hier nicht weiter behandelt werden.

1.1.3. Kinematische Neutrinomassen-Bestimmung

Die absolute Masse eines Neutrinos ist eine der beiden verbleibenden, offenen Parameter des Neutrino-Massenszenarios. Schon Fermi hat vorgeschlagen die Neutrinomasse durch die Vermessung des β -Spektrums zu bestimmen, denn im Gegensatz zu allen anderen Ansätzen hat diese Methode den Vorteil, ohne zusätzliche, teilweise unbekannte Modellannahmen auszukommen. Beim β^- -Zerfall zerfällt ein Mutterkern (Z, A) in einen Tochterkern $(Z+1, A)$ sowie ein Elektron und ein Elektronantineutrino:

$$(Z, A) \longrightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.1.19)$$

Für die Übergangsrate in einem Zeitintervall dt und Energieintervall dE gilt nach Fermis Goldener Regel:

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = \frac{2\pi}{\hbar} |M^2| \rho(E). \quad (1.1.20)$$

Wobei M das Übergangsmatrixelement zwischen Anfangs- und dem Endzustand und $\rho(E)$ die Phasenraumdicke des Endzustands ist. Für das β^- -Spektrum erhält man [Alt03]:

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = R(E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4} \Theta(E_0 - E - m_{\nu_e}^2 c^4) \quad (1.1.21)$$

mit

$$R(E) = \frac{G_F^2}{2\pi^3 \hbar^7 c^5} \cos^2(\theta_C) |M|^2 F(Z+1, E) p(E + m_e c^2) (E_0 - E). \quad (1.1.22)$$

Dabei ist:

G_F	die Fermi-Kopplungskonstante,
θ_C	der Cabibbo-Winkel,
M	das Kernmatrixelement,
p	der Impuls des Elektrons,
E	die 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.

Die Stufenfunktion $\Theta(E_0 - E - m_{\nu_e}^2 c^4)$ berücksichtigt die Energieerhaltung, die Fermifunktion $F(Z+1, E)$ den Einfluss des elektrischen Potentials des Tochterkerns auf das entstandene Elektron. Die Neutrinomasse wirkt sich nur über den Teil des Phasenraumfaktors, der von der Neutrinomasse abhängt $\sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4}$, auf das Spektrum aus. Aus dem Spektrum des β^- -Zerfalls lässt sich also die Neutrinomasse bestimmen, wobei der Einfluss der Neutrinomasse größer wird, je näher man dem kinematischen Endpunkt des Spektrums kommt.

Möchte man aus diesen theoretischen Grundlagen des β^- -Zerfalls ein Experiment zur Bestimmung der Masse des Elektronantineutrinos konstruieren, stellt sich zunächst die Frage nach dem zu verwendenden β -Strahler. Ein erstes Kriterium ist die Endpunktenergie des Isotops. Ein niedriger Endpunkt und damit schmales Spektrum führt dazu, dass ein größerer Teil der emittierten Elektronen mit einer Energie nahe dem Endpunkt emittiert wird und damit zu einer hohen Signalrate nahe dem Endpunkt. Die beiden Isotope mit der niedrigsten β -Endpunktenergie sind Rhenium ($E_0 = 2,6 \text{ keV}$) und Tritium ($E_0 = 18,6 \text{ keV}$)³. Tritium hat im Vergleich zu Rhenium Vorteile für die Verwendung in kinematischen Neutrinomassen-Experimenten:

- Der β -Zerfall von Tritium ist übererlaubt. Dies führt zu einem konstanten Matrixelement, unabhängig von der Energie des Elektrons.
- Für Tritium ($Z = 1$) wird die Berechnung der Coulomb-Wechselwirkung zwischen erzeugtem Elektron und Tochterkern sehr einfach und genau (Fermi-Funktion).
- Die elektronischen Endzustände des Tochtermoleküls lassen sich einfach berechnen.
- Tritium hat eine relativ kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren, was hohe Intensitäten bei geringen Quelldichten ermöglicht.
- Tritium kann gasförmig verwendet werden, weshalb keine komplexen Festkörpereffekte berücksichtigt werden müssen.

Durch diese experimentellen Vorteile lieferten Tritium-Experimente bisher strengere Grenzen für die Neutrinomasse als Rhenium-Experimente. Tritium-Experimente konnten bis heute keine Evidenz für die Neutrinomasse erbringen, sondern lediglich Obergrenzen bestimmen. Das KATRIN-Experiment sieht vor, die Sensitivität bzw. die Nachweisgrenze um eine weitere Größenordnung auf $0,2 \text{ eV}/c^2$ (90%C.L.) zu verbessern. Die zentralen Anforderungen an das KATRIN-Experiment ergeben sich aus den vorangegangenen theoretischen Betrachtungen [KAT04]:

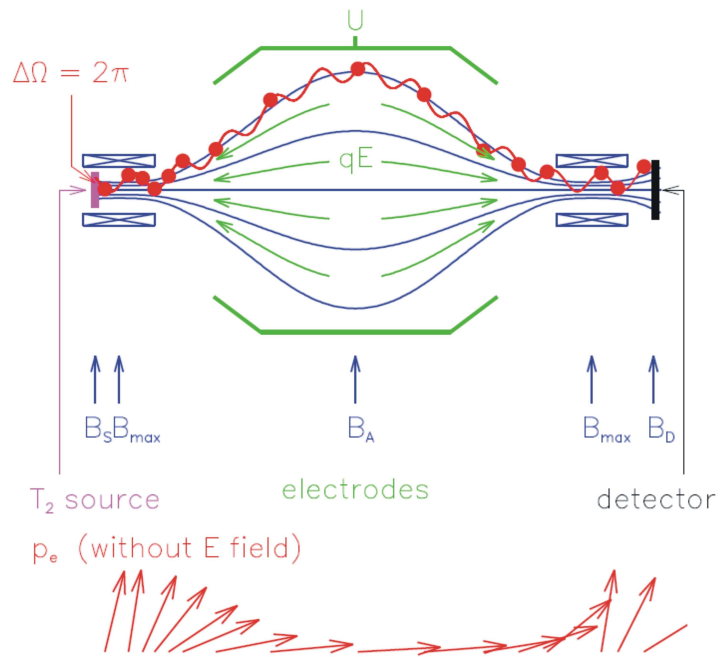
- Eine hohe Signalrate in der Endpunktregion
Das Energieintervall unterhalb des Endpunktes, aus dem die Neutrinomasse bestimmt werden kann, wird mit steigender Sensitivität kleiner. Außerdem sinkt die Zählrate in diesem Intervall mit der dritten Potenz der Energie. Um trotzdem eine hohe Signalstärke zu erreichen, müssen alle Komponenten des Experiments eine hohe Zählrate im Endpunktbereich zum Ziel haben.
- Hohe Energieauflösung
Die benötigte Energieauflösung ist proportional zur angestrebten Sensitivität auf die Neutrinomasse.
- Niedrige Untergrundzählrate in der Endpunktregion

³Andere Elemente werden bei der direkten Neutrinomassenbestimmung nicht verwendet

1.2. Das KATRIN-Experiment

Beim KATRIN-Experiment [KAT04] wird versucht, aus dem Spektrum des Tritium- β -Zerfalls die Masse des $\bar{\nu}_e$ mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ zu bestimmen. Das Konzept des Experiments ist in Abb. 1.3 dargestellt. Eine Elektronen-Quelle der Fläche A_S befindet sich in einem axialen Magnetfeld von $B_S = 3,6 \text{ T}$ und emittiert Elektronen isotrop in den gesamten Raumwinkel. Die emittierten Elektronen führen Zyklotronbewegungen um die Magnetfeldlinien aus und können so auf diesen geführt werden. Für die Führung aller Elektronen muss der magnetische Flussschlauch $B \cdot A$ erhalten bleiben: $B \cdot A = \text{const.}$

Abbildung 1.3.: Konzept des beim KATRIN-Experiment eingesetzten MAC-E Filters [KAT04]. Gezeigt sind die Lage von Quelle (tritium source), Analysierebene (analysing plane) und Detektor (detector) im magnetischen Flussschlauch eines MAC-E-Filters. Eingezeichnet ist außerdem die Entwicklung des Impulses eines Elektrons p_e durch die Veränderung des Magnetfeldes.



Die Stärke des Magnetfeldes steigt zunächst auf $B_{max} = 6,0 \text{ T}$, durchläuft ein Minimum von $B_A = 3 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ und steigt wieder auf B_{max} an. Das Minimum der Magnetfeldstärke bezeichnet die Analysierebene. Die Bewegung der Elektronen durch das Magnetfeld erfolgt adiabatisch. Das bedeutet, dass sich die kinetische Energie der Elektronen bei ihrer Führung entlang des Magnetfeldes nicht ändert. Durch die adiabatische Führung ist und auch das magnetische Bahnmoment Φ adiabatisch erhalten. Dadurch richtet sich beim Abfall der Magnetfeldstärke der Impulsvektor der Elektronen parallel zum Magnetfeld aus.

Zwischen Quelle und Analysierebene wird ein elektrisches Feld erzeugt, das der Bewegung der Elektronen entgegengesetzt ist. Die Quelle bleibt auf Erdpotential. Die sogenannte Retardierungsspannung, aus der das Feld aufgebaut wird, hat daher eine negative Polarität. Da der Einfluss der Neutrinomasse am Endpunkt des Spektrums am größten ist, wird diese Retardierungsspannung in einem Bereich von $-18,5 \text{ kV}$ bis $-18,6 \text{ kV}$ variiert. Der Übersichtlichkeit halber werden bei der weiteren Betrachtung des KATRIN-Experiments Spannungen ohne Vorzeichen genannt. Über die Elementarladung ist die Retardierungsspannung direkt mit einer Retardierungsenergie verknüpft.

Die Elektronen, deren kinetische Energie ausreicht, um das elektrische Gegenfeld zu überwinden, werden von einem Detektor gezählt. Das Konzept entspricht also einem integrierenden Hoch-Pass-Filter. Die Vermessung des Tritium- β -Spektrums erfolgt durch die Zählung der Elektronen, die bei verschiedenen Retardierungsspannungen im Detektor nachgewiesen werden können. Diesen Aufbau bezeichnet man auch als MAC-E-Filter (magnetic adiabatic collimation combined with an electrostatic filter).

Neben dieser Art, das Experiment zu betreiben, lässt sich der Aufbau auch im sogenannten MAC-E-TOF (MAC-E-time of flight) Modus betreiben, um systematische Korrekturen zu untersuchen. Für Details zu diesem Modus sei auf den KATRIN Design Report verwiesen [KAT04].

Die Bewegung von Elektronen mit einem hohen Emissionswinkel weicht in der Analysierebene stärker von der idealen Parallelität zum Magnetfeld ab, wobei sie eine geringfügig höhere Energie brauchen, um das elektrische Gegenfeld trotzdem zu überwinden. Der maximal akzeptierte Emissionswinkel beim KATRIN-Experiment von $50,77^\circ$ ergibt sich aus dem Verhältnis der Magnetfelder am Startort und im Feldmaximum. Elektronen mit dem maximalen Emissionswinkel benötigen 0,93 eV zusätzliche Energie, um das elektrische Gegenfeld zu überwinden. Dies entspricht der Auflösung des Spektrometers:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_A}{B_{max}}. \quad (1.2.1)$$

Die Energieauflösung eines MAC-E Filters ergibt sich aus dem Verhältnis von maximaler Feldstärke und der Feldstärke in der Analysierebene. Eine möglichst gute Energieauflösung wird also durch möglichst große maximale Feldstärken B_{max} und eine möglichst niedrige Feldstärke in der Analysierebene B_A erreicht. Die maximale Feldstärke wird durch die technische Realisierbarkeit begrenzt und beträgt beim KATRIN-Experiment daher $B_{max} = 6,0$ T. Eine möglichst niedrige Feldstärke in der Analysierebene wird durch eine Vergrößerung der Querschnittsfläche des Flussschauchs erreicht. Um die Adiabasie der Elektronenführung nicht zu verletzen, muss diese Vergrößerung des Flussschlauches langsam geschehen. Wie später gezeigt, ergibt sich aus diesen Bedingungen die mechanische Realisierung des MAC-E-Filters beim KATRIN-Experiment.

In der Hauptstrecke des KATRIN-Experiments wird das Konzept des MAC-E-Filters durch eine fensterlose gasförmige Tritiumquelle mit einer anschließenden Pumpstrecke sowie einer Kombination aus einem Vor- und einem Hauptspektrometer umgesetzt (Abb. 1.4). Parallel zur Hauptstrecke des Experiments wird eine weitere Messstrecke ähnlich der Hauptstrecke aufgebaut. Diese sogenannte Kalibrierungsstrecke⁴ nutzt das Spektrometer des Mainzer Vorgänger-Experiments. Es wird eine eigene Kalibrierungs-Quelle und einen eigenen Detektor haben, jedoch das elektrische Gegenfeld aus der Spannung des Hauptspektrometers aufbauen. Auf diese Weise können die Retardierungsspannungen des Hauptspektrometers ständig mit einer Kalibrierungsquelle verglichen werden. Auf die Kalibrierungsquellen wird

⁴Als Kalibrierung wird der Vergleich der mit einem Messgerät ermittelten Werte mit denen einer Referenz oder eines Normals bezeichnet.

in Abschnitt 1.3 eingegangen. Die einzelnen Komponenten des Experiments sollen im folgenden kurz vorgestellt werden, für weitere Einzelheiten zu den einzelnen Komponenten sei auf den KATRIN Design Report [KAT04] verwiesen.

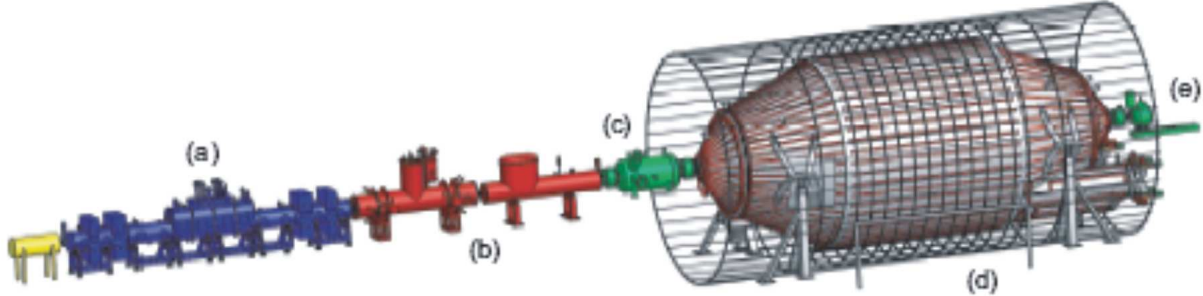


Abbildung 1.4.: Aufbau des KATRIN-Experiments. Dargestellt ist der grundlegende Aufbau des KATRIN-Experiments. Der gezeigte Aufbau hat eine Länge von 70m. Die fensterlose, gasförmige Tritiumquelle (WGTS) ist mit (a) beschriftet, die Pumpstrecke mit (b), das Vorspektrometer mit (c), das Hauptspektrometer mit (d) und der Detektor mit (e). Eingezeichnet sind außerdem Luftspulen um das Hauptspektrometer, die der Kompensation des Erdmagnetfeldes dienen. Nicht eingezeichnet ist das Monitor-Spektrometer.

1.2.1. Die Quelle

Das Konzept der Quelle entspricht einer fensterlosen, gasförmigen Tritium Quelle (windowless gaseous tritium source, WGTS). Bei diesem Konzept müssen die Elektronen, um die Quelle zu verlassen, kein Fenster überwinden. Streuungen der Elektronen am Fenster, die das Spektrum verfälschen würden, können so ausgeschlossen werden. Der mechanische Aufbau der Quelle besteht aus einem zylindrischen Rohr mit einer Länge von 10 m und einem Durchmesser von 90 mm. Auf halber Länge wird in dieses Rohr molekulares Tritium-Gas mit einer Temperatur von 27 K und einem Fluss von $2 \text{ mbar}\ell/\text{s}$ eingelassen. Das Tritiumgas diffundiert zu beiden Seiten des Rohres und zerfällt zu einem geringen Anteil dabei. Das Quellrohr befindet sich innerhalb von supraleitenden Solenoiden, die ein axiales Feld von $B_S = 3,6 \text{ T}$ erzeugen. Zerfällt das Tritium innerhalb der Quelle, koppeln die entstehenden Elektronen an die Magnetfeldlinien und führen Zyklotron Bewegungen um diese aus. Die Gesamtquellstärke lässt sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass ein Tritium-Molekül in der Quelle zerfällt, und der Injektionsrate der Tritium-Moleküle zu ca. $1,8 \cdot 10^{11}$ Zerfällen pro Sekunde berechnen [Thu07].

Unerkannte Fluktuationen der Tritiumdichte führen zu Fluktuationen des Elektronenflusses. Dies stellt eine systematische Unsicherheit dar, die es zu vermeiden gilt. Ziel des Designs ist es daher, eine möglichst konstante Tritiumdichte in der Quelle zu erreichen. Dazu müssen zahlreiche technische Herausforderungen in der Überwachung und Regelung der Betriebsparameter gemeistert werden. Zum Beispiel darf die Regelabweichung der Einlasstemperatur 30 mK und die des Einlassdrucks $1 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$ nicht überschreiten [Thu07].

Die Fensterlosigkeit der Quelle wird ermöglicht, indem das Gas an den Enden des Rohres mit Hilfe von Turbomolekularpumpen abgesaugt wird. Die Reduktion des Tritium-Partialdrucks und des Gesamtdrucks soll folgende Effekte reduzieren:

- In der Quelle erzeugte Elektronen können an den Gasmolekülen inelastische Streuungen durchführen und so das Spektrum verfälschen.
- Zerfällt Tritium nahe der Analysierebene, ist das entstehende Elektron nicht in vollem Umfang vom elektrischen Gegenfeld betroffen und ist daher dem Untergrund zuzuordnen.

Eine genaue Betrachtung der systematischen Unsicherheiten der einzelnen Effekte führt zu einer Anforderung an den Tritium-Fluss aus der Quelle von weniger als 10^{-14} mbarℓ/s [KAT04]. Dies entspricht einer Reduktion des Tritium-Flusses um 14 Größenordnungen und wird von einer Pumpstrecke ermöglicht, die im nächsten Abschnitt dargestellt wird.

1.2.2. Die Pumpstrecke

Die Pumpstrecke besteht aus zwei Teilen. Im ersten Teil, der differentiellen Pumpstrecke (differential pumping section, DPS), wird der Gasdruck an mehreren Pumpstutzen durch Turbomolekularpumpen auf etwa $0,4 \cdot 10^{-7}$ mbarℓ/s reduziert. Im zweiten Teil, der Kryo-Pumpstrecke (cryo pumping section, CPS), werden verbliebene Gas-Moleküle auf einen Argon-Schnee aufgefroren. Am Ende der Transportstrecke ist der Tritium-Fluss auf die erforderlichen 10^{-14} mbarℓ/s reduziert. Dies entspricht einer Reduktion des Tritium-Partialdrucks von ca. 10^{-3} mbar in der Quelle auf ca. 10^{-20} mbar in den Spektrometern. Der Gasdruck in den Spektrometern ergibt sich dabei unter Berücksichtigung der dort installierten Pumpleistung:

$$p_{T_2} = 10^{-14} \text{ mbarℓ/s} \cdot \frac{1}{10^6 \text{ ℓ/s}}.$$

1.2.3. Die Spektrometer

An die Pumpstrecke schließt sich ein System aus Vor- und Hauptspektrometer an. Beide Spektrometer arbeiten nach dem MAC-E-Filter Prinzip. In den Feldverteilungen der Spektrometer kann es zur Bildung von Penningfallen kommen, in denen Elektronen gespeichert werden können. Die Streuung an diesen gefangenen Elektronen stellt eine systematische Unsicherheit dar. Daher schneidet das Vorspektrometer den niederenergetischen Teil des Spektrums, aus dem sich keine Informationen über die Neutrinomasse gewinnen lassen, ab. Dabei wird der Elektronenfluss von ca. 10^{10} Elektronen pro Sekunde auf ca. 10^3 Elektronen pro Sekunde reduziert. Durch die Reduktion des Elektronenflusses sinkt auch die Anzahl der Elektronen, die in Penningfallen des Hauptspektrometers gefangen werden können. Damit sinkt die Wahrscheinlichkeit für Streuungen an den gefangenen Elektronen. Das Hauptspektrometer vermisst den übrigbleibenden, hochenergetischen Teil des Spektrums.

Der mechanische Aufbau der beiden Spektrometer ähnelt sich. Beide haben einen zylindrischen Mittelteil, der an den Enden konisch zuläuft. Da der Flussschlauch in beiden Spektrometern erhalten bleiben muss, ergibt sich die Größe der Spektrometer aus der adiabatischen

Führung der Elektronen im Inneren und der Energieauflösung der jeweiligen Spektrometer (Gl. 1.2.1). Aus der schlechteren Energieauflösung des Vorspektrometers von ca. 100 eV folgt eine geringere Größe (Länge 3,4 m, Durchmesser 1,7 m) im Vergleich zum Hauptspektrometer (Auflösung 0,93 eV, Länge 23,3 m, Durchmesser 10 m). Das Hauptspektrometer ist in Abb. 1.5 dargestellt.



Abbildung 1.5.: Hauptspektrometer beim Transport. Dieses Foto zeigt den unverkleideten Vakuumtank des Hauptspektrometers beim Transport zum Forschungszentrum Karlsruhe.

Beide Spektrometer sind aus Edelstahl gefertigt und werden im Experiment mit einem Gasdruck von $< 10^{-11}$ mbar betrieben. Dazu muss das Material der Spektrometer eine Ausgasrate von weniger als 10^{-12} mbar ℓ s $^{-1}$ cm $^{-2}$ aufweisen. Der Gasdruck im Inneren der Spektrometer wird durch eine Reihe von Turbomolekular- und Getterpumpen erreicht.

Das Retardierungspotential liegt in beiden Fällen direkt an der Spektrometerwand an. Im Inneren der Spektrometer wird jedoch zusätzlich eine Drahtelektrode angebracht, die folgende Funktionen erfüllt:

- Untergrundelektronen, die durch radioaktive Zerfälle in der Tankwand bzw. durch kosmische Myonen verursacht wurden, lassen sich abschirmen, wenn man die Drahtelektrode auf ein im Vergleich zur Tankwand negatives Potential legt. Durch die wesentlich geringere Masse bzw. die wesentlich geringere Querschnittsfläche der Drahtelektrode können aus der Drahtelektrode erheblich weniger Elektronen ausgelöst werden. Auf diese Weise wird der Spektrometer-Untergrund minimiert.

- Durch die Anordnung von verschiedenen elektrischen und magnetischen Feldern können im Inneren der Spektrometer Penningfallen entstehen, in denen Elektronen gespeichert werden können. Durch Stöße mit diesen gespeicherten Elektronen kann das Spektrum verfälscht werden. Das Anlegen eines Dipolfeldes an die Drahtelektrode kann diese Elektronen durch eine $E \times B$ Drift aus dem Flussschlauch drängen.
- Die Drahtelektrode kann zur Feinjustierung des elektrischen Gegenfeldes verwendet werden.
- Die Spektrometerwand wirkt als Faraday'scher Käfig und schirmt den Innenraum von elektrischen Feldern ab. Durch die Drahtelektrode kann das elektrische Feld im Innenraum so unabhängig von äußeren Feldern gesteuert werden.

Im Vorspektrometer wird nur eine Drahtlage angebracht, während im Hauptspektrometer zwei Drahtlagen mit Potentialdifferenzen von jeweils ca. 100 V angebracht werden. Weitere Details zur Drahtelektrode finden sich in [Hug08], [Val08] und [Hil10].

1.2.4. Der Detektor

Elektronen, die das elektrische Gegenfeld überwinden, werden wieder auf ihre ursprüngliche Energie beschleunigt und von einem Detektor gezählt. Als Detektor kommt ein segmentierter Silizium-Halbleiter Detektor mit einem Durchmesser von 9 cm und 148 Pixeln zum Einsatz. Der Detektor muss folgende Anforderungen erfüllen:

- Hohe Nachweiseffizienz für Elektronen aus dem Tritium- β -Zerfall.
- Eine hohe Energieauflösung für Untergrunduntersuchungen.
- Eine niedrige Untergrundzählrate.

Durch eine Nachbeschleunigung der Elektronen kann ein Kanal des Detektors ausgewählt werden, in dem möglichst wenig Untergrundereignisse, zum Beispiel aus dem Zerfall von Uran- und Thorium-Verunreinigungen in der Umgebung des Detektors, erwartet werden. Die Segmentierung erlaubt eine Analyse der Feldverteilung im Inneren der Spektrometer sowie eine Analyse und Diskriminierung von Untergrundelektronen, die von außen in den Flussschlauch eindringen. Zur Reduzierung des Untergrunds wird der Detektor von einem aktiven Myonen-Veto-Schild aus Plastiksintillatoren und einer passiven Abschirmung aus mehreren Lagen Cu und Pb umgeben sein.

1.3. Überwachung der Retardierungsspannung beim KATRIN-Experiment

Die Retardierungsspannung ist eine der zentralen Parameter aus dem die Messgröße $m_{\nu_e}^2$ des KATRIN-Experiments bestimmt wird. Im folgenden sollen Einflüsse auf die Sensitivität des KATRIN-Experiments dargestellt werden, die sich aus der Unsicherheit der Überwachung der Retardierungsspannung ergeben, um daraus Anforderungen an die Überwachung

der Retardierungsspannung formulieren zu können. Danach wird dargestellt, mit welchen Maßnahmen diese Anforderungen erreicht werden sollen [KAT04].

1.3.1. Anforderungen an die Überwachung der Retardierungsspannung

Die geplante Sensitivität des KATRIN-Experiments von $0,2 \text{ eV}/c^2$ setzt sich aus den geplanten statistischen Unsicherheiten von

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

und den systematischen Unsicherheiten von

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

zusammen. In der Analyse des Spektrums wird der Parameter $m_{\nu_e}^2$ betrachtet. Die Sensitivität des Experiments bei einer Sicherheit von 1σ ergibt sich gemäß:

$$(\Delta m(1\sigma))^2 = \sqrt{(0,018 \text{ eV}^2/c^4)^2 + (0,017 \text{ eV}^2/c^4)^2} \quad (1.3.3)$$

$$(1.3.4)$$

Daraus ergibt sich die Sensitivität des KATRIN-Experiments: $0,2 \text{ eV}/c^2$ (2σ), $0,3 \text{ eV}/c^2$ (3σ) und $0,35 \text{ eV}/c^2$ (5σ).

Im KATRIN Design Report [KAT04] wurde die Unsicherheit der Bestimmung der Retardierungsspannung als eine der fünf Hauptquellen der systematischen Unsicherheit identifiziert. Ihr Beitrag zur gesamten systematischen Unsicherheit darf daher

$$\Delta m_{\text{syst},U_{\text{ret}}}^2 \leq 0,0075 \text{ eV}^2/c^4 \quad (1.3.5)$$

nicht überschreiten⁵. Im folgenden wird dargestellt, welche Ansprüche an die Überwachung der Retardierungsspannung aus dieser Grenze der systematischen Unsicherheit folgen.

Die Analyse der Zählrate enthält den Endpunkt des Spektrums als freien Parameter. Die Neutrinomasse wird also hauptsächlich aus der Form des Spektrums nahe dem Endpunkt bestimmt. Daher leistet die absolute Kalibrierung der Retardierungsspannung keinen Beitrag zur systematischen Unsicherheit. Da es sich um einen integrierenden Aufbau handelt, ist vielmehr eine Fluktuation der Retardierungsspannung Hauptquelle der systematischen Unsicherheit in diesem Bereich. Dies soll ausgehend von der theoretischen Form des β -Spektrums (Gl. 1.1.21) skizziert werden [Thu07].

⁵ $0,017 \text{ eV}/c^2 = \sqrt{5 (0,0075 \text{ eV}^2/c^4)^2}$.

Das Tritium- β -Spektrum hängt von vielen Faktoren ab. Im folgenden soll die Zählrate S jedoch nur in Abhängigkeit von der Energie E und der Neutrinomasse m_{ν_e} betrachtet werden. Alle weiteren Faktoren sollen in einem einzelnen Faktor a zusammengefasst werden. Für die theoretische Zählrate S_{theo} als Funktion von E und m_{ν_e} ergibt sich:

$$S_{theo}(E, m_{\nu_e}) = \frac{d^2 N}{dtdE} = a \cdot (E_0 - E) \sqrt{(E_0 - E)^2 - m_{\nu_e}^2 c^4}. \quad (1.3.6)$$

Für eine verschwindende Neutrinomasse folgt:

$$S_{theo}(E, m_{\nu_e} = 0) = a \cdot (E_0 - E)^2. \quad (1.3.7)$$

Eine Zählrate, bei der eine unbekannte gaußförmigen Fluktuation $f(x)$ der Retardierungsspannung auftritt, lässt sich durch eine Faltung der theoretischen Zählrate bei einer verschwindenden Neutrinomasse $S_{theo}(E, m_{\nu_e} = 0)$ mit der gaußförmigen Fluktuation der Retardierungsspannung $f(x)$ simulieren⁶. Für diese simulierte Zählrate $S_{sim}(E, 0)$ folgt:

$$\begin{aligned} S_{sim}(E, 0) &= f(x) \otimes S_{theo}(E, 0) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot S_{theo}(E - x, 0) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} a \cdot (E_0 - E + x)^2 dx \\ &= a(E_0 - E)^2 \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}_{=1} + 2a(E_0 - E) \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}_{=0} \\ &\quad + a \underbrace{\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx}_{=\sigma^2} \\ S_{sim}(E, 0) &= a(E_0 - E)^2 + a\sigma^2. \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

Nun würde eine Analyse dieser simulierten Zählrate erfolgen, indem ein Fit mit der theoretischen Zählrate $S_{theo}(E, m_{\nu_e})$ (Gl. 1.3.6) mit endlicher Neutrinomasse durchgeführt wird. Dies soll hier skizziert werden, indem die theoretische Zählrate $S_{theo}(E, m_{\nu_e})$ in eine Taylor-Reihe bis zur 2. Ordnung entwickelt wird:

⁶Über die Elementarladung e ist die Retardierungsspannung mit einer Retardierungsenergie verknüpft.

$$S_{2,O}(E, m_\nu) = a \cdot (E_0 - E)^2 - a \cdot \frac{1}{2} m_{\nu_e}^2 c^4. \quad (1.3.9)$$

Aus einem Koeffizientenvergleich von simulierter Zählrate $S_{sim}(E, 0)$ (Gl. 1.3.8) und theoretischer Zählrate $S_{2,O}(E, m_\nu)$ (Gl. 1.3.9) folgt:

$$m_{\nu_e}^2 c^4 = -2\sigma^2 \quad (1.3.10)$$

Da die simulierte Zählrate von einer verschwindenden Neutrinomasse ausgegangen ist, führt eine gaußförmige Fluktuation der Retardierungsenergie also zu einem scheinbaren negativen Beitrag zum Neutrinomassenquadrat.

Aus diesem Zusammenhang lassen sich mit der maximalen systematischen Unsicherheit der Retardierungsspannung (Gl. 1.3.5) die Anforderungen an die Stabilität der Retardierungsenergie berechnen:

$$\Delta m_{\text{syst}, U_{\text{ret}}}^2 \leq 0,0075 \text{eV}^2 / c^4 \Rightarrow \sigma \leq 0,061 \text{eV}. \quad (1.3.11)$$

Die Unsicherheit der Retardierungsenergie überträgt sich über die konstante Elementarladung e direkt auf die Retardierungsspannung. Eine ausführlichere Betrachtung von systematischen Einflüssen der Retardierungsspannung in [Kas04] kommt zu ähnlichen Ergebnissen für die benötigte Messsicherheit der Retardierungsspannung. Die Maßnahmen, die das Erreichen dieser Anforderungen ermöglichen sollen, werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

1.3.2. Maßnahmen zur Überwachung der Retardierungsspannung

Die Retardierungsspannung muss über die gesamte Messdauer des KATRIN-Experiments von ca. 3 Jahren bis auf 61 mV bekannt sein. Dies entspricht einer relativen Sicherheit von 3,3 ppm⁷ bei 18,6 kV. Um diese Präzision zu erreichen, werden drei Ansätze verfolgt (Abb. 1.6):

- Die Kalibrierungsstrecke

Die Ergebnisse der Hauptstrecke des KATRIN-Experiments können jederzeit über die Kalibrierungsstrecke an Kalibrierungsquellen und damit an nukleare oder atomare Standards gekoppelt werden. Zu diesem Zweck werden zwei verschiedene Elektronenquellen mit scharfen und wohldefinierten Linien entwickelt. Eine nutzt Konversionselektronen aus dem Zerfall von ^{83m}Kr. Die verwendeten Linien liegen bei ca. 17,8 keV und ca. 30 keV [Smo08]. Die andere nutzt Photoelektronen, die von ²⁴¹Am γ -Strahlen aus einer Co-Folie ausgelöst werden. Aus diesem Prozess resultiert eine Elektronenenergie von ca. 18,6 keV.

⁷Ein ppm (part(s) per million) entspricht einer relativen Abweichung von 10^{-6} .

- Direkte Kalibrierung des Hauptspektrometers
Zwischen den Messzyklen können Kalibrierungsphasen der Hauptstrecke durchgeführt werden, indem entweder eine weitere spezielle $^{83\text{m}}\text{Kr}$ -Konversionselektronenquelle an der Pumpstrecke in die Hauptstrecke eingekoppelt wird, oder indem $^{83\text{m}}\text{Kr}$ direkt dem Tritium-Gas der Quelle beigemischt wird. Dies wird durch die geringe Halbwertszeit von $^{83\text{m}}\text{Kr}$ möglich, die bei lediglich 1,8 h liegt.
- Direkte Messung der Retardierungsspannung
Die auftretenden Spannungen bei Tritium Messzyklen (18,6 kV), aber auch während der Kalibrierungsphasen (bis zu 32 kV), sollen direkt gemessen werden. Dazu soll die Retardierungsspannung zunächst von einem Spannungsteiler heruntergeteilt und anschließend von einem Voltmeter vermessen werden.

Die direkte Messung der Retardierungsspannung ist auch bei den beiden anderen Kalibrierungskonzepten nötig. Sie muss daher die volle Präzision von 3,3 ppm über die gesamte Messdauer des Experiments erreichen. Als Voltmeter für diese Messung kommt ein Präzisionsdigitalmultimeter vom Typ Fluke 8508A Reference Multimeter zum Einsatz. Die geringsten relativen Unsicherheiten dieses Voltmeters werden im 10 V Messbereich erreicht, der Spannungsmessungen von bis zu 20 V erlaubt. Die relative Unsicherheit des Multimeters im 10 V Messbereich (über 365 Tage und Schwankungen der Umgebungstemperatur von maximal $\pm 1^\circ\text{C}$ um die Kalibrierungstemperatur) wird mit 2,7 ppm (95% C.L.) des Messwerts zuzüglich 0,2 ppm (95% C.L.) des Messbereichs angegeben [Flu85]. Bei Messbereichen für höhere Spannungen steigt die relative Unsicherheit an. Bei Messbereichen für niedrigere Spannungen bleibt die relative Unsicherheit des Voltmeters zwar konstant, der Einfluss von absoluten Unsicherheiten der Messkette, wie Kontakt- und Thermospannungen, steigt jedoch an. Für Spannungen von 10 V existieren außerdem sehr gute Kalibrierungsquellen mit einer Stabilität von < 1 ppm pro Jahr (Fluke 732A Reference Standard). Bei einer jährlichen Kalibrierung der Referenzspannungsquelle und durch eine Kalibrierung der Messwerte des Präzisionsmultimeters mit der 10 V Referenzspannungsquelle, erreicht die Spannungsmessung eine Sicherheit von < 1 ppm. Die Messspannung sollte möglichst nahe an der Spannung der Referenzquelle liegen, um nichtlineare Abweichungen des Multimeters ausschließen zu können. Das Herunterteilen der Retardierungsspannung sollte daher auf den Bereich von 9 V bis 11 V erfolgen. Im Zusammenhang mit dem KATRIN-Experiment wird dieser Bereich im folgenden 10 V Messbereich genannt.

Das Verhältnis von Eingangs- und Ausgangsspannung, im technischen Bereich Maßstabsfaktor M genannt, ist die zentrale Größe des Spannungsteilers. Die Anforderung an die Stabilität des Maßstabsfaktors des Spannungsteilers ergibt sich aus den systematischen Unsicherheiten der Messkette:

- Die Unsicherheit des Multimeters kann durch Kalibrierungen mit der 10 V Referenzquelle auf < 1 ppm pro Jahr verbessert werden.
- Die Messdauer des Multimeters liegt im Bereich von einigen Sekunden. Eine Restwelligkeit der Spannung kann durch diese Messkette daher nicht festgestellt werden. Die Netzgeräte für das KATRIN-Experiment sind bisher nicht spezifiziert. Kommerzielle Netzteile, die in Betracht kommen, erreichen eine Restwelligkeit von 20 mV, bei 18,6 kV umgerechnet 1 ppm.

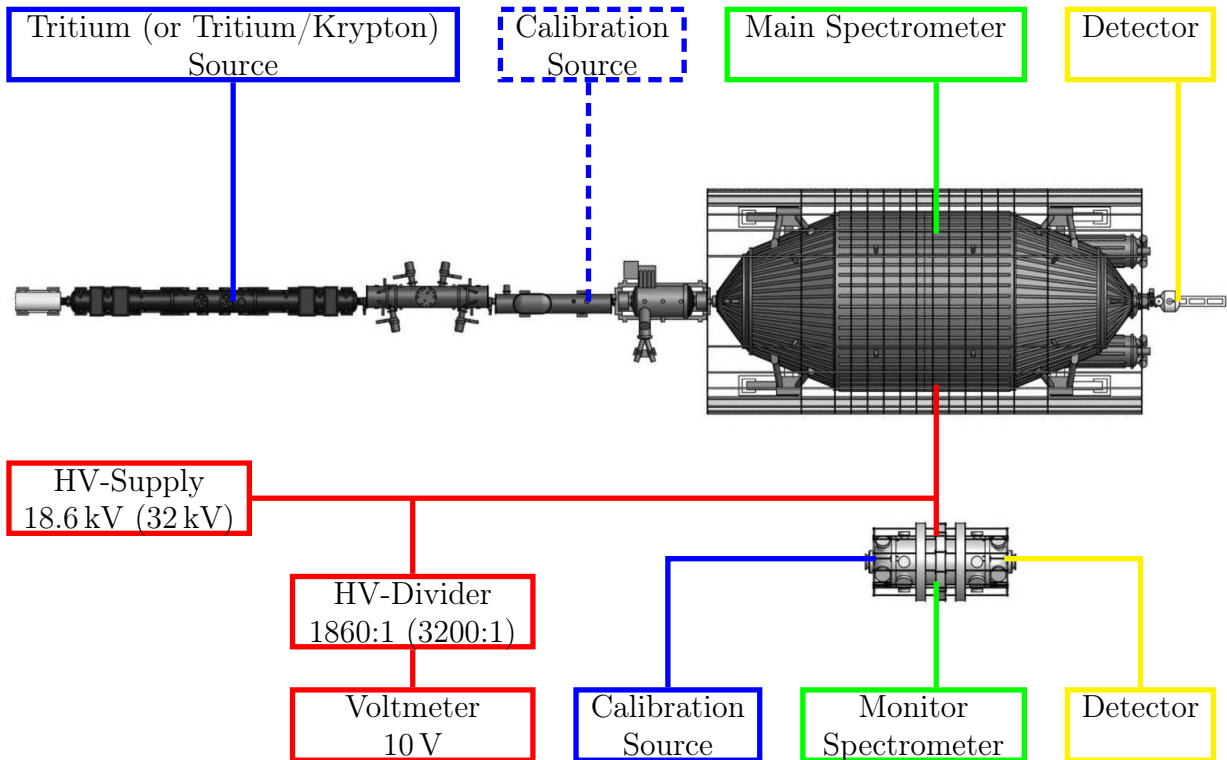


Abbildung 1.6.: Kalibrierungsmaßnahmen beim KATRIN-Experiment. Gezeigt sind die Maßnahmen, die beim KATRIN-Experiment getroffen werden, um eine Überwachung der Retardierungsspannung mit einer Genauigkeit von 3,3 ppm zu ermöglichen. Das Monitorspektrometer ist vergrößert dargestellt. Die Werte in Klammern gelten für den Kalibrierbetrieb der Hauptstrecke.

Um genügend Sicherheit für eine Fehleinschätzung der Beiträge zu haben, darf die Unsicherheit des Maßstabsfaktors 1 ppm nicht übersteigen. Für Eingangsspannungen von bis zu 32 kV existieren keine kommerziellen Geräte mit einer Stabilität des Maßstabsfaktors von $< 10^{-5}$. Daher wurde die Entwicklung eines Hochpräzisen-Spannungsteilers angestrengt, der die Anforderungen des KATRIN-Experiments erfüllt. Die Sicherheit des Maßstabsfaktors muss durch regelmäßige Kalibrierungen sichergestellt werden. Nach den ersten beiden Kalibrierungen kann eine Langzeitstabilität des Maßstabsfaktors abgeschätzt werden. Aus dieser Langzeitstabilität ergibt sich die Periode der nötigen Kalibrierungen. Kalibrierungen erfordern ein umfangreiches Messprogramm mit einer Dauer von mehreren Tagen an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) Braunschweig. Um den Messbetrieb des KATRIN-Experiments möglichst selten wegen Kalibrierungen des Spannungsteilers unterbrechen zu müssen, ist eine möglichst hohe Stabilität des Maßstabsfaktors Ziel der Entwicklung.

Aus den experimentellen Rahmenbedingungen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an den Spannungsteiler:

- Beim Betrieb der Quelle mit einem Tritium-Krypton Gasgemisch müssen Spannungen von bis zu 32 kV mit der angegebenen Präzision messbar sein. Die Infrastruktur aus Netzgeräten, Kabeln und Verbindern ist auf Spannungen von bis zu 35 kV spezifiziert. Diese Spezifikation überträgt sich direkt auf den Spannungsteiler. In Kapitel 4.1 wird die Eignung der KATRIN-Spannungsteiler für das BeTINA-Experiment diskutiert. Für

den temporären Einsatz des zweiten KATRIN-Spannungsteilers beim BeTINa-Experiment sollte die Spannungsfestigkeit auf 65 kV erhöht werden.

- Um auch bei Spannungen von 32 kV den Bereich von 10 V Messbereich zu erreichen, werden zwei Maßstabsfaktoren von ca. 1860:1 und 3200:1 benötigt.
- Im Messbetrieb wird der Spannungsteiler nahe dem Hauptspektrometer in einer unklimatisierten Halle stehen. Die Stabilität der Maßstabsfaktoren muss unabhängig von äußeren Einflüssen, wie der Umgebungstemperatur und magnetischen Feldern, gegeben sein.
- Der Aufbau muss zu regelmäßigen Kalibrierungen an die PTB Braunschweig gebracht werden und daher transportabel ausgelegt sein.
- Die Überwachung der Betriebsparameter muss sich in die Slow-Control⁸ des Experiments auf der Basis von LabView integrieren lassen.
- Um das Langzeitverhalten des Spannungsteilers nachvollziehen und extrapolieren zu können, ist die Führung einer lückenlosen Kalibrierungshistorie nötig.

Von Dr. T. Thümmel wurde in Zusammenarbeit mit der PTB Braunschweig ein Spannungsteiler entwickelt, der diese Anforderungen erfüllt. Aus verschiedenen Gründen wurde die Entwicklung eines weiteren, zweiten Spannungsteilers angestrengt:

- Beim ersten Spannungsteiler handelt es sich um ein zentrales und schwer ersetzbares Gerät. Bei einem Defekt des ersten Spannungsteilers kann durch den zweiten Spannungsteiler der Messbetrieb des Experiments fortgesetzt werden.
- Durch einen zweiten Spannungsteiler kann auch bei der Kalibrierung des ersten Spannungsteilers an der PTB der Messbetrieb des Experiments fortgesetzt werden.
- Zwei Spannungsteiler erlauben eine gegenseitige Kalibrierung durchzuführen.
- Bei der Entwicklung des zweiten Spannungsteilers soll aus der Entwicklung des ersten Spannungsteilers gelernt werden. Dadurch soll eine Verbesserung der Stabilität des zweiten Spannungsteilers erreicht werden.
- Auch bei anderen Experimenten, wie dem BeTINa-Experiment, sind hochpräzise Spannungsmessungen nötig, um systematische Unsicherheiten zu reduzieren. Ein zweiter Spannungsteiler erlaubt den temporären Einsatz eines Spannungsteilers bei anderen Experimenten.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung des zweiten Spannungsteilers, um damit einen Beitrag zur Verbesserung der Genauigkeit und Stabilität der Überwachung der Retardierungsspannung beim KATRIN-Experiment zu leisten. Im folgenden wird der erste KATRIN-Spannungsteiler kurz vorgestellt. Abschließend folgt eine Gliederung dieser Arbeit.

⁸Slow-Control bezeichnet die Überwachung von sekundären Betriebsparametern, wie z.B. der Umgebungstemperatur.

1.3.3. Der erste KATRIN-Spannungsteiler

Der erste KATRIN-Spannungsteiler folgt in weiten Teilen den Vorgaben des Referenzspannungsteilers der Abteilung für Messwandler und Hochspannung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig [Mar01], wobei der wesentliche Unterschied in den verwendeten Widerständen besteht.

Der mechanische Aufbau des Spannungsteilers besteht aus 5 kreisförmigen Kupferelektroden mit einem Durchmesser von 460 mm, die in einem Abstand von 105 mm übereinander angebracht sind. Zwischen diesen Kupferelektroden befinden sich drei separate Teilerketten. Die oberste Elektrode verbindet die drei Teilerketten mit der Hochspannung. Die unterste Elektrode ist über einen 45 k Ω Widerstand (Typ Caddock MS260) mit der Erde verbunden. Der gesamte Aufbau befindet sich in einem temperaturstabilisierten Edelstahltank.

Die primäre Teilerkette bildet den eigentlichen Spannungsteiler und besteht aus 100 Präzisionswiderständen vom Typ Vishay VHA-518-11 (jeweils 1,84 M Ω). Sie befindet sich helixförmig um die senkrechte Achse des Aufbaus, wobei auf jeder der vier Ebenen 25 Widerstände angebracht sind. Die Präzisionswiderstände sind elektrisch nicht mit den Elektroden verbunden, sondern werden zwischen den Elektroden über Durchführungen aneinander gekoppelt. An die Präzisionswiderstände schließt sich eine Anordnung von Abgriffwiderständen (ebenfalls Präzisionswiderstände vom Typ Vishay VHA-518-11) an, die aus insgesamt sechs Widerständen mit jeweils 140 k Ω besteht, und Maßstabsfaktoren von $M_{1972} = 1972 : 1$ und $M_{3945} = 3945 : 1$ ermöglicht. Die Anordnung besteht aus zwei in Reihe geschalteten Blöcken von jeweils drei parallelen Widerständen (Abb. 1.7). Die Maßstabsfaktoren M_{1972} und M_{3945} ergeben sich gemäß:

$$\frac{1}{M_{1972}} = \frac{2 \frac{140 \text{ k}\Omega}{3}}{2 \frac{140 \text{ k}\Omega}{3} + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{93 \text{ k}\Omega}{93 \text{ k}\Omega + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{1972} = 0,000507 \quad (1.3.12)$$

$$\frac{1}{M_{3945}} = \frac{\frac{140 \text{ k}\Omega}{3}}{\frac{140 \text{ k}\Omega}{3} + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{47 \text{ k}\Omega}{47 \text{ k}\Omega + 184 \text{ M}\Omega} = \frac{1}{3945} = 0,000254 \quad (1.3.13)$$

Die sekundäre Teilerkette verbindet die Elektroden über vier Hochspannungswiderstände und ermöglicht so eine Formung des elektrischen Feldes zwischen den Elektroden. Die Hochspannungswiderstände sind vom Typ Caddock MX480 und haben einen Widerstand von jeweils 44 M Ω (Abb. 1.7).

Die tertiäre Teilerkette besteht aus vier Kondensatoren vom Typ Vishay MKT1816 (Kapazität je 2,5 nF) zum Schutz der primären Teilerkette bei plötzlichen Spannungssprüngen (Abb. 1.7). Ohne diese Teilerkette könnte es bei plötzlichen Spannungssprüngen zu hohen Spannungen an einzelnen Widerständen kommen.

Ein Schaltbild des Spannungsteilers zeigt Abb. 1.7, ein Foto Abb.1.8.

Dieser Spannungsteiler wurde zweimal am Referenzspannungsteiler MT100 der PTB Braunschweig kalibriert. Bei diesen Kalibrierungen wurden das Einschaltverhalten, die Langzeitstabilität, die Spannungsabhängigkeit und die Temperaturabhängigkeit der Maßstabsfaktoren

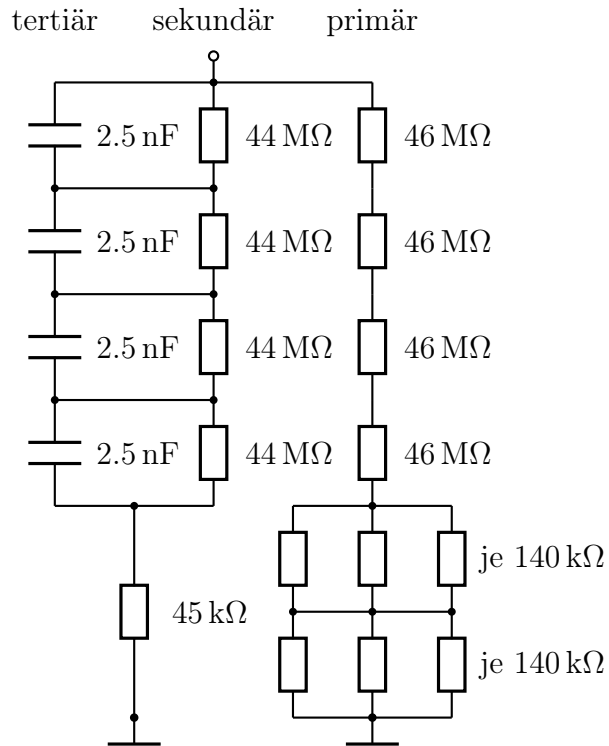


Abbildung 1.7.: Schaltbild des ersten KATRIN-Spannungsteilers. Gezeigt sind die drei Teilerketten des ersten Spannungsteilers sowie die Abgriffwiderstände bestehend aus 6 Widerständen mit jeweils $140\text{ k}\Omega$. Die Widerstände der primären Teilerkette sind ebenenweise zu einem Widerstand zusammengefasst.

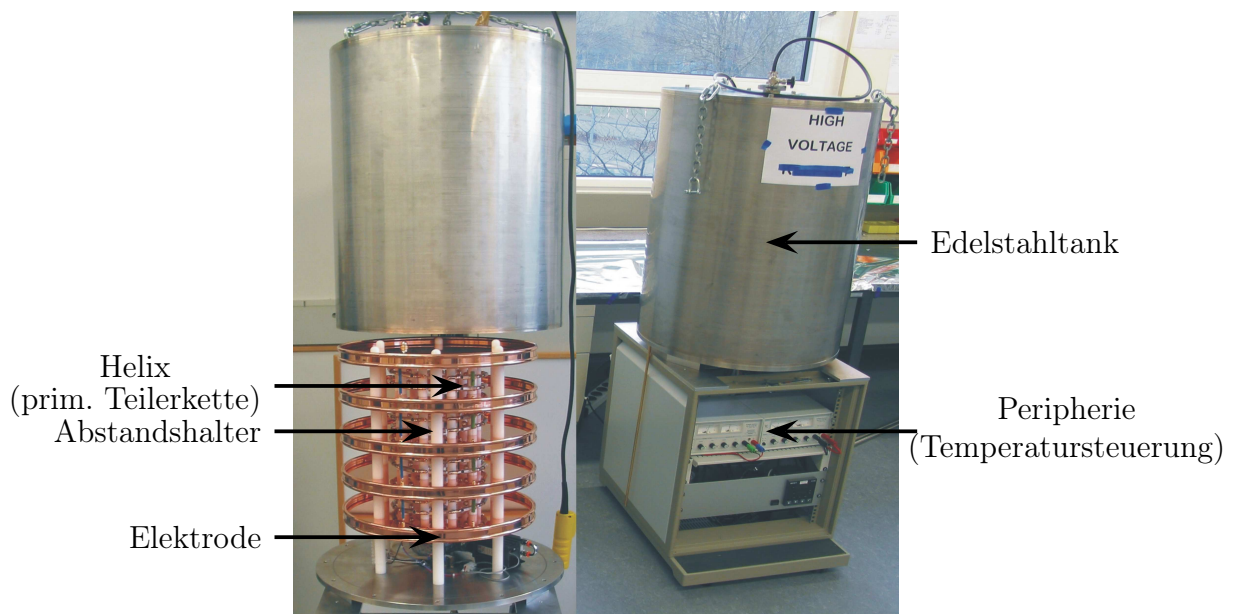


Abbildung 1.8.: Der erste KATRIN-Spannungsteiler. Auf dem linken Foto sind die Elektroden, die Abstandhalter sowie die Teilerketten sichtbar. Auf dem rechten Foto sieht man den fertigen Aufbau, erkennbar ist nur noch der temperaturstabilisierte Edelstahltank sowie die Steuergeräte zur Temperaturstabilisierung und -überwachung im Podest.

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 ersten 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.

untersucht. Aus der Gesamtzahl aller gemessenen Maßstabsfaktoren wurde ein mittlerer Kalibrierungswert bestimmt. Die Ergebnisse der Kalibrierungen zeigt Tabelle 1.1. Hervorzuheben für die Entwicklung des zweiten Spannungsteilers sind folgende Punkte der Kalibrierung:

- Zwischen den Kalibrierungen von 2005 und 2006 hat sich der Maßstabsfaktor um 7,9 ppm verändert. Nimmt man einen linearen Verlauf dieser Langzeitdrift an, ergibt sich eine Drift von 0,6 ppm pro Monat. Sobald eine dritte Kalibrierung des Spannungsteilers durchgeführt wurde, kann eine Aussage über die Art der Drift gemacht werden. Entspricht die Drift der Beschreibung aus den Datenblättern der Vishay Widerstände, wird eine Sättigung der Drift erwartet. Eine genaue Betrachtung der Langzeitdrift wird in Abschnitt 2.3.4 durchgeführt. Ziel bei der Entwicklung des zweiten Spannungsteilers ist es, eine Verbesserung der Langzeitstabilität der Maßstabsfaktoren zu erreichen.
- Nach der Entwicklung des ersten Spannungsteilers wurde ein Betrag des Temperaturkoeffizienten der Maßstabsfaktoren von $\leq 0,02$ ppm/K erwartet. Das Ergebnis von -0,081(6) ppm/K bzw. -0,171(73) ppm/K liegt deutlich über dieser Erwartung. Durch die gute Temperaturstabilisierung des Spannungsteilers auf sind im Messbetrieb keine Auswirkungen des Temperaturkoeffizienten zu erwarten. Bei der Entwicklung des ersten Spannungsteilers wurde der Einfluss der Abgriffwiderstände zu wenig beachtet. Die Temperaturkoeffizienten der beiden Maßstabsfaktoren zeigen außerdem ein unterschiedliches Vorzeichen. Dies deutet darauf hin, dass primär die Abgriffwiderstände für den Temperaturkoeffizienten verantwortlich sind (vgl. Abb. 1.7). Beim zweiten Spannungsteiler soll daher besonderes Augenmerk auf das Design der Umgebung der Abgriffwiderstände gelegt werden.

Betrachtet man das Kalibrierungsergebnis insgesamt, lässt sich eine Stabilität und Reproduzierbarkeit im ppm-Bereich festhalten. Der erste KATRIN-Spannungsteiler erreicht damit

dem PTB Referenzspannungsteiler vergleichbare Werte und erfüllt so die Anforderungen des KATRIN-Experiments.

1.4. Diese Arbeit

In dieser Arbeit wird die Entwicklung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers dargestellt. Ziel der Entwicklung ist eine möglichst hohe Stabilität der Maßstabsfaktoren zu erreichen. Dies verhindert teure und zeitaufwändige Kalibrationen. Dazu sollen die Erfahrungen, die beim Bau des ersten Spannungsteiler gewonnen wurden, in die Entwicklung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers einfließen. Ziel der Entwicklung des zweiten Spannungsteilers ist eine Verbesserung der Langzeitstabilität der Maßstabsfaktoren zu erreichen. Dazu sollen die verwendeten Widerstände verbessert werden. Weiterhin soll der Temperaturkoeffizient der Maßstabsfaktoren verbessert werden. Dazu sollen die Umgebung der Abgriffwiderstände und die Abgriffwiderstände selbst verbessert werden. Durch zusätzliche Maßstabsfaktoren soll eine Selbstkalibrierung der Spannungsteiler nach dem Vorbild der PTB ermöglicht werden. Für den Einsatz des zweiten Spannungsteilers beim BeTINA-Experiment soll die Spannungsfestigkeit auf 65 kV erhöht werden. Außerdem sollen weitere, bisher nicht untersuchte Einflüsse auf die Maßstabsfaktoren untersucht werden, weitere Funktionen hinzugefügt und praktische Verbesserungen am Design getätigt werden.

Die einzelnen Schritte, die zur Entwicklung des zweiten Spannungsteilers durchlaufen wurden, sind Inhalt dieser Arbeit. Die Gliederung der einzelnen Schritte erfolgt von innen nach außen, das heißt von den Maßstabsfaktoren der primären Teilerkette, über die restlichen spannungsführenden Komponenten zu äußeren Ansprüchen wie der Temperaturstabilisierung und Handhabung.

- Kapitel 2 - Elektrisches Design
In diesem Kapitel wird der elektrische Aufbau des Spannungsteilers ausgehend von einem einfachen Ersatzschaltbild dargestellt, um anschließend alle Einflüsse von spannungsführenden Bauteilen auf die Maßstabsfaktoren zu untersuchen.
- Kapitel 3 - Mechanisches Design
In diesem Kapitel wird die mechanische Realisierung des elektrischen Designs entwickelt. Auch die mechanische Realisierung des elektrischen Designs hat eine möglichst hohe Stabilität der Maßstabsfaktoren zum Ziel und soll außerdem eine einfache Handhabung des Spannungsteilers gewährleisten.
- Kapitel 4 - Eignung der KATRIN-Spannungsteiler für das BeTINA-Experiment
In diesem Kapitel wird die Eignung der beiden KATRIN-Spannungsteiler für die Reduzierung von systematischen Unsicherheiten der Spannungsüberwachung beim BeTINA-Experiment untersucht.
- Kapitel 5 - Ausblick
In diesem Kapitel wird der Status der Realisierung des Designs des zweiten KATRIN-Spannungsteilers dargestellt. Außerdem wird die Übertragung des Designs auf einen

Spannungsteiler für Spannungen von bis zu 5 kV beschrieben. Abschließend findet sich eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit.

- Anhang

Der Anhang enthält eine genaue Beschreibung der Messungen, die für die Spezifizierung der Widerstände der primären Teilerkette durchgeführt wurden. Er enthält außerdem die Baupläne der mechanischen Komponenten des Spannungsteilers und die Rohdaten der Messung, die für die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der beiden KATRIN-Spannungsteiler für das BeTINa-Experiment durchgeführt wurden.

ELEKTRISCHES DESIGN

Um die Sensitivität des KATRIN-Experiments zu erreichen, ist ein Spannungsteiler erforderlich, der die auftretenden Retardierungsspannungen von bis zu 32 kV auf den 10 V-Messbereich eines Voltmeters herunterteilt. Das Verhältnis von Eingangs- und Ausgangsspannung, im technischen Bereich Maßstabsfaktor M genannt, ist die zentrale Größe des Spannungsteilers. Aus der Betrachtung der systematischen Unsicherheiten des Experiments ergibt sich eine Anforderung an die Sicherheit der Maßstabsfaktoren von etwa 1 ppm über die Dauer des Experiments von mehreren Jahren. Eine hohe Stabilität der Maßstabsfaktoren verhindert teure und zeitaufwändige Kalibrierungen und ist daher Ziel der Entwicklung.

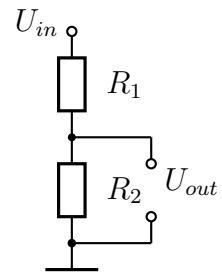
In diesem Kapitel wird der elektrische Aufbau des Spannungsteilers ausgehend von einem einfachen Ersatzschaltbild dargestellt, um anschließend alle Einflüsse von spannungsführenden Bauteilen auf die Maßstabsfaktoren zu untersuchen.

2.1. Die primäre Teilerkette

Die primäre Teilerkette des zweiten Spannungsteilers soll die auftretenden Retardierungsspannungen auf den Messbereich von 10 V herunterteilen. Die einfachste Realisierung eines Spannungsteilers besteht aus zwei in Serie geschalteten Widerständen (Abb. 2.1). Der Maßstabsfaktor M ergibt sich gemäß¹:

$$\frac{1}{M} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \quad (2.1.1)$$

Abbildung 2.1.: Einfachster Spannungsteiler. Die einfachste Realisierung eines Spannungsteilers besteht aus zwei in Serie geschalteten Widerständen. Widerstand R_1 wird auch als Teilerwiderstand, Widerstand R_2 auch als Abgriffwiderstand bezeichnet.



Da der sogenannte Abgriffwiderstand R_2 im folgenden wesentlich kleiner als der sogenannte Teilerwiderstand R_1 sein wird, lässt sich der Gesamtwiderstand R_{ges} der Schaltung durch $R_{\text{ges}} \approx R_1$ annähern. Der Fehler dieser Näherung entspricht dem Kehrwert des Maßstabsfaktors, bei einem Maßstabsfaktor von 100 : 1 beträgt der Fehler also 1%.

Die Größe des Gesamtwiderstands R_{ges} bestimmt den Strom, der durch den Spannungsteiler fließt. Große Ströme führen zu einer hohen Entwicklung von Joulescher Wärme. Bei der Entwicklung des Spannungsteilers müssen die Widerstände bei verschiedenen Strömen untersucht werden, die nicht notwendigerweise dem Strom im Messbetrieb entsprechen. Widerstände verändern sich unter dem Einfluss von Wärme. Ein hoher Strom führt daher möglicherweise zu einer Veränderung der Maßstabsfaktoren im Messbetrieb. Kleine Ströme bedeuten zwar generell niedrigere Wärmebelastungen, für ihre Realisierung werden jedoch sehr große Widerstände benötigt. Bei einem sehr hohen Innenwiderstand des Spannungsteilers steigt der Messfehler durch Leckströme. Als Kompromiss aus möglichst hohem und möglichst niedrigem Strom, wurde von der PTB Braunschweig ein Wert von $I_{\text{empf}} = 1 \text{ mA}$ empfohlen. Für R_1 und $U_{\text{mess}} = 18,6 \text{ kV}$ folgt damit:

$$R_1 \approx \frac{U_{\text{mess}}}{I_{\text{empf}}} = 186 \text{ M}\Omega \quad (2.1.2)$$

Aus Gleichung (2.1.1) ergibt sich für Größe des Widerstands R_2 :

¹Bei der Messung der Ausgangsspannung muss der Einfluss des Innenwiderstands R_{in} auf den Maßstabsfaktor berücksichtigt werden. Für $R_{\text{in}} \gg R_2$ lässt sich dieser vernachlässigen.

$$R_2 = \frac{R_1}{M}. \quad (2.1.3)$$

Zu beachten ist, dass die Spannungsfestigkeit der Widerstände auf die angelegte Spannung abgestimmt sein muss. Ist die Spannungsfestigkeit von einzelnen Widerständen zu gering, kann es nötig sein, mehrere Widerstände in serieller Schaltung anstelle eines einzigen Widerstands einzusetzen.

Für den zweiten KATRIN-Spannungsteiler wurden vier Maßstabsfaktoren spezifiziert:

- $M_1 \approx 3200 : 1$
Dieser Maßstabsfaktor soll im Kalibrierbetrieb Eingangsspannungen von 32 kV auf den 10 V Messbereich herunterteilen.
- $M_2 \approx 1860 : 1$
Dieser Maßstabsfaktor soll im Messbetrieb Eingangsspannungen von 18,6 kV auf den 10 V Messbereich herunterteilen.
- $M_3 \approx 500 : 1$
Durch diesen Maßstabsfaktor können auch Spannungen von ca. 5 kV auf den 10 V Messbereich heruntergeteilt werden. Spannungsmessungen in diesem Bereich sind bei anderen Projekten, z.B. der Krypton Kalibrierungsquelle, wichtig.
- $M_4 \approx 100 : 1$
Mit Hilfe eines Maßstabsfaktors von 100 : 1 ist eine Kalibrierung der übrigen Maßstabsfaktoren gemäß der PTB Arbeitsanweisung „Bestimmung des Teilverhältnisses MT100 10 V Ausgang“ möglich. Eine Erläuterung des Ablaufs findet sich auch in [Thu07].

Um diese Maßstabsfaktoren zu realisieren, muss das Ersatzschaltbild des Spannungsteilers (Abb. 2.1) um drei weitere Widerstände erweitert werden (Abb. 2.2). Der Abgriff der Spannungen erfolgt immer gegenüber dem Erdpotential. Ein Abgriff gegenüber einem anderen Potential ist stets zu vermeiden.

Um dieses Ersatzschaltbild zu realisieren, wurden kommerziell verfügbare Widerstände anhand ihrer Datenblätter verglichen. Der absolute Wert der Widerstände muss dabei nur so genau spezifiziert werden, dass der 10 V Messbereich des Voltmeters erreicht wird. Die Toleranz des Widerstandswertes kann daher auf $< 10\%$ festgelegt werden. Wichtig ist die Stabilität des Maßstabsfaktors, und damit des Widerstandswerts, gegenüber äußeren Einflüssen wie der Temperatur und der Zeit. Kriterien bei dem Vergleich waren daher der Temperaturkoeffizient und die Langzeitstabilität des Widerstands. Es fanden sich zwei Typen von Widerständen mit sehr geringen Temperaturkoeffizienten. Die Baureihe VHA-518 von Vishay, die bereits beim ersten KATRIN-Spannungsteiler verbaut wurde [Thu07] und die Baureihe USF-200 des Herstellers Caddock.

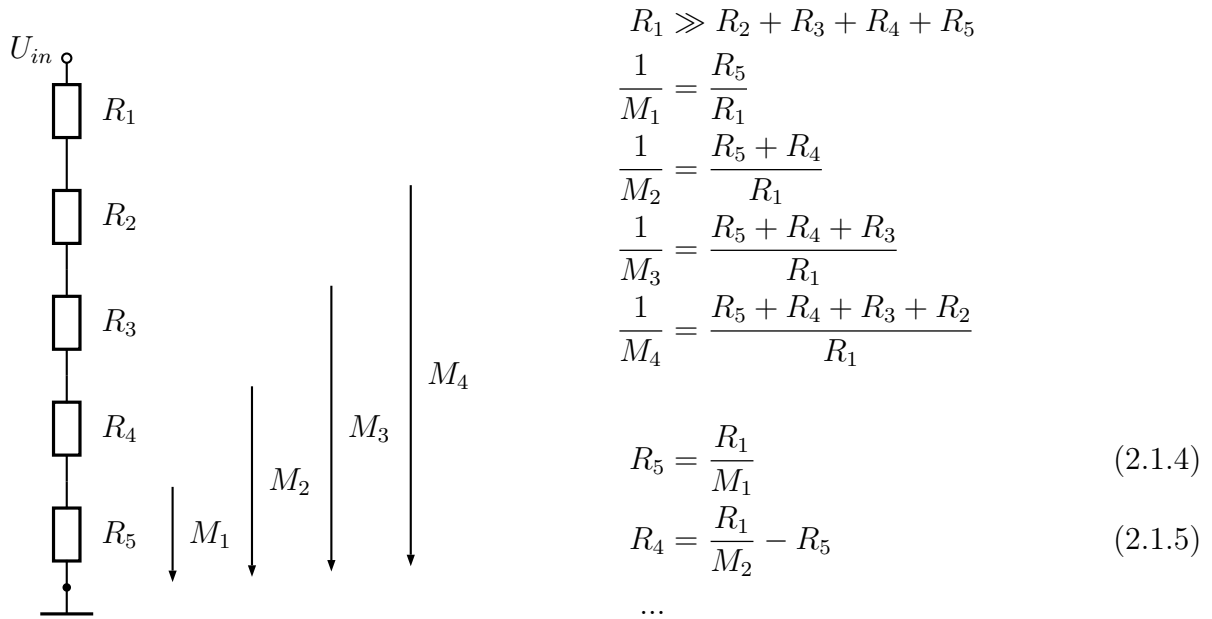


Abbildung 2.2.: Spannungsteiler mit vier Maßstabsfaktoren. Gezeigt ist das Ersatzschaltbild eines Spannungsteilers mit vier Maßstabsfaktoren M_1 bis M_4 . Eingetragen sind außerdem Formeln, um die einzelnen Widerstände R_2 bis R_5 aus dem Widerstand R_1 und den Maßstabsfaktoren abzuschätzen. Der Fehler der Abschätzung ist $\leq 1\%$.

Beide Hersteller geben den Temperaturkoeffizienten ihrer Widerstände mit maximal 0,2 ppm pro Kelvin an [Vis07][Cad04]. Die Langzeitstabilität unter Last (load-life stability) gibt Cad-dock mit $(+150 \pm 150)$ ppm über 2000 h bei 85 °C und maximaler Last an, die Langzeitstabilität bei lastfreier Lagerung (shelf-life stability) mit 10 ppm/Jahr. Die Langzeitstabilität unter Last ist in den Datenblättern von Vishay mit ± 50 ppm über 2000 h bei 70 °C und halber Maximalbelastung angegeben. Die Langzeitstabilität bei lastfreier Lagerung ist mit ± 2 ppm über mindestens 10 Jahre angegeben. Der Vergleich der Langzeitstabilität der beiden Typen und die guten Erfahrungen mit Vishay Widerständen beim ersten Spannungsteiler führen zur Spezifizierung von Vishay Widerständen der VHA-Serie für die primäre Teilerkette des zweiten Spannungsteilers. Widerstände der VHA-Baureihe sind mit maximal 1,84 MΩ erhältlich, R_1 wird daher durch mindestens 100 einzelne Widerstände realisiert.

Um die Stabilität von Widerständen untersuchen zu können, wurde ein Präzisions-Messstand aufgebaut, der die Vermessung von Widerstandsänderungen im sub-ppm Bereich erlaubt. Die benötigten Geräte für diesen Präzisionsmessstand standen von der Entwicklung des ersten Spannungsteilers zur Verfügung.

Die Eigenschaften der Widerstände können von uns nicht beeinflusst werden. Um trotzdem eine Verbesserung der Eigenschaften der Widerstände erreichen zu können, wurde der Kontakt mit der Firma Vishay, der beim Bau des ersten Spannungsteilers hergestellt wurde, auf eine Kooperation mit der Entwicklungsabteilung ausgedehnt. Für diese Kooperation werden Vishay unsere Messergebnisse zur Verfügung gestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen und den Ansprüchen des Projekts soll so eine Verbesserung der für dieses Projekt wichtigen

Eigenschaften der Widerstände erreicht werden.

Resultat der Kooperation sind weiterentwickelte Prototypen der VHA-Baureihe. Einige dieser Prototypen wurden uns als Testmuster zur Verfügung gestellt. In den folgenden Abschnitten wird zunächst der Präzisionsmessstand zur Vermessung der Widerstände dargestellt, um anschließend die einzelnen Untersuchungen und Verbesserungen an den Widerständen genau zu betrachten.

2.2. Präzisions-Messstand

Veränderungen von Widerständen können eine Änderung der Maßstabsfaktoren in einem Spannungsteiler bewirken. Möchte man einen Spannungsteiler mit Maßstabsfaktoren entwickeln, die eine Stabilität von 1 ppm über mehrere Jahre erreichen, ist es nötig, die Veränderung von Widerständen im Bereich von Bruchteilen von ppm bestimmen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein Messstand aufgebaut, mit dem Änderungen von Widerständen durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen und untersucht werden können.

Grundlage des Messstandes ist ein Vergleich des zu vermessenden Testwiderstands R_1 mit einem Referenzwiderstand R_2 . Dazu werden Referenz- und Testwiderstand in einem einfachen Spannungsteiler verschaltet (Abb. 2.1, R_1 entspricht dem Testwiderstand, R_2 dem Referenzwiderstand). Weitere Komponenten dieser Messkette sind eine Spannungsquelle (U_{in} in Abb. 2.1) und ein Voltmeter (U_{out} in Abb. 2.1).

Ändert sich der Testwiderstand R_1 durch einen bekannten äußeren Einfluss $R_1 \rightarrow R'_1$, ändert sich der Maßstabsfaktor entsprechend Gleichung (2.1.1) und damit auch die Ausgangsspannung $U_{out} \rightarrow U'_{out}$. Bleibt man bei der Näherung von $R_1 \gg R_2$, überträgt sich die relative Änderung der Ausgangsspannung direkt auf die relative Änderung des Testwiderstands (Gleichung 2.2.1). Die Genauigkeit dieser Messung hängt von der Stabilität der Spannungsquelle, des Voltmeters und des Referenzwiderstands ab.

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{R'_1}{R_1} - 1 = \frac{U_{out}}{U'_{out}} - 1 \quad (2.2.1)$$

Im folgenden wird der genaue Aufbau des Messstandes beschrieben. Dabei soll insbesondere die Stabilität von Spannungsquelle und Voltmeter untersucht werden. Die Stabilität des Referenzwiderstands wird bei jeder Messung einzeln diskutiert. Ein Foto des Messstandes zeigt Abb. 2.3.

Die Spannungsquelle stammt von der Firma Fluke und trägt die Bezeichnung 5720A Calibrator. Sie dient normalerweise zur Kalibrierung von anderen Spannungsquellen und Multimetern und erreicht daher eine besonders hohe Präzision und Stabilität. Sie liefert Spannungen von bis zu 1000 V bei einem maximalen Strom von 20 mA. Die absolute Unsicherheit der eingestellten Spannung wird mit 5 ppm (99% C.L.) über 24 h bei $U \leq 1000$ V angegeben, wenn man in einem Bereich von ± 5 K um die Kalibrierungstemperatur bleibt [Flu57]. Um



die größtmögliche Präzision für die Vermessung der Widerstände zu erreichen, ist es wichtig, folgendes zu beachten:

- Obwohl die Einlaufzeit des Geräts mit $< 5\text{ s}$ angegeben ist, sollte sie auf mindestens 24 h ausgedehnt werden, um die Stabilität zu verbessern.
- Das Gerät besitzt eine Funktion, um die Spannung an den Anschlüssen ein- und auszuschalten. Auf dem Bediendfeld ist diese Funktion mit „Operate/Standby“ beschriftet. Bei einer Überprüfung dieser Funktion wurde festgestellt, dass sich das Gerät, nachdem es eingelaufen ist, nicht länger als 10 min im Standby-Modus befinden darf. Sollte diese Zeit doch einmal überschritten werden, ist es nötig, dem Gerät wieder eine mindestens 24-stündige Einlaufzeit zu gewähren.
- Die Spannungserzeugung im Inneren des Gerätes ist in einem Faraday'schen-Käfig untergebracht. Über eine Buchse an der Vorderseite des Geräts kann dieser Faraday'sche-Käfig über die sogenannte Schutz- (engl: Guard-) Leitung mit anderen Teilen der Messkette verbunden werden. Dieses Prinzip ist auch bei dem Voltmeter und der Unterbringung der Widerstände realisiert. Über die Schutz-Leitungen ist es also möglich, alle

Komponenten der Messkette in einem einzigen Faraday'schen-Käfig unterzubringen, trotz ihrer räumlichen Trennung. Dieser Faraday'sche Käfig muss geerdet werden, da es sonst zu einer Aufladung des Käfigs kommen kann, was zu einem elektrischen Potential im Innenraum führt und dadurch die Messergebnisse beeinflussen kann. Die Erdung muss an genau einer Stelle erfolgen, da sonst die Gefahr der Bildung von Erdschleifen besteht. Über Induktionsspannungen kann dies die Messergebnisse beeinflussen. Die Erdung wird an der der Spannungsquelle durchgeführt, indem die Funktion „External Guard“ („EX GRD“ auf dem Bedienfeld) ausgeschaltet bleibt.

- Um die Präzision des Geräts zu gewährleisten, muss mindestens alle 30 Tage die Eigenkalibrierung des Geräts „DC Zeros Calibration“ durchgeführt werden.
- Der Staubfilter auf der Rückseite des Geräts muss bei Bedarf gereinigt werden, damit eine homogene Temperatur im Inneren gewährleistet ist.
- Das Gerät sollte so selten wie möglich ausgeschaltet werden.

Das Voltmeter stammt von der Firma Agilent Technologies und trägt die Bezeichnung 3458A Multimeter. Es wurde auf die Option 002 High Stability Reference nachgerüstet, dadurch wird eine verbesserte Unsicherheit bei Langzeit Messungen erreicht. Der genaueste Messbereich des Voltmeters ist der 10 V Messbereich, der Spannungsmessungen bis maximal 12 V erlaubt. Bei einer Integrationszeit von 2 s (Einstellung „NPLC 100“ und „PRESET“) wird die Präzision in diesem Messbereich mit 0,5 ppm des Messwerts zuzüglich 0,05 ppm des Messbereichs über 24 h bei konstanter Umgebungstemperatur angegeben [Agi34]. Bei diesem Multimeter wird für alle anderen Messbereiche eine schlechtere Präzision angegeben. Bei diesem Gerät ist es wichtig Folgendes zu beachten:

- Spannungsmessungen sollten ausschließlich in einem einzigen Messbereich durchgeführt werden. Als genauester Messbereich bietet sich der 10 V Messbereich an. Dazu ist es nötig die automatische Messbereichsbestimmung zu deaktivieren (Einstellung „DCV 10“).
- Der Einfluss von konstanten Messfehlern, wie der absoluten Unsicherheit des Multimeters (angegeben in ppm des Messbereichs) oder von Kontakt- und Thermospannungen, sinkt bei einem großen Signal. Der Messbereich sollte daher möglichst voll ausgenutzt werden.
- In einer Überprüfung des Multimeters wurde ein Temperaturkoeffizient von 0,4 ppm/K festgestellt. Dies liegt im Rahmen der Literaturangabe von 0,5 ppm/K. Laut Literatur kann mit Hilfe der internen Selbstkalibrierung des Multimeters der Temperaturkoeffizient auf 0,16 ppm/K reduziert werden. Diese Selbstkalibrierung kann nur zwischen zwei Messungen durchgeführt werden. Um die Einflüsse des Temperaturkoeffizienten möglichst gering zu halten, sollte während einer Messung die Umgebungstemperatur überwacht und kontrolliert werden. Zwischen einzelnen Messungen sollte in geeigneten Abständen die interne Selbstkalibrierung (Funktion „ACAL DCV“) ausgeführt werden.
- Bei Messungen zum Aufwärmverhalten der Widerstände wurde eine erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit des ersten Messwerts festgestellt (Anhang A.2). Dies ist auch im

Handbuch des Multimeters [Agi34] beschrieben. Der erste Messwert einer Messung muss daher verworfen werden.

- Sollen nicht nur Spannungsänderungen genau vermessen werden, sondern eine absolute Spannung, ist es nötig, eine Offset und Gain Kalibrierung mit einer 10 V Referenzspannungsquelle durchzuführen (Details zu dieser Kalibrierung finden sich in [Thu07]). Als 10V Referenz steht ein „732A Reference Standard“ des Herstellers Fluke zur Verfügung. Bei Kalibrierungen durch die PTB erreichte diese eine Stabilität von 0,6 ppm über 16 Monate.
- Der Innenwiderstand des Voltmeters beträgt $50\text{ G}\Omega$. Bei der Untersuchung von Widerstandsänderungen ($R_2 \leq 1,5\text{ M}\Omega$) kann der Einfluss des Innenwiderstands vernachlässigt werden.
- Auch dieses Gerät sollte möglichst selten ausgeschaltet werden.

Der Referenzwiderstand befindet sich fest angebracht in einer abgeschirmten Box. Die Testwiderstände werden in speziellen Halterungen ebenfalls in diese Box gegeben und dort gemäß Abb. 2.1 verschaltet. Soweit nicht anders angegeben, wird die Temperatur im Innenraum der Box auf $25 \pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ stabilisiert. Dazu befindet sich im Innenraum ein Pt100-Temperaturfühler, der von einem Agilent 34970A Multiplexer ausgelesen wird. Die gemessene Temperatur wird an einen Computer übermittelt, der mittels eines PID-Reglers die Heizleistung für den Innenraum bestimmt. Die Stellgröße für die Heizleistung wird an den Mess-Multiplexer zurückgesendet, der wiederum ein EA PS 32 05 Lastnetzteil steuert, das Heizwiderstände im Inneren der Box versorgt. Die Heizwiderstände sind auf einem Radiator befestigt. Ein Lüfter auf dem Radiator sorgt für eine gleichmäßige und schnelle Verteilung der Wärme im Inneren der Box. Das Lastnetzteil ist linear geregelt und verursacht im Gegensatz zu anderen getesteten Netzteilen keine messbaren Störungen beim Messbetrieb. Ein Foto des Innenraums der Box zeigt Abb. 2.4.

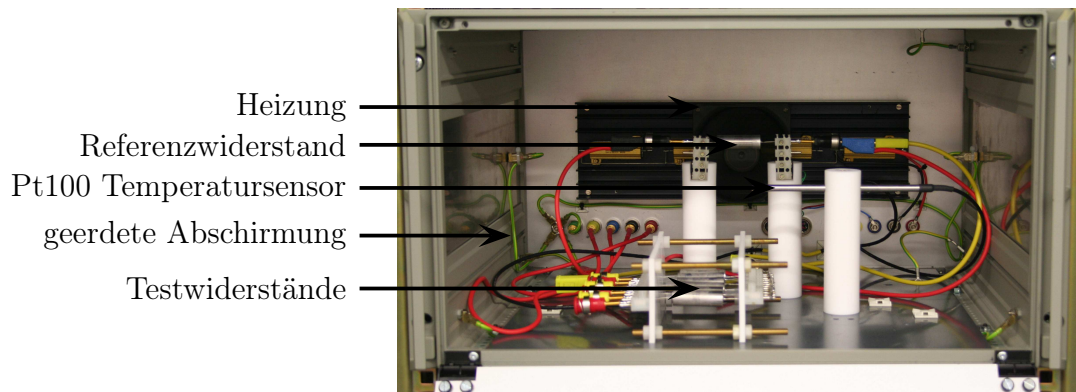


Abbildung 2.4.: Temperaturstabilisierte Box. Gezeigt ist ein Blick in die temperaturstabilisierte Box. Zu sehen sind unter anderem der Referenzwiderstand und mehrere Testwiderstände.

Alle Geräte befinden sich in einem klimatisierten und abgeschirmten Schrank. Die Klimatisierung des Schanks erfolgt über eine Kompressorkühlung, welche die Temperatur im Innenraum mit einer Stabilität von $\pm 2\text{ K}$ regeln kann. Um diese Stabilität der Klimatisierung

zu erreichen, darf der Schrank im Sommer keiner direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt werden. Der Schrank ist lediglich über das Netzkabel galvanisch mit der Außenwelt verbunden. Um die Einkopplung von Rauschen aus der Netzleitung zu unterdrücken, wird die Netzspannung im Schrank gefiltert. Um Einflüsse der Netzspannung zu untersuchen, ist es möglich, durch eine Unterbrechungsfreie Stromversorgung den gesamten Schrank für bis zu 60 min vom Netz zu entkoppeln.

Die Steuerung des PID-Reglers ist wie die Steuerung aller anderen Geräte über ein LabView Programm auf dem Computer möglich (eine kurze Beschreibung des Programms findet sich in Anhang A.1). Die Verbindung zwischen Computer und Messstand erfolgt über eine optische GPIB Verbindung.

Die Verbindungen zwischen Spannungsquelle und Box sowie zwischen Box und Multimeter erfolgen über Bananen-Stecker und -Buchsen aus einer Kupfer-Tellur Legierung. Die Verwendung dieser Legierung führt zu besonders niedrigen Thermo-Spannungen. Durch die stabilisierte Temperatur im Inneren der Box reicht es, dort auf vergoldete Verbindungen zurückzugreifen. Die verwendeten Kabel außerhalb der Box sind vom Hersteller LEMO, nach dem Twisted Pair Prinzip aufgebaut und mit einem Außenmantel aus Teflon versehen. Die Verwendung dieser speziellen Kabel wurde von Mitarbeitern der PTB Braunschweig empfohlen.

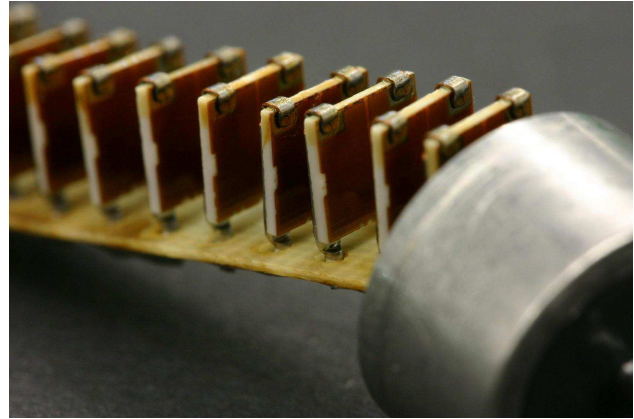
Betrieibt man den Messstand unter Beachtung seiner Eigenheiten, jedoch ohne Test- oder Referenzwiderstand durch äußere Einflüsse zu ändern, ergibt sich eine Tag- Nacht Drift der Ausgangsspannung von 2 ppm. Diese lässt sich der Stabilität von Multimeter und Spannungsquelle zuschreiben und stellt die systematische Unsicherheit beim Betrieb des Messstandes dar. Über kürzere Dauern von einer Stunde oder weniger kann diese Drift vernachlässigt werden. In diesem Fall ergibt sich die systematische Unsicherheit aus dem verbleibenden Rauschen von ca. 0,1 ppm. Beide Effekte sind zum Beispiel bei der Vermessung der Abhängigkeit des Widerstands von magnetischen Feldern sichtbar (Abb. 2.16).

Im folgenden werden die Untersuchungen dargestellt, die mit Hilfe dieses Messstandes an den weiterentwickelten Widerstands-Testmustern durchgeführt wurden.

2.3. Untersuchung der Widerstands-Testmuster

Ein Widerstand der VHA-Baureihe besteht aus einer zylindrischen Hülle aus verzinktem Messing mit einem Durchmesser von 12,7 mm, einer Länge von 38,1 mm und einer Wandstärke von ca. 0,5 mm. An dessen Kopf- und Fußende ist jeweils ein mit Lötzinn überzogener Kupferdraht als Anschluss angebracht. Diese Hülle ist hermetisch abgeschlossen, mit Öl gefüllt und beherbergt eine elektronische Leiterplatte, die mit den äußeren Anschlüssen verlötet ist. Die Isolation der Leiterplatte von der Außenwand erfolgt durch einen Plastikschauch. Senkrecht auf der Leiterplatte befinden sich Platten, die als Substrat für eine Metallfolie dienen. In diese Metallfolie sind meanderförmige Leiterbahnen eingätzt deren Querschnitt so gering ist, dass sich die Leiterbahnen mit dem bloßen Auge nicht erkennen lassen. Durch die meanderförmige Auslegung der Leiterbahnen wird eine große effektive Weglänge erreicht, wobei gleichzeitig die Induktivität gering gehalten wird. Die Befestigung der Substratplatten

Abbildung 2.5.: Innenleben eines Widerstands. Dieses Foto zeigt den Aufschnitt eines Widerstands der VHA-Baureihe. Zu erkennen sind ein Teil der zylindrischen Hülle auf der rechten Seite, die Leiterplatte sowie die Substratplatte mit der aufgetragenen Folie. Die Leiterbahnen setzen sich schwarz auf der bernsteinfarbenen Substratoberfläche ab.



auf der Leiterplatte erfolgt durch Metallklemmen, welche die Substratplatte umschließen und mit der Leiterplatte verlötet werden (Abb. 2.5). Das System aus Substratplatte und Folie wird von Vishay als Chip bezeichnet.

Der niedrige Temperaturkoeffizient der Widerstände ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Folie und Substrat (Abb. 2.6) [Zan08] [Vis05].

In erster Näherung entsteht der Widerstand von metallischen Legierungen, und damit der Folie R_{foil} , durch die Streuung von Elektronen an Defekten des Gitters (R_{def}) und an den Phononen (R_{pho}). Die Streuung an Gitterdefekten geschieht unabhängig von der Temperatur, die Wahrscheinlichkeit für Streuungen an Phononen steigt mit der Temperatur an. Dadurch ergibt sich eine lineare Erhöhung des Widerstands mit der Temperatur. Zusätzlich muss in diesem Fall das Vorhandensein von Nickel in der Metallfolie berücksichtigt werden. Dadurch enthält die Folie lokale magnetische Momente, an denen die Elektronen zusätzlich streuen können. Dieser Beitrag (R_{mag}) hängt von der Orientierung des magnetischen Moments des Streuatoms und des Spins des Elektrons ab, da Spin-Umklappprozesse berücksichtigt werden müssen. Bei einer gleichmäßigen Ausrichtung der magnetischen Momente sinkt die Wahrscheinlichkeit für Spin-Umklappprozesse. Bei ferromagnetischen Stoffen, wie Nickel, kommt es zu dieser Ordnung bei Temperaturen unterhalb der Curie-Temperatur. Dadurch kommt es bei R_{mag} zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands bis zur vollständigen Unordnung der magnetischen Momente oberhalb der Curie-Temperatur. Oberhalb dieser Temperatur bleibt dieser Beitrag konstant [Lin02] seine genaue Form hängt von der verwendeten Legierung ab.

Materialien verändern ihre Größe mit der Temperatur. Der Ausdehnungskoeffizient des Substrats ist geringer als der Ausdehnungskoeffizient der Folie. Dadurch wird die Ausdehnung der Leiterbahnen auf dem Substrat behindert und die Ausdehnung der Leiterbahnen erfolgt überproportional stark senkrecht zur Substratoberfläche. Dies bedeutet jedoch auch eine überproportional starke Erhöhung des Querschnitts der Leiterbahnen und damit eine lineare Erniedrigung des Widerstands R_{comp} .

Bei der Überlagerung dieser Effekte kommt es bei einer bestimmten Temperatur zu einer Kompensation der Beiträge und damit zu einem Scheitelpunkt im Temperaturkoeffizienten (Abb. 2.6). In der Umgebung dieses Scheitelpunkts ist der Temperaturkoeffizient besonders

niedrig. Die genauen Werte und die genaue Form des Beitrages R_{mag} , und damit die genaue Form des Temperaturkoeffizienten, hängen von den verwendeten Materialien ab.

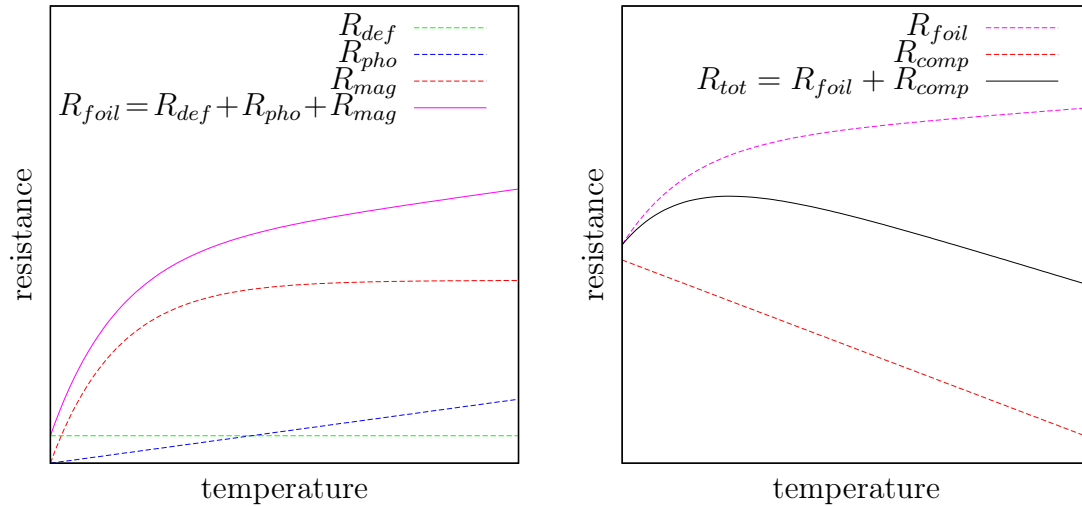


Abbildung 2.6.: Temperaturabhängigkeit der Widerstände. Der Widerstand der Folie R_{foil} setzt sich aus der Streuung der Elektronen mit Gitterdefekten R_{def} , mit Phononen R_{pho} und den magnetischen Momenten R_{mag} zusammen (links dargestellt). Der Widerstand des kombinierten Systems aus Folie und Substrat R_{tot} (rechts dargestellt) setzt sich aus dem Widerstand der Folie R_{foil} und der Kompression der Folie durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Folie und Substrat R_{comp} zusammen. Die genauen Werte und die genaue Form des Beitrags R_{mag} hängen von den verwendeten Materialien ab.

Bei der Vermessung der Widerstände müssen folgende Eigenheiten der Widerstände beachtet werden:

- Durch den ölfüllten Aufbau und die Isolation der Leiterplatte durch einen Schlauch dauert es sehr lange, bis sich die Widerstände bei einem Temperaturwechsel wieder im thermischen Gleichgewicht befinden. Erlaubt man den Widerständen eine Akklimatisierungszeit von 3 h, kann es zu Abweichungen von bis zu 0,2 ppm kommen. Erst wenn man den Widerständen mindestens 12 h Zeit zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts gibt, lassen sich Temperatureffekte ausschließen. Dies wurde bei der Vermessung der Langzeitstabilität der Widerstände festgestellt, die in Abschnitt 2.3.4 ausgeführt wird. Ein ähnlicher Effekt wird derzeit bei der Vermessung der endgültigen Widerstände der primären Teilerkette durch S. Bauer [Bau09] festgestellt. Dieser Effekt ist nur auf großen Zeitskalen von mehreren Stunden sichtbar.
- Fasst man die Widerstände mit den Händen an, bleibt ein Film aus Hautfett auf den Widerständen zurück, der einen Widerstand parallel zum eigentlichen Widerstand darstellt. Dies ruft Kriechströme hervor und führt damit nicht nur zu einer unbekannten Änderung des Widerstands, der Betrag des Kriechstromes hängt außerdem empfindlich von Umgebungsparametern, wie der Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab. Um Kriechströme zu vermeiden, werden alle Widerstände mit Alkohol gereinigt und

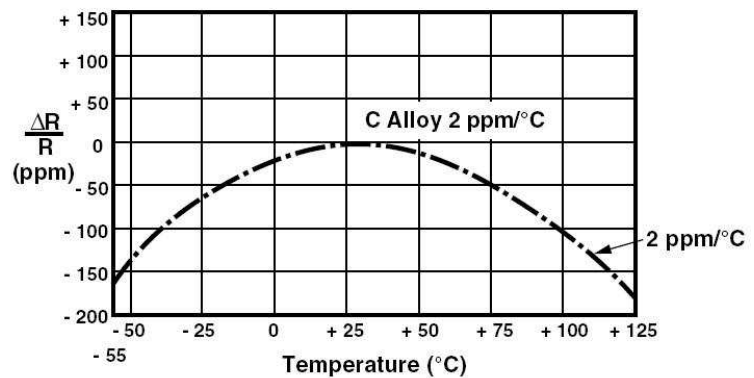
danach ausschließlich mit fusselfreien Reinraum-Handschuhen angefasst. Die Verwendung von Latex-Handschuhen ist nicht zu empfehlen, da diese mit einer Schicht aus Talkum überzogen sind, das ebenfalls an den Widerständen haften bleiben kann.

Insgesamt wurden zehn Widerstands-Testmuster untersucht. Sie tragen Bezeichnungen, die sich aus dem Buchstaben „b“ oder „x“ und vier Ziffern zusammensetzen (z.B.: „x9812“). Ihr Widerstand beträgt $1,5 \text{ M}\Omega \pm 0,1 \%$.

2.3.1. Der Temperaturkoeffizient

In den Datenblättern der Widerstände ist ein parabelförmiger Temperaturkoeffizient dargestellt (Abb. 2.7) [Vis07]. Für die Testmuster ist ein Scheitelpunkt des Temperaturkoeffizienten bei ca. 25°C spezifiziert.

Abbildung 2.7.: Temperaturkoeffizient des Widerstands. Gezeigt ist die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur in ppm (aus [Vis07]). Die Angabe von $2 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ bezieht sich auf einen großen Temperaturbereich von -55°C bis 125°C . In kleineren Temperaturbereichen um den Scheitelpunkt wird auch ein geringerer Temperaturkoeffizient erreicht.



Um den Temperaturkoeffizienten des Widerstands untersuchen zu können, wird die Temperatur in unmittelbarer Umgebung des Testwiderstands verändert. Als Referenzwiderstand kommt ein weiterer Widerstand der Testmuster mit gleichem Widerstandswert zum Einsatz. Um den 10 V Messbereich des Multimeters zu erreichen, wurde eine Spannung von 20 V an den Schaltkreis angelegt. Die Joulesche Wärme, die durch diese Spannung entsteht, beträgt $< 0,1 \text{ mW}$ und kann vernachlässigt werden.

Um die Umgebungstemperatur des Testwiderstands beeinflussen zu können, wurde ein quaderförmiger Aluminium-Block mit einer zylindrischen Bohrung vom Durchmesser der Widerstände versehen und entlang dieser Bohrung in zwei Hälften aufgeschnitten. Ein Widerstand kann in diese Bohrung eingebracht und dort durch Schrauben, welche die beiden Teilblöcke zusammenhalten, fixiert werden. Die Kontakte des Widerstands werden mit Lüsterklemmen und Kupferstücken verlängert, aus dem Block herausgeführt und gleichzeitig von diesem isoliert. In diesem Block befindet sich außerdem ein Pt100 Temperaturfühler. Der Block mit dem Widerstand wird für 24 h im Kühlschrank ($T \approx 5^\circ\text{C}$) gelagert und anschließend in einer Isolierung aus Armaflex in die temperaturstabilisierte Box des Messstandes gebracht. Den Block mit einem Widerstand und der Isolierung zeigt Abb. 2.8. Die Temperatur im Inneren der Box wird auf 35°C geregelt. Durch die Wärmeisolierung des Blocks steigt die Temperatur im Inneren über mehrere Stunden langsam an. Dies führt zu einer Veränderung des Widerstands gemäß seinem Temperaturkoeffizienten.

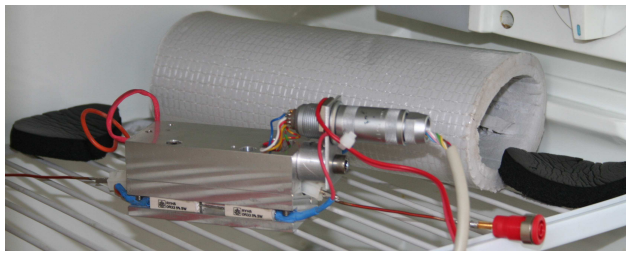


Abbildung 2.8.: Widerstandshalterung zur Vermessung des Temperaturkoeffizienten. Gezeigt ist der Aluminium-Block, in dem ein Widerstand eingespannt ist, um den Temperaturkoeffizienten zu vermessen. Dahinter befindet sich die Wärmeisolation, in die die Halterung gesteckt wird.

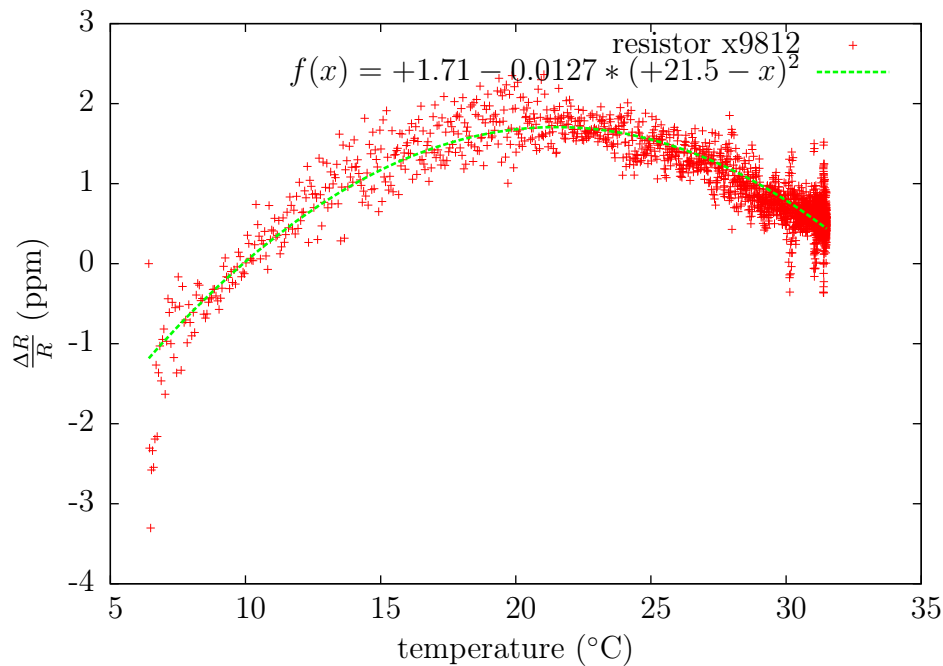


Abbildung 2.9.: Messung des Temperaturkoeffizienten. Gezeigt ist die relative Änderung des Widerstands des Testmusters x9812 in Abhängigkeit von der Temperatur in ppm. Die Vermessung der Widerstands startet bei ca. 5°C , was der Temperatur im Kühlschrank entspricht. Die Temperatur in der temperaturstabilisierten Box beträgt bei dieser Messung 35°C .

Die Vermessung des Temperaturkoeffizienten des Widerstands „x9812“ ist in Abb. 2.9 dargestellt. Der gemessene Verlauf des Temperaturkoeffizienten stimmt mit den Datenblättern von Vishay überein. Auch der Scheitelpunkt der Parabel wird, wie von Vishay angegeben, bei ca. 25°C erreicht.

Für die Vorbereitung dieser Messung muss ein Widerstand 24 h im Kühlschrank verbringen. Die Erwärmung des Widerstands erfolgt durch die Wärmeisolation über einen Zeitraum von mehreren Stunden, daher muss bei der Beurteilung der Ergebnisse die Stabilität des Messstandes berücksichtigt werden. Außerdem erfolgt die Messung der Temperatur außen an dem Aluminium Block. Durch den ölgefüllten Aufbau kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass die Temperatur im Inneren des Widerstands der gemessenen Temperatur entspricht. Diese systematischen Unsicherheiten haben zur Entwicklung eines weiteren Messverfahrens geführt, das eine schnellere und präzisere Bestimmung der thermischen Eigenschaften der Testmuster erlaubt und im nächsten Abschnitt dargestellt wird.

2.3.2. Die Aufwärmabweichung

Nutzt man als Referenzwiderstand einen Widerstand von $36,8\text{ k}\Omega$, muss die anliegende Spannung 400 V betragen, um in den 10 V Messbereich des Multimeters zu gelangen. Gemäß $P = U^2/R$ beträgt die Joulesche Wärme, die am Referenzwiderstand abfällt, in diesem Fall $0,002\text{ W}$, während der Testwiderstand mit einer Leistung von $0,1\text{ W}$ geheizt wird. Bei dieser Methode werden die Leiterbahnen des Testwiderstands direkt geheizt. Die Wärmeleistung kann über die anliegende Spannung genau bestimmt werden. Die interne Erwärmung des Referenzwiderstands ist so gering, dass sie vernachlässigt werden kann.

Exemplarisch ist diese sogenannte Aufwärmabweichung des Widerstands „x9812“ in Abb. 2.10 dargestellt. Vom Anlegen der Spannung bei $t = 0\text{ s}$, bis sich die Erwärmung der Leiterbahnen im thermischen Gleichgewicht mit der Ölfüllung der Widerstände befindet, vergehen ca. 10 min . Auf diesen kurzen Zeitskalen kann die Tag-Nacht Drift des Messstands vernachlässigt werden. Dies bedeutet, dass die gesamte gemessene Veränderung der Ausgangsspannung der Veränderung des Testwiderstands zugeschrieben werden kann. Die Aufwärmabweichung eines Widerstands lässt sich in einem Rahmen von $0,1\text{ ppm}$ reproduzieren und wurde durch Vergleichsmessungen der PTB abgesichert (Anhang A.2). Dies bestätigt die in Abschnitt 2.2 angenommene Präzision des Teststandes von $0,1\text{ ppm}$.

Die Temperatur im Inneren der Box wird bei dieser Messung auf $25,0 \pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt, da laut Vishay in diesem Bereich der Temperaturkoeffizient am geringsten ist. Der Betrag der Aufwärmabweichung wird durch einen Fit mit einer Konstanten an die Daten von 15 min bis 30 min durchgeführt. Er liegt bei allen vermessenen Testmustern unter 10 ppm . Die Aufwärmabweichung des Widerstands tritt sowohl mit positivem, als auch mit negativem Vorzeichen auf. Dies lässt sich erklären, wenn man den Temperaturkoeffizienten des Widerstands betrachtet. Vor der Messung beträgt die Temperatur der Leiterbahnen $25\text{ }^\circ\text{C}$. Durch das Anlegen der Spannung erwärmen sich die Leiterbahnen und der Widerstand ändert sich gemäß dem Temperaturkoeffizienten. Je nachdem ob der Scheitelpunkt des Temperaturkoeffizienten über oder unter $25\text{ }^\circ\text{C}$ liegt, kommt es zu einem Aufwärmverhalten mit positivem oder negativem Vorzeichen.

Auf diese Weise lässt sich auch die Änderung der Temperatur der Leiterbahnen durch die anliegende Spannung abschätzen. Betrachtet man einen parabolischen Fit des Temperaturkoeffizienten (Abb. 2.9) bei einer Temperatur T von $25\text{ }^\circ\text{C}$ und folgt diesem zu höheren Temperaturen bis sich der Temperaturkoeffizient gerade um die Aufwärmabweichung verändert hat, ergibt sich im Fall des Widerstands x9812 eine Temperaturdifferenz von $7,3 \pm 0,3\text{ K}$.

Dieser Zusammenhang wurde bereits durch ähnliche Untersuchungen an Widerständen der ersten Generation bestätigt [Thu07]. Die Bestimmung des Aufwärmverhaltens erlaubt also einen Rückschluss auf den Temperaturkoeffizienten des Widerstands.

Ein Vergleich der Aufwärmabweichungen der Widerstände der ersten Generation und der Testmuster zeigt Abb. 2.11. Die genaue Ermittlung der Aufwärmabweichungen für diesen Vergleich findet sich ebenfalls in Anhang A.2. Man erkennt eine leichte Verringerung des Betrags der Aufwärmabweichungen. Dies bedeutet, dass auch der Temperaturkoeffizient der einzelnen Widerstände verringert werden konnte. Dies lässt bereits eine Verbesserung des Temperaturkoeffizienten beim fertigen Spannungsteiler erwarten.

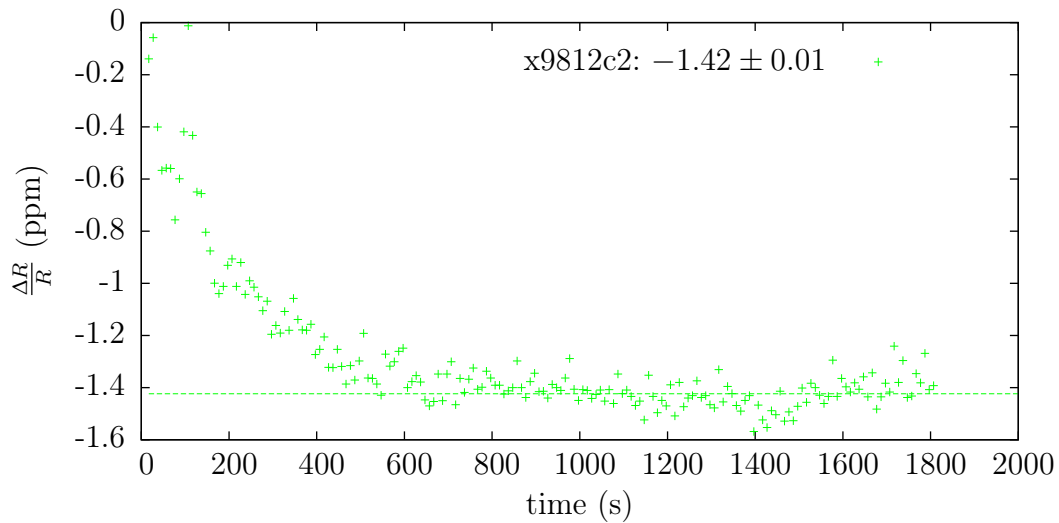


Abbildung 2.10.: Aufwärmverhalten eines Widerstands. Gezeigt ist die relative Änderung des Widerstands des Testmusters x9812 vom Startwert nach dem Anlegen einer Spannung bei $t = 0$ s. Außerdem wurde der Bereich von 900 s bis 1800 s durch eine Konstante gefittet. Der Wert dieses Fits ist die Aufwärmabweichung des Widerstands bei einer Spannung von 400 V und einer Umgebungstemperatur von $25,0 \pm 0,1$ °C.

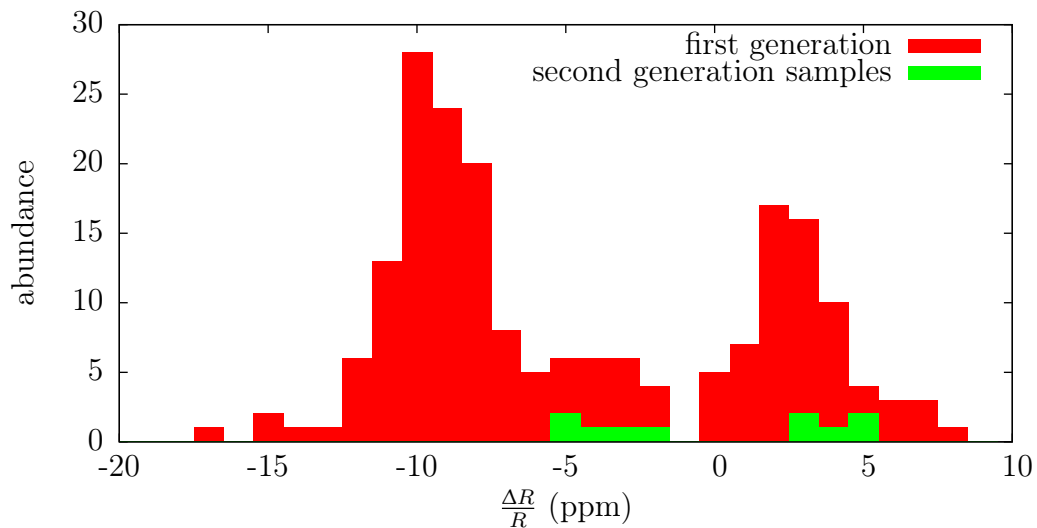


Abbildung 2.11.: Vergleich der Aufwärmverhalten. Eingetragen in dieses Diagramm sind die Aufwärmverhalten der Widerstände der ersten Generation [Thu07] (rot) und der Testmuster der zweiten Generation (grün) als Histogramm. Die Ergebnisse der Testmuster sind mit einem Faktor 3,38 skaliert, da die Messspannung bei diesen nur 400 V betrug, während die Widerstände der ersten Generation mit 600 V vermessen wurden. Die Bestimmung dieses Faktors ist in Kapitel A.2 beschrieben. Die angegebenen Werte auf der x-Achse bezeichnen die Untergrenze eines Bins mit der Breite 1.

2.3.3. Kompensation von Aufwärmabweichungen

Mit unserer Messeinrichtung kann die Bestimmung des Aufwärmverhaltens eines Widerstands wesentlich schneller, leichter und reproduzierbarer durchgeführt werden als die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten. Dies erlaubt die Bestimmung des Aufwärmverhaltens von allen zu verbauenden Widerständen.

Im endgültigen Aufbau wird der Widerstand R_1 durch mindestens 100 in Serie geschaltete Widerstände realisiert. Das Aufwärmverhalten und damit auch der Temperaturkoeffizient des gesamten Aufbaus von R_1 lässt sich verbessern, indem man Widerstände mit positivem und negativem Aufwärmverhalten verbaut, die sich gegenseitig kompensieren (Abb. 2.12). Die Anordnung der sich kompensierenden Widerstände sollte dabei ortsnahe erfolgen, falls es im Spannungsteiler zu einem Temperaturgradienten kommt.

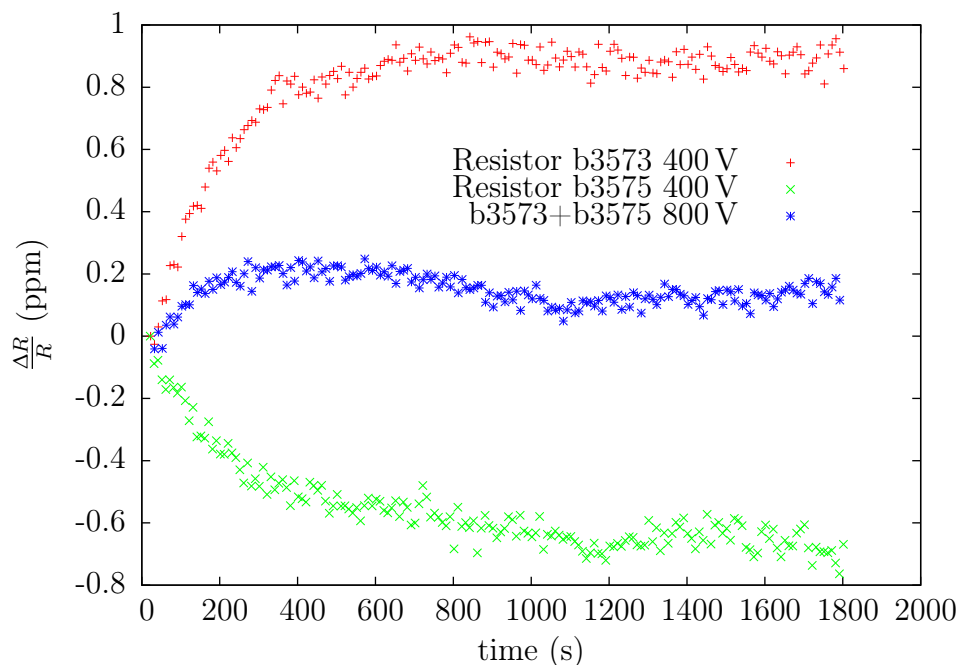


Abbildung 2.12.: Kompensation von Aufwärmverhalten. Gezeigt ist das Aufwärmverhalten der Widerstandstestmuster b3573 und b3575 bei 400 V, sowie das Aufwärmverhalten des kombinierten Systems aus b3573 und b3575 bei 800 V.

Für eine solche Kompensation ist es nötig, eine ähnliche Anzahl von Widerständen mit positivem und negativem Vorzeichen zu erlangen. Dieses Konzept wurde an die Entwicklungsabteilung von Vishay herangetragen. Aus unseren Ergebnissen und Ansprüchen hat Vishay ein Verfahren entwickelt, mit dem der Scheitelpunkt des Temperaturkoeffizienten und damit das Vorzeichen der Aufwärmabweichung kontrolliert werden kann. Bei der Produktion muss dazu der Temperaturkoeffizient der einzelnen Chips vermessen werden. Die einzelnen Chips werden in geeigneter Weise kombiniert, um das Aufwärmverhalten zu kontrollieren.

Dieses Verfahren wurde bereits bei den vorhandenen Widerstandstestmustern angewendet und erklärt den leicht gesunkenen Temperaturkoeffizienten der Widerstandstestmuster. Um das Verfahren von Vishay zu überprüfen, wurden fünf Testmuster mit positivem und fünf

Testmustern mit negativem Aufwärmverhalten spezifiziert. Diese Spezifikation entspricht unseren Ergebnissen (Abb. 2.11). Durch dieses Verfahren wird die Bestellung von Widerständen mit paarweise unterschiedlichen Aufwärmabweichungen ermöglicht.

Beim ersten Spannungsteiler mussten 200 Widerstände bestellt werden, um genügend Widerstände mit positivem und negativem Aufwärmverhalten zu erlangen. Durch die Möglichkeit, Widerstände mit paarweise verschiedenen Aufwärmabweichungen zu bestellen, kann die Anzahl der zu bestellenden Widerstände von 200 % auf 110 % reduziert werden. Dadurch kann außerdem eine Kompensation der Aufwärmverhalten der Abgriffwiderstände durchgeführt werden. In Kapitel 1.3.3 wurde dies als Hauptursache für den Temperaturkoeffizienten des ersten Spannungsteilers identifiziert. Dies lässt beim fertigen Spannungsteiler eine weitere Verbesserung des Temperaturkoeffizienten erwarten.

Mittlerweile bietet Vishay Widerstände mit paarweise verschiedenem Temperaturkoeffizienten offiziell an. Die Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung von Vishay hat also zu der Entwicklung eines neuen Produkts geführt.

Die Kompensation der Aufwärmverhalten von zwei in Serie geschalteten Widerständen ist unmittelbar klar. Falls die mechanischen Gegebenheiten es erfordern, ist eine derartige Kompensation auch in einer parallelen Schaltung von Widerständen möglich. Der Widerstand von zwei parallelen Widerständen R ergibt sich zu:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R}. \quad (2.3.1)$$

Ändert sich nun ein Widerstand um einen positiven Betrag ΔR und der andere um einen negativen Betrag $-\Delta R$ folgt:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{ges}}} &= \frac{1}{R + \Delta R} + \frac{1}{R - \Delta R} \\ &= \frac{R - \Delta R + R + \Delta R}{(R + \Delta R)(R - \Delta R)} \\ &= \frac{2R}{R^2 - \Delta R^2} \\ R_{\text{ges}} &= R \frac{R^2 - \Delta R^2}{2R^2} \\ R_{\text{ges}} &= \frac{R}{2} \left(1 - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right) \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Die Abweichung von $-\frac{\Delta R^2}{R^2}$ bewegt sich im Bereich von 10^{-12} und lässt sich vernachlässigen.

2.3.4. Langzeitstabilität der Widerstände

Die beiden Maßstabsfaktoren des ersten Spannungsteilers wurden 2005 und 2006 an der PTB kalibriert [Thu07]. Aus den Abweichungen der beiden Kalibrierungswerte ergibt sich, unter der Annahme einer linearen Zeitverhaltens, eine Drift der Maßstabsfaktoren $\Delta M/M$ von 0,6 ppm pro Monat. Eine gleichmäßige Änderung der Teiler- und Abgriffwiderstände führt zu keiner Veränderung des Maßstabsfaktors. Erst wenn sich einer der beiden Widerstände stärker als der andere verändert, kommt es zu einer Veränderung des Maßstabsfaktors. Beide Maßstabsfaktoren des ersten Spannungsteilers zeigen die gleiche Drift von 0,6 ppm pro Monat. Dies deutet darauf hin, dass primär die Teilerwiderstände für die Drift verantwortlich sind. Insbesondere erklärt eine lastabhängige Veränderung der Widerstände die Langzeitdrift.

Im Messbetrieb (18,6 kV) wird jeder einzelne Teilerwiderstand mit 0,019 W belastet (alle Teilerwiderstände zusammen mit 1,86 W). Die sechs Abgriffwiderstände werden in diesem Fall mit jeweils 0,0002 W belastet (alle Abgriffwiderstände zusammen mit 0,001 W). Die Belastung der einzelnen Abgriffwiderstände ist damit um einen Faktor 120 geringer als die Belastung der einzelnen Teilerwiderstände und lässt sich daher vernachlässigen. Bleibt man in der Näherung von $R_1 \gg R_2$ und betrachtet die Abgriffwiderstände als konstant, lässt sich eine Änderung des Maßstabsfaktors $\Delta M/M$ direkt auf eine Änderung des gesamten Teilerwiderstands $\Delta R_1/R_1$ mit dem gleichen Betrag zurückführen (Gleichung 2.3.3).

$$M = \frac{R_1}{R_2} \quad , \quad M' = \frac{R'_1}{R_2} = \frac{(1 + \Delta R_1/R_1) R_1}{R_2}$$

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{M' - M}{M} = \frac{\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2} - \frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2}} - 1 = \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2.3.3)$$

Geht man davon aus, dass jeder einzelne Teilerwiderstand gleichmäßig zur Veränderung des gesamten Teilerwiderstands R_1 beiträgt, überträgt sich die Langzeitdrift der Maßstabsfaktoren von 0,6 ppm pro Monat direkt auf eine Drift der einzelnen Teilerwiderstände von 0,6 ppm pro Monat. In den Datenblättern von Vishay ist eine lastabhängige Langzeitdrift der Widerstände der ersten Generation beschrieben (Abb. 2.13). Laut diesen Angaben ändern sich die Widerstände unter dem Einfluss einer hohen Last stärker als unter dem Einfluss von geringen Lasten. Die lastabhängige Langzeitdrift der Widerstände kann daher die Langzeitdrift der Maßstabsfaktoren des ersten Spannungsteilers erklären.

Durch das von Vishay entwickelte „pre-aging“ Verfahren soll die Langzeitstabilität der Widerstände verbessert worden sein. Bei diesem Verfahren werden die Widerstände nach der Produktion bei hohen Spannungen und Temperaturen über einen langen Zeitraum betrieben, um sämtliche Alterungseffekte möglichst schnell zu durchlaufen.

Um die Langzeitstabilität von Widerständen zu überprüfen, welche die „pre-aging“ Prozedur durchlaufen haben, wurde die Langzeitstabilität von fünf Testmustern (Serie „b...“) untersucht. Drei dieser Testmuster wurden dauerhaft bei einer Spannung von 600 V gelagert (entspricht einer Belastung von 0,24 W), zwei der Testmuster wurden lastfrei gelagert. Als

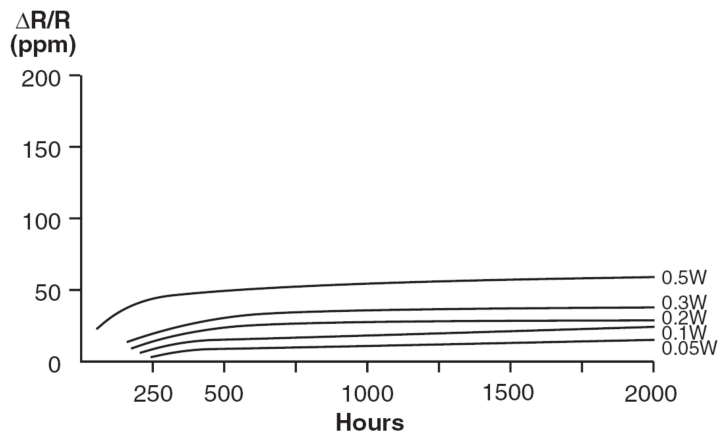


Abbildung 2.13.: Langzeitstabilität von Vishay-Widerständen.

Dargestellt ist die Abweichung des Widerstands in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene Belastungen ($P = U^2/R$) bei 25 °C [Vis07].

Referenzwiderstand kam bei dieser Messung der 36,8 kΩ Widerstand zum Einsatz, der auch bei der Vermessung der Aufwärmabweichung der Widerstände verwendet wurde. Im Abstand von mehreren Wochen wurde die Abweichung der Testmuster relativ zum Referenzwiderstand vermessen. Der Zeitrahmen der Messung erstreckte sich über mehrere Monate. Daher soll zunächst die Präzision des Messstands für diese Messung diskutiert werden.

- Der Referenzwiderstand wurde nicht der „pre-aging“ Prozedur unterzogen und die Last am Referenzwiderstand lässt sich vernachlässigen. Daher muss mit einer Drift des Referenzwiderstands von bis zu 2 ppm [Vis07] gerechnet werden.
- Über einen Zeitraum von 90 Tagen und bei konstanter Temperatur wird in den Datenblättern des Voltmeters eine Genauigkeit von 2,7 ppm angegeben [Agi34].
- Über einen Zeitraum von 90 Tagen kann die Umgebungstemperatur nicht als konstant angesehen werden. Die Kompressorkühlung des klimatisierten Schrankes erreicht eine Stabilisierung der Temperatur auf ± 2 °C. Bei regelmäßiger Durchführung der Selbstkalibrierung des Multimeters ergibt sich daraus eine zusätzliche Unsicherheit von 0,3 ppm.
- Über einen Zeitraum von 90 Tagen und in einem Rahmen von ± 5 °C um die Kalibrierungstemperatur wird in den Datenblättern der Spannungsquelle eine absolute Unsicherheit von 4,5 ppm zuzüglich 400 µV angegeben [Flu57].
- Die 10 V Referenzspannungsquelle stand für diese Messung noch nicht zur Verfügung.
- Die anliegende Spannung wurde zusätzlich zum Anschluss an die temperaturstabilisierte Box durch einen Fluke 752A Reference Divider auf den 10 V Messbereich heruntergeteilt und von einem Fluke 8508A Reference Multimeter überwacht. In diesem Messbereich beträgt die Unsicherheit dieses Multimeters über 90 Tage in einem Bereich von ± 1 °C um die Kalibrierungstemperatur 2,1 ppm. Aus dem Temperaturkoeffizienten ergibt sich eine zusätzliche Unsicherheit von 0,3 ppm.
- Die Aufwärmabweichung der Testmuster nach dem Anlegen der Messspannung wurde berücksichtigt. Die Ausgangsspannung wurde in einem Intervall von 15 min bis 25 min nach dem Anlegen der Spannung bestimmt.

- Um weitere systematische Unsicherheiten zu reduzieren, wurde der Aufbau des Messstands während der gesamten Dauer der Untersuchung nicht verändert. Es wurde kein Kabel ausgetauscht und auch die Testmuster befanden sich zu jedem Zeitpunkt fest eingespannt in einem Magazin. Die Widerstände wurden lediglich von ihrer Lagerposition außerhalb des Messstands in den Messstand gebracht und umgekehrt. Die Vermessung der unterschiedlichen Testmuster wurde durch die Änderung von lediglich zwei Bananenstecker-Verbindungen realisiert.
- Jedesmal wenn die Testmuster von ihrem Lagerort in den Messstand gegeben wurden, wurde ihnen eine Akklimatisierungszeit von 3 h zugestanden. Die Widerstände wurden für mindestens einen weiteren Tag im Messstand belassen und währenddessen mindestens ein weiteres mal vermessen. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Messwerte, die ab dem zweiten Tag aufgenommen wurden. Zwischen den Messwerten des ersten und zweiten Tages trat jedoch eine Abweichung von ca. 0,2 ppm auf. Auf einen systematischen Effekt weist außerdem hin, dass am ersten Tag der Betrag der Abweichung mit der Reihenfolge der Messung korreliert. Die Messwerte des ersten Tages wurden daher verworfen und nur Messwerte des zweiten Tages wurden verwendet. Die Abweichung von 0,2 ppm zwischen dem ersten und zweiten Tag lässt sich durch eine Änderung der internen Temperatur des Widerstands erklären.

Um die Lastabhängigkeit der Abweichungen zu untersuchen, müssen die Abweichungen der einzelnen Widerstände zueinander untersucht werden. Die Messung der Abweichungen der einzelnen Widerstände erfolgte jeweils in einem Zeitrahmen von 12 h. Daher muss bei einem Vergleich der Messwerte eine systematische Unsicherheit von 1 ppm berücksichtigt werden. Innerhalb dieser Unsicherheit lässt sich über die Dauer der Messungen von 4,5 Monaten kein Auseinanderlaufen der Abweichungen und damit keine lastabhängige Langzeitdrift feststellen (Abb. 2.14). Dies bedeutet eine deutliche Verbesserung der lastabhängigen Langzeitstabilität durch das „pre-aging“ Verfahren, sowohl im Vergleich zu den Literaturangaben von Visahy, als auch im Vergleich zu den Ergebnissen der Kalibrierung des ersten Spannungsteilers, sollte diese Drift der Maßstabsfaktoren des ersten Spannungsteilers durch eine lastabhängige Drift verursacht worden sein.

Der absolute Betrag aller Abweichungen liegt in einem Bereich von 0 ppm und 2,5 ppm (Abb. 2.14). In diesem Bereich lässt sich die absolute Drift der Testwiderstände nicht von einer Drift des Referenzwiderstands unterscheiden. Durch die übrigen systematischen Unsicherheiten zeigen die Abweichungen außerdem einen unregelmäßigen Verlauf (Abb. 2.14).

Eine weitere Erklärung für die Langzeitdrift des ersten Spannungsteilers ist eine ungleichmäßige Drift der Widerstände. Die Vermessung der Gleichmäßigkeit der Langzeitdrift würde jedoch eine hohe statistische Sicherheit erfordern, was nur durch eine hohe Anzahl an Testmustern ermöglicht werden kann. Eine solche Messung wurde daher nicht durchgeführt. Die Bestimmung der Langzeitdrift beim zweiten Spannungsteiler muss daher wieder durch mehrere Kalibrierungen an der PTB durchgeführt werden.

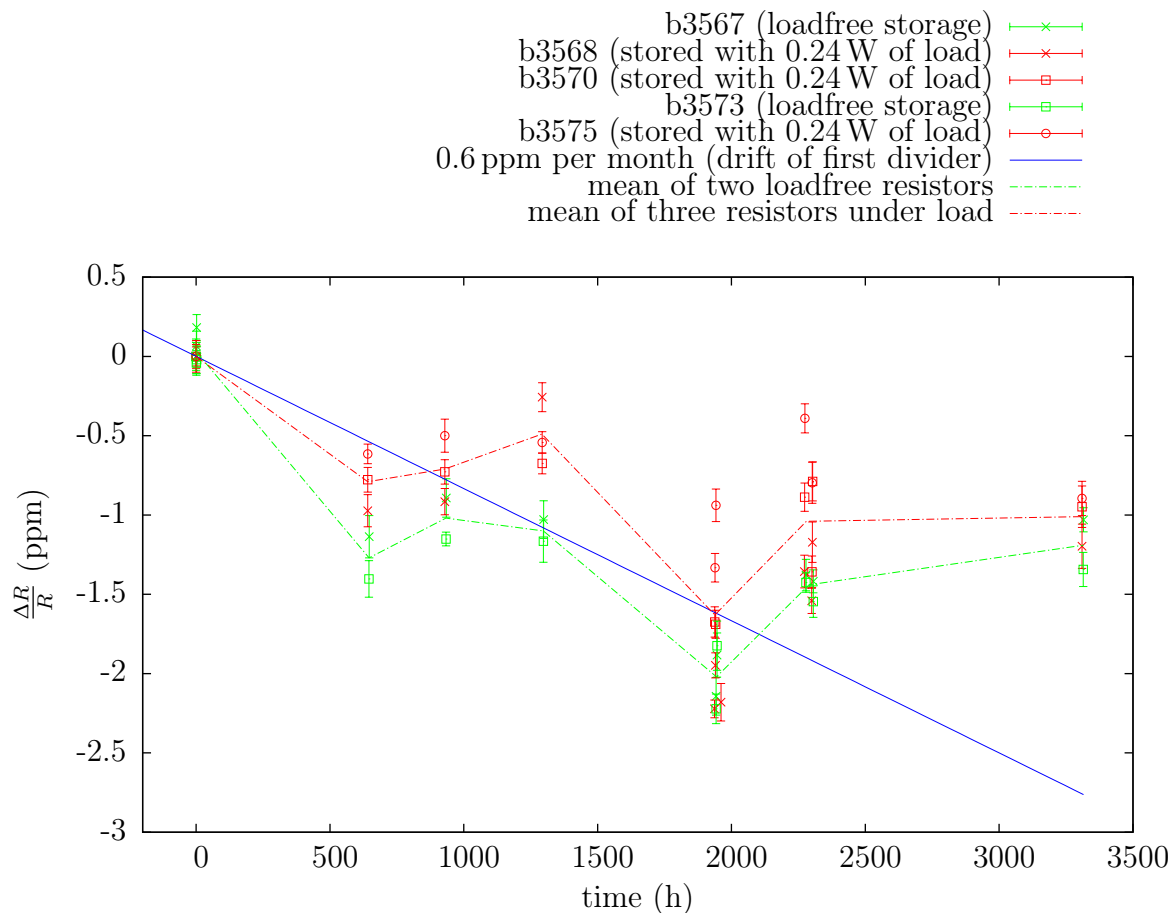


Abbildung 2.14.: Langzeitstabilität der Testmuster. Dargestellt ist die Änderung des Widerstands von 5 Widerstands-Testmustern. Drei der Widerstände wurden mit einer Last von 0,24 W gelagert (entspricht 600 V, in rot dargestellt), zwei Widerstände wurden lastfrei gelagert (in grün dargestellt). Eingetragen wurde außerdem das Ergebnis aus der Vermessung des ersten Spannungsteilers von 0,6 ppm pro Monat (blau) sowie die Entwicklung der Mittelwerte von lastfrei gelagerten Widerständen (grüne Linie) und bei Last gelagerten Widerständen (rote Linie). Die einzelnen Messpunkte ergeben sich aus der Mittelung von 16 einzelnen Messwerten der Widerstandsabweichung in einem Abstand von 30 s. Die Fehlerbalken stellen die Standardabweichung aus der Mittelung dar. Teilweise wurden Widerstände innerhalb von einigen Stunden mehrfach vermessen.

2.3.5. Spannungsabhängigkeit des Widerstands

In den Datenblättern von Vishay wird ein Spannungskoeffizient des Widerstands von weniger als 0,1 ppm/V angegeben [Vis07]. Bei der Kalibrierung des ersten Spannungsteilers ergaben sich Spannungsabhängigkeiten der Maßstabsfaktoren von 0,03 ppm/kV [Thu07]. Verantwortlich für diesen niedrigen Spannungskoeffizient der Maßstabsfaktoren ist die Kompensation der Temperaturkoeffizienten der Teilerwiderstände. Durch die Kompensation wird die Auswirkung der Änderung der Jouleschen Wärme bei der Änderung der anliegenden Spannung minimiert. Durch den ähnlichen Aufbau des zweiten Spannungsteilers wird auch bei diesem ein ähnlich niedriger Spannungskoeffizient erwartet. Auf eine Bestimmung der Spannungskoeffizienten der einzelnen Widerstände wurde daher verzichtet. Die Bestimmung des Spannungskoeffizienten der Maßstabsfaktoren beim fertigen Spannungsteiler muss jedoch unbedingt Teil der Kalibrierung sein, um Einflüsse der Spannungskoeffizienten ausschließen zu können.

2.3.6. Stabilität der Widerstände bei magnetischen Feldern

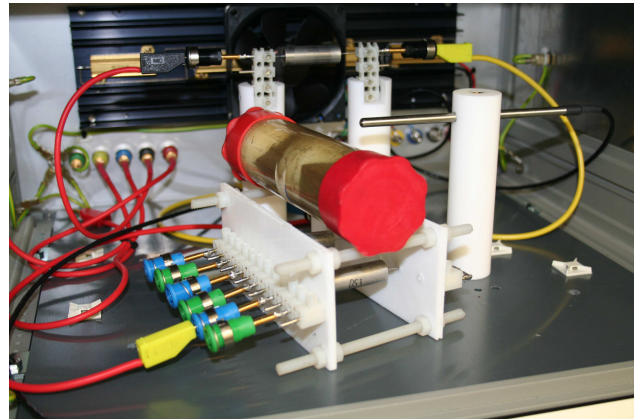
Die Abhängigkeit des Widerstands von magnetischen Feldern ist eine gut beschriebene Eigenschaft von metallischen Legierungen und direkte Folge der auf die Ladungsträger wirkenden Lorentzkraft. In den Datenblättern von Vishay wird die Abhängigkeit des Widerstands von magnetischen Feldern nicht diskutiert. Da beim KATRIN-Experiment starke Magnetfelder auftreten, und sich Magnetfelder nur schwer abschirmen lassen, soll der Einfluss von einem Magnetfeld auf die Widerstände untersucht werden.

Für diese Messung wurde der Messstand mit dem Referenzwiderstand von 36,8 k Ω in Betrieb genommen und ein starker Magnet in die Nähe des Testwiderstands gebracht (Abb. 2.15). Nach einiger Zeit wurde der Magnet entfernt, um nach einer weiteren Wartezeit um 90° gedreht wieder in die Nähe des Widerstands gebracht zu werden. Auf diese Weise war das magnetische Feld sowohl transversal, als auch longitudinal zur Bewegungsrichtung der Elektronen ausgerichtet. Der Verlauf der Widerstandsänderung ist in Abb. 2.16 dargestellt.

Der Abstand vom Magnet zum Testwiderstand betrug ca. 2 cm. Der Abstand vom Magnet zum Referenzwiderstand betrug ca. 10 cm. Durch den größeren Abstand hat der Magnet nur einen geringen Einfluss auf den Referenzwiderstand. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Magneten auf den Referenzwiderstand das gleiche Vorzeichen wie beim Testwiderstand hat, da Referenz- und Testwiderstand baugleich sind. Eine Kompensation der Abweichungen von Referenz- und Testwiderstand kann daher ausgeschlossen werden. Die Messgeräte befinden sich in einer Entfernung von mindestens 30 cm zum Magneten. Eine Beeinflussung der Messgeräte durch den Magneten kann daher ausgeschlossen werden. Die Dauer dieser Messung beträgt ca. 5 h. Über diesen Zeitraum muss mit einer systematischen Unsicherheit von 0,2 ppm gerechnet werden.

Bei der Anwesenheit des Magneten in der Nähe des Testwiderstands kann eine Abweichung des Widerstands von $-0,46 \pm 0,2$ ppm im transversalen Fall, und von $-0,27 \pm 0,2$ ppm im longitudinalen Fall bestimmt werden. Aus der Stärke des Magnetfeldes im transversalen Fall

Abbildung 2.15.: Messung der Magnetfeldabhängigkeit. Gezeigt ist die temperaturstabilisierte Box des Messstands mit dem Magneten in longitudinaler Position.



von ca. 200 Gs und ca. 90 Gs im longitudinalen Fall ergibt sich eine Obergrenze für die Abhängigkeit des Widerstands von einem magnetischen Feld von $-0,005 \text{ ppm/Gs}$.

Im Messbetrieb befindet sich der Aufstellungsort des Spannungsteilers nahe der Analysierebene. In diesem Bereich liegen die magnetischen Feldstärken zwischen 0,5 Gs (Erdbagnetfeld) und 2,5 Gs (im Spektrometer) [Kar07]. Ein Einfluss von magnetischen Feldern auf den Maßstabsfaktor im Messbetrieb des KATRIN-Experiments kann daher auf $< 0,02 \text{ ppm}$ abgeschätzt werden und vernachlässigt werden².

2.3.7. Stabilität der Widerstände bei elektrischen Feldern

Im endgültigen Aufbau des Spannungsteilers wird die primäre Teilerkette durch einen Faradayschen Käfig von äußeren elektrischen Feldern abgeschirmt. Im Inneren soll durch eine besondere Anordnung und Form von Elektroden das elektrische Potential in der Umgebung der Widerstände so geformt werden, dass es dem Potential der Widerstände entspricht. Dadurch werden Kriechströme minimiert. Diese beiden Maßnahmen verhindern eine Änderung des elektrischen Feldes in der Umgebung der Widerstände. Daher wurde auf eine Untersuchung von Einflüssen von elektrischen Feldern auf die Widerstands-Testmuster verzichtet.

In den Datenblättern von Vishay wird die Abhängigkeit des Widerstands von elektrischen Feldern nicht diskutiert.

2.3.8. Zusammenfassung der Untersuchungen und Spezifikation der Widerstände

Bei der Vermessung der Testmuster wurde eine Verbesserung der für das KATRIN-Experiment entscheidenden Eigenschaften festgestellt. Außerdem wurde ein besseres Verständnis der Widerstände erreicht. Die einzelnen Verbesserungen werden im folgenden noch einmal

²Bei den Messungen von Dr. T. Thümmel am Mainzer Spektrometer [Thu07] betrug die Magnetfeldstärke am Aufstellungsort des Spannungsteilers $< 10 \text{ Gs}$. Auch dort können Einflüsse des Magnetfeldes auf die Maßstabsfaktoren daher ausgeschlossen werden

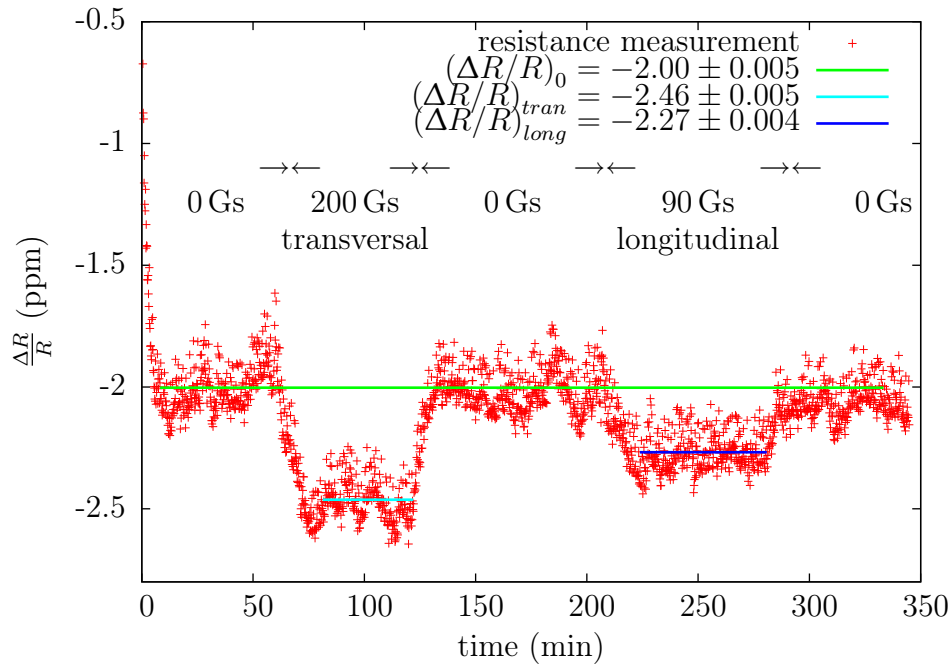


Abbildung 2.16.: Abhängigkeit des Widerstands von einem Magnetfeld. Dargestellt ist die Veränderung des Widerstands durch ein magnetisches Feld. In den ersten Minuten erkennt man das typische Einlaufverhalten der Widerstände durch die interne Erwärmung $((\Delta R/R)_0)$. In der Zeit von 58 min bis 120 min befand sich der Widerstand unter dem Einfluss eines transversalen Magnetfeldes mit einer Stärke von ca. 200 Gs $((\Delta R/R)_{tran})$. In der Zeit von 206 min bis 273 min befand sich der Widerstand unter dem Einfluss eines longitudinalen Magnetfeldes mit einer Stärke von ca. 90 Gs $((\Delta R/R)_{long})$. In der übrigen Zeit befand sich der Magnet nicht in der Nähe der Widerstände. In grün ist ein Fit an die Daten von 10 min bis 58 min eingetragen $((\Delta R/R)_0)$. Am Ende der Messung, nach ca. 5 h, erkennt man eine leichte Abweichung des Messwertes von diesem Fit. Diese lässt sich der Tag- Nacht Drift des Messstands zuschreiben. Zu erkennen ist außerdem das Rauschen des Teststandes. In türkis ist ein Fit an die transversale Magnetfeld-Phase eingetragen, in blau ein Fit an die longitudinale Magnetfeld-Phase.

kurz zusammen gefasst, um anschließend die endgültigen Spezifikationen der Widerstände der primären Teilerkette anzugeben.

Durch die Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung von Vishay wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem es möglich ist, das Vorzeichen der Aufwärmabweichung zu kontrollieren. Dies erlaubt eine Bestellung von Widerständen mit paarweise verschiedenen Aufwärm-Vorzeichen. Dies wiederum erlaubt eine Kompensation der Aufwärmabweichungen der Abgriffwiderstände durchzuführen. Die fehlende Kompensation der Abgriffwiderstände beim ersten Spannungsteiler wurde als Hauptquelle des Temperaturkoeffizienten identifiziert (Kapitel 1.3.3).

Paarweise Widerstände mit unterschiedlichen Vorzeichen reduzieren außerdem die benötigte Anzahl der Widerstände. Während beim ersten Spannungsteiler noch ein Überschuss von 100 % bestellt werden musste, wurde beim zweiten Spannungsteiler ein Überschuss von lediglich 10 % bestellt. Dadurch kann Geld gespart werden. Im Zuge der Zusammenarbeit konnte auch der Betrag der Aufwärmabweichung reduziert werden, was gleichbedeutend mit einer

Verbesserung des Temperaturkoeffizienten der Widerstände ist und abermals eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften des zweiten Spannungsteiler erwarten lässt.

Durch das von Vishay entwickelte „pre-aging“ Verfahren konnte außerdem die Langzeitstabilität der Widerstände verbessert werden. Die Langzeitdrift des ersten Spannungsteilers stellt die Hauptquelle der systematischen Unsicherheit der Maßstabsfaktoren dar. Beim zweiten Spannungsteiler kann daher mit einer deutlich verbesserten Stabilität der Maßstabsfaktoren gerechnet werden.

Der einzige verbleibende Parameter der Widerstände ist der Wert des Widerstands. Nach intensiver Diskussion mit Vishay fiel die Entscheidung auf ein Design mit $880\text{ k}\Omega$ pro Widerstand. Dies entspricht einem Widerstand, der intern aus 11 Chips mit jeweils $80\text{ k}\Omega$ aufgebaut ist. Dieser Wert wurde aus zwei Gründen gewählt. Zum einen ist dieser Widerstand produktionstechnisch am einfachsten herzustellen und ermöglicht so einen relativ niedrigen Preis von ca. 600EUR (inkl. MwSt.) für ein Paar Widerstände mit unterschiedlichen Vorzeichen. Zum anderen wird durch den niedrigeren Widerstand von $880\text{ k}\Omega$ (erste Generation: $1,84\text{ M}\Omega$) und damit höhere Anzahl an Widerständen eine Reduzierung der thermischen Last der einzelnen Widerstände erreicht.

Die Verwendung von 170 Stück dieser Widerstände mit jeweils $880\text{ k}\Omega$ ermöglicht zum einen, weite Teile des mechanischen Designs des ersten Spannungsteilers zu übernehmen, und zum anderen, dem angestrebten Wert von $R_1 = 186\text{ M}\Omega$ möglichst nahe zu kommen. Der Gesamtwiderstand der Teilerwiderstände beim zweiten Spannungsteiler beträgt damit $R_1 = 149,6\text{ M}\Omega$. Eine Zusammenfassung der Spezifikationen für die Teilerwiderstände der primären Teilerkette findet sich in Tab. 2.1.

Typenbezeichnung:	VHA-518-11
Anschlüsse:	2 mit Lötzinn überzogene Kupferanschlüsse
Widerstandswert:	$880\text{ k}\Omega \pm 0,1\%$
Temperaturkoeffizient:	$\pm 0,2\text{ ppm/K}$ nach bestem Bemühen;
(bei 24°C bis 26°C)	$\pm 0,3\text{ ppm/K}$ Ausschlusskriterium
Leistungskoeffizient:	$2\text{ ppm}/0,5\text{ W}$
Arbeitsleistung bei 25°C :	$0,07\text{ W}$
Besonderheiten:	pre-aging, paarweise Kompensation der Aufwärmverhalten

Tabelle 2.1.: Widerstands-Spezifikationen. Spezifikation der Widerstände für die primäre Teilerkette des zweiten Spannungsteilers.

Aus den Gleichungen (2.1.4ff) und dem Wert von $R_1 = 149,6\text{ M}\Omega$ lassen sich die Werte der Abgriffwiderstände R_2 bis R_5 bestimmen. Die ungefähren Maßstabsfaktoren, die sich aus diesen Widerständen ergeben sind in Abb. 2.17 eingetragen. Die Spezifikationen der Abgriffwiderstände entsprechen bis auf den Wert den Spezifikationen der Teilerwiderstände. Bei den Abgriffwiderstände soll eine Kompensation der Aufwärmverhalten durch eine parallele Verschaltung von mehreren Widerständen erreicht werden. Bei einem Defekt eines Abgriffwiderstands wird auf diese Weise verhindert, dass der Innenwiderstand des Multimeters als Abgriffwiderstand dient. Bei einem Innenwiderstand von $50\text{ G}\Omega$ würde dies bedeuten, dass praktisch die gesamte Hochspannung am Multimeter anliegt. Dies würde eine Zerstörung des

Multimeters bedeuten. Außerdem vereinfacht die parallele Verschaltung der Widerstände den mechanischen Aufbau.

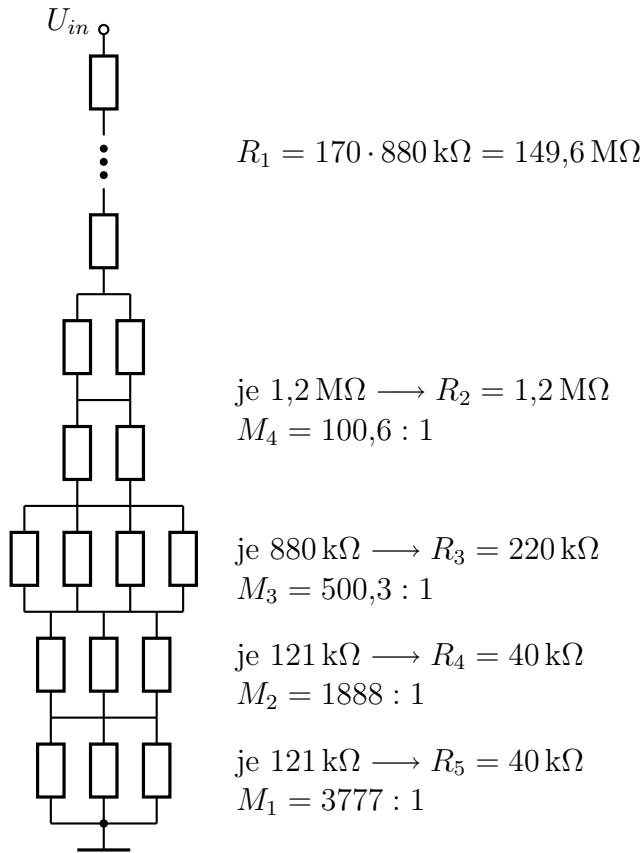


Abbildung 2.17.: Schaltbild der primären Teilerkette. Dargestellt sind alle Widerstände der primären Teilerkette. Der Teilerwiderstand R_1 besteht aus 170 einzelnen, in Serie geschalteten Widerständen mit jeweils $880 \text{ k}\Omega$. Eingezeichnet sind außerdem die ungefähren Maßstabsfaktoren.

2.4. Sekundäre Teilerkette

Die sekundäre Teilerkette trägt zur Formung des elektrischen Feldes in der Umgebung der Widerstände bei. Die Widerstände der primären Teilerkette werden zwischen Kupferelektroden verbaut. Legt man eine Spannung an die Kupferelektroden an, bildet sich ein nahezu homogenes elektrisches Feld zwischen den Kupferelektroden aus. In Kapitel 3.2 wird die genaue Form der Kupferelektroden diskutiert, um Randeffekte zu minimieren. Die primäre Teilerkette wird in sechs Ebenen eingeteilt, die von den Kupferelektroden getrennt werden. Fünf Ebenen tragen jeweils 34 Teilerwiderstände, auf der sechsten Ebene befinden sich die Abgriffwiderstände. Die sekundäre Teilerkette verbindet die einzelnen Kupferelektroden über Widerstände miteinander und steuert so die Stärke des elektrischen Feldes zwischen den einzelnen Ebenen.

Um Kriechströme zu reduzieren und Coronaentladungen zu verhindern [Thu08], soll das elektrische Potential in der Umgebung der Widerstände so geformt werden, dass es dem Potential an den Widerständen entspricht. Dies wird erreicht, wenn die Kupferelektroden über Widerstände verbunden werden, deren Wert dem überbrückten Widerstandswert der

primären Teilerkette bis auf einen konstanten Faktor entspricht. Diese Widerstände bilden die sekundäre Teilerkette. Ihr Gesamtwiderstand sollte leicht hochohmiger sein als der Gesamtwiderstand der primären Teilerkette.

Die Teiler-Widerstände der primären Teilerkette, die sich auf einer Ebene befinden, ergeben zusammen einen Widerstand von $30\text{ M}\Omega$. Fünf Widerstände der sekundären Teilerkette haben daher einen Widerstand von jeweils $36\text{ M}\Omega$. Da der Widerstand der Abgriffwiderstände wesentlich kleiner als $30\text{ M}\Omega$ ist, ist auch der letzte Widerstand der sekundären Teilerkette mit $90\text{ k}\Omega$ entsprechend kleiner. Dieser letzte Widerstand kann als Kontrollteiler benutzt werden, um unabhängig von den Präzisionswiderständen die anliegende Spannung mit einer Genauigkeit von einigen Prozent zu überwachen.

Als Widerstände für die sekundäre Teilerkette wurden Widerstände der Baureihe MX480 des Herstellers Caddock ausgewählt [CAD08]. Gründe für die Auswahl dieser Widerstände sind die hohe Spannungsfestigkeit von 24 kV pro Widerstand, die Verfügbarkeit von beliebigen Widerstandsgrößen, eine passende Bauform für die direkte Anbringung zwischen den Elektroden sowie ein günstiger Preis von lediglich 25 EUR pro Widerstand.

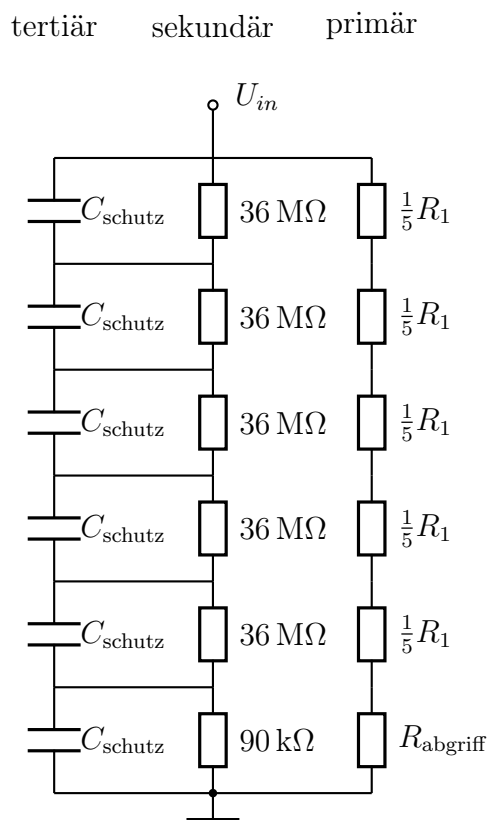


Abbildung 2.18.: Schaltbild des gesamten Aufbaus. Eingezeichnet sind alle drei Teilerketten. Die Teilerwiderstände der primären Teilerkette und die Abgriffwiderstände sind dabei ebenenweise zusammengefasst.

2.5. Tertiäre Teilerkette

Im Gleichspannungfall liegen an allen 170 Teilerwiderständen der primären Teilerkette $\frac{1}{170}$ der Spannung an. Bei Eingangsspannungen von 32 kV entspricht dies 188 V pro Widerstand. Im Fall von Spannungssprüngen im gleichen Bereich, wie sie zum Beispiel bei der Kalibrierung erforderlich sein können, ergibt sich ein vollkommen anderes Bild. Durch Streukapazitäten, wie zum Beispiel zwischen Kupferelektrode und Außenwand, kommt es in den ersten Momenten eines Spannungssprungs am ersten Widerstand der Teilerkette zu einer überhöhten Spannung. Für den Fall, dass gar keine weiteren Kapazitäten vorhanden sind, liegt im ersten Moment theoretisch die gesamte Spannung des Spannungssprungs am ersten Widerstand an. Dies könnte die Präzisionswiderstände zerstören oder zumindest deren Widerstandswert so stark verändern, dass sich der Maßstabsfaktor ändert [Thu07].

Diesem Verhalten wirken Kapazitäten entgegen, welche parallel zu den Widerständen verbaut sind. Ein Beispiel für eine solche Schutzkapazität ist die Kapazität, welche die Elektroden zueinander bilden. Eine solche Schutzkapazität wirkt der Überhöhung der Spannung am ersten Widerstand entgegen, indem Wechsellspannungsanteile die Kapazität passieren können und so den überbrückten Widerstand nicht schädigen können. Eine Erhöhung dieser parallelen Kapazitäten durch Kondensatoren stellt die sogenannte tertiäre Teilerkette dar (siehe Abb. 2.18).

Um den genauen Einfluss aller Streukapazitäten und der tertiären Teilerkette zu berücksichtigen, wurde eine Simulation des ersten Spannungsteilers mit dem Programm PSpice erstellt. Die Streukapazitäten, die in dieser Simulation verwendet wurden, ergeben sich aus einer Untersuchung des Verhaltens des ersten Spannungsteilers bei Wechsellspannungen (Details siehe Kapitel 4.1).

Bei dieser Simulation des ersten Spannungsteilers kam es bei Spannungssprüngen von 60 kV mit einer Flankensteilheit von 1 ns zu einer Überhöhung der Spannung am ersten Widerstand von weniger als 10% (siehe Abb. 2.19). Dies führt zu der Überzeugung, dass die im ersten Spannungsteiler verbauten Schutzkondensatoren mit einer Kapazität von 2,5 nF ausreichen, um die Präzisionswiderstände vor einer gefährlichen Spannungsüberhöhung zu schützen.

Beim zweiten Spannungsteiler wird das Konzept des kapazitiven Schutzteilers übernommen. Für die Erfüllung der Spezifikationen des KATRIN-Experiments stehen Kondensatoren bereit. Diese stammen vom Bau des ersten Spannungsteilers, und sind vom Typ Vishay MKT 1816. Die Spannungsfestigkeit dieser Kondensatoren beträgt 10 kV.

In Kapitel 4.1 wird die Anwendung des zweiten Spannungsteilers beim BeTINa-Experiment diskutiert. In diesem Fall muss die Spannungsfestigkeit der Schutzkondensatoren auf mindestens 15 kV erhöht werden. Hierfür konnten bisher keine Kondensatoren spezifiziert werden, da die Baureihe MKT von Vishay nicht mehr produziert wird, und die Bauform anderer kommerziell erhältlicher Kondensatoren schwer mit dem mechanischen Design kompatibel ist. Eine Spezifizierung der Kondensatoren und mögliche Anpassung des mechanischen Designs muss für die Anwendung des zweiten Spannungsteilers beim BeTINa-Experiment durchgeführt werden.

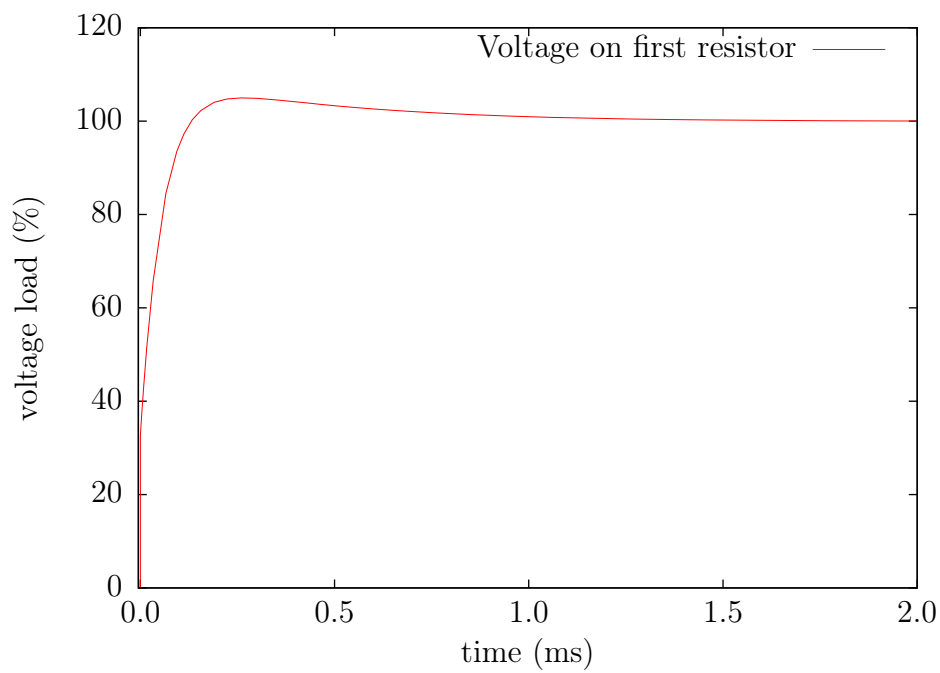


Abbildung 2.19.: Simulation der Spannung am ersten Widerstand bei Spannungssprung (erster Spannungsteiler). Dargestellt ist die Belastung des ersten Widerstands bei der Simulation eines Spannungssprungs von 60 kV mit einer Flankensteilheit von 1 ns. Die Belastung ist in % der maximalen Belastung von 600 V angegeben. Die Gleichspannungsbelastung eines Widerstands beträgt in diesem Fall 600 V.

MECHANISCHES DESIGN

Die mechanische Realisierung des elektrischen Designs folgt in weiten Teilen dem Design des ersten KATRIN-Spannungsteilers [Thu07] und damit auch den Vorgaben des Referenzspannungsteilers der Abteilung für Messwandler und Hochspannung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig [Mar01].

Auch die mechanische Realisierung des elektrischen Designs hat eine möglichst hohe Stabilität der Maßstabsfaktoren zum Ziel und soll außerdem eine einfache Handhabung des Spannungsteilers gewährleisten.

3.1. Überblick

Um die Stabilität der Maßstabsfaktoren zu verbessern, soll das elektrische Potential in der Umgebung der Widerstände so geformt werden, dass es dem Potential der Widerstände entspricht. Diese Formung des elektrischen Feldes minimiert Kriechströme und reduziert die Feldstärke in der Umgebung der Widerstände. Kriechströme führen zu Messfehlern, hohe Feldstärken an den Widerständen können zu Coronaentladungen führen. Beides gilt es zu vermeiden, um die Stabilität der Maßstabsfaktoren zu erhöhen [Thu08]. Außerdem soll die Temperatur in der Umgebung der Widerstände möglichst gleichmäßig und konstant gesteuert werden. Die Steuerung der Temperatur in der Umgebung der Widerstände erlaubt eine Reduzierung des Einflusses des Temperaturkoeffizienten der Widerstände. Dies verbessert die Stabilität der Maßstabsfaktoren bei Schwankungen der Umgebungstemperatur, zum Beispiel durch den Wechsel der Jahreszeiten. Dies ist von besonderer Bedeutung für das KATRIN-Experiment, da der Spannungsteiler im Messbetrieb in einer unklimateisierten Halle aufgebaut sein wird. Dort ist mit Schwankungen der Umgebungstemperatur von ± 10 K zu rechnen.

Um das elektrische Potential in der Umgebung der Präzisions-Widerstände kontrollieren zu können, wird die primäre Teilerkette zwischen Kupferelektroden verbaut. Die Kupferelektroden werden über Widerstände der sekundären Teilerkette mit einem Potential versehen und bilden so Plattenkondensatoren. Um die Temperatur in der Umgebung der Widerstände kontrollieren zu können, werden sie helixförmig um die zentrale Achse der Kupferelektroden angebracht. Auf der zentralen Achse befindet sich ein Rohr mit Auslässen. Die Gastemperatur im Inneren des Rohres wird gesteuert. Über einen Lüfter wird eine Zirkulation des Füllgases von den Auslässen des Rohres über die Widerstände aufgebaut. Durch den helixförmigen Aufbau haben alle Widerstände den gleichen Abstand von dem zentralen Rohr und werden so gleichmäßig vom Gas aus dem Rohr überströmt.

Die spannungsführenden Komponenten werden zur Abschirmung gegenüber elektrischen Feldern von einem Edelstahltank umgeben. Der gesamte Aufbau wird von einem Transportrahmen aus Kanya-Profilen umgeben, der außerdem Platz für Peripherie bietet. Durch dieses Design ist der Spannungsteiler transportabel und lässt sich leicht zur Kalibrierung an die PTB oder zu Messungen bei anderen Experimenten bringen. Im Messbetrieb des Spannungsteilers werden in der Umgebung des Spannungsteilers viele elektrische Geräte, wie Pumpen und Netzteile, betrieben. Der Faraday'sche Käfig um den elektrischen Aufbau schließt eine Beeinflussung der Maßstabsfaktoren durch diese Störquellen aus. Einflüsse von magnetischen Feldern auf die Maßstabsfaktoren wurden in Kapitel 2.3.6 ausgeschlossen. Um eine Beeinflussung der Maßstabsfaktoren durch elektromagnetische Felder auszuschließen, dürfen keine Wechselspannungen in den Innenraum des Spannungsteilers geführt werden. Soweit wie möglich sollte auch auf die Führung von Gleichspannungen in den Innenraum verzichtet werden.

Wichtigste Änderung des mechanischen Designs beim zweiten Spannungsteiler ist die Unterbringung der Abgriffwiderstände auf einer eigenen Ebene. Dadurch sind die Abgriffwiderstände beim zweiten Spannungsteiler im gleichen Maß von der Temperaturstabilisierung betroffen wie die Teilerwiderstände. Im Gegensatz dazu befanden sich die Abgriffwiderstände beim ersten Spannungsteiler in einer speziellen Aufhängung unter der untersten Elektrode.

Zusammen mit der verbesserten Kompensation der Abgriffwiderstände (Abschnitt 2.3.3) soll der Temperaturkoeffizient der Maßstabsfaktoren beim zweiten Spannungsteiler so weiter verbessert werden.

Im folgenden wird zunächst die Bestimmung der genauen Form der Elektroden dargestellt. Im Anschluss daran wird die Steuerung der Temperatur in der Umgebung der Widerstände beschrieben. Abschließend folgt eine genaue Beschreibung des mechanischen Aufbaus.

3.2. Elektrodesign

Das elektrische Potential in der Umgebung der Widerstände soll so geformt werden, dass es dem Potential der Widerstände entspricht. Dazu befinden sich die Widerstände zwischen Kupferelektroden, die Plattenkondensatoren bilden. Die Verteilung des elektrischen Potentials zwischen den Elektroden wird durch den Rand der Elektroden beeinflusst. Mit dem Ziel eine möglichst homogene Verteilung des elektrischen Potentials zu erreichen, wurden verschiedene Elektrodenränder mit dem Programm FEMLab simuliert. Dieses Programm erlaubt eine Berechnung von beliebigen physikalischen Größen aus einer Geometrie und Randbedingungen. Es arbeitet nach der „finite elements method“, bei der die Geometrie in kleine Zellen aufgeteilt wird, für die separat die physikalischen Größen berechnet werden.

Simuliert wurde eine rotationssymmetrisch vereinfachte Geometrie des Spannungsteilers. Die Potentiale der Elektroden entsprechen einer anliegenden Spannung von 30 kV. Die Außenwand befindet sich auf Erdpotential. Es wurden verschiedene Formen der Elektroden simuliert, dargestellt in Abb. 3.1 und Abb. 3.3. Geometrie *a* entspricht dem Design der Elektroden im ersten Spannungsteiler. Bei diesem Design wird an den Rand der kreisförmigen Elektrode ein 30 mm hoher Rand angebracht. Dieser besteht aus einem 10 mm hohen und 2 mm flachen Mittelstück und zwei ringförmigen Ober- und Unterteilen mit einem Durchmesser von jeweils 10 mm. Dieses Design ist in der Herstellung sehr aufwendig. Daher wurde nach einer Vereinfachung dieses Designs gesucht. Geometrie *b* berücksichtigt nur den flachen Rand mit einer Höhe von 10 mm. Geometrie *c* berücksichtigt einen einzigen ringförmigen Rand mit einem Durchmesser von 10 mm.

Betrachtet man das elektrische Potential dieser Geometrien (Abb. 3.1), lassen sich augenscheinlich nur geringe Randeffekte an der Widerstandspositionen erkennen. Dies entspricht der Erwartung eines Plattenkondensators, bei dem das elektrische Potential im Inneren homogen verteilt ist. Wertet man den Potentialverlauf entlang der Widerstandspositionen numerisch aus, findet man eine leichte Verbesserung der Homogenität bei Geometrie *a* (Abb. 3.2).

Betrachtet man die maximalen Feldstärken der drei Geometrien (Abb. 3.3), erkennt man eine starke Reduzierung der maximalen Feldstärke von 2,83 kV/mm bei Geometrie *b*, auf 1,86 kV/mm bei Geometrie *c* und 1,72 kV/mm bei Geometrie *a*. Hohe elektrische Feldstärken begünstigen Sprüh- und Funkenentladungen, die zu Messfehlern führen können und daher vermieden werden müssen.

Geometrie *a* hat also sowohl bei der Homogenität als auch bei der maximalen Feldstärke leichte Vorteile gegenüber einfacheren Geometrien und wird daher auch beim zweiten Spannungsteiler umgesetzt. Um die Wahrscheinlichkeit für Sprüh- und Funkenentladungen weiter zu minimieren, werden die Elektroden elektropoliert. Auch bei allen anderen Bauteilen ist auf eine runde und polierte Form zu achten.

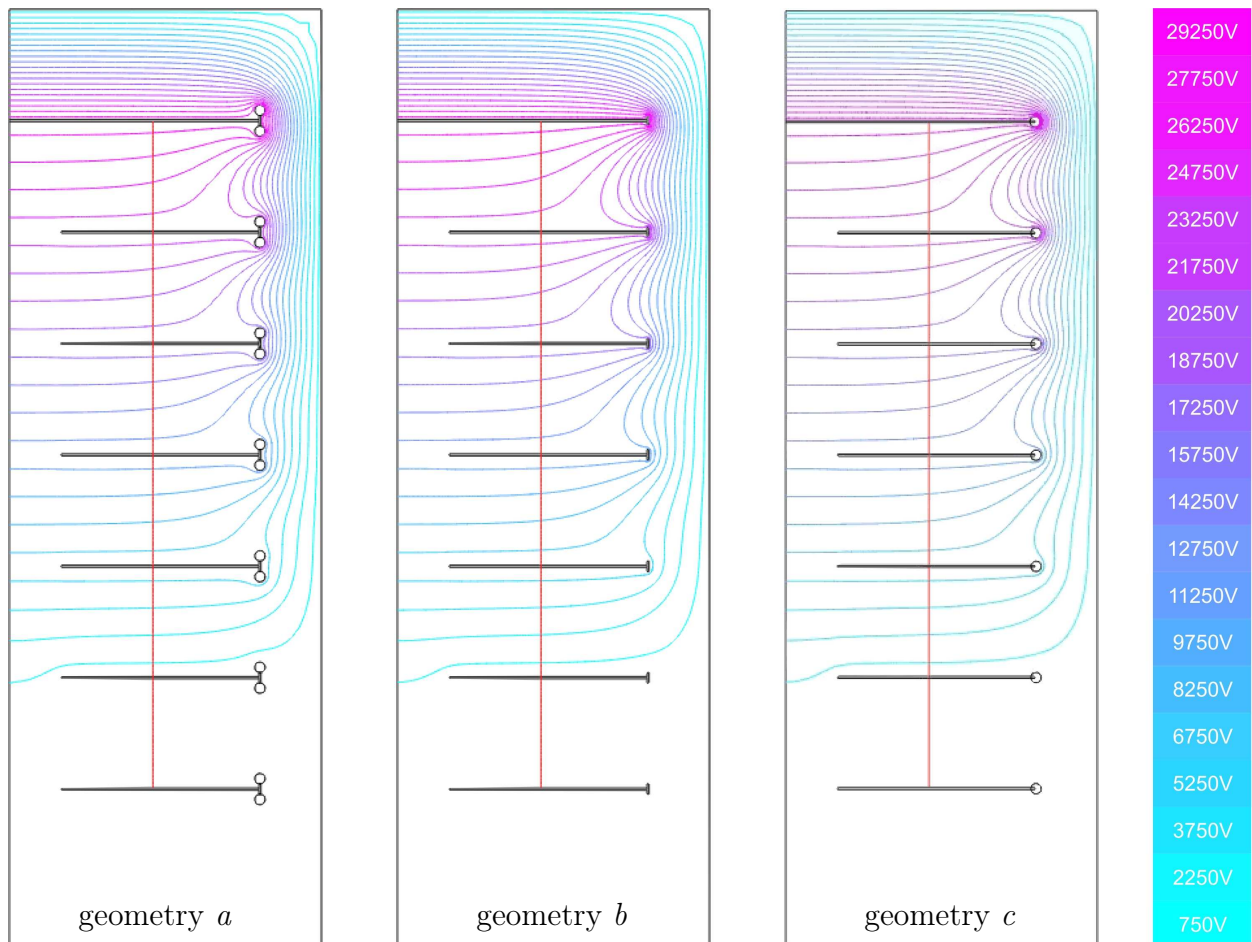


Abbildung 3.1.: Äquipotentiallinien im Spannungsteiler. Dargestellt ist die Potentialverteilung verschiedener Geometrien in einer rotationssymmetrisch vereinfachten Simulation des zweiten Spannungsteilers. Die rote Linie kennzeichnet die Position der Widerstände.

3.3. Temperatursteuerung

Die Temperatur in der Umgebung der Widerstände soll möglichst konstant und gleichmäßig gesteuert werden. Um unabhängig von der Umgebungstemperatur eine konstante Innenraumtemperatur erreichen zu können, muss dem Innenraum Wärme zu- und abgeführt werden können. Die Verteilung der Wärme im Innenraum erfolgt über einen Lüfter, der das Gas im Innenraum durch ein Rohr mit Auslässen über die Widerstände zirkulieren lässt. In der Zu- und Abfuhr des Lüfters befindet sich ein Radiator, der dem Füllgas Wärme zu- oder abführen kann.

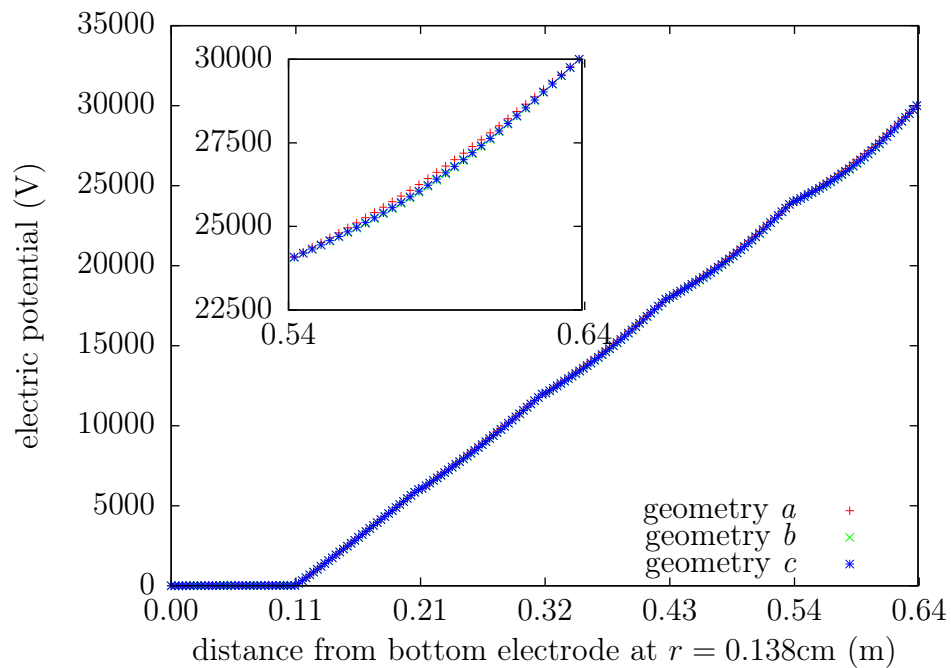


Abbildung 3.2.: Auswertung des Potentialverlaufs an der Widerstandsposition. Dargestellt ist der Potentialverlauf entlang der Widerstandspositionen für verschiedene Geometrien.

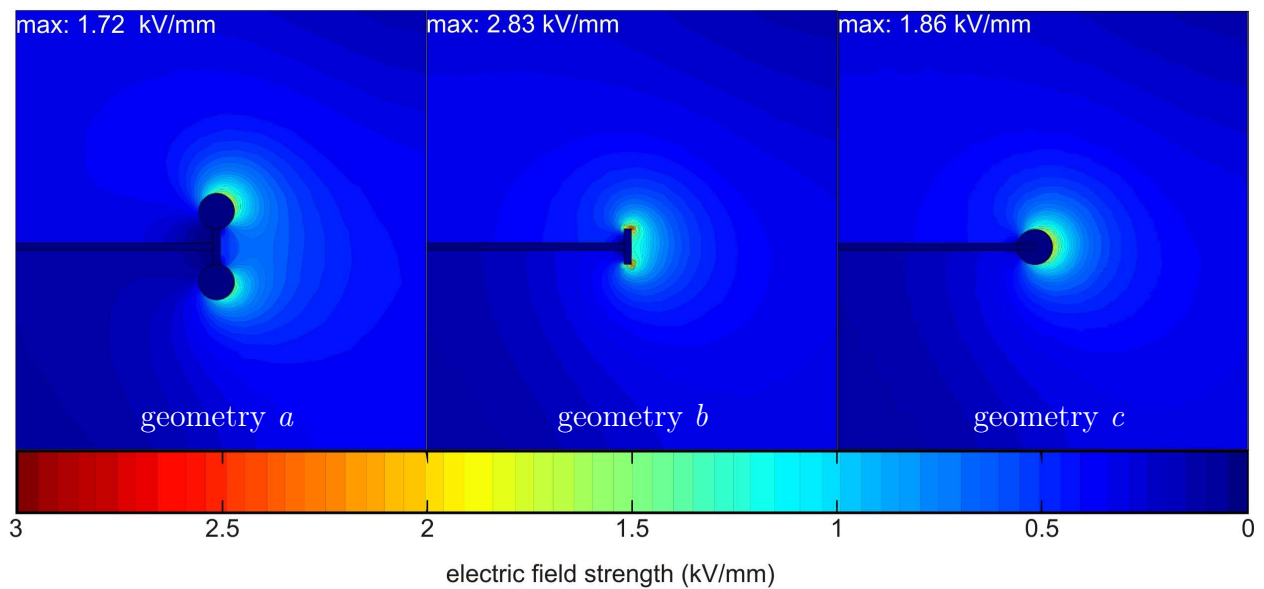


Abbildung 3.3.: Simulation der elektrischen Felder. Gezeigt ist der Betrag der elektrischen Feldstärke bei verschiedenen Elektroden-Geometrien bei einer anliegenden Spannung von 30 kV. Eingetragen ist außerdem die maximale Feldstärke.

Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Wärme in der Umgebung der Widerstände zu erreichen, soll eine Simulation des Aufbaus durchgeführt werden, in der verschiedene Parameter des Gasverteilerrohres und des Füllgases untersucht werden.

Im folgenden wird zunächst das System beschrieben, mit welchem dem Innenraum Wärme zu- bzw. abgeführt werden kann. Im Anschluss daran werden die Simulationen der Temperaturregelung dargestellt. Beim ersten Spannungsteiler wurden keine derartigen Simulationen durchgeführt, die Temperatur wird lediglich durch zwei Temperaturfühler unterhalb der untersten Ebene überwacht. Die Ergebnisse der Simulationen lassen daher Rückschlüsse auf die Güte der Temperaturregelung beim ersten Spannungsteiler zu.

3.3.1. Komponenten der Temperaturregelung

Außerhalb des Spannungsteilers befindet sich ein Peltier-Element. Legt man eine Spannung an das Peltierelement an, kommt es zu einem Wärmestrom von einer Seite des Peltier-Elements zur anderen. Eine Seite des Peltierelementes wird durch einen Radiator mit Lüfter im Gleichgewicht mit der Umgebungstemperatur gehalten. Je nach Polarität der anliegenden Spannung wird die andere Seite warm oder kalt. Diese Wärme wird an ein Flüssigkeitsradiator übergeben. Eine Pumpe lässt Wasser von diesem Flüssigkeitsradiator zu einem ähnlichen Bauteil im Inneren des Spannungsteilers zirkulieren. Dort wird die Wärme wieder an einen Lufradiator mit Lüfter übergeben (Abb. 3.4). Um eine einfache Befüllung des Systems zu ermöglichen und Luftblasen automatisch aus dem Kreislauf zu entfernen, befindet sich im Ansaugkanal der Pumpe ein Ausgleichsbehälter. Über dieses System lässt sich dem Innenraum Wärme zu- und abführen, ohne die Spannung für das Peltier-Element in den Innenraum führen zu müssen.

Der Luftstrom des Lüfters ist nach oben in ein Rohr gerichtet, das von der untersten Elektrode bis unter die oberste Elektrode verläuft. In dieses Gasverteilerrohr sind Bohrungen eingebracht, aus dem das temperierte Gas austreten kann. Im Ausgangsluftstrom dieser Löcher befinden sich die Widerstände.

Die Temperatur im Innenraum wird von einem Pt100 Temperatursensor gemessen und an einen PID-Regler übergeben. Aus dieser kann der PID-Regler die Spannung berechnen, die an das Peltier-Element angelegt werden muss, um eine konstante Temperatur am Temperatursensor zu erreichen (Abb. 3.4). Die Spannung wird von einem Lastnetzteil erzeugt.

Die maximale Wärmeleistung des Peltier-Elements bestimmt die maximale Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und Innentemperatur (ca. 25 °C). Diese wurde beim ersten Spannungsteiler im Klimaturm der PTB zu ca. 5 K bestimmt. Im Messbetrieb wird der fertige Spannungsteiler in einer unklimatisierten Halle stehen. Im Wechsel der Jahreszeiten muss daher mit Schwankungen der Umgebungstemperatur von ± 10 K gerechnet werden. Beim zweiten Spannungsteiler wurde die maximale Wärmeleistung der Temperaturregelung daher auf 102 W verdoppelt.

Generell ist beim Aufbau der Temperaturregelung darauf zu achten, möglichst wenig Wasser im Kreislauf zu bewegen. Dies verringert die Trägheit des Systems und erlaubt so eine schnelle Reaktion auf Temperaturschwankungen. Eine Isolierung sämtlicher Komponenten

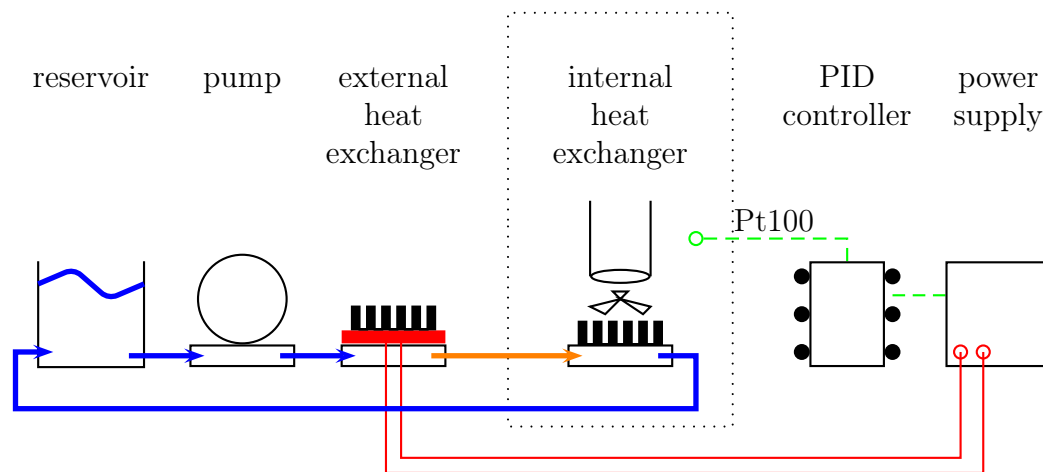


Abbildung 3.4.: Diagramm der Temperatursteuerung. Gezeigt sind die einzelnen Komponenten der Temperatursteuerung, das Peltier Element ist in rot dargestellt. Das Innere des Spannungsteilers ist durch eine gestrichelte Box angedeutet, in der auch der Lüfter und das Tunnelrohr skizziert sind.

und Leitungen mit Dämmmaterial der Firma Armaflex reduziert Wärmeverluste und erhöht somit die maximal regelbare Temperaturdifferenz. Im Gegensatz zum ersten Spannungsteiler sollen nicht nur das Volumen des Spannungsteilers selbst isoliert werden, sondern auch alle Leitungen und Komponenten außerhalb. Dies bedeutet weitere Vorteile für die Regelung durch den PID-Regler. Für diesen stellen unterschiedliche Umgebungstemperaturen eine Störung dar. Eine Isolierung sämtlicher Komponenten verringert diese Störquelle und erlaubt so eine genauere Regelung der Temperatur.

Beim ersten Spannungsteiler wird die Zufuhr von Wärme von Heizwiderständen, die Abfuhr von Wärme von einem Peltierelement übernommen, die jeweils eigene Versorgungsnetzteile benötigen. Im Gegensatz dazu wird die Wärme beim zweiten Spannungsteiler durch ein einziges Peltier-Element zu- und abgeführt, indem die Polarität der Spannung am Peltier-Element gesteuert wird. Dadurch verringert sich die benötigte Wassermenge im Kreislauf.

Die einzelnen Komponenten der Temperatursteuerung werden im folgenden kurz vorgestellt.

Der Ausgleichsbehälter stammt von der Firma Aquacomputer (Typ aquatube) und besteht aus einem verschließbaren Aluminium-Zylinder. Vorteil dieses Ausgleichsbehälters sind die einfachen Befestigungsmöglichkeiten sowie die Möglichkeit, zusätzliche Anschlüsse über Verschraubungen anbringen zu können. Dadurch kann zum Beispiel ein Pt100 Temperaturfühler zur Überwachung der Wassertemperatur installiert werden. Durch die Wahl eines kommerziellen Ausgleichsbehälters konnte Werkstattzeit gespart werden.

Die Pumpe wurde ursprünglich für den Einsatz in Wasserkühlungen im PC-Bereich entwickelt und ist eine modifizierte Version der Eheim 1046 Aquariumpumpe. Die Firma Aqua Computer hat die Spannungsversorgung der Pumpe modifiziert, so dass die Pumpe nun mit 12 V Gleichspannung betrieben werden kann.

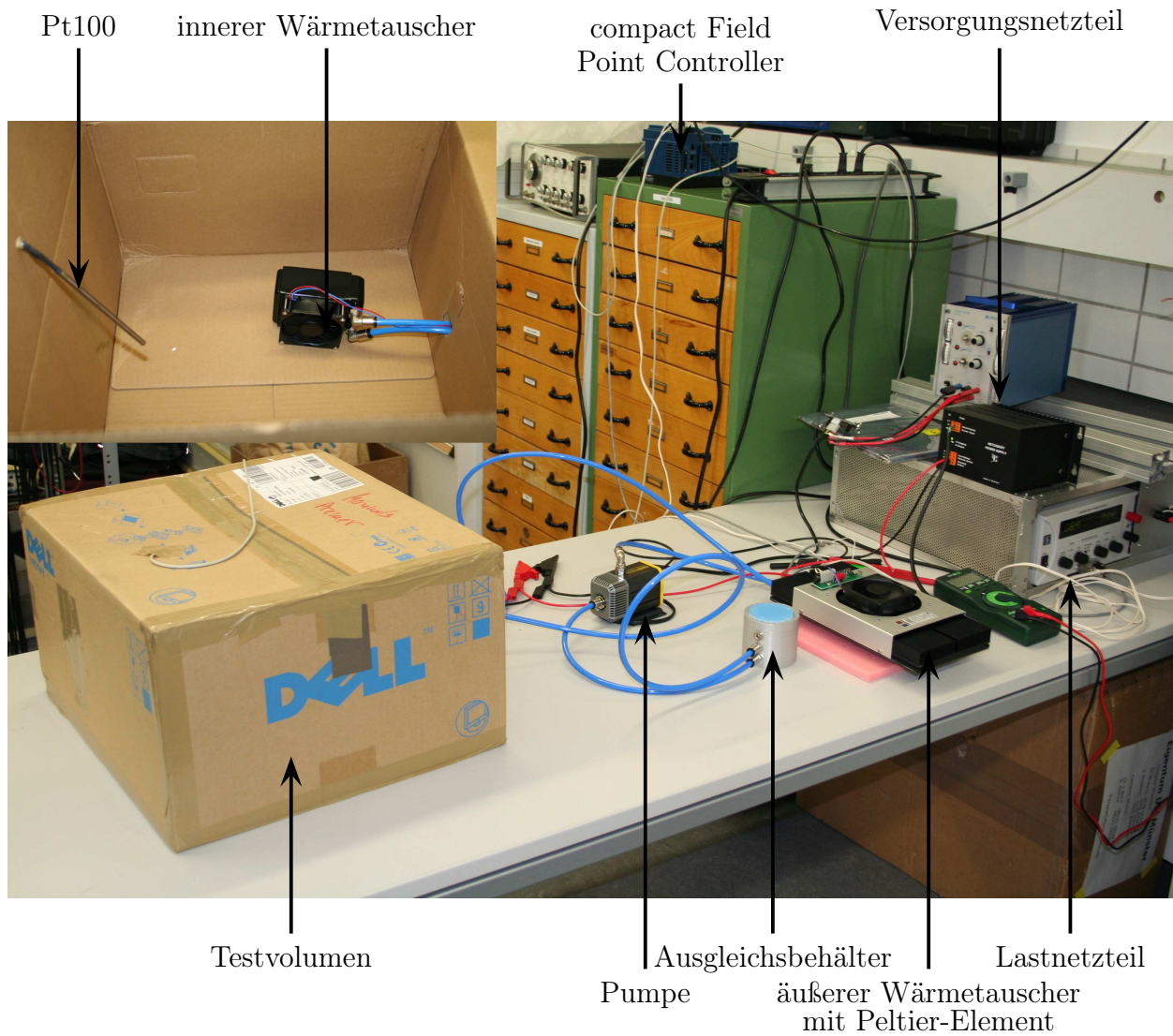


Abbildung 3.5.: Testaufbau der Temperatursteuerung. Gezeigt ist der Aufbau der einzelnen Komponenten zur Regelung der Temperatur im Innenraum des Spannungsteilers in einem Testaufbau. Es wurde darauf geachtet, dass der Pt100 Temperaturfühler nicht genau im Ausgangsluftstrom des inneren Wärmetauschers liegt.

Der äußere Wärmetauscher besteht aus einer Kombination von Lüfter, Kühlkörper, Peltier-Element und Wasserführung. Hergestellt wird diese Kombination von Supercool unter der Bezeichnung AA-100-24-22. Der ursprüngliche Lüfter dieser Kombination wurde durch einen Lüfter der Firma Papst vom Typ 4182NX mit einer maximalen Förderleistung von $180 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgetauscht (Betriebsspannung 12 V).

Der innere Wärmetauscher stammt vom Hersteller Sub Zero und trägt die Bezeichnung Exodus Chill 80. Als Lüfter kommt ein Papst 8412NH zum Einsatz (maximale Förderleistung $79 \text{ m}^3/\text{h}$). Beim ersten Spannungsteiler wurde der Wärmetauscher auf der Bodenplatte verschraubt und die Luft über einen Schlauch in das Gasverteilerrohr geleitet. Der Einlass des Wärmetauschers zeigt beim ersten Spannungsteiler in Richtung der Außenwand. Dies kann zu einer inhomogenen Zirkulation führen. Beim zweiten Spannungsteiler soll die Zirkulation verbessert werden, indem der innere Wärmetauscher unter der untersten Elektrode angebracht wird, und der Einlass nach unten zeigt.

Das Lastnetzteil, welches das Peltier-Element versorgt, ist linear geregelt, stammt vom Hersteller EA und trägt die Bezeichnung PS 3032-10B. Es lässt sich über ein 10 V Eingangssignal stufenlos steuern und stellt Spannungen von bis zu 32 V bei maximal 10 A bereit. Das Netzteil wurde durch ein Relais modifiziert, das einen Wechsel der Polarität der Ausgangsspannung erlaubt. Die Polarität des Relais kann über 5 V Signale gesteuert werden. Die gesamte Elektronik wurde in einem 19“-Gehäuse untergebracht und kann so fest mit dem Rahmen des Spannungsteilers verschraubt werden. Mit Netzteilen dieser Baureihe wurden bereits beim Aufbau des Präzisions-Messstandes gute Erfahrungen gemacht.

Die Komponenten der Temperatursteuerung sind vorhanden und haben ihre Leistungsfähigkeit bereits in einem Testaufbau unter Beweis gestellt. Ein Foto des Testaufbaus zeigt Abb. 3.5. In diesem Testaufbau konnte die Temperatur in einem Testvolumen leicht um $\pm 13 \text{ K}$ verändert werden. Bei dieser Temperaturdifferenz war die Leistungsfähigkeit der Anlage nicht ausgeschöpft, eine größere Temperaturdifferenz hätte jedoch das Überschreiten der Taugrenze und damit eine mögliche Beschädigung der Bauteile hervorrufen können. Bei diesem Aufbau wurde noch kein PID-Regler verwendet. Die Einrichtung des PID-Reglers hängt vom genauen mechanischen Aufbau ab, und soll daher erst am fertigen Spannungsteiler durchgeführt werden.

3.3.2. Simulationen der Temperatursteuerung

Im letzten Abschnitt wurde ein System beschrieben, durch das dem Innenraum des Spannungsteilers Wärme zu- und abgeführt werden kann. Eine weitere Herausforderung ist die homogene Verteilung dieser Wärme in der Umgebung der Widerstände. Um die Verteilung der Wärme im Innenraum zu untersuchen, wurde eine Simulation des Spannungsteilers mit dem Programm EFDLab erstellt. Dieses Programm arbeitet ebenfalls nach der „finite-elements-method“, im Gegensatz zu dem Programm FEMLab ist es jedoch auf die Berechnung von Strömungen und Temperaturverteilungen spezialisiert. Es bietet eine intuitive Unterstützung von Lüftern und Wärmequellen und verfügt über eine große Materialdatenbank. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit, CAD-Daten direkt aus dem Programm Inventor 10 zu

importieren oder über die eingebaute AutoCAD-Funktionalität eigene Geometrien zu erstellen. Das Programm EFDLab wurde für diese Aufgabe von der Firma Nika im Rahmen einer dreimonatigen Teststellung kostenlos zur Verfügung gestellt.

Die Geometrie des Spannungsteilers wurde für diese Simulation auf den Tank, sämtliche Stäbe, die Elektroden und das Gasverteilerrohr vereinfacht. Der innere Wärmetauscher wird durch ein poröses Medium repräsentiert, mit dem ein Wärmestrom von 100 W in den Innenraum gelangt. Dies entspricht theoretisch der maximalen Wärmeleistung und damit der größten Differenz zwischen Innenraum und Umgebungstemperatur. In diesem Fall wird der größte Temperaturgradient im Innenraum erwartet. Im fertigen Aufbau wird nur ein Teil der theoretischen Wärmeleistung an das Füllgas abgegeben werden können, die erreichten Temperaturen werden im fertigen Aufbau daher niedriger als in der Simulation ausfallen. In der Simulation wird ein maximaler Unterschied von Innen- und Umgebungstemperatur von bis zu 70 K erreicht. Im Experimentierbetrieb sind mit Unterschieden zwischen Innen- und Umgebungstemperatur von 10 K zu rechnen. Auch die in den Simulationen gefundenen Temperaturgradienten werden im fertigen Aufbau daher entsprechend niedriger ausfallen. Obwohl sich die absoluten Temperaturen aus dieser Simulation nicht auf die Realität übertragen lassen, lässt eine Verbesserung der Temperaturgradienten in der Simulation auch eine Verbesserung der Temperaturgradienten im fertigen Aufbau erwarten. Vor der ersten Inbetriebnahme des Spannungsteilers mit Hochspannung können die genauen Temperaturgradienten im Innenraum untersucht werden, indem auch auf den Hochspannungsebenen Temperaturfühler installiert werden. Dies ist im Betrieb des Spannungsteilers wegen der Gefahr von Überschlügen nicht möglich.

Die Kennlinien von Lüftern der Firma Papst sind in das Programm integriert, die Kennlinie des Modells 8412NH wurde für den internen Wärmetauscher ausgewählt. Den Außenwänden des Spannungsteilers wurde ein Wärmeleitungskoeffizient von $2,2 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ zugewiesen, was einer Isolierung mit 15 mm starken Dämmplatten der Firma Armaflex entspricht. Das Ende der Simulation ist erreicht, wenn sich die durchschnittliche Temperatur im Innenraum um weniger als 10^{-6} ändert. Dies entspricht dem thermischen Gleichgewicht, in dem genau 100 W Wärme über die Außenwand abgegeben werden. Durch Simulationen, bei denen die Verteilung der Temperatur über die Zeit betrachtet wurde, konnte das Erreichen des thermischen Gleichgewichts im Fall einer unveränderlichen Durchschnittstemperatur augenscheinlich bestätigt werden.

Bei einer anliegenden Spannung von 35 kV erzeugen die Widerstände selbst eine Wärmeleistung von jeweils 0,05 W. Durch die zirkulierende Luft ist dadurch keine Änderung der Temperatur in der Umgebung der Widerstände zu erwarten. Da in dieser Simulation nur die Temperatur in der Umgebung der Widerstände untersucht werden soll, wird die Wärmeleistung der einzelnen Widerstände vernachlässigt.

Untersucht wurde die Temperatur entlang einer Linie von der untersten Elektrode bis unter die oberste Elektrode, deren Abstand von der zentralen Achse dem der Widerstände entspricht. Die maximale Temperaturdifferenz ΔT entlang dieser Linie wird benutzt, um die verschiedenen Simulationen zu beurteilen.

Zu Beginn der Simulationen wurde ein vorläufiges Design des Spannungsteilers benutzt, das aus fünf Ebenen mit 100 Widerständen bestand. Nach verschiedenen Probe-Simulationen

wurden verschiedene Parameter der Temperatursteuerung näher untersucht.

In der ersten Simulation wurden zwei verschiedene Designs der Auslassöffnungen des Gasverteilerrohrs untersucht. Ein Design lehnt sich am ersten Spannungsteiler an und beinhaltet ein Gasverteilerrohr mit 18 Bohrungen pro Ebene und einem konstanten Bohrungsdurchmesser von 5 mm. Die Summe der Bohrungsflächen ist in diesem Fall kleiner als die Grundfläche des Gasverteilerrohrs. Auf diese Weise soll ein Staudruck aufgebaut werden, der für eine gleichmäßige Zirkulation der Luft aus dem Gasverteilerrohr und über die Widerstände sorgen soll. Das zweite untersuchte Design verfolgt die Idee, die Summe der Bohrungsflächen genauso groß wie die Einlassfläche des Gasverteilerrohrs zu wählen. Zusätzlich sollte der Bohrungsdurchmesser von der untersten Ebene bis zur obersten Ebene ansteigen. Dahinter verbirgt sich die Idee, dass die Luft in der Nähe des Wärmetauschers wärmer sein sollte als weit entfernt von diesem. Der Verlauf der Temperatur entlang der Widerstandspositionen ist in Abb. 3.7 dargestellt.

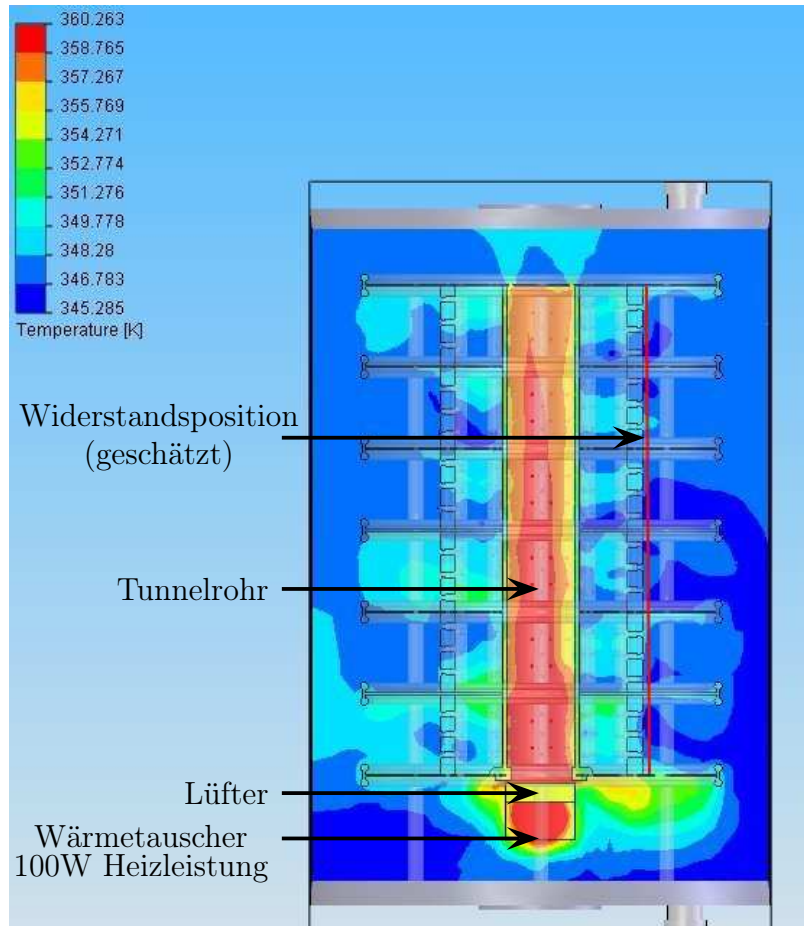
Das Design mit konstanten Bohrungsdurchmessern erreichte eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 5,3 \text{ K}$, das Design mit ansteigendem Bohrungsdurchmesser eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 7,2 \text{ K}$ entlang der Widerstandspositionen. Eine ansteigende Lochgröße erreicht also keine Verbesserung der Temperatursteuerung. Durch eine ansteigende Lochgröße steigt die Temperatur entlang der Widerstandsposition sogar kontinuierlich an, was unbedingt zu vermeiden ist.

Während dieser Simulationen konnte die Verteilung der Temperatur im Innenraum bei jedem Rechenschritt verfolgt werden. Dabei ist aufgefallen, dass das Volumen zwischen oberster Elektrode und Tankdeckel nicht von der Zirkulation der Luft betroffen ist. Dieses Volumen erwärmt sich in der Simulation nur sehr langsam und beeinflusst währenddessen die Temperatur der obersten Ebene negativ. Um dieses Volumen in die Zirkulation einzubinden, wurde eine Geometrie simuliert, bei der Bohrungen mit einem Durchmesser von 5 mm in die oberste Elektrode eingefügt wurden (Abb. 3.7). Das Ergebnis ist eine auf $\Delta T = 3,7 \text{ K}$ reduzierte Temperaturdifferenz entlang der Widerstandspositionen. Diese Simulation benötigte außerdem weniger Iterationen, bis das thermische Gleichgewicht erreicht wurde. Es lässt sich also schließen, dass die Löcher in der obersten Elektrode eine Verbesserung der Temperatursteuerung erlauben.

Nach der Beendigung dieser Simulationen wurde die geplante Anzahl der Widerstände erhöht. Dadurch wurde es nötig eine zusätzliche, sechste Ebene zu integrieren und pro Umlauf der Helix nicht neun sondern zwölf Widerstände zu verbauen. Daher wurde auch die Anzahl der Bohrungen im Tunnelrohr von 18 pro Ebene auf 24 pro Ebene erhöht. Die Ergebnisse der bisherigen Simulationen sind unabhängig von der genauen Größe des Spannungsteilers und lassen sich daher auf das neue Design übertragen. Auf eine Wiederholung der Simulationen mit dem neuen Design wurde wegen der beschränkten Nutzungszeit für das Programm und der langen Vorbereitungs- und Rechenzeit der Simulationen verzichtet. Eine Illustration der verwendeten Geometrie inklusive der Einzeichnung einer Temperaturverteilung zeigt Abb. 3.6.

Um zu untersuchen, ob durch die Erhöhung der Bohrungsanzahl pro Ebene und die zusätzliche Ebene der Bohrungsdurchmesser reduziert werden muss, wurde eine weitere Simulation

Abbildung 3.6.: Illustration der Temperatursimulation. Gezeigt ist die aktuellste Geometrie bei der Simulation der Temperatursteuerung mit Hilfe des Programms EFDLab. Eingezeichnet ist außerdem die Temperatur einer Schnittebene durch die zentrale Achse des Aufbaus. Bei dieser Simulation beträgt der Bohrungsdurchmesser 5 mm und das Füllgas ist Stickstoff.



durchgeführt. Bei dieser Simulation wurden Bohrungsdurchmesser von 5 mm und 4 mm verglichen. Die Darstellung des Temperaturverlaufs bei diesen Simulationen zeigt Abb. 3.8. Bei einem Durchmesser von 4 mm betrug die Temperaturdifferenz 12,0 K. Beachtenswert ist dabei, dass diese Temperaturdifferenz vor allem aus einem starken Abfall der Temperatur auf der obersten Ebene herrührt. Bei einem Bohrungsdurchmesser von 5 mm betrug die Temperaturdifferenz entlang der Widerstandspositionen 4,6 K. Der Bohrungsdurchmesser sollte also einen Wert von 5 mm nicht unterschreiten. Trotz der gestiegenen Bohrungsanzahl ist die gesamte Bohrungsfläche kleiner als die Grundfläche des Tunnelrohrs geblieben.

Größere Löcher würden dazu führen, dass die gesamte Bohrungsfläche größer als die Grundfläche des Gasverteilerrohrs wird. Damit würde kein Staudruck mehr aufgebaut, und es ergibt sich eine inhomogenere Verteilung der Temperatur an der Widerstandspositionen.

Weiterhin wurde der Einfluss des Füllgases auf die Temperaturverteilung untersucht. Im ersten Spannungsteiler wurde Stickstoff als Füllgas verwendet. Als Vergleichsgas wurde das Gas mit der höchsten Wärmeleitfähigkeit, Helium, simuliert. Die Temperaturdifferenz konnte durch die Verwendung von Helium in der Simulation verbessert werden. In einem Testaufbau wurde jedoch festgestellt, dass die Spannungsfestigkeit von Helium ca. drei mal kleiner als die von Stickstoff ist. Helium kann daher nicht als Füllgas für den Spannungsteiler verwendet werden.

Auch andere Gase haben entscheidende Nachteile. So wird SF_6 häufig zur Isolation von Hoch-

spannungsanlagen verwendet. Die Spannungsfestigkeit von SF_6 ist ca. sechs mal größer als die von Luft. Es besitzt jedoch nicht nur eine schlechtere Wärmeleitung, es handelt sich bei SF_6 auch um das stärkste bekannte Klimagas (über vier Größenordnungen stärker als CO_2). Daher muss bei der Benutzung sichergestellt werden, dass kein Gas in die Atmosphäre gelangen kann. Dies muss über staatlich geprüfte Rückgewinnungsanlagen geschehen. SF_6 kommt daher als Füllgas für den zweiten Spannungsteiler nicht in Frage. Andere Gase haben entweder eine niedrigere Spannungsfestigkeit als Stickstoff, eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit oder beides.

Der Gasdruck im Innenraum wird dem Atmosphärendruck entsprechen. Ein abweichender Gasdruck im Innenraum birgt keine Vorteile. Eine Unterschreitung des Atmosphärendrucks bringt weder Vorteile bei Spannungsfestigkeit noch bei der Wärmeleitfähigkeit. Bei einer Unterschreitung des Atmosphärendrucks kann es sogar zu einer starken Erniedrigung der Spannungsfestigkeit kommen. Überschreitet man den Atmosphärendruck im Innenraum, fällt der Behälter unter die Druckbehälterverordnung. Auch dies ist mit zeit- und geldintensiven Überprüfungen verbunden, die in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen.

Abschließend kann die beim ersten Spannungsteiler gewählte Verteilung der Wärme im Innenraum als nahezu ideal bezeichnet werden. Einzig durch die Löcher in der obersten Elektrode kann die Temperaturverteilung noch verbessert werden. Dies wird beim zweiten Spannungsteiler umgesetzt.

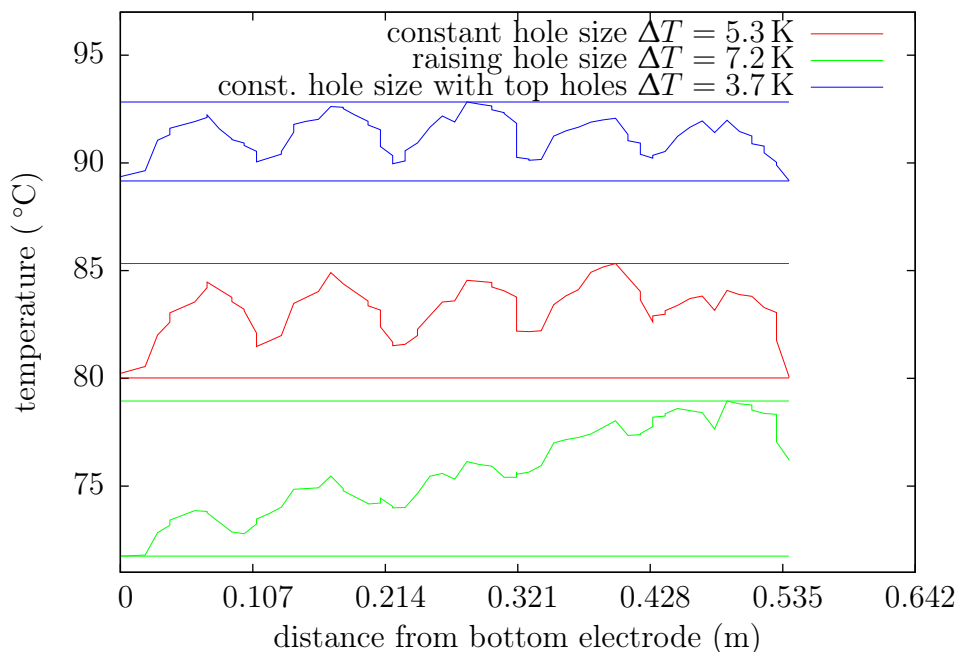


Abbildung 3.7.: Verlauf der Temperatur entlang der Widerstandspositionen. Gezeigt ist die Temperatur entlang der Widerstandspositionen für verschiedene Bohrungsparameter. Für eine genaue Beschreibung der Unterschiede siehe Text.

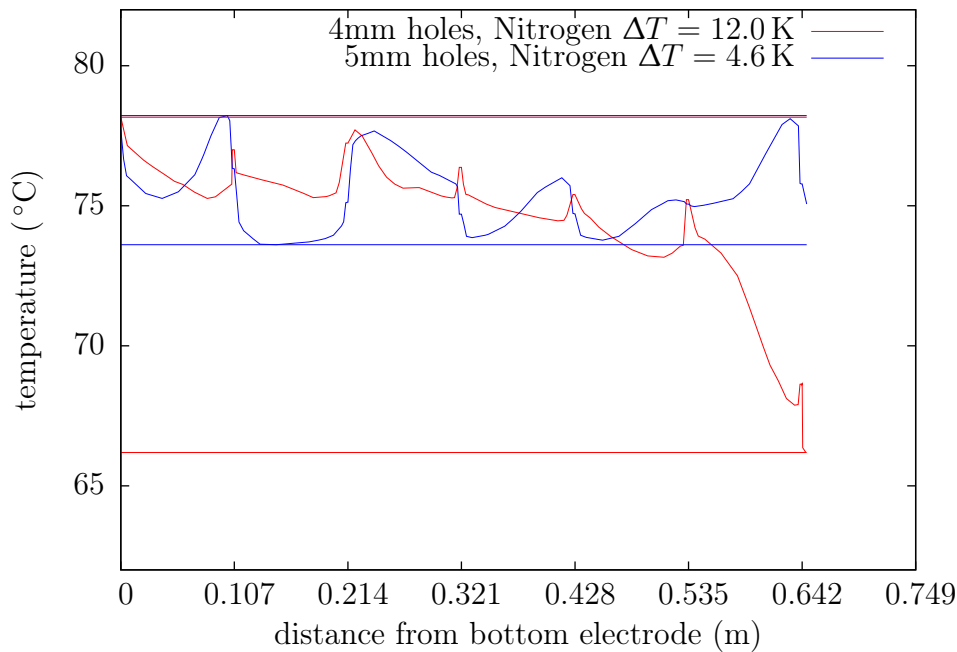


Abbildung 3.8.: Verlauf der Temperatur entlang der Widerstandspositionen. Gezeigt ist die Temperatur entlang der Widerstandspositionen für verschiedene Bohrungsparameter. Für eine genaue Beschreibung der Unterschiede der Simulationen siehe Text.

3.4. Der mechanische Aufbau

Im folgenden wird der genaue mechanische Aufbau des Spannungsteilers beschrieben. Von dem gesamten Aufbau wurden CAD-Zeichnungen mit dem Programm Autodesk Inventor 10 angefertigt (Abb. 3.9). Die Baupläne der einzelnen Komponenten finden sich in Anhang B. Die genauen Bezeichnungen der einzelnen Komponenten werden im Text durch Anführungszeichen kenntlich gemacht („Muster-Bauteil“).

Sieben kreisförmige Kupferelektroden („elektrode oben“, „elektrode“ und „elektrode abgriff“) mit einem Durchmesser von 460 mm und in einem Abstand von 105 mm übereinander bilden die sechs Ebenen des Spannungsteilers. Die unterste Ebene beherbergt die Abgriffwiderstände, die oberen fünf Ebenen beherbergen die Teilerwiderstände der primären Teilerkette.

Das genaue Design der Elektroden ergibt sich aus Simulationen, die in Abschnitt 3.2 beschrieben wurden. Für die mechanische Stabilität sorgen auf jeder Ebene sechs Delrin-Stützen („stab POM“), die mit einem Abstand von 190 mm kreisförmig um die zentrale Achse des Aufbaus angeordnet sind. Die unterste Ebene wird von sechs Delrin Stützen mit einer Höhe von 150 mm getragen („stab POM lang“) und auf einer Grundplatte aus Aluminium befestigt („boden neu“). Ebenfalls kreisförmig um die zentrale Achse angeordnet sind zwölf Befestigungsstäbe für die Widerstände der primären Teilerkette. Diese Stäbe werden aus Teflon gefertigt und ihr Abstand zur zentralen Achse beträgt 138 mm.

Ausgehend von der obersten Elektrode windet sich die primäre Teilerkette helixförmig um die zentrale Achse des Aufbaus. Die Richtung der Helix ändert sich bei jeder Ebene, um die

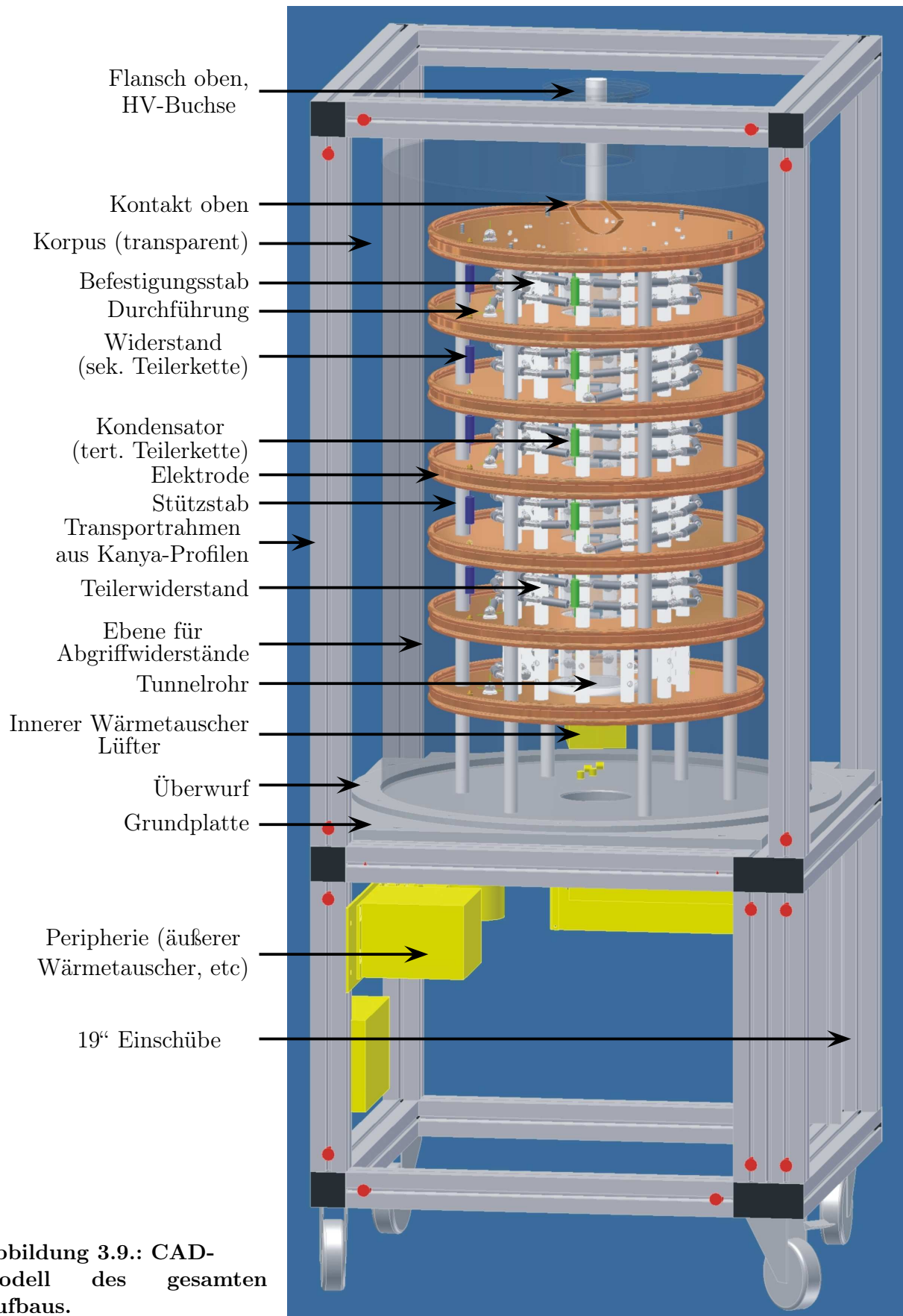


Abbildung 3.9.: CAD-Modell des gesamten Aufbaus.

Induktivität des Aufbaus gering zu halten. Auf diese Weise gelingt es außerdem, identische Elektroden auf jeder Ebene zu verwenden, lediglich die oberste und unterste Elektrode haben entweder zusätzliche oder unterdrückte Bohrungen. Eine Bauanleitung für den Aufbau einer Ebene ist im Anhang B.1 dargestellt. Die primäre Teilerkette hat keinen elektrischen Kontakt zu den mittleren Kupferelektroden, sondern wird zwischen den einzelnen Ebenen über spezielle Durchführungen („durchführung“) miteinander verbunden. Erst das Ende der primären Teilerkette wird mit der untersten Elektrode elektrisch verbunden. Die unterste Elektrode wird geerdet und stellt sternförmig den Bezugspunkt für alle weiteren Erdpotentiale dar. Die Abgriffe der Maßstabsfaktoren werden durch nicht leitende Durchführungen in der untersten Elektrode geführt. Alle Messpotentiale werden zu einem Flansch in der Grundplatte geführt, welcher sämtliche Verbindungen des Innenraums mit der Außenwelt beherbergt.

Für die Befestigung der Widerstände in einer Helix befinden sich auf jeder Ebene zwölf Befestigungsstäbe aus Teflon („stab A“ bis „stab E“) mit einem Abstand von 138 mm zur zentralen Achse. Die Befestigungsstäbe tragen Halterungselemente, die auf zwei Seiten die Aufnahme der Anschlüsse der Widerstände erlauben („stueck“, „kugel“). Die Befestigung der Widerstände in den Halterungen erfolgt über Madenschrauben. Die Verwendung von Lötzinn könnte zu einer starken Erwärmung der Widerstände und damit möglicherweise zu einer Änderung des Widerstands führen. Die Widerstände werden daher nicht verlötet.

An bestimmten Stellen, wie zum Beispiel den Abgriffwiderständen, müssen zusätzliche Verbindungen geschaffen werden. Dies geschieht über spezielle Halterungselemente („kstueck“). Die Verbindungen werden aus dem Draht gefertigt, der von Vishay für die Anschlüsse der Widerstände verwendet wird. Auf diese Weise kann es nicht zu unvorhergesehenen Kontaktpotentialen bei den kritischen Abgriffwiderständen kommen. Der Draht wird durch Schrumpfschlauch isoliert.

Die Zuführung der Hochspannung erfolgt durch einen Flansch, der am oberen Ende des Edelstahl tanks angeschweißt wird. Durch diesen Flansch wird die Hochspannungsbuchse in die Nähe der obersten Elektrode geführt. Den Kontakt zwischen Hochspannungsbuchse und oberster Elektrode wird durch ein Bauteil gewährleistet, das aus Federbronze gefertigt wird („kontakt oben“)¹. Dieser Kontakt wird an der Hochspannungsbuchse befestigt und drückt großflächig auf die oberste Elektrode. Die oberste Elektrode ist also Knotenpunkt für die Verbindung aller drei Teilerketten mit der Hochspannung. An dieser Stelle werden zwei verschiedene Materialien verbunden, was bei unterschiedlichen Temperaturen der beiden Materialien Thermospannungen erzeugen kann. Diese Thermospannungen bewegen sich im Rahmen von μV . Bei einer anliegenden Messspannung von mehreren kV ergeben sich Abweichungen im Bereich von maximal 10^{-9} . Die Thermospannungen in diesem Bereich können daher vernachlässigt werden. Im Bereich der Abgriffwiderstände sollten diese jedoch durch eine geeignete Wahl der Materialien minimiert werden.

Die sekundäre und tertiäre Teilerkette verbindet die Elektroden miteinander. Die Befestigung erfolgt über elektrisch leitende Halterungen an jeder Elektrode („durchführung2“). Das Ende der sekundären und tertiären Teilerkette wird mit der untersten Elektrode verbunden und dort geerdet.

¹Die genaue Realisierung dieses Kontakts wird derzeit von S. Bauer durchgeführt [Bau09].

Der gesamte Aufbau befindet sich in einem Edelstahltank mit einer Höhe von 900 mm, einem Innendurchmesser von 600 mm und einer Wandstärke von 2 mm („korpus neu“). Am unteren, offenen Ende des Tanks befindet sich eine gebördelte Kante. Diese wird durch einen Überwurf („überwurf neu“) auf eine Silikondichtung gepresst, die auf der Grundplatte aufliegt. Dadurch wird der Innenraum gasdicht abgeschlossen, und das Gas im Inneren kann durch Stickstoff ausgetauscht werden. Um Verunreinigungen des Füllgases zu minimieren, muss bei allen Durchführungen auf eine gasdichte Auslegung geachtet werden.

Unterhalb der untersten Elektrode auf der zentralen Achse befindet sich der innere Wärmetauscher inklusive Lüfter. Der Luftstrom ist nach oben gerichtet. In der Mitte der unteren sechs Elektroden befinden sich runde Löcher, durch welche das Gasverteilerrohr von der untersten bis unter die oberste Elektrode verläuft („Tunnelrohr“). Die Befestigung des Gasverteilerrohrs, des Wärmetauschers und des Lüfters an der untersten Elektrode erfolgt über die Bauteile „Arretierung oben“ und „Arretierung unten“. Der innere Wärmetauscher ist über Wasserleitungen mit der Außenwelt verbunden. Dort befindet sich die Pumpe, der Ausgleichsbehälter sowie der äußere Wärmetauscher inklusive Peltier-Element. Die Steuerung der Leistung des Peltier Elements erfolgt durch einen PID-Regler, der die Temperatur im Innenraum misst und daraus die nötige Heiz- bzw. Kühlleistung berechnen kann. Eine detaillierte Beschreibung der Temperatursteuerung findet sich in Kapitel 3.3. Durch diesen Aufbau muss lediglich die Versorgungsspannung für den Lüfter von 12 V Gleichspannung in den Innenraum geführt werden.

Der Temperaturfühler, der als Eingangssignal für den PID-Regler dienen soll, befindet sich auf der Ebene der Abgriffwiderstände. Dort sind mehrere leere Befestigungsstäbe vorhanden, an denen ein Pt100 Temperaturfühler befestigt werden kann. Dadurch kann der Temperaturfühler an einer Position verbaut werden, die der Position eines Widerstands sehr ähnlich ist. Die Spannung von wenigen hundert Volt auf dieser Ebene steht dieser Befestigung nicht im Weg. Im Gegensatz dazu musste der Temperaturfühler für diese Aufgabe beim ersten Spannungsteiler im Zuluftstrom des Wärmetauschers befestigt werden, um Überschläge zu vermeiden. Beim zweiten Spannungsteiler können weitere Temperaturfühler im Zu- oder Abluftstrom des Wärmetauschers befestigt werden, um weitere Informationen über die Temperaturverteilung im Innenraum zu erhalten.

Die Auslesung der Pt100 Temperaturfühler, die Ansteuerung der Lastnetzteile und die Berechnung der Regelgröße aus der Temperatur mittels eines PID-Reglers erfordern eine zentrale Steuerung. Ein National Instruments compact Field Point Controller Modell cFP-2020 kann alle benötigten Funktionen bereitstellen und lässt sich außerdem leicht in die Slow-Control des KATRIN-Experiments integrieren. Der interne Speicher des Steuergeräts beträgt 128 MB. Über einen Steckplatz für compact flash Karten lässt sich der Speicher des Geräts erweitern. Der Arbeitsspeicher ist ebenfalls 128 MB groß. Der interne Prozessor ist mit 400 MHz getaktet. Über eine Netzwerkverbindung kann das Gerät programmiert werden und eine grafische Benutzeroberfläche des laufenden Programms auf jedem Java fähigen Browser dargestellt. Vier Geräte können über RS232 Schnittstellen angesprochen werden. Die Versorgungsspannung beträgt 12 V. Die Funktionalität des Controllers lässt sich über Module erweitern. Das cFP-RTD-124 Modul ermöglicht die Messung von acht Widerständen über Vier-Draht-Messungen und wird zur Auslesung der Pt100 Temperaturfühler genutzt. Das cFP-AIO-610 Modul stellt jeweils vier analoge Spannungsausgänge und -eingänge bereit.

Es wird zur Steuerung des Lastnetzteils und über die sekundäre Teilerkette zur Überprüfung der Spannung im Innenraum genutzt.

Der gesamte Aufbau wird von einem Rahmen aus Kanya-Profilen getragen („kanya“- Bauteile). Die Grundplatte wird durch Schrauben am Kanya-Rahmen fixiert, jedoch durch Silikon thermisch und galvanisch vom Kanya-Rahmen isoliert. Zusätzlich wird der gesamte Korpus mit Dämmplatten der Firma Armaflex isoliert, um die Einflüsse der Umgebungstemperatur auf den Innenraum zu minimieren. Um die Mobilität des Aufbaus zu gewährleisten, wird der gesamte Rahmen auf Lenkrollen stehen, die über eine Feststellmöglichkeit verfügen, und jeweils ein Gewicht von maximal 80 kg tragen können. Die Rollen sind wesentlich großzügiger als beim ersten Spannungsteiler ausgelegt und ermöglichen so eine einfache Überwindung von Rampen und kleinen Stufen. Beim ersten Spannungsteiler befindet sich der Korpus des Spannungsteilers ungeschützt auf einem Untersatz, der die Peripherie beherbergt. Zum Transport muss der erste Spannungsteiler daher auf eine spezielle Palette gestellt und durch Holzverstreben geschützt werden. Beim zweiten Spannungsteiler umschließt der Rahmen die empfindliche Außenwand des Spannungsteilers. Er kann daher beim Transport ohne zusätzliche Vorkehrungen in den Laderaum geschoben und dort mit Spanngurten fixiert werden.

Unterhalb der Grundplatte bietet der Rahmen Platz für Peripherie und Einschübe im 19“-Format mit insgesamt neun Höheneinheiten. Dort befindet sich auch ein Umsetzer von RJ45 auf optische Datenübertragung (IMC-101 Hersteller MOXA, Versorgungsspannung 12 V). Durch die optische Datenübertragung ist der gesamte Aufbau, bis auf die Messspannungszuführung und die 230 V Versorgungsspannung der Netzteile, vollkommen elektrisch isoliert. Eine gesonderte Erdung des Aufbaus kann bei Bedarf durchgeführt werden.

Alle verbauten Geräte benötigen entweder 230 V Netzspannung oder eine 12 V Versorgungsspannung. Um die 12 V Versorgungsspannung zur Verfügung zu stellen, steht ein linear geregeltes Netzteil der Firma EA bereit (Typ PS 612-05A). Mit Netzteilen dieser Baureihe wurden bereits beim Aufbau des Präzisionsmessstandes gute Erfahrungen gemacht.

Um das Gas im Inneren des Aufbaus durch Stickstoff austauschen zu können, befindet sich auf der Unterseite der Grundplatte ein Handventil und ein Anschluss für 6 mm Swagelock Verbindungen. Am Flansch auf der Oberseite befindet sich ein Überdruckventil, das bereits bei einem Überdruck von 0,07 bar öffnet. Ein Gas-Austausch des Innenraums kann also erfolgen, indem eine Gasdruckflasche über einen Druckminderer an das untere Handventil angeschlossen wird und der Innenraum mit Gas gespült wird. Wird der Innenraum mit trockenem Gas befüllt, erlaubt ein Feuchtigkeitssensor im Inneren des Spannungsteilers die Verunreinigung mit Umgebungsluft abzuschätzen. Der Sensor benötigt dabei nur während der Messung eine Spannung. Wird der Sensor nicht ausgelesen, muss auch keine Spannung in den Innenraum geführt werden.

Mit Hilfe des CAD Programms kann die Höhe des gesamten Aufbaus auf 1701 mm, Breite und Tiefe zu 700 mm bestimmt werden. Das Gewicht der Aufbau wird bei ca. 178 kg liegen.

EIGNUNG DER KATRIN- SPANNUNGSTEILER FÜR DAS BETINA- EXPERIMENT

Nach der Fertigstellung des Designs des zweiten KATRIN-Spannungsteilers erreichte uns eine Anfrage des BeTINa-Experiments (Beryllium Trap for the Investigation of Nuclear charge radii), das versucht die Ladungsradien von Halo Kernen am Beispiel von Beryllium zu untersuchen. In dieser Anfrage wurde die Reduzierung von systematischen Unsicherheiten des Experiments durch den Einsatz eines hochpräzisen Spannungsteilers diskutiert. Eine Zusammenarbeit ist aus mehreren Gründen interessant. Zum einen sollte die, für das KATRIN-Experiment entwickelte, Präzisions-Hochspannungs-Technologie auch anderen Experimenten

zur Verfügung gestellt werden. Zum anderen arbeiten Teilgruppen der BeTINa-Kollaboration mit der Arbeitsgruppe von Prof. Weinheimer am SpecTrap Experiment zusammen.

In diesem Kapitel wird die Eignung der beiden KATRIN-Spannungsteiler für das BeTINa-Experiment untersucht.

4.1. Überblick

Das BeTINa-Experiment versucht den Ladungsradius von Halo-Kernen am Beispiel von Beryllium zu untersuchen. Den experimentellen Zugang zu dieser Vermessung stellt die Isotopieverschiebung der Energieniveaus der verschiedenen Isotope eines Elements dar. Aus einer Kombination von hochauflösender Laserspektroskopie und theoretischen Berechnungen der Isotopieverschiebungen können die Ladungsradius-Änderungen der einzelnen Isotope eines Elements extrahiert werden [Bet06].

Die Beryllium Ionen für diese Messung werden von ISOLDE (Isotope Separation On-Line) am CERN bereitgestellt. Die Erzeugung findet in einem Bereich statt, der auf einem Potential von $U < 60$ kV gegenüber dem Erdpotential liegt, im folgenden Erzeugungsplattform genannt. Von dieser Plattform werden die Ionen auf Erdpotential beschleunigt. Der daraus resultierende schnelle Ionenstrahl wird in einer Laserspektroskopie-Sektion durch eine gleichfalls auf Hochspannung gelegte Ionenoptik (max. ± 10 kV) abgebremst bzw. nachbeschleunigt.

Der Spektroskopielaser bleibt auf einer festen Frequenz stabilisiert, während die Spannung der zweiten Plattform durchgestimmt wird, um über die Dopplerverschiebung die Isotopieverschiebung der Ionen mit dem Laser in Resonanz zu bringen. Die kinetische Energie der Ionen berechnet sich aus der Spannungsdifferenz der beiden Hochspannungsplattformen.

Der Einsatz eines Spannungsteilers mit einer Genauigkeit von 10 ppm oder besser ist von großem Interesse, um systematische Fehler in der Vermessung der Beschleunigungsspannung zu reduzieren. Laut eines Lastenheftes [Noe07] muss der Spannungsteiler dazu folgende Anforderungen erfüllen:

- **Maximal-Spannung**

Bei der Vermessung der Beschleunigungsspannung der Ionen treten Spannungen von bis zu 60 kV auf. Die Spezifikationen des Spannungsteilers sollten daher Spannungsmessungen von bis zu 65 kV erlauben. Bei der Vermessung der Hochspannung der Ionenoptik treten Spannungen von ± 10 kV auf. Der Teiler sollte für diese beiden Spannungsbereiche entsprechende Maßstabsfaktoren besitzen.

- **Konstanz der Spannung**

Die Konstanz der Beschleunigungsspannung soll überprüft werden. Dazu sollte der Spannungsteiler Schwankungen mit Amplituden von 1 V und einer Frequenz von 100 Hz auflösen können.

- **Folgen von Spannungsrampen**

Beim Durchstimmen der Nachbeschleunigungs- bzw. Bremsspannung der Ionenoptik ändert sich die Spannung alle 4 ms um bis zu 3 V. Da innerhalb der 4 ms die Messdaten genommen werden müssen, sollte der Spannungsteiler bei einem Spannungsschritt nach 1 ms eine Präzision von 10 ppm erreicht haben.

- **Spannungssprünge**

Bei der Vermessung der Hyperfeinstrukturaufspaltung treten Spannungssprünge von ± 5 kV auf. Nach einem solchen Spannungssprung sollte der Spannungsteiler nach 3 s wieder die benötigte Präzision erreichen.

Um eine mögliche Anwendung des ersten Spannungsteilers beim BeTINa-Experiment zu untersuchen, wurde das Verhalten des ersten Spannungsteilers bei sinusförmigen Wechselspannungen und bei Rechteckspannungspulsen vermessen. Die Ergebnisse dieser Messung fließen in eine Simulation des Spannungsteilers mit dem Programm PSpice ein, um das vermessene Verhalten zu verstehen. Aus den Messungen und Simulationen wird die Eignung des ersten Spannungsteilers für das Experiment abgeleitet. Durch eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den zweiten Spannungsteiler wird auch dessen Eignung für diese Messung diskutiert.

4.2. Verhalten des ersten Spannungsteilers bei Wechselspannungen

Um das Verhalten des ersten Spannungsteilers bei Wechselspannung zu bestimmen, wurden die folgenden Observablen untersucht:

- Das Verhalten des Maßstabsfaktors M_{1972} bei verschiedenen Frequenzen f , $M_{1972}(f)$
- Die Phasenverschiebung P_{1972} zwischen Eingangs- und Ausgangssignal bei verschiedenen Frequenzen f , $P_{1972}(f)$
- Die Antwort des Maßstabsfaktors M_{1972} auf einen Rechteckpuls mit einer Amplitude von 10 V
- Amplituden- und Phasenverhalten beim sekundären Abgriff M_{sek} , $P_{sek}(f)$.

Der Messaufbau zur Bestimmung dieser Observablen ist in Abb. 4.1 dargestellt. Ein Funktionsgenerator vom Typ HP 8111A wurde zusammen mit einem Verstärker an den Eingang des Spannungsteilers angeschlossen. Der Verstärker wurde von der elektronischen Werkstatt des Instituts für Kernphysik Münster gebaut und ermöglicht Verstärkungen von Sinus-Signalen bis zu einer Amplitude von 120 V. Der Ausgang des Spannungsteilers mit dem Maßstabsfaktor 1972:1 wurde mit Kanal 2 eines Oszilloskops vom Typ Tektronix TPS 2024 verbunden. Durch den Innenwiderstand des Oszilloskops von 1 M Ω ändert sich das Gleichspannungsteilerverhältnis gemäß¹:

¹Auch der sekundäre Abgriff ändert sich entsprechend, die Rechnung ist hier nicht aufgeführt.

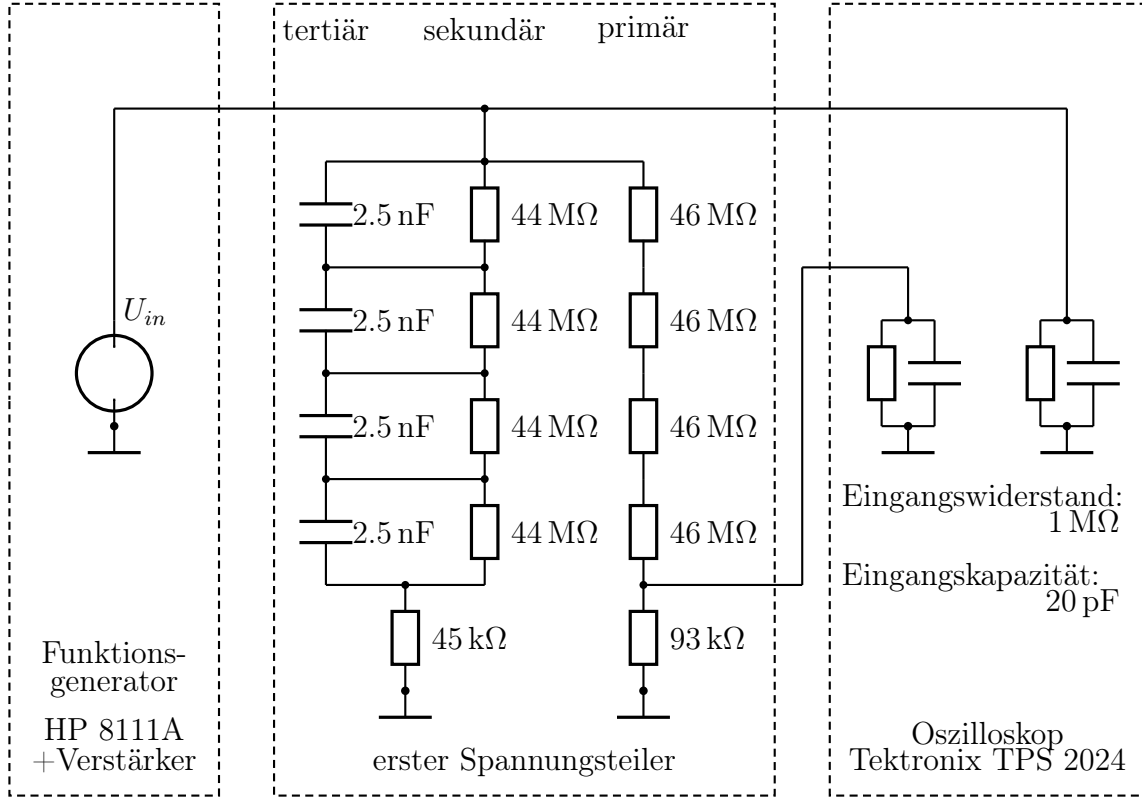


Abbildung 4.1.: Aufbau der Messung. Dargestellt sind die verwendeten Geräte, ihr interner Schaltplan sowie die Verschaltung zwischen den Geräten. Die Widerstände der primären Teilerkette sind dabei ebenenweise zu einem Widerstand zusammengefasst. Der Frequenzgenerator lieferte je nach Messung Sinus-Signale mit einer Amplitude von 100 V oder Rechteck-Signale mit einer Amplitude von 10 V. Die Verschaltung des sekundären Abgriffs entspricht der des primären Abgriffs, ist jedoch nicht einzeln eingetragen.

$$\frac{1}{M_{1972}(f)} \rightarrow \frac{1}{M'_{1972}(f)} = \frac{\frac{1}{\frac{1}{93k\Omega} + \frac{1}{1M\Omega}}}{184M\Omega + \frac{1}{\frac{1}{93k\Omega} + \frac{1}{1M\Omega}}} = \frac{1}{2163} = 0,000462 \quad (4.2.1)$$

Über ein T-Stück wurde der Funktionsgenerator außerdem direkt mit Kanal 1 des Oszilloskops verbunden. Zur Vermessung des Maßstabsverhältnisses $M'_{1972}(f)$ und der Phasenverschiebung $P(f)$ wurden mit dem Funktionsgenerator Sinus-Signale mit Frequenzen von 1 Hz bis 30 kHz erzeugt und mit dem Oszilloskop aufgezeichnet. Aus diesen Aufzeichnungen wurden durch einen Fit mit einer Sinus Funktion, Frequenz, Amplitude und Phase der Signale bestimmt. Ein Beispiel zeigt Abb. 4.2. Sämtliche Rohdaten sind im Anhang C beigefügt. Aus der Amplitude (bzw. Phase) des Eingangs- und Ausgangssignals wurde das Verhältnis (bzw. die Differenz) bestimmt und in Abb. 4.3 (bzw. 4.4) dargestellt, dies entspricht der Observablen $M'_{1972}(f)$ (bzw. $P(f)$). In beiden Fällen erkennt man eine komplexe Abhängigkeit der Observablen von der Frequenz f .

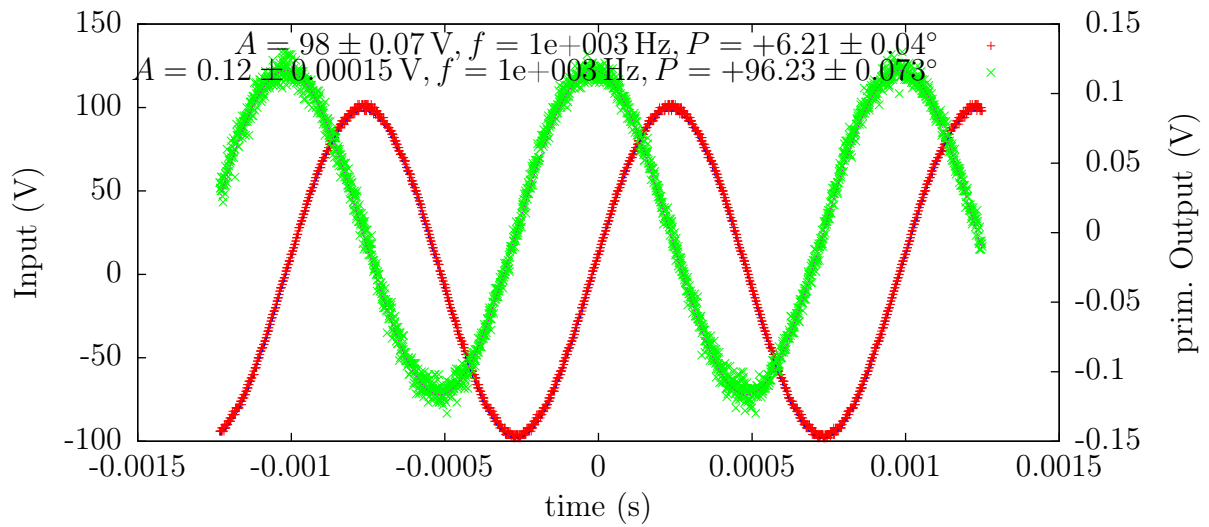


Abbildung 4.2.: Antwort des Maßstabsfaktors M_{1972} bei $f = 1000$ Hz. Gezeigt ist das Signal des Funktionsgenerators (rot, linke Achse) sowie das Ausgangssignal des Maßstabsfaktors M_{1972} (grün, rechte Achse). Eingezeichnet sind außerdem die Ergebnisse eines Fits mit einem Sinus Signal.

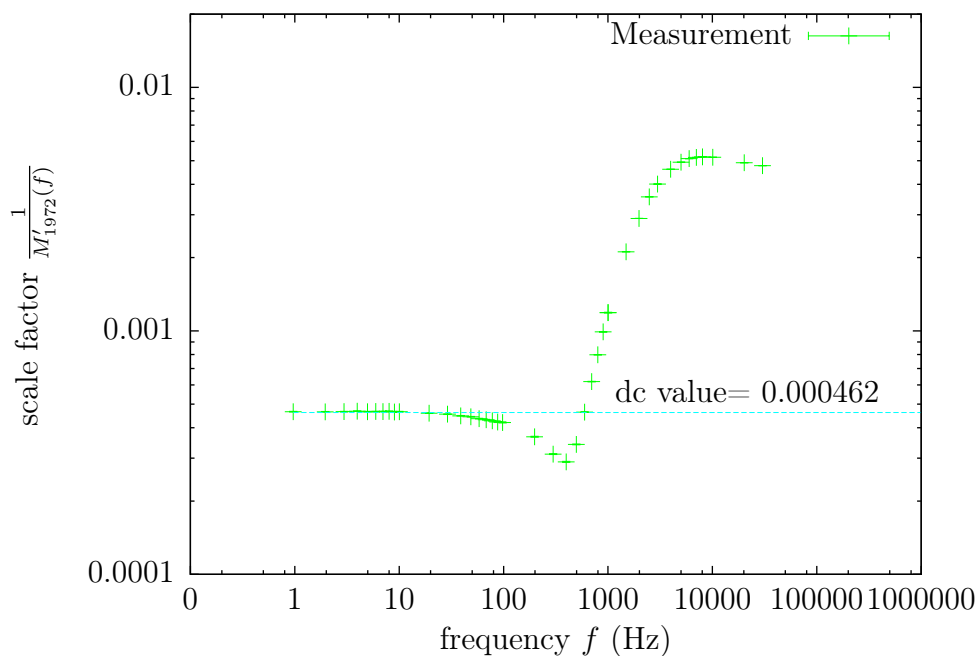


Abbildung 4.3.: Vermessung des Maßstabsfaktors (Primärer Abgriff). Messung (grün) des Maßstabsfaktors $M'_{1972}(f)$ bei verschiedenen Frequenzen f .

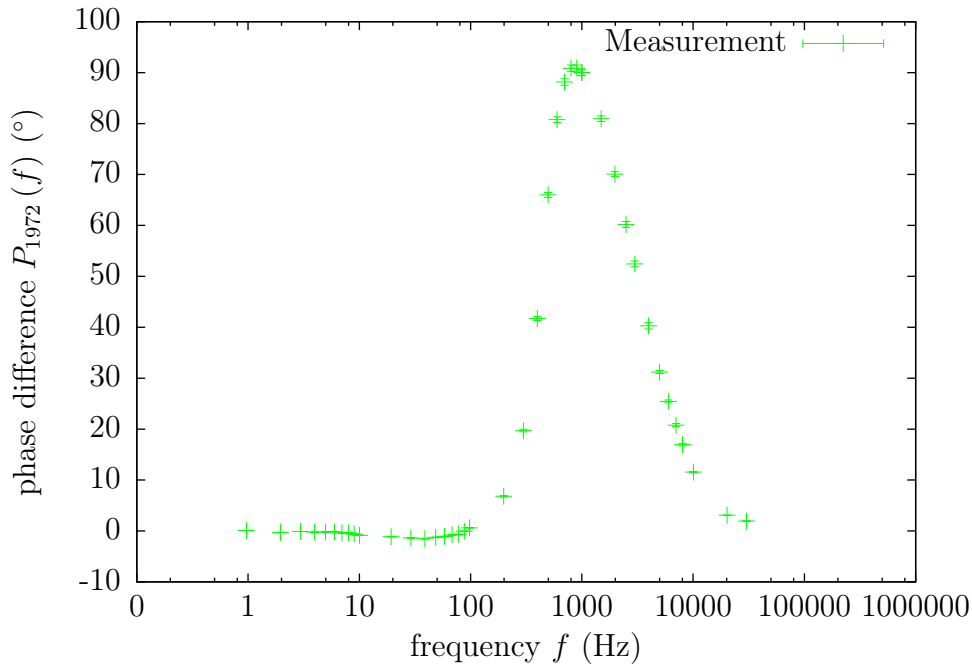


Abbildung 4.4.: Vermessung der Phasendifferenz (Primärer Abgriff). Messung (grün) der Phasendifferenz $P_{1972}(f)$ beim Maßstabsfaktor M_{1972} der primären Teilerkette.

Das Ergebnis der Messung mit Rechteckspannungspulsen² ist in Abb. 4.5 dargestellt. Durch die Flanke des Rechteckpulses kommt es in den ersten 10 μs zu einem Signal, das um ca. eine Größenordnung größer als die Erwartung von einem reinen Gleichspannungssignal ist (ca. 60 mV statt 4,62 mV). In den folgenden 150 μs folgt ein Abfall des Signals unter die Erwartung eines reinen Gleichspannungssignals (Minimum bei ca. 175 μs , -5 mV). In der Zeit von 175 μs bis 250 μs folgt ein langsamer Anstieg in Richtung der Gleichspannungserwartung. Das reine Gleichspannungssignal wurde innerhalb der Messdauer von 250 μs dabei nicht erreicht. Die Differenz zwischen Minimum (bei 150 μs) und dem Ende der Messung (bei 250 μs) wurde dabei jedoch von ca. 10 mV auf ca. 5 mV halbiert.

4.3. Simulation des Wechselstromverhaltens des ersten Teilers

Simuliert man den Aufbau mit dem Programm PSpice und berücksichtigt dabei nur die in Abb. 4.1 dargestellten Bauteile ergibt sich keine Abhängigkeit des Maßstabsfaktors M'_{1972} von der Frequenz f . Dies widerspricht der Messung (Abb. 4.3) deutlich. Verantwortlich für diese Abweichungen sind Streukapazitäten innerhalb des Spannungsteilers. Diese Streukapazitäten wurden aus geometrischen Überlegungen abgeschätzt und in die Simulation übernommen. Die berücksichtigten Streukapazitäten sind im einzelnen:

²Bei dieser Messung wurde ein Hameg HM 8131-2 Funktionsgenerator verwendet.

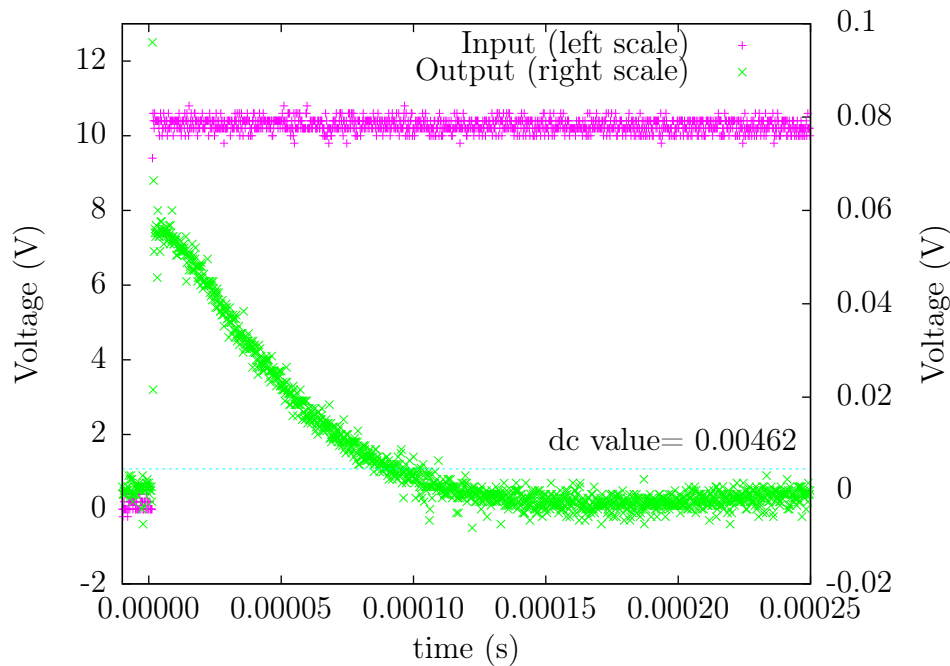


Abbildung 4.5.: Messergebnis bei Rechteckpuls. Eingezeichnet ist das Signal des Funktionsgenerators (pink, linke Achse) sowie die Antwort des Maßstabsfaktors M'_{1972} (rot, rechte Achse). Außerdem ist die Gleichspannungserwartung von $10 \cdot 0,000462 = 0,00462$ eingezeichnet.

- Die Elektroden bilden eine Kapazität zur geerdeten Tankwand von ca. 6,7 pF (im Ersatzschaltbild 4.6 mit „CEbeneTank“ bezeichnet).
- Die Elektroden bilden zueinander eine Kapazität von ca. 15 pF, diese Kapazität befindet sich jedoch parallel zu den Schutzkapazitäten von 2,5 nF und kann vernachlässigt werden (im Ersatzschaltbild daher nicht eingezeichnet).
- Die Durchführungen, welche die primäre Teilerkette zwischen den Elektroden verbinden, bilden Kapazitäten zur Elektrode, die sie überbrücken, von ca. 1 pF (im Ersatzschaltbild mit „CHauptEbene“ bezeichnet).
- Die Aufhängung der Abgriffwiderstände bildet eine Kapazität zur untersten Ebene von ca. 4 pF (im Ersatzschaltbild 4.6 mit „CMessEbene“ bezeichnet).
- Die Eigenkapazität der Präzisionswiderstände wird von Vishay mit 0,5 pF bis 1 pF angegeben (im Ersatzschaltbild 4.6 mit „CWiderstand“ bezeichnet) [Vis07].
- Bei der Verbindung des Messsignals mit dem Oszilloskop ist eine weitere Durchführung durch den Edeltank mit ca. 1 pF sowie das anschließende Kabel mit ca. 100 pF/m zu berücksichtigen (im Ersatzschaltbild 4.6 mit „CKabel1“ und „CKabel2“ bezeichnet). Die Kabelkapazität des primären Abgriffs erwies sich bei der Auswertung als zentral für die Erklärung des Frequenzverhaltens, sie wurde jedoch nicht genau vermessen und lässt sich daher nur grob abschätzen. Die Länge des benutzten Messkabels betrug beim primären Abgriff ca. 10 m, beim sekundären Abgriff ca. 5 m. Da diese Messkabel mit speziellen LEMO-Steckern bestückt sind, ist kein Austausch der Kabel möglich, um den Einfluss von anderen Kabeln zu untersuchen.

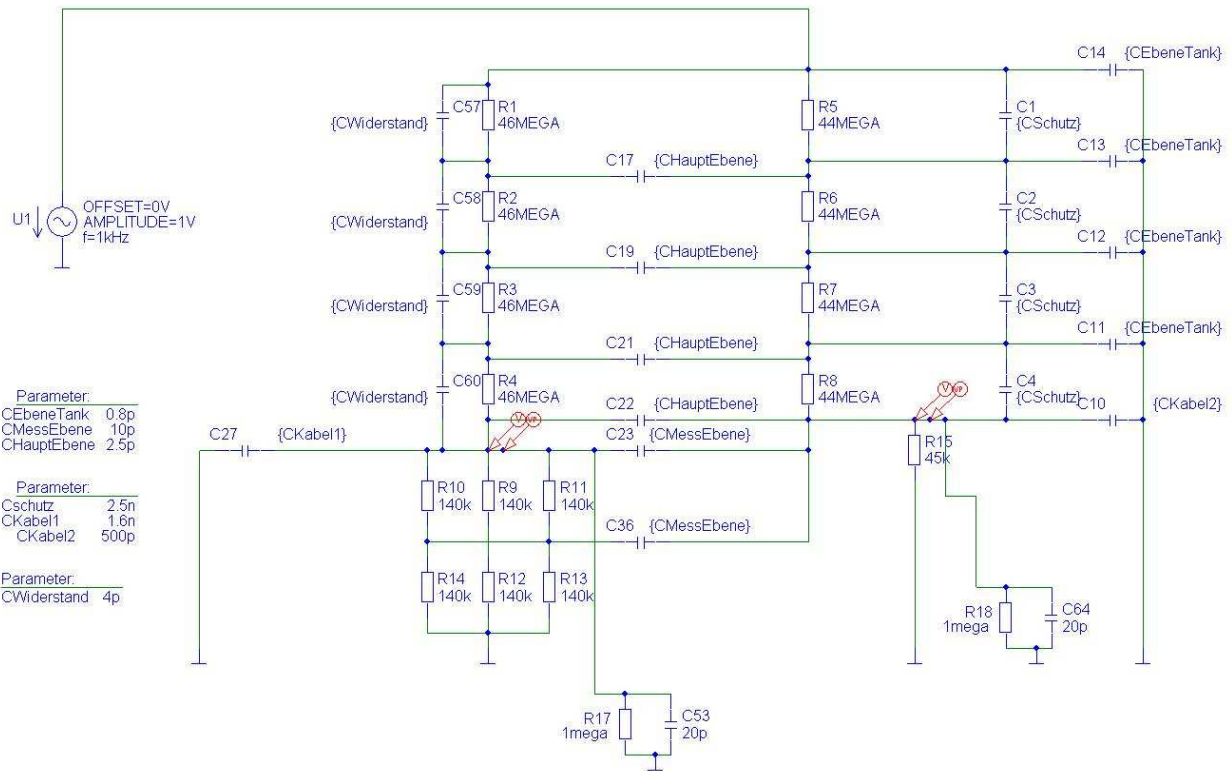


Abbildung 4.6.: Simulation des Spannungsteilers (Pspice). Ersatzschaltbild des ersten Spannungsteilers inklusive der Streukapazitäten aus dem Programm PSpice. Bei den Streukapazitäten steht anstatt des Wertes die Bezeichnung in geschweiften Klammern. Die Werte der Streukapazitäten sind in der linken unteren Ecke angegeben. Die Widerstände der primären Teilerkette sind ebenenweise zu einem Widerstand zusammengefasst. Die Sinus-Spannungsquelle U1 wurde bei der Simulation von Rechteckpulsen durch eine entsprechende Spannungsquelle ersetzt. Die roten Pfeile kennzeichnen die Punkte der Spannungs- und Phasenmessung. Die Kabelkapazitäten sind mit „CKabel1“ und „CKabel2“ bezeichnet.

Da es sich bei den Werten dieser Kapazitäten lediglich um grobe Abschätzungen aus geometrischen Überlegungen handelt, wurden bei der Simulation des Teilers alle Streukapazitäten im Bereich von einer Größenordnung variiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung von Simulation und Messung zu erreichen. Die dabei gefundenen Werte sind in Abb. 4.6 eingezeichnet. Einen Vergleich der so erhaltenen Simulationen mit den Messungen zeigen Abbildungen 4.7 bis 4.11.

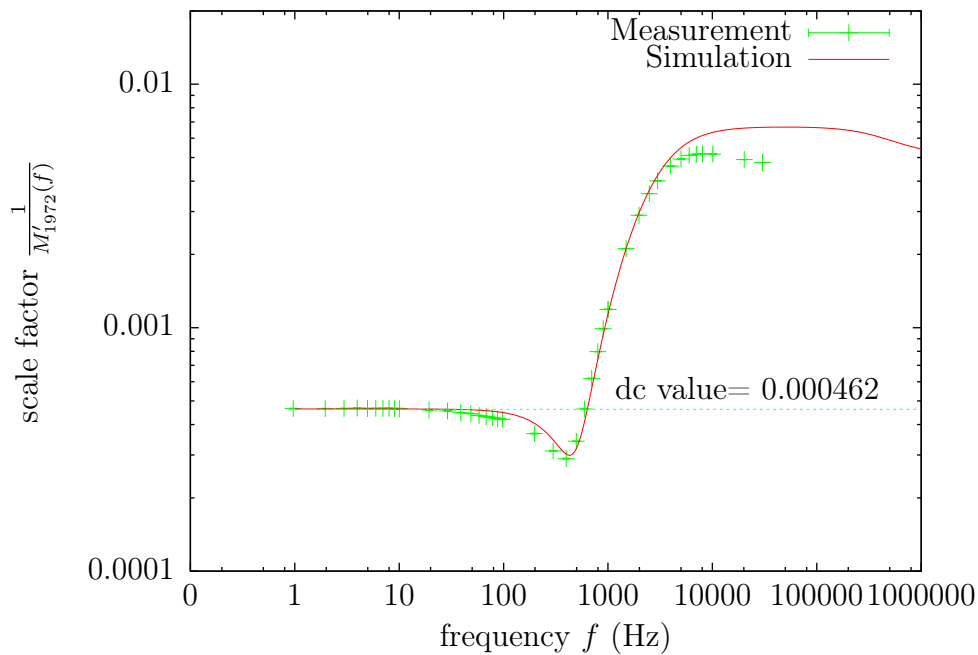


Abbildung 4.7.: Simulation des Maßstabsfaktors (Primärer Abgriff). Vergleich von Simulation (rot) und Messung (grün) des Maßstabsfaktors $M'_{1972}(f)$ der primären Teilerkette.

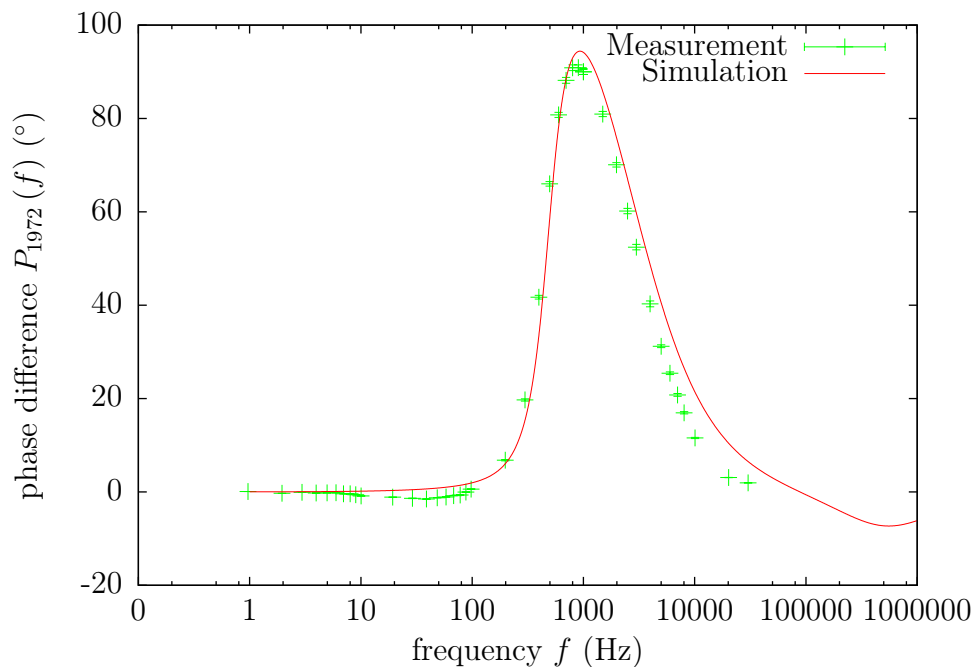


Abbildung 4.8.: Simulation der Phasendifferenz (Primärer Abgriff). Vergleich von Simulation (rot) und Messung (grün) der Phasendifferenz $P_{1972}(f)$ beim Maßstabsfaktor M'_{1972} der primären Teilerkette.

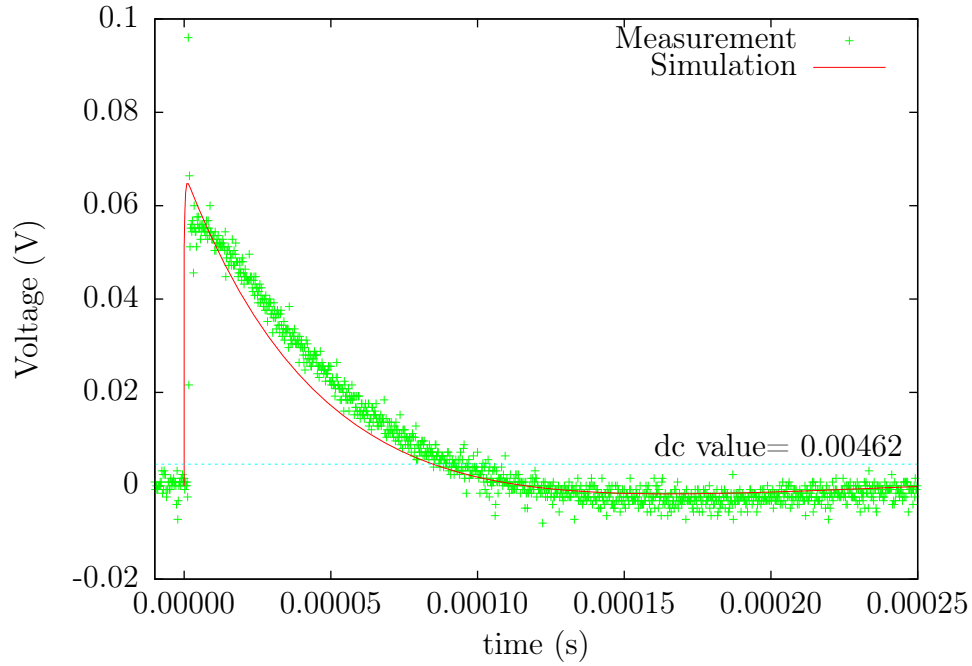


Abbildung 4.9.: Simulation von Rechteckpulsen (primärer Abgriff). Vergleich von Simulation (rot) und Messung (grün) beim Anlegen von Rechtecksignalen mit einer Amplitude von 10V an den Maßstabsfaktor M'_{1972} .

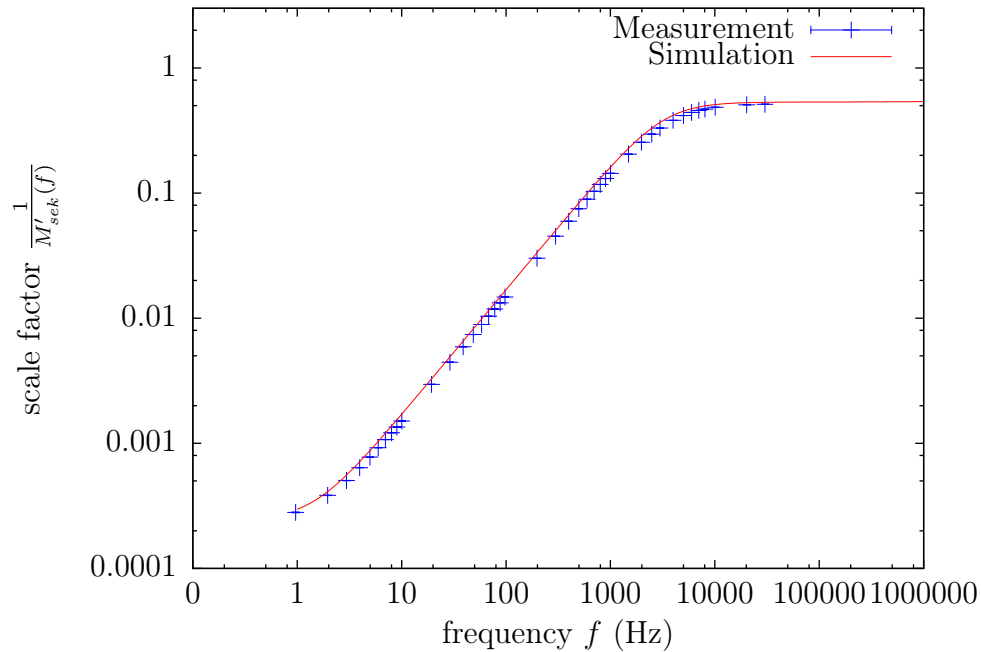


Abbildung 4.10.: Simulation des Maßstabsfaktors (Sekundäre Teilerkette). Vergleich von Simulation (rot) und Messung (blau) beim Kontrollteiler der sekundären Teilerkette.

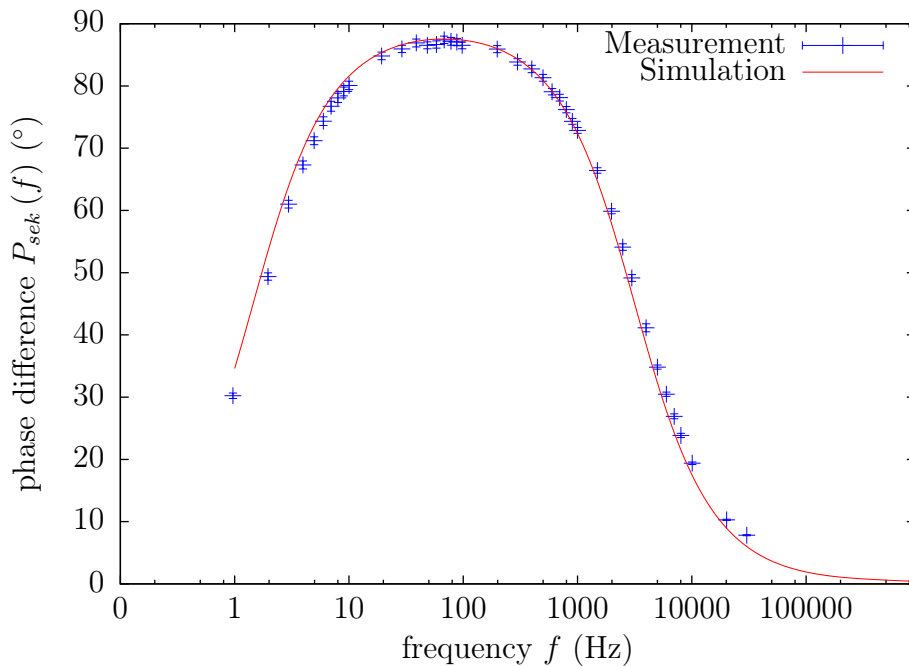


Abbildung 4.11.: Simulation der Phasendifferenz (Sekundäre Teilerkette). Vergleich von Simulation (rot) und Messung (blau) der Phasendifferenz $P_{sek}(f)$ beim Kontrollteiler der sekundären Teilerkette.

4.4. Eignung des ersten KATRIN-Spannungsteilers für das BeTINA-Experiment

Vermessung und Simulation der Observablen am ersten Spannungsteiler stimmen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 30 kHz gut überein. Überträgt man die so gewonnenen Informationen auf die Ansprüche des BeTINA-Experiments lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- **Maximal-Spannung**

Die Spannungsfestigkeit des ersten Spannungsteilers beträgt 35 kV und liegt damit unter den Anforderungen für den Einsatz an der Erzeugungsplattform (60 kV). Ein Einsatz an der Spektrometrie Plattform mit bis zu ± 10 kV ist möglich.

- **Konstanz der Spannung**

Eingangsspannungen mit Amplituden von 1 V und Frequenzen von 100 Hz rufen Ausgangsspannungen von weniger als 1 mV hervor. In diesem Bereich erlaubt die Frequenzabhängigkeit des Maßstabsfaktors keine Messung mit einer Präzision von < 10 ppm. Der erste Spannungsteiler kann daher nicht für diese Aufgabe eingesetzt werden. Speziell für diese Aufgabe bieten sich jedoch kapazitive Messabgriffe an, die in Abschnitt 4.7 kurz dargestellt werden.

- **Folgen von Spannungsrampen**

Wertet man die Simulation der Antwort des ersten Spannungsteilers auf Rechteckspannungspulse aus, ergibt sich eine Präzision des Maßstabsfaktors von 10 ppm nach 1,3 ms.

Für die Messung der Spannung verbleiben also 2,7 ms. Der erste Spannungsteiler verfehlt damit den geforderten Zeitrahmen von 1 ms nur sehr knapp. Eine Erweiterung des Zeitrahmens um 0,3 ms würde den Einsatz des ersten Spannungsteilers für diese Messung erlauben.

- **Spannungssprünge**

Bei einer Simulation erreicht der erste Spannungsteiler auch bei einem Spannungssprung von 5 kV nach 1,3 ms eine Präzision von 10 ppm. Berücksichtigt werden muss bei derart großen Spannungssprüngen jedoch auch die Änderung der thermischen Last der Widerstände durch die Spannungsänderung gemäß $P = U^2/R$. Die Abweichung des Maßstabsfaktors durch eine Änderung der internen Wärmelast bei Spannungssprüngen von ± 5 kV lässt sich durch einen Vergleich mit Kalibrierungsmessungen an der PTB abschätzen. Bei diesen Messungen wurde der Spannungsteiler einem Spannungssprung von 32 kV ausgesetzt und das Einlaufverhalten vermessen. In dieser Messung wurde der erste Messwert nach ca. 8 s aufgenommen und erreichte bereits eine Präzision von < 10 ppm [Thu07]. Der Spannungssprung bei der zu untersuchenden Messung ist um einen Faktor 6,4 kleiner als in der Kalibrierung. Die Änderung der Leistung ist damit um einen Faktor 41 kleiner als in der Kalibrierung. Dies bedeutet, dass der Spannungsteiler nach einem Spannungssprung von ± 5 kV nach 3 s wahrscheinlich eine Präzision von 10 ppm erreicht. Eine verbindliche Aussage für das Erreichen der Zeitvorgabe lässt sich jedoch erst durch eine entsprechende Kalibrierung treffen. Mit einer erweiterten Zeitvorgabe von 8 s kann der Spannungsteiler ohne eine weitere Kalibrierung für diese Messung eingesetzt werden.

4.5. Eignung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers für das BeTINa-Experiment

Der erste Spannungsteiler verfehlt die Zeitvorgaben für die Vermessung einer Spannungsrampe knapp und erlaubt lediglich die Vermessung von Spannungen an der Spektrometrie Plattform. Durch den ähnlichen Aufbau der beiden KATRIN-Spannungsteiler lassen sich ähnliche Ergebnisse für den zweiten Spannungsteiler erwarten. Der Einfluss der geänderten Aufhängung der Abgriffwiderstände kann nicht abgeschätzt werden. Die Eignung des zweiten Spannungsteiler für die einzelnen Messungen muss daher am fertigen Aufbau überprüft werden.

Soll das Zeitverhalten des Spannungsteilers verändert werden, ist eine Veränderung der Streukapazitäten nötig. Eine Erniedrigung der Streukapazitäten würde zu einer schnelleren Antwort des Spannungsteilers auf Spannungsänderungen führen. Streukapazitäten können zum Beispiel durch die Vergrößerung der Abstände zwischen leitenden Bauteilen erniedrigt werden. Viele Bauteile des zweiten Spannungsteilers wurden bereits produziert und lassen sich daher nicht mehr verändern. Daher ist eine Beeinflussung der beteiligten Streukapazitäten und damit des Zeitverhaltens des zweiten Spannungsteilers nicht mehr möglich.

Durch einfache mechanische Änderungen kann jedoch die Spannungsfestigkeit des zweiten Spannungsteilers auf 65 kV erhöht werden. Dadurch kann der zweite Spannungsteiler auch an

der Erzeugungsplattform verwendet werden. Im einzelnen müssen dazu folgende Änderungen vorgenommen werden:

- Die Anschlussbuchse muss durch eine HVS65 Buchse ersetzt werden. Diese ist der S150 Buchse des ersten Spannungsteilers sehr ähnlich und unterscheidet sich von dieser lediglich durch die Länge. Eine längere Anschlussbuchse kann durch eine Verlängerung des Flansches in das bestehende Design integriert werden. Die mechanische Ähnlichkeit der beiden Buchsen erlaubt die Verwendung von identischen Kontakten zwischen Buchse und oberster Elektrode.
- Um Überschläge von der obersten Elektrode auf die Tankwand zu verhindern, muss die Tankwand von innen mit einer Schicht aus Polyethylen ausgekleidet werden. Die Spannungsfestigkeit von PE beträgt 90 kV/mm [Cer86]. Eine Schichtdicke von 1 mm reicht daher aus, um die Spannungsfestigkeit auf 65 kV zu erhöhen.
- Die Spannungsfestigkeit der Schutzkapazitäten der tertiären Teilerkette muss auf mindestens 15 kV erhöht werden.

4.6. Erste Testmessungen

Auf der Erzeugungsplattform von ISOLDE kommen zwei baugleiche Netzteile zur Beschleunigung der Ionen zum Einsatz (ASTEC1 und ASTEC2). Bei laserspektroskopischen Messungen zur Kalibrierung der Beschleunigungsspannung wurde eine Abweichung der Spannung der beiden Netzteile von der erwarteten Spannung festgestellt. Bei 60 kV liegt die laserspektroskopisch bestimmte Spannung V_{spekt} beim ASTEC1 Netzteil ca. 16 ± 1 V unter der von der ISOLDE Infrastruktur angegebenen Spannung V_{ISOLDE} , $V_{spekt} - V_{ISOLDE} = -16 \pm 1$ V. Beim ASTEC2 Netzteil beträgt $V_{spekt} - V_{ISOLDE} = 40 \pm 1$ V.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde der erste KATRIN-Spannungsteiler zum CERN gebracht. Mit dessen Hilfe konnte eine Kalibrierung der ISOLDE Netzteile durchgeführt werden. Dafür wurde die Ausgangsspannung der Netzteile mit Hilfe des ersten KATRIN-Spannungsteilers und einem Fluke 8508A Multimeter bestimmt (V_{KATRIN}). Diese wurden mit der von der ISOLDE Infrastruktur angezeigten Spannung V_{ISOLDE} verglichen (Abb. 4.12). Ein Foto des ersten Spannungsteiler auf der Erzeugungsplattform von ISOLDE zeigt Abb. 4.13.

Trägt man die Differenz $V_{KATRIN} - V_{ISOLDE}$ über den vermessenen Spannungsbereich von 7,5 kV bis 35 kV auf, ergibt sich eine lineare Abweichung der Differenz. Beim Netzteil ASTEC1 beträgt die Steigung -0,00026 V/V, beim Netzteil ASTEC2 beträgt die Steigung 0,00064 V/V. Extrapoliert man diese Abweichungen auf eine Spannung von 60 kV ergeben sich Abweichungen von $-15,4 \pm 1$ V beim Netzteil ASTEC1 und $38,2 \pm 1$ V beim Netzteil ASTEC2. Die Unsicherheiten der Messwerte von umgerechnet 16 ppm ergeben sich durch die Extrapolation und die unbekannte Linearität der Netzteile. Durch den Einsatz eines Spannungsteiler, der Spannungsmessungen von 60 kV erlaubt, kann eine Verbesserung dieser Kalibrierung erreicht werden.

Die laserspektroskopisch bestimmten Abweichungen konnten durch die Kalibrierung mit dem KATRIN-Spannungsteiler im Rahmen der Unsicherheit bestätigt werden. Die Ursache der Abweichungen kann daher der ISOLDE Infrastruktur zugeschrieben werden. Dies ist von großer Bedeutung für das BeTINa-Experiment und alle weiteren Experimente an ISOLDE, die auf die Beschleunigungsspannung sensitiv sind. Durch unsere Kalibrierung konnte dadurch bereits ein Beitrag zur Reduzierung der systematischen Unsicherheiten geleistet werden. Außerdem konnte der erste Spannungsteiler zum ersten Mal seine Leistungsfähigkeit bei einem anderen Experiment unter den rauen Umgebungsbedingungen einer Beschleunigeranlage unter Beweis stellen.

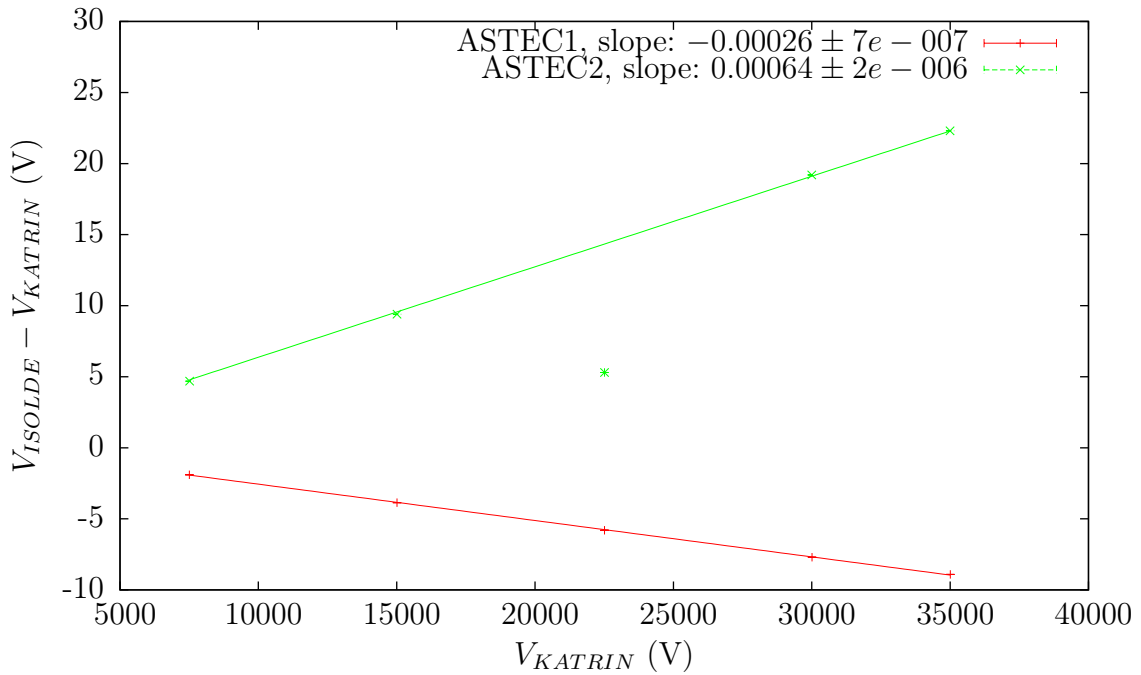


Abbildung 4.12.: Kalibrierung der ISOLDE Infrastruktur. Gezeigt ist die Abweichung der von der ISOLDE Infrastruktur angezeigten Spannung V_{ISOLDE} mit von der vom KATRIN-Spannungsteiler bestimmten Spannung V_{KATRIN} bei verschiedenen Spannungen. Der Messpunkt bei 22,5 kV beim Netzteil Astec2 wurde verworfen.

4.7. Kapazitiver Messabgriff

Ein kapazitiver Messabgriff besteht aus einem Kondensator, der direkt an die Hochspannung angeschlossen und über einen hochohmigen Widerstand geerdet wird. Der Kondensator lässt nur die Wechselspannungsanteile der Hochspannung passieren. Zwischen Kondensator und Widerstand können so Wechselspannungen auf einer Hochspannung vermessen werden. Die Amplitude der Wechselspannungen wird dabei nicht reduziert. Der Aufbau aus Kondensator und Widerstand entspricht einem Hochpass. Kapazität und Widerstandswert müssen so gewählt werden, dass die Grenzfrequenz $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ die Vermessung des interessanten Frequenzbereichs erlaubt.



Abbildung 4.13.: Erster KATRIN-Spannungsteiler auf der ISOLDE-Erzeugungsplattform. Zu sehen ist der erste KATRIN-Spannungsteiler auf der ISOLDE-Erzeugungsplattform. Zu sehen sind außerdem das Fluke 8508A Multimeter auf der linken Seite, das Astec1 Netzteil rechts im Vordergrund und der Hochspannungskäfig aus dem die Ionen beschleunigt werden im Hintergrund.

Bei der Verschaltung des kapazitiven Messabgriffs mit einem Oszilloskops kommt es zur Bildung eines kapazitiven Spannungsteiler zwischen der Eingangskapazität des Oszilloskops C_{in} und der Kapazität C des Abgriffs. Damit die Ausgangsspannung durch diesen kapazitiven Spannungsteiler nicht verfälscht wird, sollte $C \gg C_{in}$ gewählt werden.

Da es bei hohen Spannungen zu Überschlügen in den Kondensatoren kommen kann, können zwei Hochpässe parallel verschaltet werden (Abb. 4.14). Beide Ausgänge des Abgriffs werden auf getrennte Kanäle eines Oszilloskops gegeben. Signale die durch Überschlüge in einem Kondensator entstehen, sind nur auf einem Kanal sichtbar und können so von Veränderungen der Eingangsspannung unterschieden werden. Wichtig beim Aufbau eines kapazitiven Messabgriffs ist die Spannungsfestigkeit der Komponenten. Aus Sicherheitsgründen sollte außerdem auf eine gute Isolierung und sichere Erdung geachtet werden.

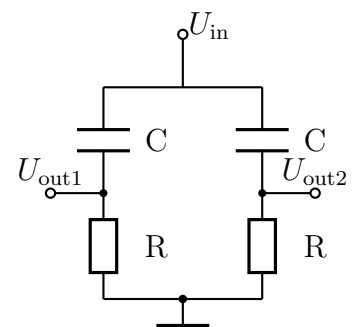


Abbildung 4.14.: Kapazitiver Messabgriff. Gezeigt ist der prinzipielle Schaltplan eines kapazitiven Messabgriffs.

AUSBLICK UND ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wird der Status der Realisierung des in den vergangenen Kapiteln beschriebenen Designs des zweiten KATRIN-Spannungsteilers dargestellt. Außerdem wird die Übertragung des Designs auf einen Spannungsteiler für Spannungen von bis zu 5 kV beschrieben. Abschließend findet sich eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit.

5.1. Realisierung des Designs

Die Realisierung des Designs des zweiten KATRIN-Spannungsteilers erfordert zunächst die Beschaffung aller Komponenten. Im folgenden wird eine Aufstellung der Komponenten und deren Status gegeben:

- Nach den intensiven Überprüfungen der Widerstands Testmuster wurden die Teiler- und Abgriffwiderstände der primären Teilerkette im November 2007 bestellt. Im April 2008 wurden die Widerstände geliefert und befinden sich derzeit (Jun.08) in der Vermessung ihrer Aufwärmverhalten durch S. Bauer [Bau09].
- Die Widerstände der sekundären Teilerkette stehen bereit.
- Für die Spezifikationen des KATRIN-Experiments stehen Kondensatoren für die tertiäre Teilerkette bereit. In Abschnitt 4.1 wird die Eignung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers für den Einsatz beim BeTINA-Experiment beschrieben. Für diesen Einsatz sind neue Kondensatoren mit einer erhöhten Spannungsfestigkeit nötig.
- Sämtliche mechanische Komponenten im Inneren des Spannungsteilers werden in der Feinmechanischen Werkstatt des Instituts für Kernphysik nach den Bauplänen aus Kapitel B gefertigt. Die Fertigung ist weit fortgeschritten. Die Rohlinge der meisten Komponenten wurden bereits fertig gestellt und werden nun in weiteren Arbeitsschritten vollendet. Diese Arbeitsschritte umfassen zum Beispiel das Vernickeln und Polieren von Halterungselementen. Als letztes zeitaufwändiges Bauteil steht der Bau der Kupferelektroden an.
- Die Außenwand und die Grundplatte des Spannungsteilers wurden in externen Firmen gefertigt und stehen bereit. Stephan Bauer führt derzeit letzte Modifikationen am Tank durch. Diese umfassen die Anbringung des Flanschs und der Hochspannungsverbindung an der Oberseite des Tanks, sowie die Installation der Durchführungen für die Messabgriffe [Bau09].
- Das Rohmaterial für den Kanya-Rahmen ist vorrätig und wird von der Feinmechanischen Werkstatt zugeschnitten.
- Die Peripherie für den Spannungsteiler steht bereit. Dies umfasst sämtliche Komponenten der Temperatursteuerung, der Wärmeisolierung, des Steuergeräts und der Versorgungsnetzteile.

Als nächster Schritt in der Realisierung des Spannungsteilers wird das Aufwärmverhalten von allen Teilerwiderständen der primären Teilerkette bestimmt. Dies wird von S. Bauer durchgeführt und voraussichtlich im August 2008 abgeschlossen sein [Bau09]. Hat die Werkstatt bis dahin die mechanischen Komponenten fertiggestellt, kann danach mit dem Aufbau des Spannungsteilers begonnen werden.

Um die Parameter der Temperatursteuerung anzupassen und die Güte der Temperatursteuerung zu bestimmen, sollte nach dem Aufbau des Spannungsteilers zunächst eine genaue Bestimmung der Temperaturverteilung im Innenraum durchgeführt werden. Im Messbetrieb

können wegen der Überschlagsgefahr keine Temperatursensoren in die Nähe der Hochspannung gebracht werden. Als Zeitfenster für diesen Schritt bietet sich daher die Zeit zwischen dem Aufbau des Spannungsteilers und der ersten Inbetriebnahme mit Hochspannung an.

Im Anschluss an die Konfiguration der Temperatursteuerung kann mit einem Testbetrieb des Spannungsteilers begonnen werden. Mit den vorhandenen Geräten ist eine erste präzise Untersuchung im Bereich von bis zu 1 kV möglich. Bei dieser Untersuchung sollte die Innenraumtemperatur des Spannungsteilers im Bereich von ± 5 K verändert werden, um den Temperaturkoeffizienten der Maßstabsfaktoren zu bestimmen. Aus dieser Untersuchung sollte die optimale Innenraumtemperatur bestimmt werden. Auch die Untersuchung der grundsätzlichen Eignung des Spannungsteilers für die spezifizierten Spannungen sollte durchgeführt werden.

Hat der Spannungsteiler alle Untersuchungen mit den vorhandenen Möglichkeiten erfolgreich bestanden, muss er zur Kalibrierung an die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig. Für diese Kalibrierung ist die Ausarbeitung eines genauen Kalibrierungsprogramms nötig. Es sollte die Kalibrierung der Maßstabsfaktoren über den gesamten spezifizierten Spannungsbereich und bei verschiedenen Temperaturen umfassen. Wichtig sind außerdem die Einlaufzeit des Spannungsteilers bei plötzlichen Spannungssprüngen sowie eine Untersuchung der maximal regelbaren Innentemperatur.

Zur Bestimmung der Langzeitstabilität muss diese Kalibration im Abstand von ca. einem Jahr wiederholt werden. Erst nach der Bestimmung der Langzeitstabilität können endgültige Aussagen über die Eignung des zweiten Spannungsteilers für das KATRIN-Experiment gemacht werden.

5.2. 5kV Spannungsteiler

Für viele Bereiche des KATRIN-Experiments sind präzise Spannungsmessungen im Bereich von bis zu 5 kV nötig, zum Beispiel bei den Krypton Kalibrierungsquellen oder bei der Tritiumquelle. Für diese Messungen soll ein weiterer kleiner Spannungsteiler entwickelt werden, der eine möglichst hohe Präzision erreicht. Für diesen Spannungsteiler sollen Widerstände verwendet werden, die vom Bau des ersten KATRIN-Spannungsteilers übrig geblieben sind. Diese Widerstände haben einen Widerstand von $1,84 \text{ M}\Omega$ und eine Spannungsfestigkeit von 600 V. Um einen Strom von ca. 1 mA bei 5 kV zu gewährleisten und unter Berücksichtigung der Spannungsfestigkeit der Widerstände könnte die primäre Teilerkette dieses Spannungsteilers aus zehn der vorhandenen Widerstände aufgebaut werden. Zwei weitere Abgriffwiderstände mit einem Wert von jeweils $18 \text{ k}\Omega$ sind nötig um den Maßstabsfaktor von 500 : 1 zu realisieren und eine Kompensation der Aufwärmverhalten der Widerstände zu ermöglichen. Überträgt man das mechanische Design der KATRIN-Spannungsteiler auf zwölf Widerstände können zahlreiche Vereinfachungen durchgeführt werden.

Zwölf Widerstände können auf einer einzigen Ebene untergebracht werden. Dadurch ist keine sekundäre Teilerkette nötig. Durch das geringere Gewicht reicht die Stabilität der inneren Befestigungsstäbe für den Aufbau aus. Separate Delrin Stäbe sind nicht nötig. Durch die gesunkene Anzahl der Widerständen reicht es aus, eine einzige Art von Stäben zu verbauen.

Durch die gesunkene Spannung sind auch die elektrischen Feldstärken geringer. Der aufwendige Rand der Elektroden kann daher auf einen einfachen kreisförmigen Ring mit einem Durchmesser von 10 mm vereinfacht werden (Geometrie b in Kapitel 3.2). Durch die Verwendung einer einzigen Ebene kann auf das Gasverteilerrohr verzichtet werden. Das Design der Durchführungen und des Befestigungsmaterials kann vom Design der KATRIN-Spannungsteiler übernommen werden. Die Verbindung von Hochspannung mit der obersten Elektrode kann durch eine SHV-Buchse und eine Lötstelle erfolgen. Die Steuerung der Temperatur im Innenraum kann durch einen kommerziellen Temperaturregler erfolgen. Der Transport von Wärme in und aus dem Innenraum kann über ein Peltier-Element und Heatpipes erfolgen. Dies spart den aufwendigen Transport über eine Flüssigkeit.

Durch die Vereinfachungen sinkt die Größe des Spannungsteilers auf eine Höhe von 300 mm und einen Durchmesser von 370 mm. Für eine tatsächliche Realisierung ist eine genaue Ausarbeitung aller Details nötig. Einen skizzierten Aufbau zeigt Abb. 5.1.

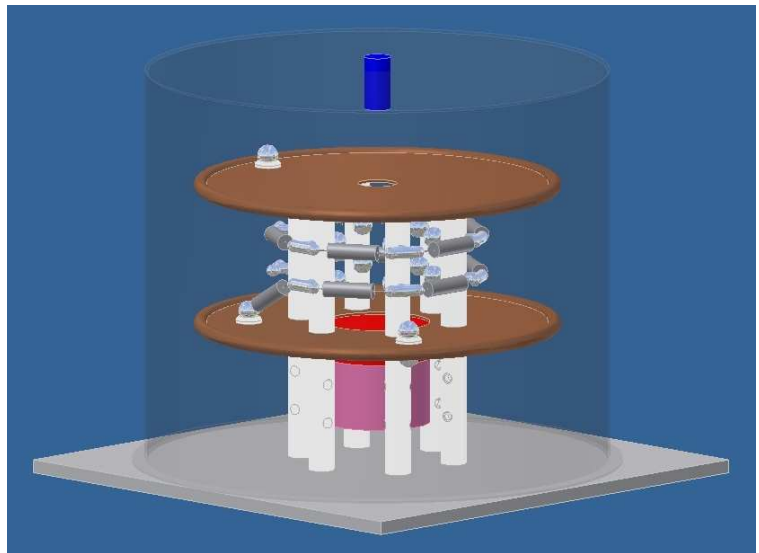


Abbildung 5.1.: Skizze eines 5 kV Spannungsteilers. Dargestellt ist eine Vereinfachung des Designs der KATRIN-Spannungsteiler für Spannungen von < 5 kV.

5.3. Zusammenfassung

Das KATRIN-Experiment versucht die Masse des Elektronantineutrinos mit einer Sensitivität von $0,2 \text{ eV}/c^2$ (90% C.L.) zu bestimmen. Es nutzt dazu die Zählrate von Elektronen aus dem Zerfall von Tritium, die bei verschiedenen Retardierungsspannungen das elektrische Gegenfeld eines MAC-E Filters überwinden können. Um die Sensitivität des Experiments zu erreichen muss die Retardierungsspannung mit einer Präzision von 61 mV bestimmt werden können. Für diese Bestimmung ist ein Spannungsteiler nötig, der die auftretenden Retardierungsspannungen von bis zu 32 kV auf den 10 V Messbereich eines Multimeters herunterteilt. Das Verhältnis von Eingangs- und Ausgangsspannung, im technischen Bereich Maßstabsfaktor genannt, muss dazu mit einer Präzision von 1 ppm bekannt sein. Diese Stabilität steht bei kommerziellen Produkten nicht zur Verfügung. Daher muss ein Spannungsteiler entwickelt werden, der die Anforderungen des KATRIN-Experiments erreicht. Eine hohe

Stabilität der Maßstabsfaktoren verhindert teure und zeitaufwendige Kalibrierungen und ist Ziel der Entwicklung.

Von Dr. T. Thümmel wurde im Rahmen seiner Dissertation ein Spannungsteiler entwickelt, der die Anforderungen des KATRIN-Experiments erfüllt. Aus Gründen der Redundanz dieser für das KATRIN-Experiment essentiellen Spezial-Komponente wurde die Entwicklung eines weiteren Spannungsteilers angestrengt, dessen Maßstabsfaktoren im Vergleich zum ersten Spannungsteiler eine verbesserte Präzision erreichen sollen. Bei der Entwicklung des zweiten Spannungsteilers soll aus den Erfahrungen, die beim Bau des ersten Spannungsteilers gewonnen wurden, gelernt werden. Dadurch lassen sich die Verbesserung der Langzeitstabilität und des Temperaturkoeffizienten der Maßstabsfaktoren als Hauptziele der Entwicklung festlegen. Außerdem soll die Handhabung des zweiten Spannungsteilers verbessert und durch einen zusätzlichen Maßstabsfaktor 100 : 1 die Selbstkalibration der beiden Spannungsteiler ermöglicht werden.

Um die Stabilität der Maßstabsfaktoren beim zweiten Spannungsteiler zu verbessern, wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Vishay verbesserte Widerstände für den Spannungsteiler entwickelt. In unseren Untersuchungen konnten diese Widerstände eine Verbesserung der lastabhängigen Langzeitdrift beweisen. Dadurch kann beim zweiten Spannungsteiler eine verbesserte Langzeitstabilität der Maßstabsfaktoren erwartet werden. Durch die von uns angeregte Entwicklung wurde von Vishay ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt, Widerstände mit paarweise verschiedenem Aufwärmverhalten zu bestellen. Dies erlaubt, im Gegensatz zum ersten Spannungsteiler, eine Kompensation der Aufwärmverhalten der Abgriffwiderstände durchzuführen und lässt dadurch einen verbesserten Temperaturkoeffizienten der Maßstabsfaktoren erwarten.

Bei der Realisierung des mechanischen Designs konnte ein Konzept zur Formung des elektrischen Potentials im Innenraum des Teilers gefunden werden, das dem Design des ersten Spannungsteilers nahezu ebenbürtig ist, jedoch wesentlich leichter zu produzieren ist. Dieses Konzept kann bei der Entwicklung eines weiteren Spannungsteilers für Spannungen von bis zu 5 kV verwendet werden und reduziert den Arbeitsaufwand zur Herstellung der mechanischen Teile drastisch. Auf Grund der etwas besseren Ergebnisse des Konzepts vom ersten Spannungsteiler wird dieses auch beim zweiten Spannungsteiler umgesetzt. Bei der Simulation der Temperatursteuerung für den Innenraum des Spannungsteilers ergab sich das Konzept des ersten Spannungsteilers als nahezu ideal. Kleinere Verbesserungen werden beim zweiten Spannungsteiler umgesetzt und lassen eine homogenere Verteilung der Temperatur in der Umgebung der Widerstände und damit eine verbesserte Stabilität der Maßstabsfaktoren erwarten. Beim mechanischen Design des zweiten Spannungsteilers wurde außerdem die Anbringung der Abgriffwiderstände der primären Teilerkette verbessert, was einen verbesserten Temperaturkoeffizienten der Maßstabsfaktoren erwarten lässt. Außerdem konnten Verbesserungen der Handhabung des Spannungsteilers umgesetzt werden. Dies betrifft vor allem Vereinfachungen beim Transport des Spannungsteilers und die Verbesserung der Einsatzmöglichkeiten bei Schwankungen der Umgebungstemperatur.

Der erfolgreiche Bau des ersten KATRIN-Spannungsteilers führte zu einer Anfrage des BeTINa-Experiments, das versucht den Ladungsradius von Halo-Kernen am Beispiel von Beryllium zu untersuchen. Es nutzt dazu die ISOLDE-Infrastruktur am CERN zur Bereitstellung der Beryllium Ionen. In der Anfrage wurde die Reduzierung der systematischen

Unsicherheiten des Experiments durch den Einsatz eines hochpräzisen Spannungsteilers diskutiert. Bei Untersuchungen zur Eignung der KATRIN-Spannungsteiler für diese Messungen konnte eine bedingte Eignung beider Spannungsteiler festgestellt werden. Durch Modifikationen am Design und weitere Untersuchungen am zweiten Spannungsteiler sowie die Nutzung eines kapazitiven Messabgriffs können möglicherweise alle Ansprüche des BeTINA-Experiments durch den zweiten KATRIN-Spannungsteiler erfüllt werden. Bei Kalibrierungsmessungen mit dem ersten Spannungsteiler an der ISOLDE-Infrastruktur am CERN konnte dieser seine Eignung für bestimmte Messungen bereits unter Beweis stellen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass durch die Erfahrungen, die bei der Entwicklung des ersten Spannungsteilers gewonnen wurden und durch Verbesserungen am Design des zweiten Spannungsteilers, eine verbesserte Stabilität und Handhabung des zweiten KATRIN-Spannungsteilers erwartet werden kann. Noch im Jahr 2008 soll der zweite Spannungsteiler dadurch an die Erfolge des ersten Spannungsteilers anknüpfen, auch über die Grenzen des KATRIN-Experiments hinaus.

ANHANG A

VERMESSUNG DER TESTMUSTER

A.1. Steuerprogramm für den Präzisionsmessstand

Das Programm zur Vermessung von Abweichungen der Widerstände wurde im Rahmen des Hauptpraktikums entwickelt und soll daher hier nur kurz skizziert werden. Das Programm basiert auf LABView und ermöglicht mehrere Funktionen. Die Regelung und Überwachung der Temperatur im Inneren einer Box, die Steuerung und Auslesung der Spannungsquelle und des Multimeters. Ein Bild des Frontpanels zeigt Abb. A.1. Dort sind folgende Programmteile gekennzeichnet:

- **Ablaufsteuerung**

Hier kann der Ablauf des Programms gesteuert werden. Dazu gehören die Festlegung der Mess- und Kontrollintervalle, die Einstellung einer Zeitvorwahl für die Messung, die Benutzung der Dateiausgabe, das Starten einer neuen Messung sowie die Beendigung des Programms.

- **Temperatúrauslesung**

Hier wird die gemessene Innentemperatur der Box dargestellt. Es werden zwei Temperaturen ausgelesen, die Temperatur im Inneren der temperaturstabilisierten Box sowie die Temperatur im gesamten Rack.

- **Temperatursteuerung**

Hier wird der Verlauf der Stellgröße des PID-Reglers angezeigt. Ein Tiefpassfilter glättet das Rauschen der Temperaturmessung, das durch die Digitalisierung entstanden ist. Die Grenzfrequenz des Filters ist auf 0,3 Hz eingestellt. Niedrigere Werte vermindern das Rauschen zwar stärker, glätten jedoch auch schnelle Temperaturänderungen beim Öffnen der Box, die durch den PID-Regler ausgeglichen werden müssen.

- **Spannungsauslesung**

Hier wird direkt der Verlauf der gemessenen Spannung dargestellt. Außerdem wird hier die interne Temperatur des Multimeters ausgelesen und angezeigt.

- **Spannungssteuerung**

Hier kann die Spannung der Spannungsquelle festgelegt werden.

- **PID-Paramter**

Hier können die Paramter des PID-Regler manuell oder automatisch festgelegt werden.

- **Darstellung der Widerstandsabweichung**

Hier werden die Messwerte der Widerstandsabweichung direkt in ein Diagramm eingetragen. In der obersten Zeile kann der Name des Widerstands sowie eine Bestimmung der Abweichung inklusive Fehler angegeben werden. Ist die Dateiausgabe aktiviert, wird dieses Diagramm am Ende einer Messung als Bild gespeichert.

A.1.1. Ablauf einer Messung

Die Testwiderstände werden in einem Magazin in die temperaturstabilisierte Box gegeben, dabei wird die Spannungsquelle in den „Standby“ Modus versetzt. Ein Testwiderstand wird

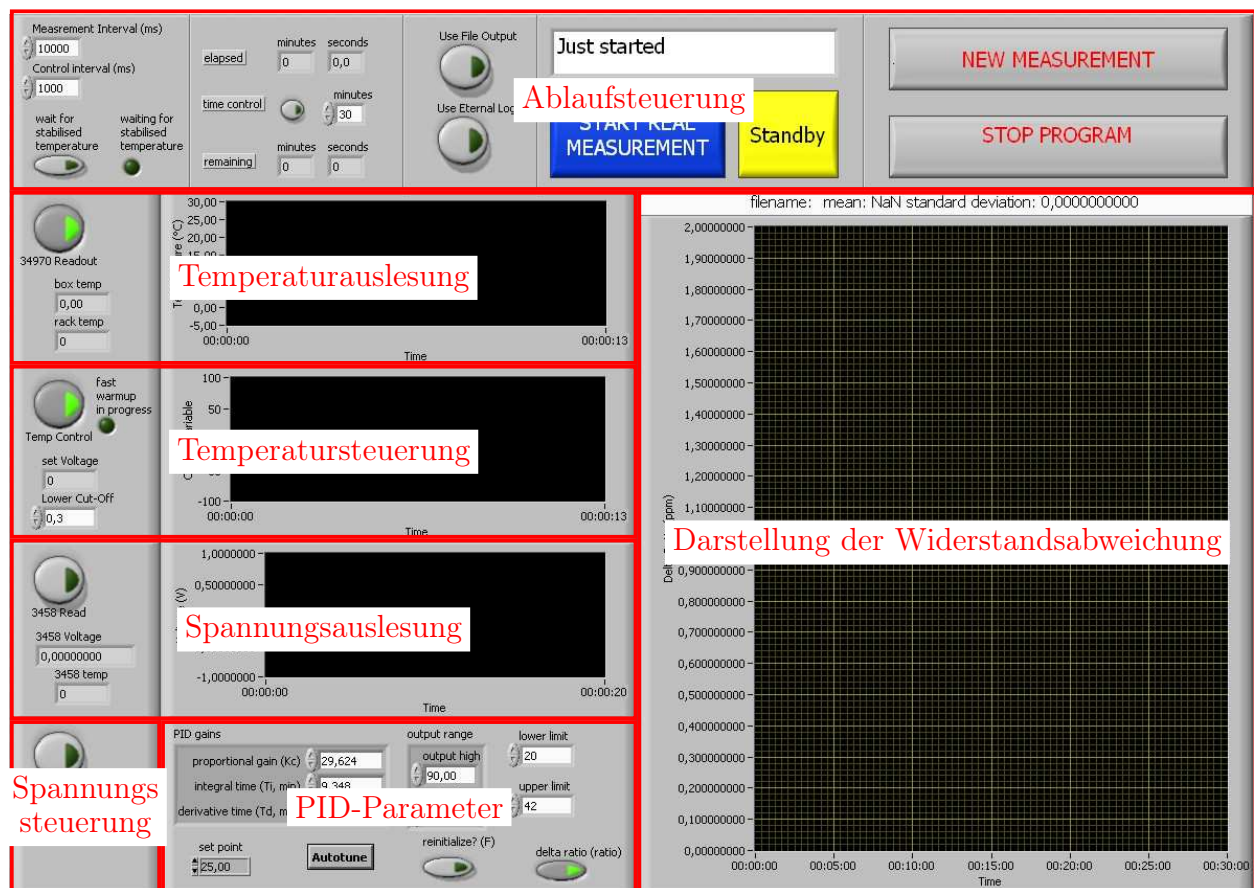


Abbildung A.1.: Frontpanel des Programms zur Vermessung von Widerstandsänderungen. In rot wurden die einzelnen Programmteile kenntlich gemacht, Erklärungen finden sich im Text.

mit dem Referenzwiderstand verschaltet. Nun wird eine neue Messung gestartet („Start Real Measurement“ Funktion des Messprogramms). Durch das Öffnen der temperaturstabilisierten Box hat sich die Temperatur im Inneren verändert. Zunächst wartet das Programm daher, bis die Innentemperatur wieder bis auf $\pm 0,1$ K der Solltemperatur entspricht. Dann schaltet das Programm die Spannungsquelle in den „Operate“ Modus, Zeitpunkt $t = 0$ s. Nach einem Zeitintervall Δt wird der erste Messwert der Ausgangsspannung U_{out} mit dem Multimeter aufgenommen $U_{out}(t_1 = \Delta t)$. Ab diesem Zeitpunkt werden regelmäßig Messwerte im Zeitintervall Δt aufgenommen. Dieses Zeitintervall lässt sich im Programm mit der Funktion „Measurement Interval (ms)“ steuern.

Um die relative Änderung des Widerstands bezüglich seines Startwerts zu erhalten, müssen auch die gemessenen Ausgangsspannungen auf einen Startwert $U_{out}(t_{norm})$ normiert werden. Dieser Zeitpunkt ist von Null verschieden, da der erste Messwert verworfen werden sollte, und die Aufnahme eines Messwerts mehrere Sekunden dauert. Bis zur Aufnahme des ersten Messwerts ist es jedoch bereits zu einer unbekannten Veränderung des Widerstands gekommen. Damit die Ergebnisse vergleichbar bleiben, sollte die Zeit bis zum Messwert auf den normiert wird genau kontrolliert werden. Wird auf einen späteren Zeitpunkt normiert er-

geben sich entsprechend kleinere Abweichungen der Widerstände. Gemäß Gleichung (2.1.1) ergibt sich die relative Abweichung des Widerstands gemäß:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{U_{out}(t_{norm})}{U_{out}(t)} - 1 \quad (\text{A.1.1})$$

Diese Abhängigkeiten wurden erst im Laufe der im folgenden beschriebenen Messungen erkannt. Die einzelnen Messungen und Verbesserungen am Messverfahren werden im folgenden dargestellt.

A.2. Aufwärmverhalten

Die Vermessung der Aufwärmverhalten der Widerstandstestmuster erfolgte in mehreren Schritten. Die Testmuster wurden in mehreren Einzel-Lieferungen geliefert. Nach jeder Lieferung wurden die Aufwärmabweichungen bestimmt und der Messablauf verbessert. Nach der zweiten Lieferung wurden einige Testmuster zur Überprüfung unserer Ergebnisse an die PTB geschickt. Abschließend wurde eine erneute Auswertung der Testmuster durchgeführt, um sie mit den Widerständen der ersten Generation vergleichen zu können. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen und die Verbesserungen am Verfahren werden im folgenden dargestellt.

Die Temperatur im Inneren der Temperaturstabilisierten Box wurde bei allen Messungen auf $25,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ eingestellt. Der Betrag der Aufwärmabweichung wurde durch einen Fit mit dem Programm GNUPlot in einem Bereich von 900 s und 1800 s bestimmt. Als Fit-Funktion wurde eine Konstante verwendet. Die Unsicherheiten aller Fits beträgt $< 0,01$ ppm. Eine Genauigkeit der Messung von $< 10^{-8}$ erscheint jedoch unwahrscheinlich. Als Sicherheit der Messung wird daher ausschließlich 0,01 ppm angenommen.

Die erste Lieferung von Testmustern bestand aus drei Widerständen mit jeweils $1,5\text{ M}\Omega$. Um in den 10 V-Messbereich des Multimeters zu gelangen, wurde eine Spannung von $U_{in} = 400\text{ V}$ gewählt. Auf diesen Widerständen befindet sich eine handschriftliche Bezeichnung, der Buchstabe „x“ gefolgt von vier Ziffern („x9812“, „x9813“, „x9815“). Das Aufwärmverhalten jedes Widerstands wurde vier mal vermessen und durch ein nachgestelltes „c“ gefolgt von einer Ziffer gekennzeichnet (z.B. „x9815c3“). Bei der Vermessung wurde der Abstand zwischen dem Einschalten der Spannung und dem ersten Messwert nicht kontrolliert. Der erste Messwert wurde zwischen 2 s und 10 s nach dem Einschalten der Spannung aufgenommen. Die Abweichungen wurden auf den ersten Messwert normiert, der erste Messwert wurde also nicht verworfen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Abschnitt A.2.1 dargestellt, eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle A.1.

Alle drei Testmuster zeigen eine negative Aufwärmabweichung mit einem Betrag von $< 2,3$ ppm. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Messungen betragen bis zu 0,8 ppm. Bildet man die Mittelwerte der Messungen ergeben sich Standard Abweichungen von bis zu 0,38 ppm. Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse erkennt man einen sehr ähnlichen Verlauf der Messungen, der sich nur durch die Position des ersten Messwerts unterscheidet. Dies lässt

sich durch eine erhöhte Fehlerwahrscheinlichkeit des ersten Messwerts erklären, die im Handbuch des Multimeters beschrieben ist [Agi34]. Zur Sicherheit wurden bei der Vermessung der zweiten Widerstandslieferung daher die ersten beiden Messwerte verworfen.

Die zweite Lieferung bestand aus sieben Widerständen mit jeweils $1,5\text{ M}\Omega$. Auf den Widerständen befinden sich wieder handschriftliche Bezeichnungen, diesmal aus einem vorangestellten „b“ gefolgt von vier Ziffern („b3567“, „b3568“, „b3570“, „b3571“, „b3573“, „b3575“, „b3576“). Ein Magazin mit Platz für sechs Widerstände wurde fünf mal nacheinander mit verschiedenen Widerständen bestückt. Die Vermessung der einzelnen Magazine wird mit einem nachgestellten „c“ gefolgt von einer Ziffer gekennzeichnet. Durch einen Schreibfehler konnten im nachhinein zwei Messungen nicht mehr eindeutig einem Widerstand zugeordnet werden und wurden daher verworfen.

Die Spannung betrug $U_{in} = 400\text{ V}$, die Zeit zwischen dem Anlegen der Spannung und der Aufnahme des ersten Messwerts wurde nicht kontrolliert. Die ersten beiden Messwerte wurden verworfen. Die Werte wurden auf den dritten Messwert (22 s bis 30 s) nach dem Einschalten der Spannung normiert. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Abschnitt A.2.2 dargestellt und in Tabelle A.2 zusammengefasst. Fünf der Widerstände zeigen positive Aufwärmabweichungen mit einem Betrag von $< 2\text{ ppm}$. Zwei der Widerstände zeigen negative Aufwärmabweichungen mit einem Betrag von $< 1\text{ ppm}$. Deutlich zu erkennen ist eine Verbesserung der Standard Abweichungen auf $< 0,2\text{ ppm}$ durch das Verwerfen der ersten beiden Messwerte.

Eine Messung des Widerstands „b3575c1“ zeigte eine starke Abweichung zu den übrigen Vermessungen des gleichen Widerstands. Diese Messung wurde direkt nach dem Einbringen des Magazins in die temperaturstabilisierte Box durchgeführt. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich der Widerstand noch nicht im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung befand. Diese Messung kann daher als fehlerhaft betrachtet werden und wird im folgenden nicht berücksichtigt.

Die Widerstände der ersten Lieferung und zwei Widerstände der zweiten Lieferung („b3571“ und „b3576“) wurden zur Überprüfung unserer Ergebnisse an die PTB geschickt. Die Ergebnisse der PTB weichen deutlich von unseren Ergebnissen ab (Abb. A.2). Zum einen ist das Signal um einen Faktor zwei größer als das von uns gemessene Signal, zum anderen ist keine eindeutige Sättigung des Signals erkennbar. Um zu überprüfen, ob die Unterschiede im Messaufbau die unterschiedlichen Ergebnisse erklären können, wurde unser Messaufbau für eine Messung dem Aufbau der PTB angeglichen. Die untersuchten Unterschiede sind dabei im einzelnen:

Resistor	c1	c2	c3	c4	$\bar{\sigma}$	σ
x9812	-1.93	-1.42	-1.59	-2.28	-1.80	0.38
x9813	-1.41	-1.24	-1.98	-1.66	-1.57	0.32
x9815	-1.64	-1.44	-1.49	-1.36	-1.48	0.12

Tabelle A.1.: Ergebnisse der „x...“ Widerstände. Vermessen bei 400 V , normiert auf den ersten Messwert nach $< 10\text{ s}$.

Resistor	c1	c2	c3	c4	c5	\bar{O}	σ
b3567	0.90	1.02	1.22		1.19	1.08	0.15
b3568	1.91	1.78	1.80	1.59	1.85	1.78	0.12
b3570		1.74	1.79	1.85		1.79	0.06
b3571	1.03	1.15	0.98	0.92		1.02	0.10
b3573	1.02		0.86	0.90	0.80	0.90	0.09
b3575	(0.49)	-0.61		-0.75	-0.59	-0.65	0.09
b3576	-0.38	-0.71		-0.54	-0.31	-0.48	0.18

Tabelle A.2.: Ergebnisse der „b...“ Widerstände. Vermessen bei 400 V, normiert auf den dritten Messwert nach 20 s - 30 s

- Die Box, in der die Widerstände bei der PTB vermessen werden, ist nicht vollkommen abgeschlossen, sondern zu einer Seite offen. Die Lufttemperatur im Inneren der Box entspricht daher der Raumtemperatur von $22,3 \pm 0,1$ °C.
- Im Inneren der Box befindet sich kein Lüfter, der für eine Zirkulation der Umgebungsluft sorgt.
- Der erste Messwert wird nach 1 s aufgenommen und verworfen. Die Ergebnisse werden auf den zweiten Messwert nach 6 s normiert.

Gleicht man alle drei Punkte unseres Messstandes an den der PTB an, zeigt sich auch bei unserem Messaufbau ein um den Faktor zwei größeres Signal sowie eine fehlende Sättigung der Drift (Abb. A.3). Dies bedeutet, dass die Unterschiede im Messaufbau die unterschiedlichen Ergebnisse erklären können. Dies bedeutet aber auch, dass das Ergebnis der Vermessung empfindlich vom genauen Aufbau des Messstandes abhängt. Um die Testmuster der neuen Widerstände mit den Widerständen der ersten Generation vergleichen zu können, werden die verbleibenden Widerstände erneut vermessen. Der Messaufbau und die Durchführung der Messungen soll dabei möglichst genau der Vermessung der Widerstände der ersten Generation angepasst werden. Die Testmuster, die zur PTB geschickt wurden und nicht mehr zur Verfügung stehen, sollen dazu, basierend auf der erneuten Vermessung der Widerstände, so skaliert werden, dass auch sie mit den Ergebnissen der Widerstände der ersten Generation verglichen werden können.

Die Vermessung der Widerstände der ersten Generation wurde von Dr. T. Thümmel im Rahmen seiner Dissertation durchgeführt. Die Geräte wurden von dieser Messung übernommen, lediglich die Temperaturstabilisierung erfolgte beim ersten Messstand durch einen West 4100 Regler, während sie jetzt über einen Software PID-Regler durchgeführt wird. Beide Verfahren erreichen jedoch eine Stabilisierung von $\pm 0,1$ K. Bei der Vermessung der Widerstände der ersten Generation wurde der erste Messwert verworfen. Die Normierung erfolgte auf den zweiten Messwert nach ca. 25 s. Der Widerstandswert der ersten Generation beträgt $1,84 \text{ M}\Omega$ und ist damit größer als der Widerstandswert der Testmuster ($1,5 \text{ M}\Omega$). Um trotz des geringeren Widerstands in den 10 V Messbereich des Multimeters zu gelangen, musste die anliegende Spannung von 600 V auf 400 V reduziert werden. Die Leistung an den Widerständen reduziert sich damit von 0,20 W um einen Faktor 1,83 auf 0,11 W.

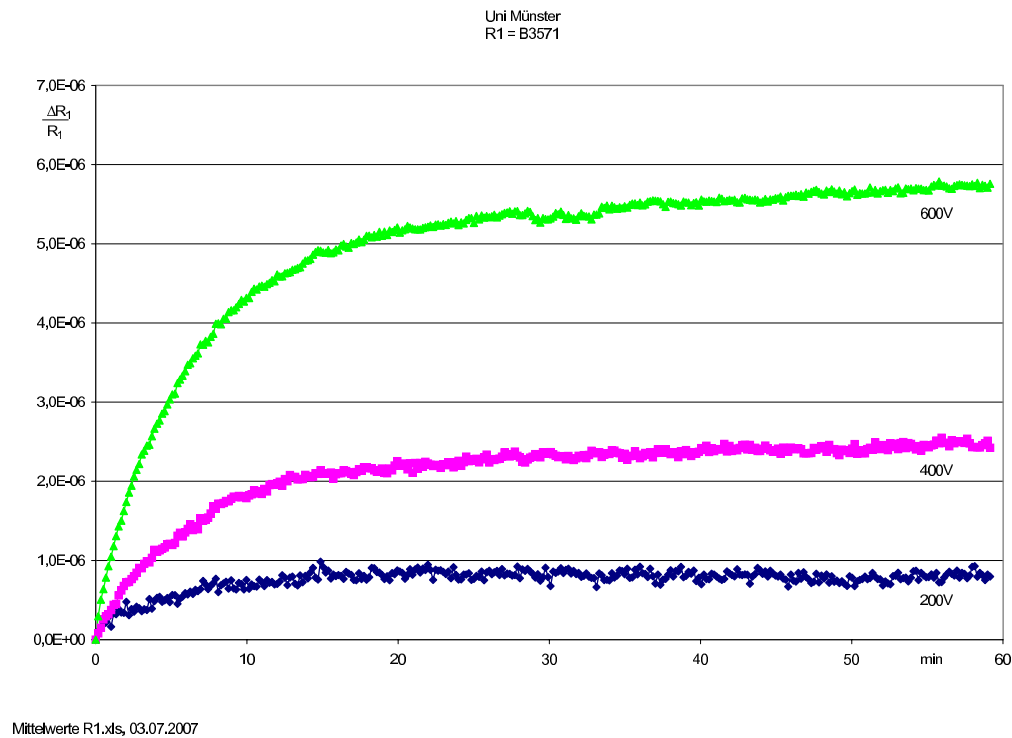


Abbildung A.2.: PTB Messung. Ergebnisse der Vermessung des Aufwärmverhaltens des Widerstands „b3571“ durch die PTB. Normiert auf den zweiten Messwert nach 6 s. Umgebungstemperatur $22,3 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

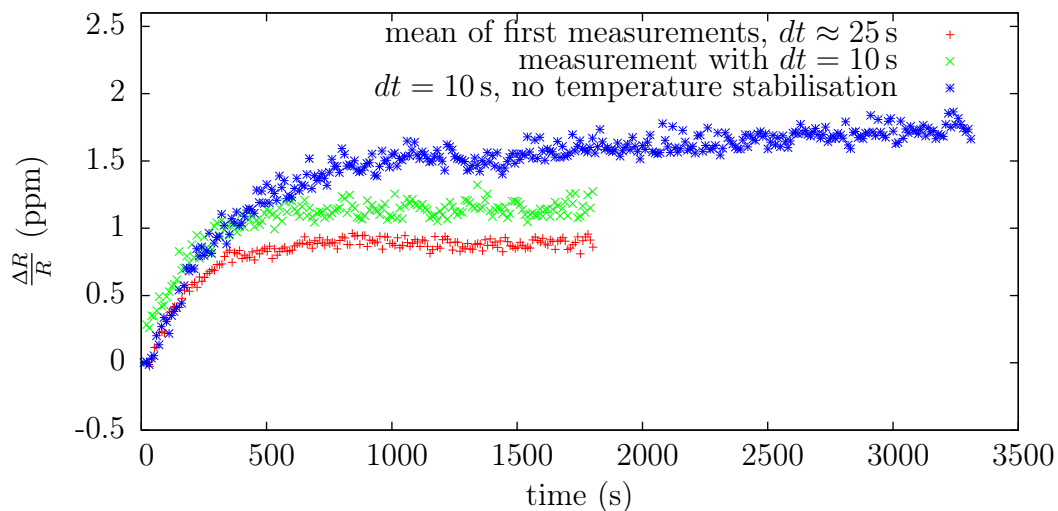


Abbildung A.3.: Messung mit PTB-ähnlichem Messaufbau. Gezeigt sind drei verschiedene Vermessungen des Widerstands „b3573“ bei einer Spannung von 400 V. In rot ist der Mittelwert der Messungen mit dem unangepassten Aufbau gezeigt, bei dem die ersten zwei Messwerte verworfen werden und auf den dritten Messwert nach ca. 25 s normiert wird. In grün wurde nur ein Messwert verworfen und auf den zweiten Messwert nach 10 s normiert. In blau ist eine Messung dargestellt, bei der die Temperaturstabilisierung und der Lüfter ausgestellt wurden.

Resistor	c1	c2	$\emptyset(600\text{ V})$	σ	$\emptyset(600\text{ V})/\emptyset(400\text{ V})$	σ
b3567	3.94	4.45	4.20	0.21	3.87	0.58
b3568	4.86	5.21	5.03	0.12	2.82	0.20
b3570	5.40	5.20	5.30	0.10	2.96	0.11
b3573	2.85	3.29	3.07	0.18	3.42	0.41
b3575	-2.45	-2.52	-2.48	0.04	3.81	0.52

Tabelle A.3.: Ergebnisse der „b....“ Widerstände vermessen mit dem Fluke 8508A Reference Multimeter. Vermessen bei 600 V, normiert auf den dritten Messwert nach $25,000 \pm 0,001\text{ s}$.

Resistor	$\emptyset(\text{scaled})$	σ
b3571	3.45	0.55
b3576	-1.64	0.64
x9812	-4.48	0.60
x9813	-3.87	0.55
x9815	-4.39	0.68

Tabelle A.4.: Skalierung der verbleibenden Widerstände. Skalierung der Widerstände, die bei 400 V vermessen wurden, mit dem Faktor $3,38 \pm 0,43$.

Um zu überprüfen, wie die Aufwärmabweichung mit der anliegenden Leistung skaliert, wurden die verbleibenden fünf Widerstände mit einem Fluke 8508A Reference Multimeter vermessen. Dieses Multimeter erlaubt Spannungsmessungen von bis zu 20 V im genauesten Messbereich. Die Ergebnisse wurden auf den zweiten Messwert nach 25 s normiert. Die einzelnen Ergebnisse sind in Abschnitt A.2.3 dargestellt, eine Zusammenfassung zeigt Tabelle A.3. Das Verhältnis zwischen Aufwärmabweichung bei 600 V und 400 V beträgt $3,38 \pm 0,43$ und weicht deutlich von 1,83 ab. Dies lässt sich auf den parabolischen Temperaturkoeffizient zurückführen.

Um auch die Testmuster der ersten Lieferung mit den Widerständen der ersten Generation vergleichen zu können, wurde eine erneute Auswertung der Daten durchgeführt. Bei dieser Auswertung wurde die Aufwärmabweichung auf den dritten Messwert normiert, zwischen 20 s und 30 s nach dem Einschalten der Spannung. Die Ergebnisse wurden anschließend mit dem Faktor $3,38 \pm 0,43$ skaliert. Auch die Ergebnisse der verbleibenden beiden Widerstände „b3571“ und „b3576“ wurden mit dem Faktor $3,38 \pm 0,43$ skaliert.

Die Ergebnisse der Vermessung der Testmuster bei 600 V (Tabelle A.3) und die Skalierung der übrigen Messwerte (Tabelle A.4) bilden die Grundlage für Abb. 2.11.

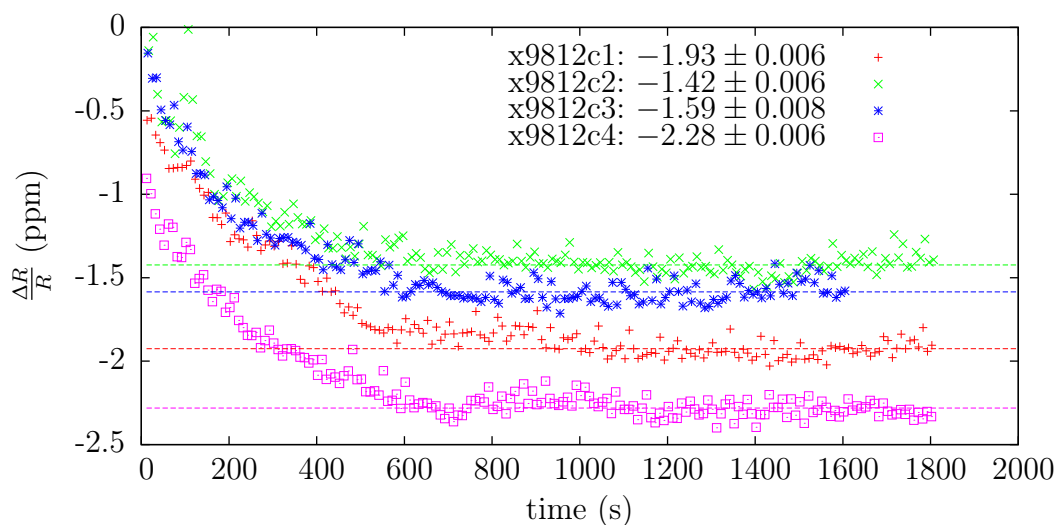
Nachdem die genauen Spezifikationen der Widerstände aufgestellt worden waren, stellte Vishay einen weiteren Satz von sechs Testmustern zur Verfügung. Diese Testmuster entsprechen den endgültigen Widerständen und tragen die Bezeichnungen „g5866“, „g5867“, „g5868“, „g5869“, „g8775“ und „g8776“. Auch von diesen Widerständen wurde das Aufwärmverhalten bestimmt (Abschnitt A.2.4). Durch den niedrigeren Widerstand von 880 k Ω wurde eine Spannung von 311,5 V gewählt. In den vergangenen Messungen wurde festgestellt, dass der Messpunkt, auf den normiert wird, einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Aufwärmabweichung hat. Der erste Messwert wird bei 5 s aufgenommen und verworfen. Die Zeit bis zum zweiten Messpunkt, auf den normiert wird, wurde bei dieser Messung genau kontrolliert und

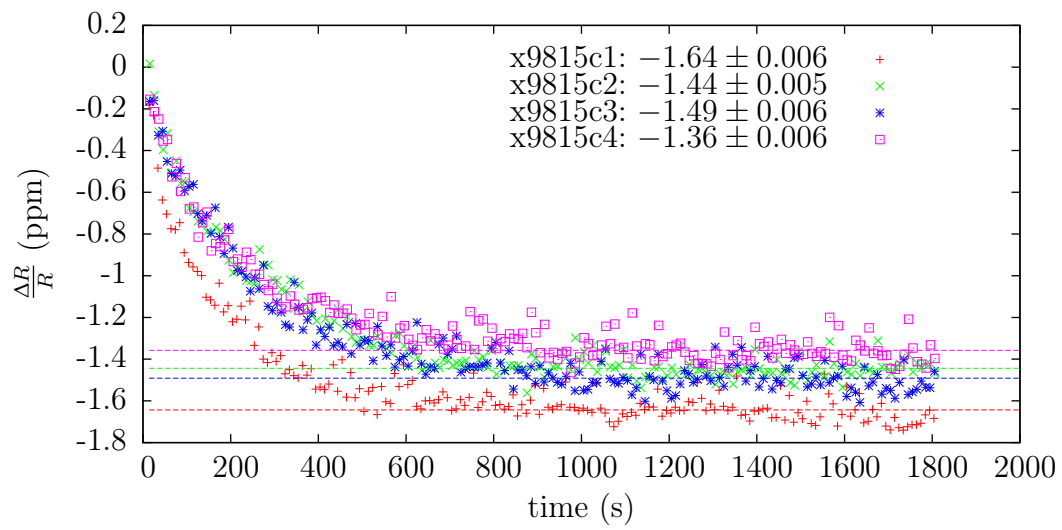
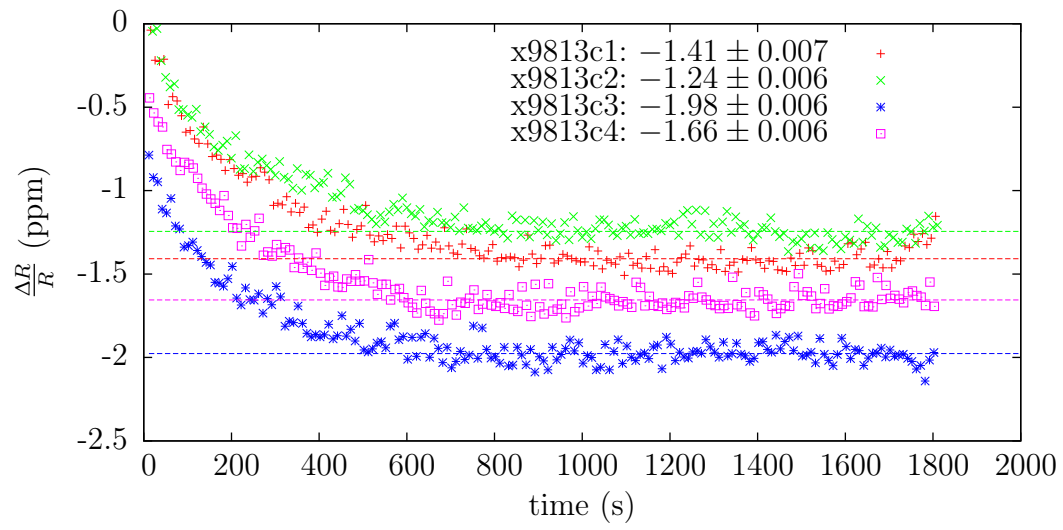
Resistor	c20	c21	c30	$\bar{\sigma}$	σ
g5866	-1.24 (18.4 °C)	-1.15 (18.1 °C)	-1.50 (15.2 °C)	-1.30	0.18
g5867	-0.82 (18.2 °C)	-0.79 (18.1 °C)	-0.84 (16.4 °C)	-0.82	0.03
g5868	-1.22 (18.1 °C)	-1.14 (18.1 °C)	-1.36 (17.3 °C)	-1.24	0.11
g5869	-1.12 (18.2 °C)	-1.18 (18.1 °C)	-1.38 (14.8 °C)	-1.22	0.13
g8775	1.74 (18.2 °C)	1.77 (18.0 °C)	1.69 (16.9 °C)	1.74	0.04
g8776	2.03 (18.4 °C)	2.07 (18.0 °C)	1.82 (14.6 °C)	1.97	0.13

Tabelle A.5.: Ergebnisse der „g...“ Widerstände. Vermessen bei 311,5 V, normiert auf zweiten Messwert nach $10,000 \pm 0,001$ s. Die durchschnittliche Temperatur im klimatisierten Rack ist in Klammern angegeben.

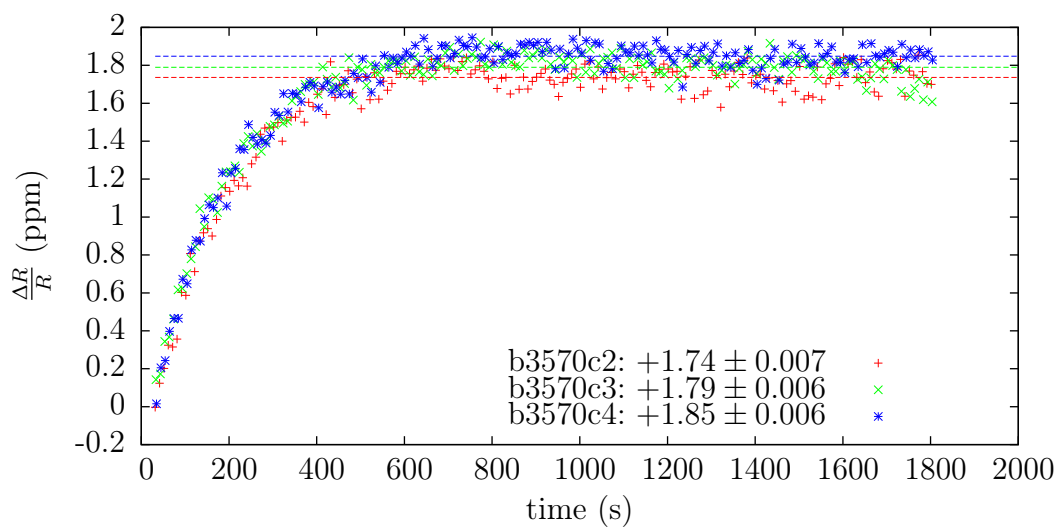
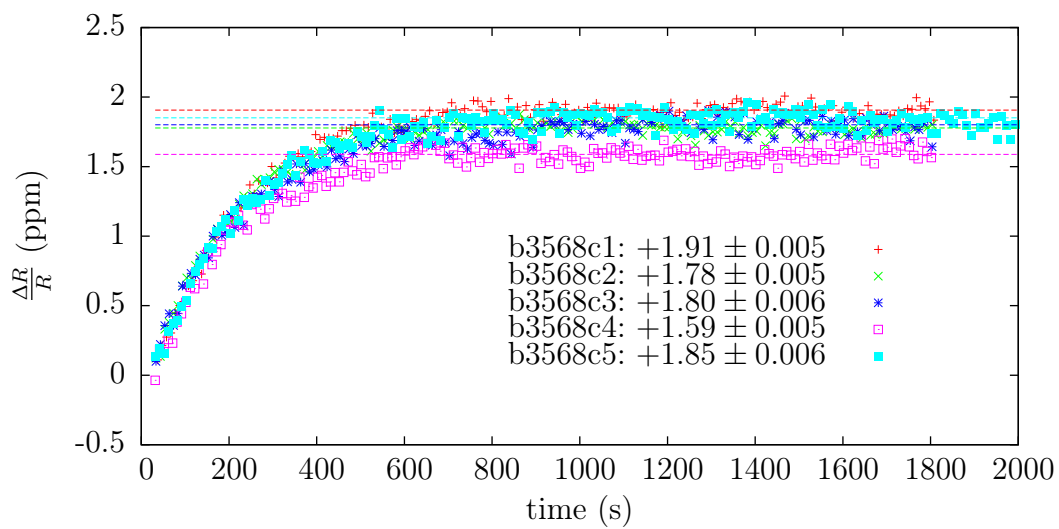
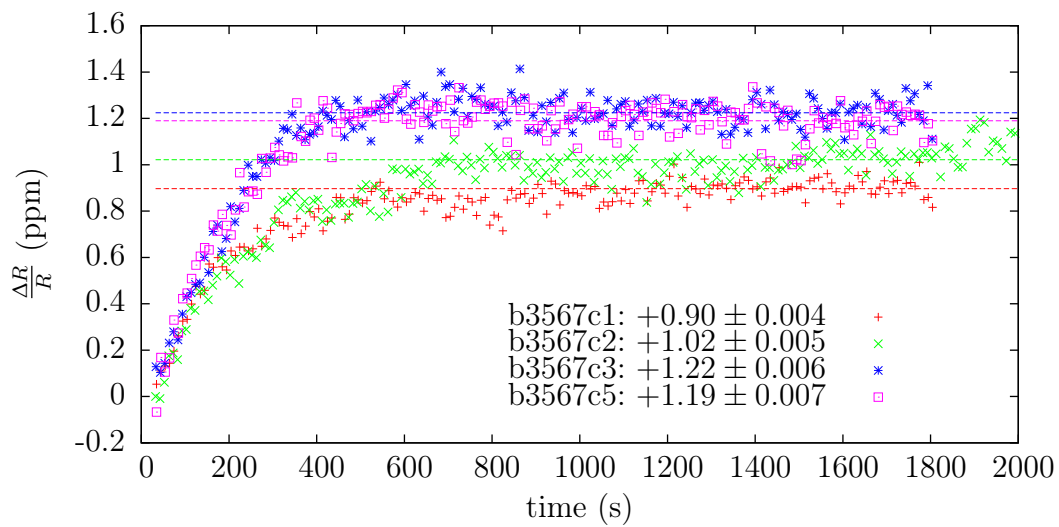
auf $10,000 \pm 0,001$ s festgelegt. Diese Vorgabe sollte auch für alle weiteren Vermessungen von Widerständen eingehalten werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle A.5. Man erkennt nur noch gelegentlich Abweichungen zwischen den Messungen von maximal 0,2 ppm. Bestimmt man die durchschnittliche Lufttemperatur im klimatisierten Schrank, stellt man bei den Messungen mit einer starken Abweichung des Aufwärmverhaltens auch eine starke Abweichung der Lufttemperatur fest. Die Lufttemperatur beträgt in diesen Fällen $< 16,0$ °C. Vernachlässigt man Messungen bei denen die Lufttemperatur des Schrankes $< 16,0$ °C liegt, beträgt die maximale Abweichung zwischen den Messungen 0,14 ppm. Durch Verbesserungen der Messprozedur konnte die Sicherheit der Bestimmung des Aufwärmverhaltens also deutlich verbessert werden. Die Reproduzierbarkeit bestätigt auch die in Kapitel 2.2 angenommene Präzision des Messstands von 0,1 ppm.

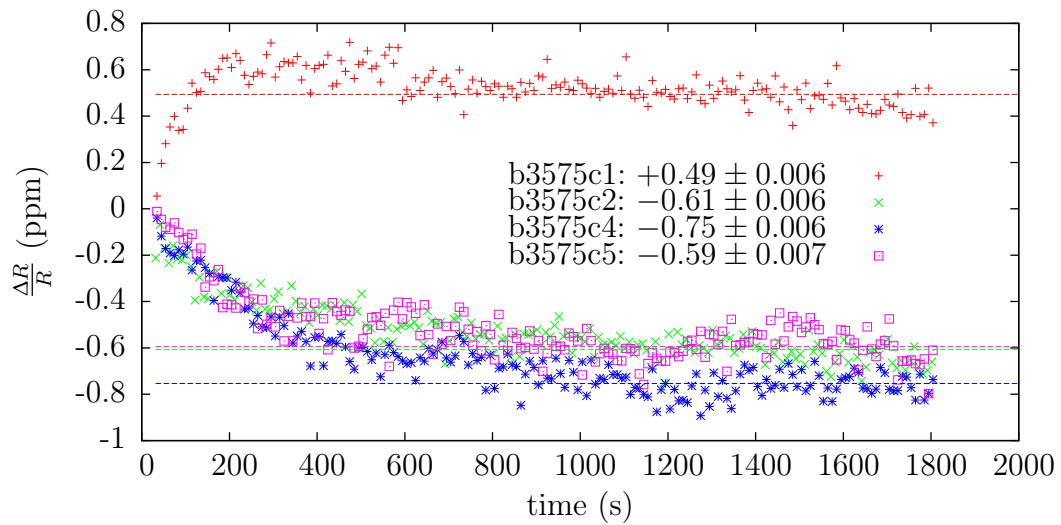
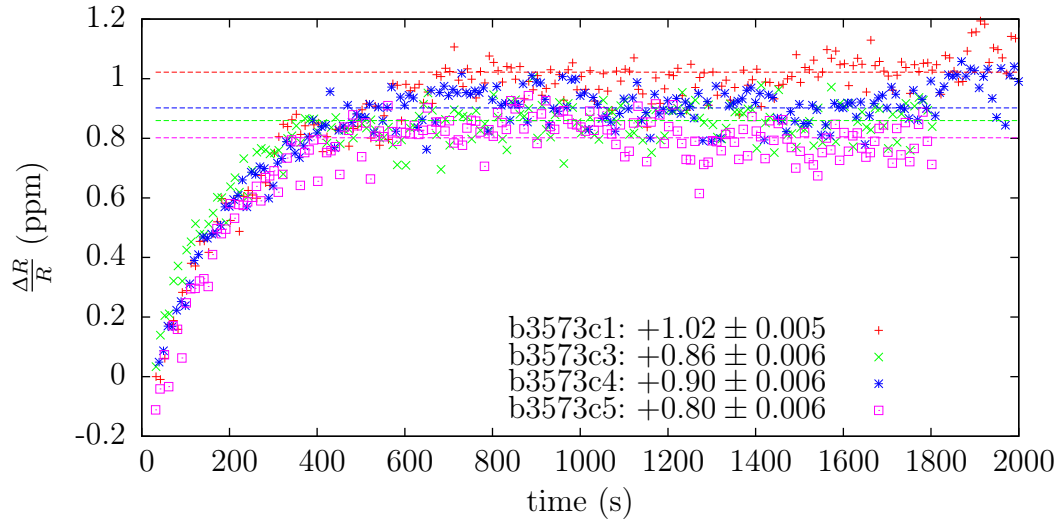
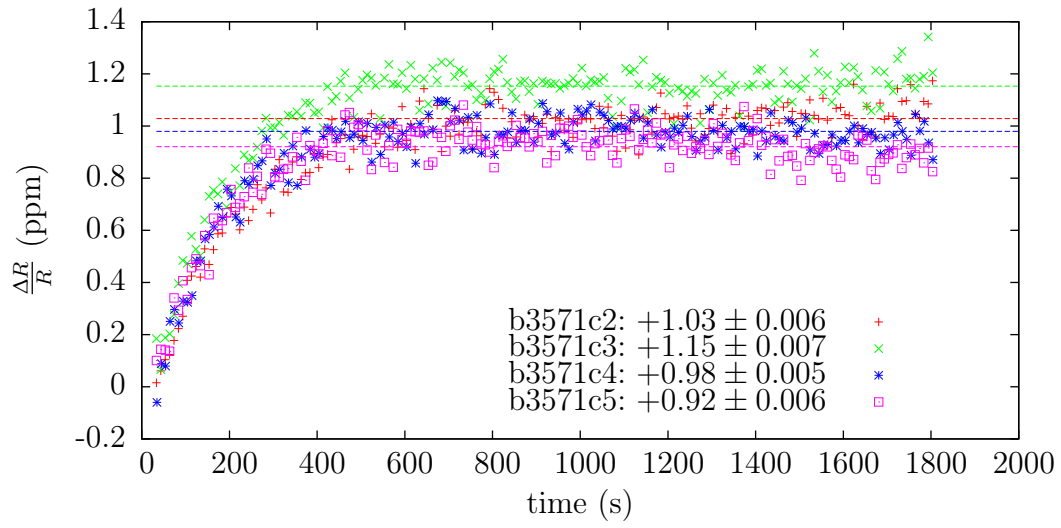
A.2.1. Ergebnisse der Widerstände „x...“

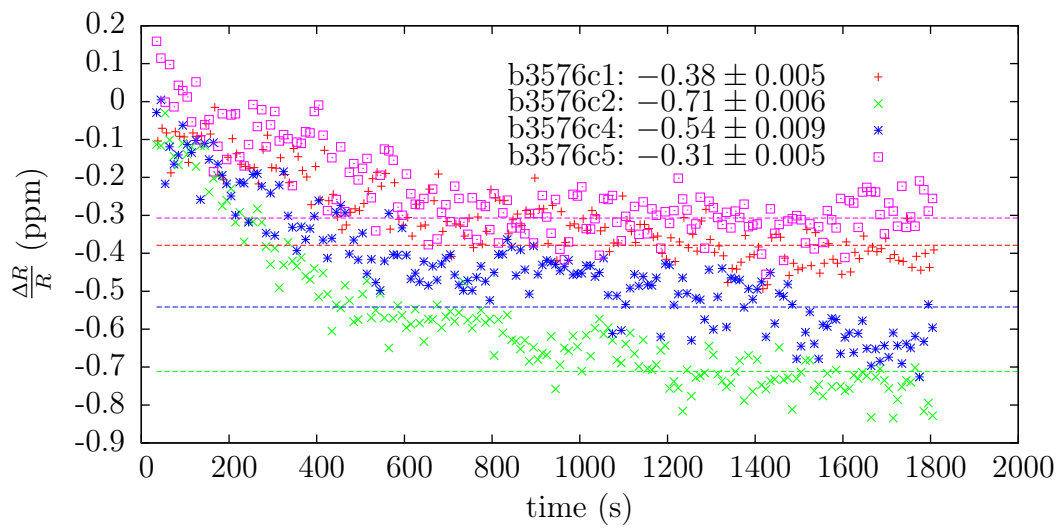




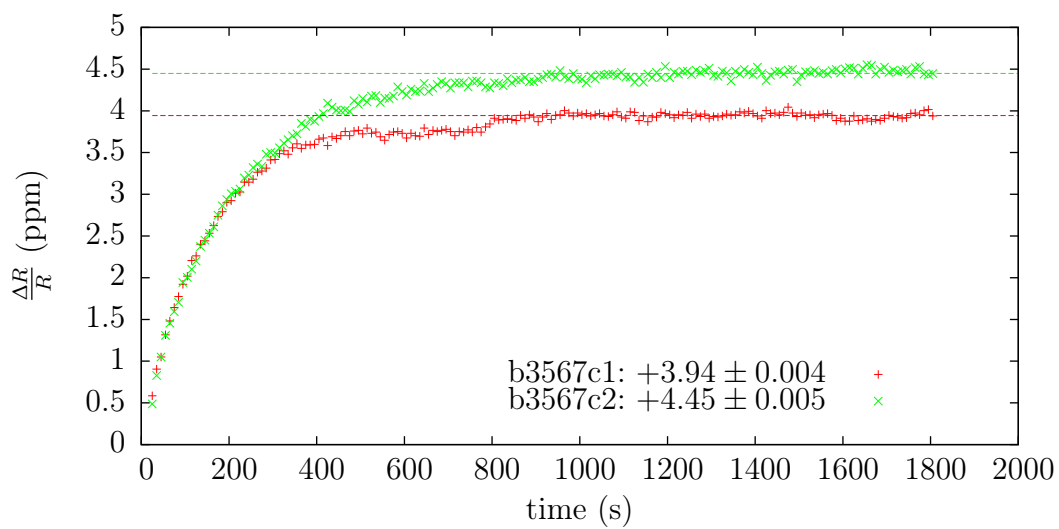
A.2.2. Ergebnisse der Widerstände „b....“

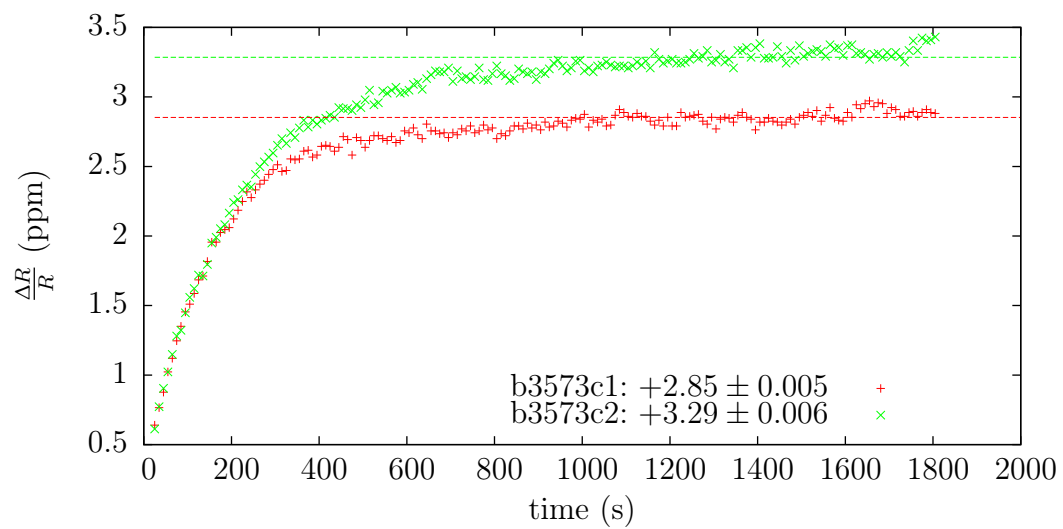
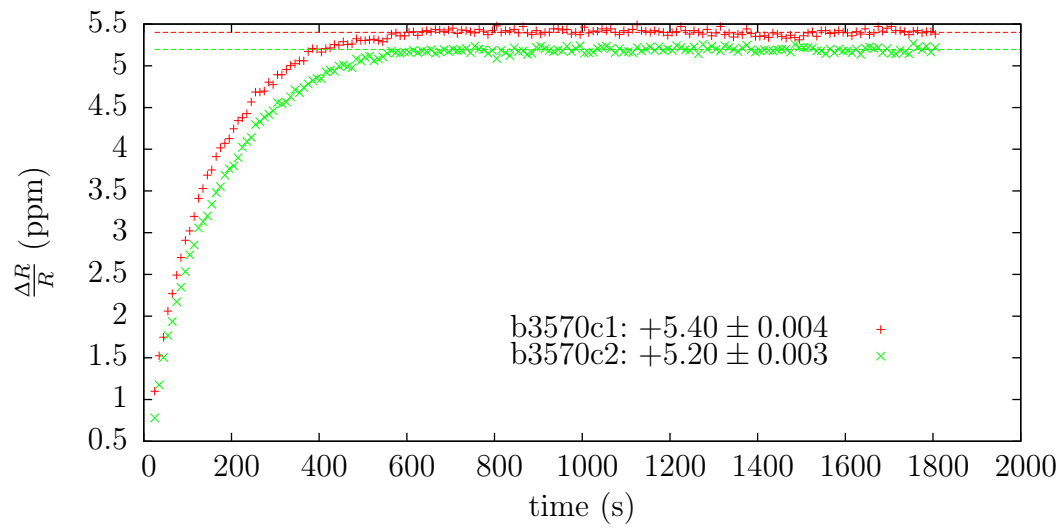
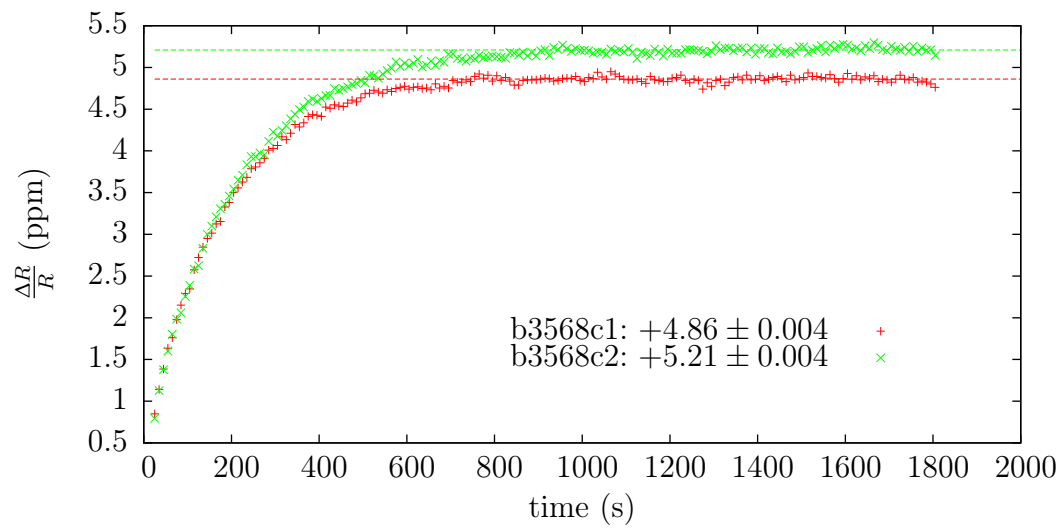


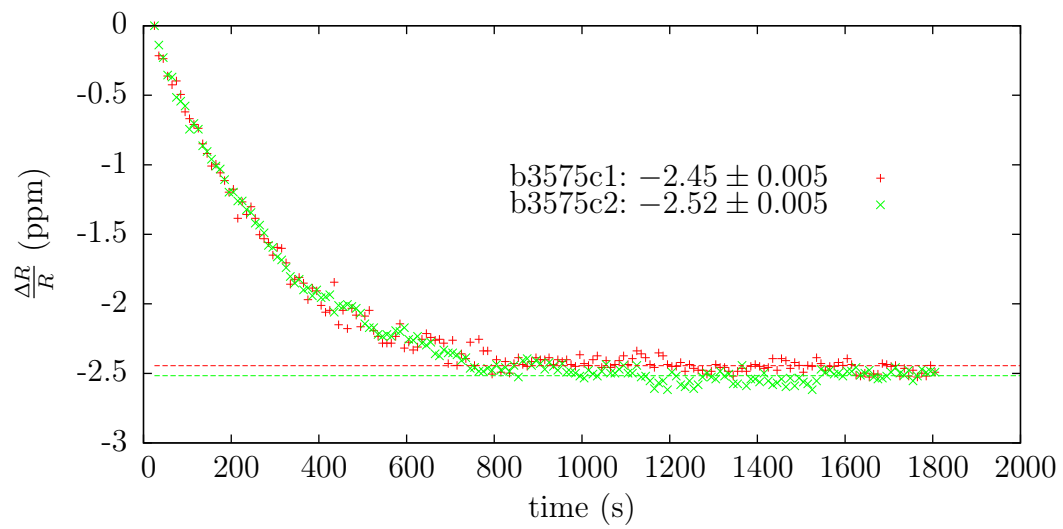




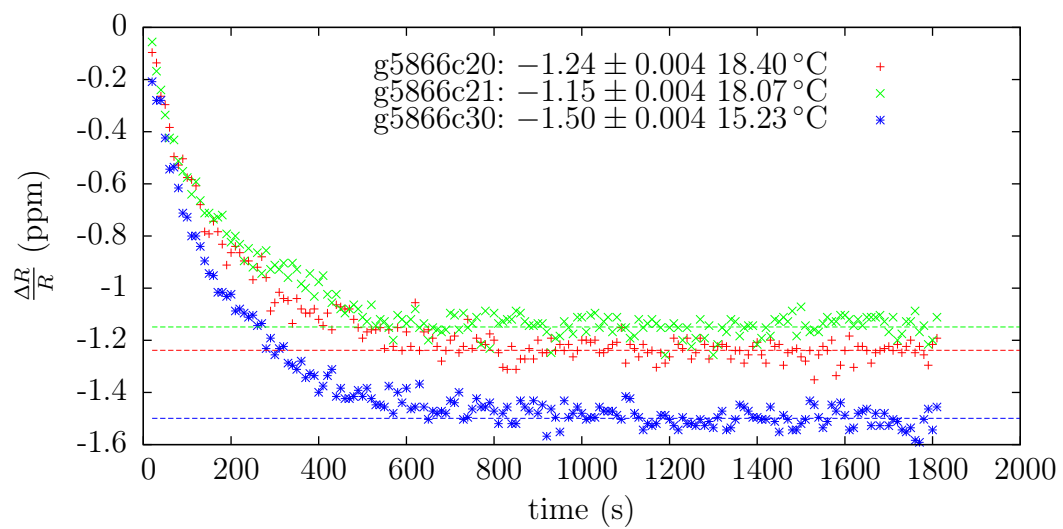
A.2.3. Ergebnisse der Widerstände „b....“ bei 600 V

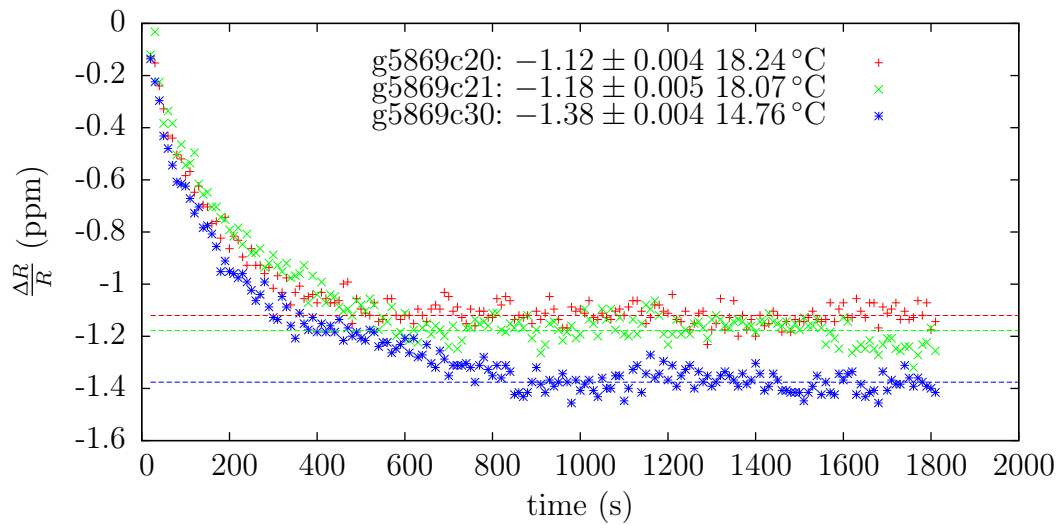
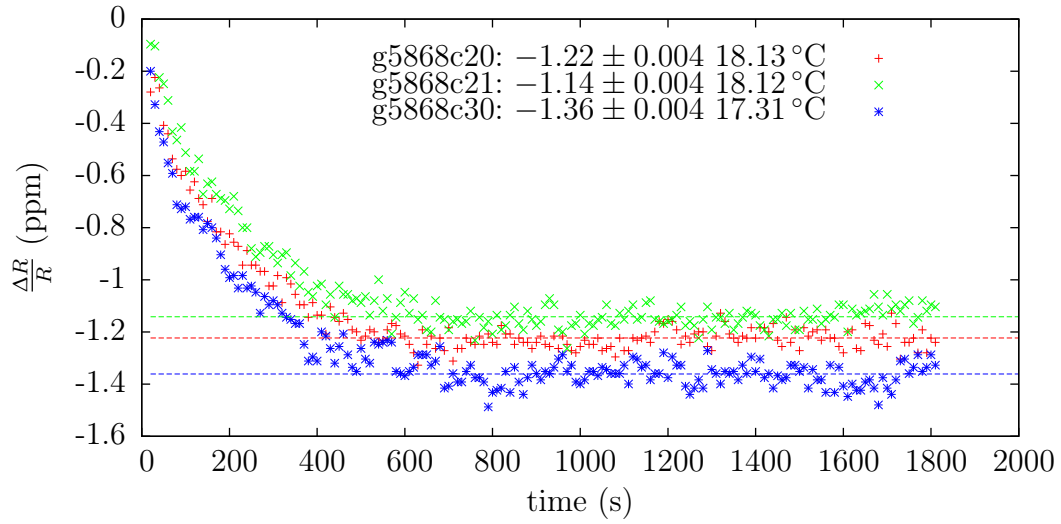
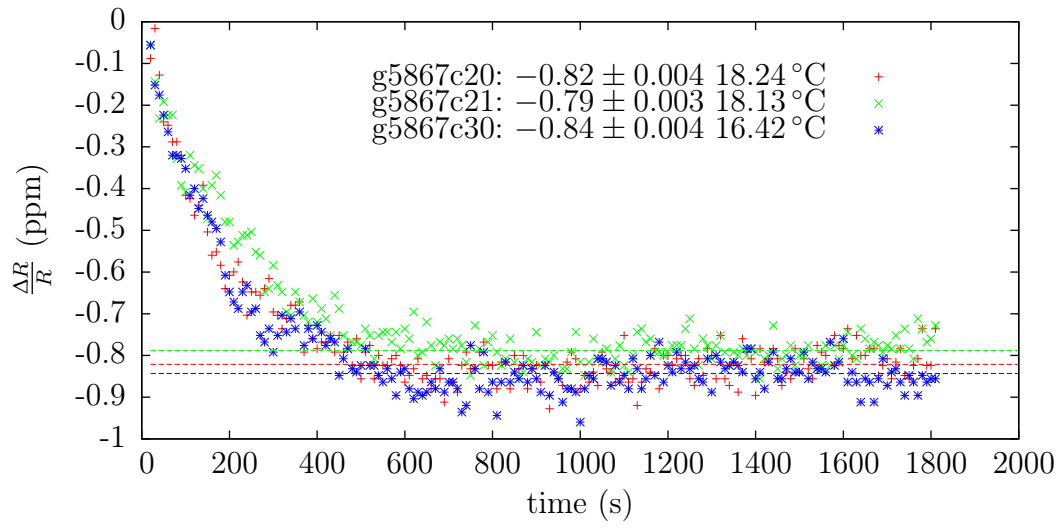


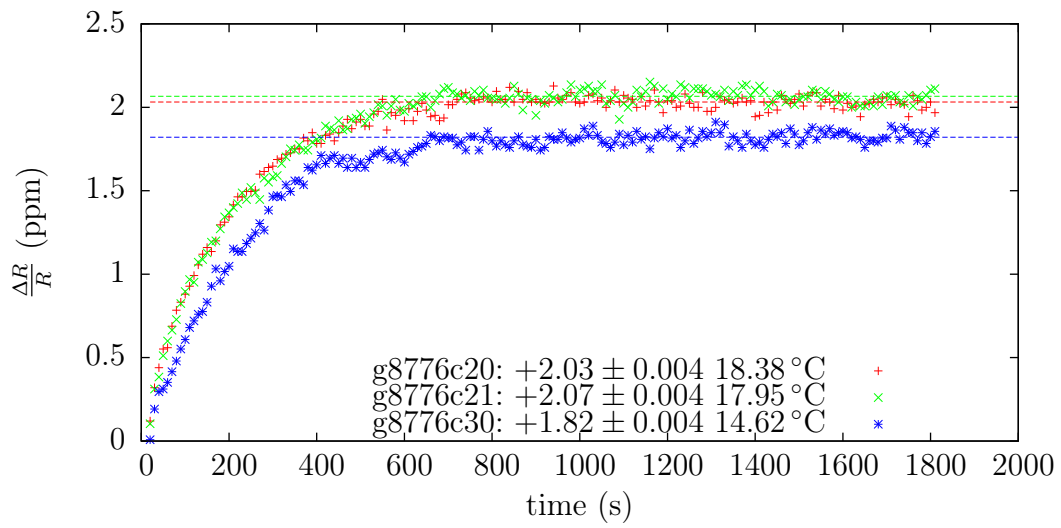
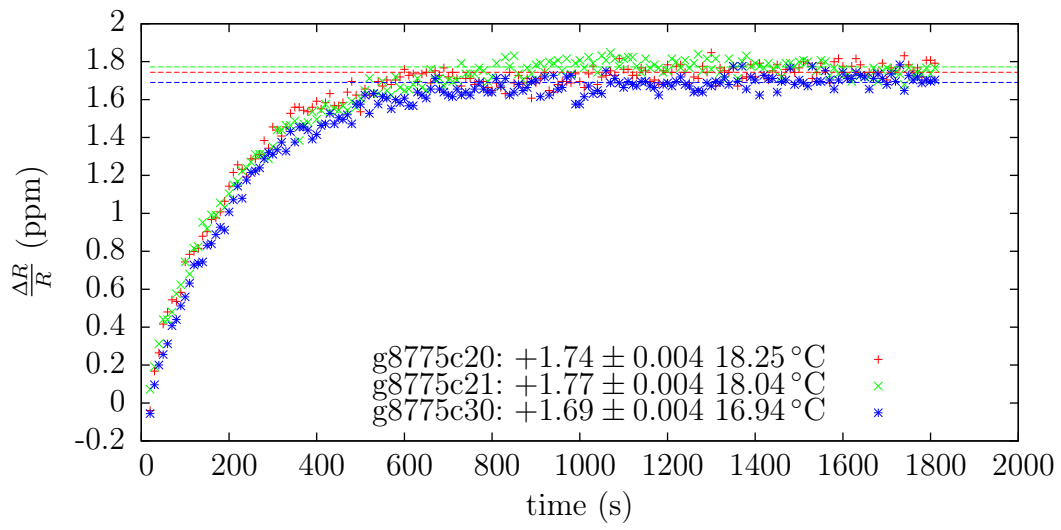




A.2.4. Ergebnisse der Widerstände „g....“







ANHANG B

BAUPLÄNE UND AUFBAU DER MECHANISCHEN KOMPONENTEN

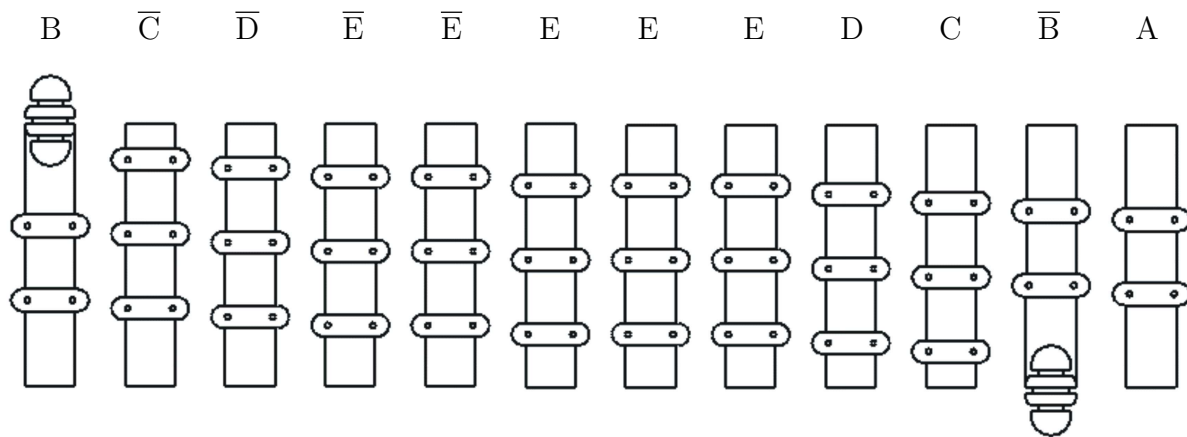


Abbildung B.1.: Auffaltung einer Ebene. Dargestellt ist die Auffaltung einer „ebene“. Die umgekehrte Einbauorientierung der Stäbe ist durch einen Strich über der Bezeichnung angedeutet. Um die Anordnung „ebene spvk“ zu erhalten muss jeder Stab auf der anderen Seite stehend verbaut werden.

B.1. Aufbau einer Ebene

Die Abgriffwiderstände sind auf der untersten Ebene untergebracht („ebene abgriff“). Darüber folgt eine Ebene mit Widerständen der primären Teilerkette („ebene“). Die Dritte Ebene ergibt sich aus der zweiten Ebene durch eine Spiegelung („ebene spvk“). Die restlichen drei Ebenen folgen dem Schema „ebene“ - „ebene spvk“ - „ebene“. Der genaue Aufbau der Ebenen ist in Anhang B dargestellt. Auf jeder Ebene befinden sich Befestigungsstäbe, die Aufhängungen für die Befestigung der Widerstände tragen. Im folgenden soll auf die Eigenheiten eingegangen werden, die beim Aufbau der einzelnen Ebenen beachtet werden müssen.

Auf der Ebene der Abgriffwiderstände werden zwei verschiedene Arten von Befestigungsstäben verbaut. Stäbe mit Platz für drei Aufhängungen („stab abgriff“) und Stäbe mit Platz für vier Aufhängungen („stab abgriff 4“). Die Befestigungsstäbe auf dieser Ebene unterscheiden sich von den Befestigungsstäben auf den anderen Ebenen durch fest angebrachte Erhebungen auf der Unterseite, mit denen sie auf der untersten Ebene befestigt werden können. Auf der Oberseite haben sie Vertiefungen für die Aufnahme von „stäbchen“, welche durch die obere Elektrode ragen und dort eine Arretierung der darüberliegenden Befestigungsstäbe erlauben. Die Widerstands-Aufhängungen auf dieser Ebene unterscheiden sich von den übrigen Aufhängungen durch eine zusätzliche Bohrung, welche die Querverbindung von Widerständen und die Ausführung zu den Abgriffen ermöglicht („kstueck“).

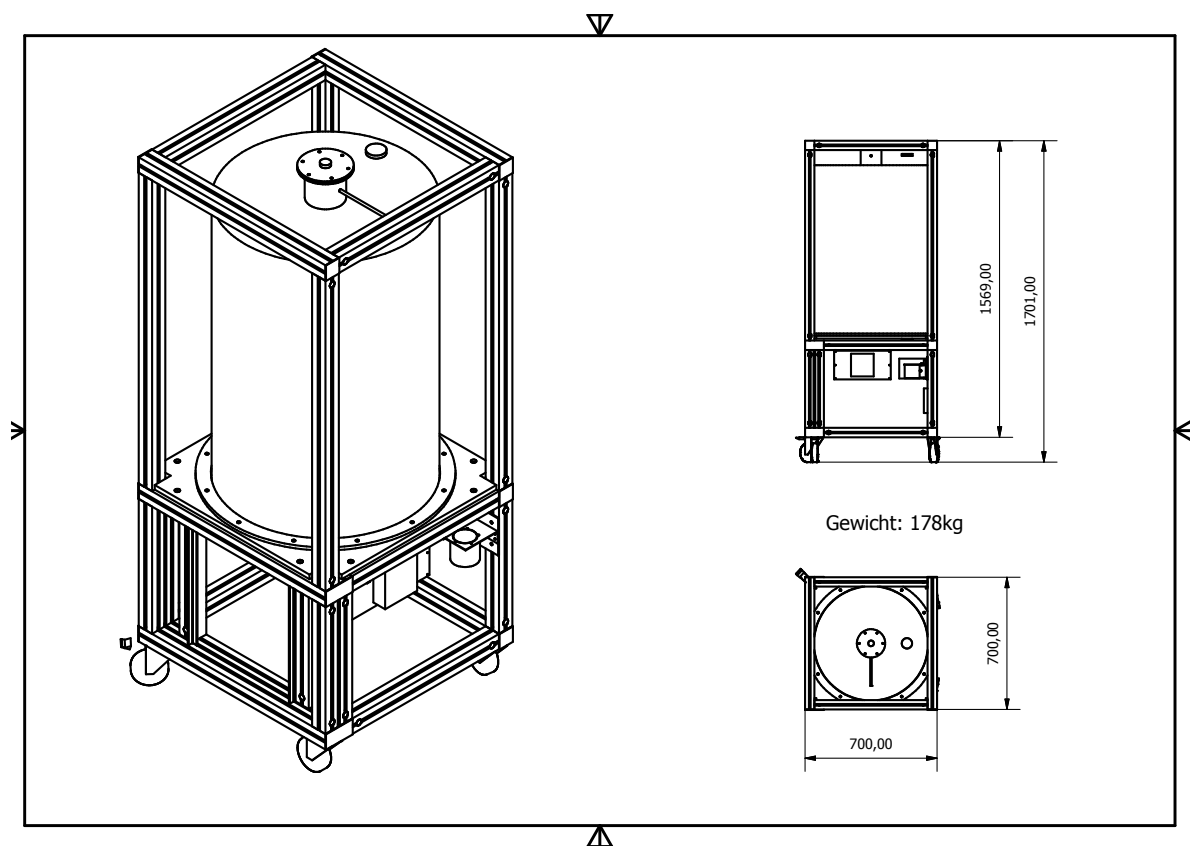
Auf den übrigen Ebenen werden fünf verschiedene Befestigungsstäbe verbaut („stab A“ bis „stab E“). Diese haben auf der Ober- und Unterseite Vertiefungen für die Aufnahme der Verbindungs-„stäbchen“ und können so auf zwei verschiedene Arten verbaut werden. Dies ermöglicht eine gleichmäßige Helix zu formen und gleichzeitig wenige verschiedene Stäbe zu produzieren. Dies spart Werkstattzeit. Eine Auffaltung der Ebenen-Art „ebene“ ist in Abb. B.1 dargestellt. Die Anordnung „ebene spvk“ ergibt sich, indem alle Befestigungsstäbe auf der anderen Seite stehend verbaut werden.

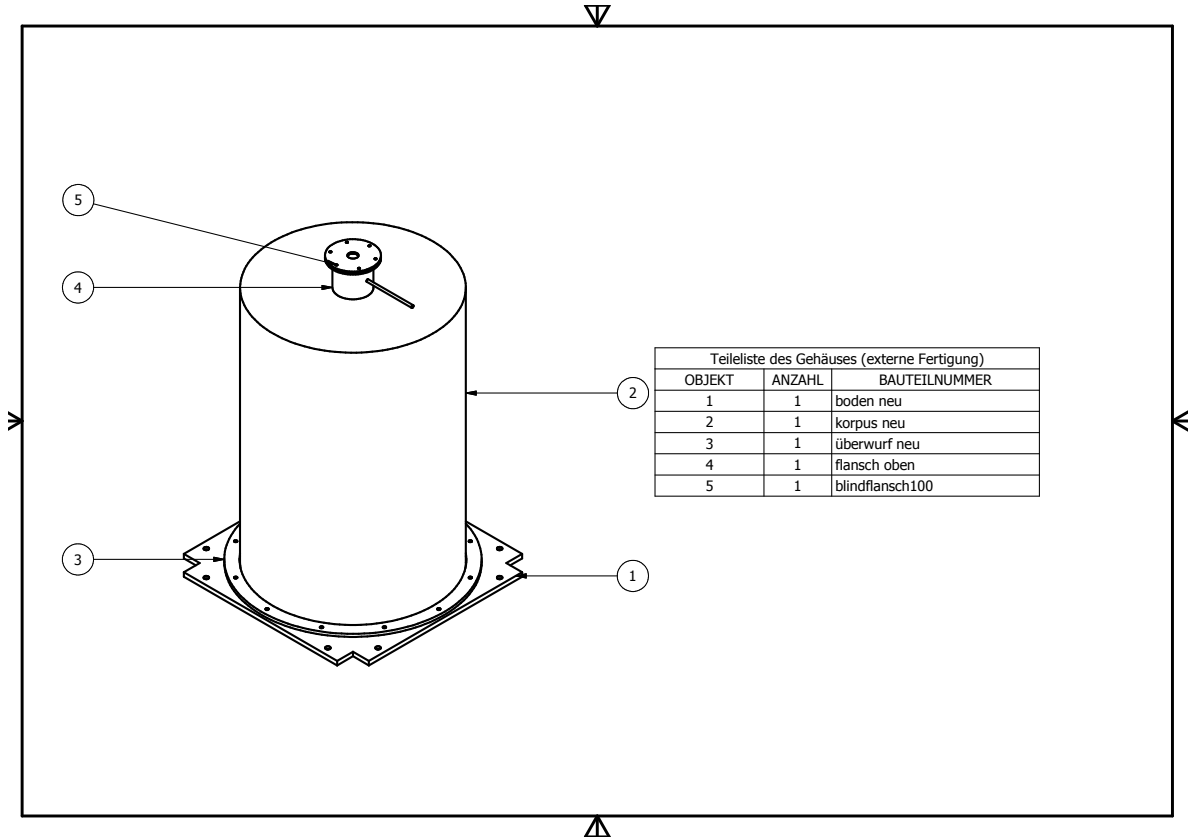
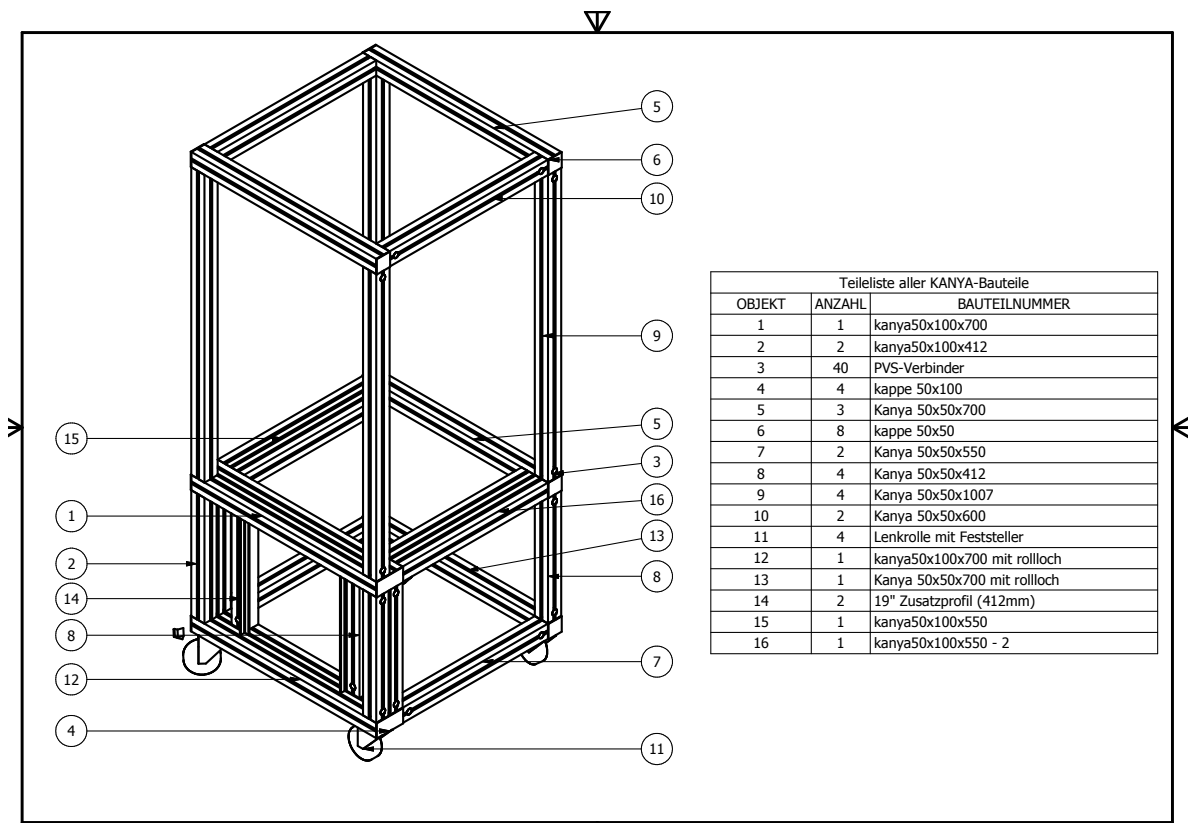
Durch diese Art die Befestigungsstäbe anzuordnen sind alle Elektroden, bis auf zusätzliche oder unterdrückte Bohrungen der obersten und untersten Elektrode, identisch. Die genaue Form der Elektroden wird in Kapitel 3.2 entwickelt.

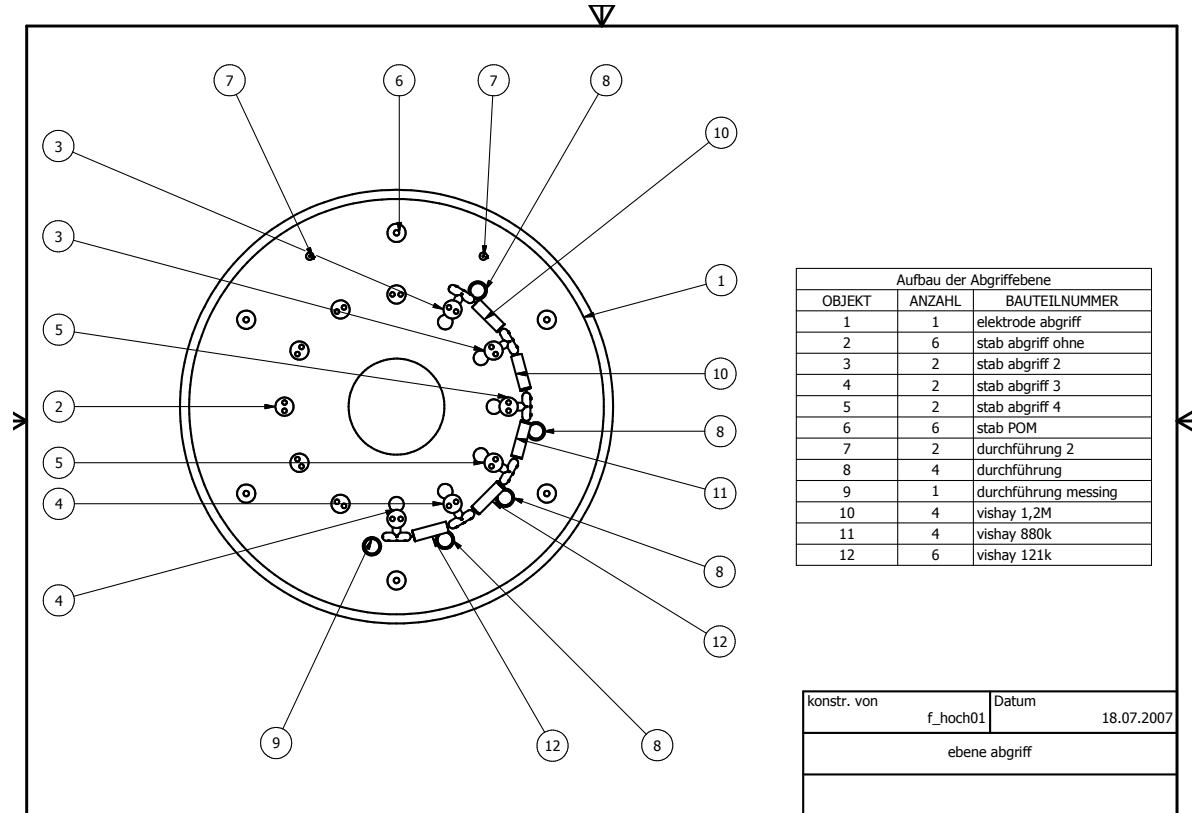
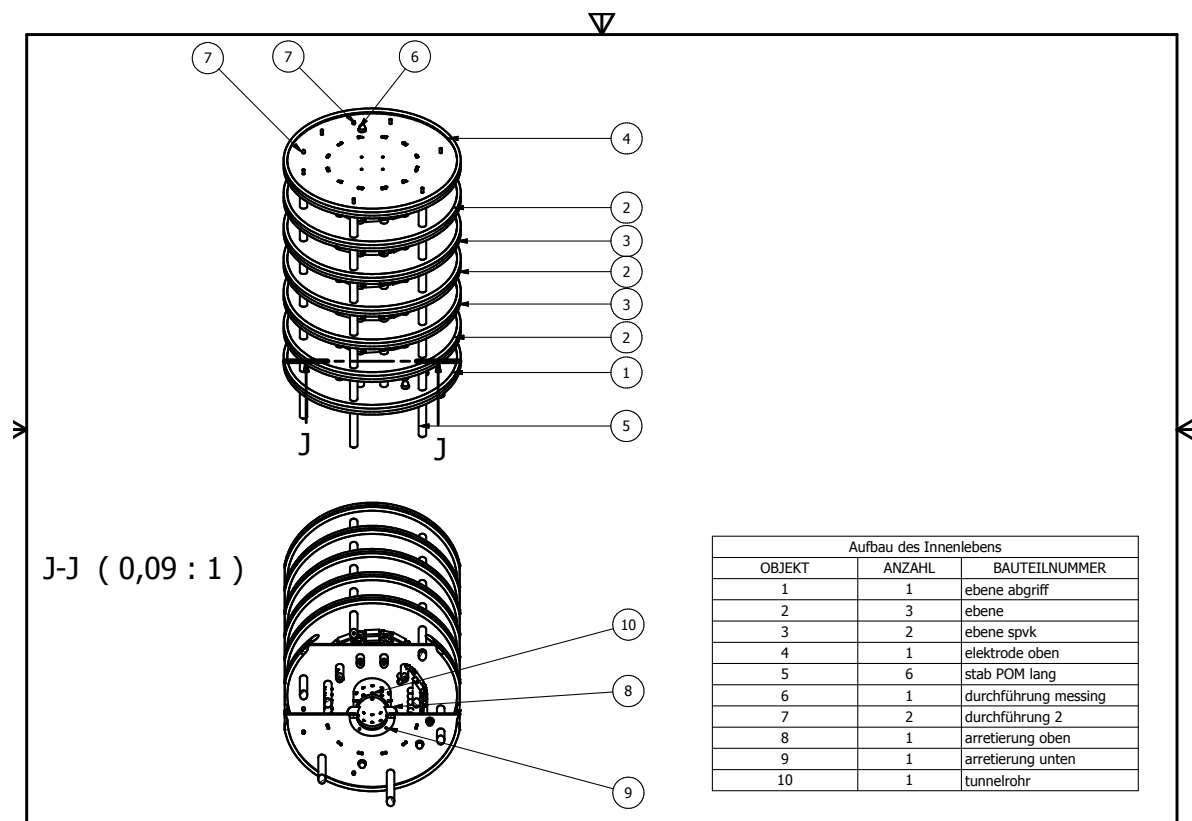
Die Verbindung der Helix zwischen den Elektroden erfolgt durch das Bauteil „durchführung“. Dieses isoliert die Teilerkette von den Elektroden und ermöglicht gleichzeitig den Anschluss von Widerständen.

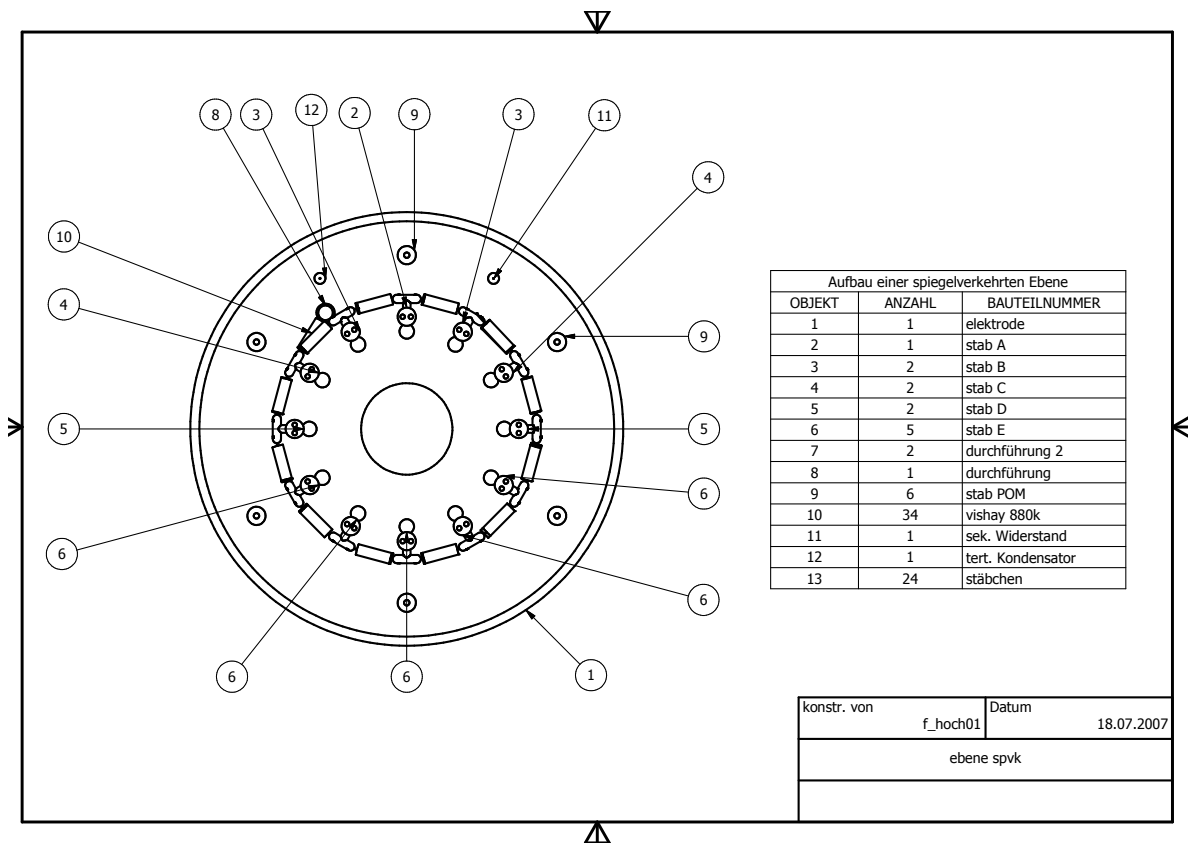
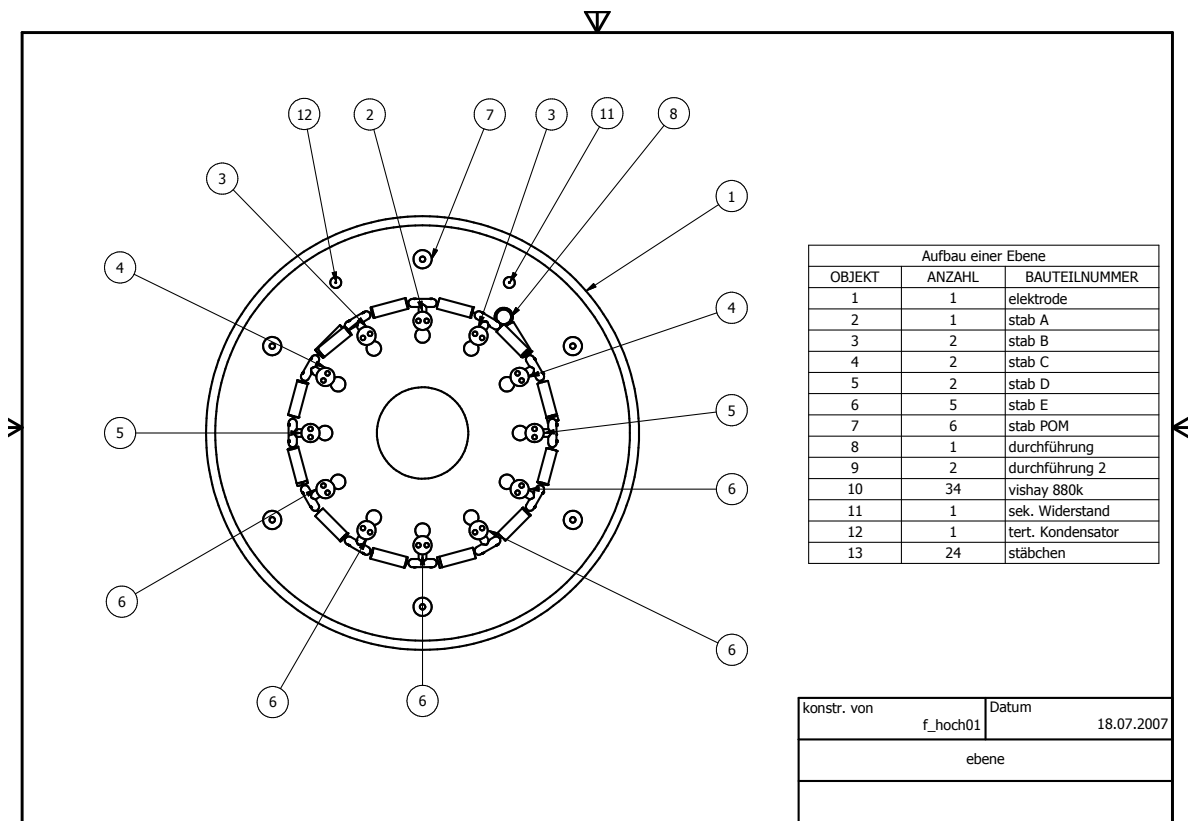
Die Befestigung der Widerstände in den Aufhängungen erfolgt durch Madenschrauben. Bei der Befestigung der Widerstände ist es notwendig die Anschlüsse der Widerstände soweit zu kürzen, dass der Umfang der Helix erreicht wird. Dabei ist zu beachten, dass die Widerstände, die sich zwischen den Durchführungen und den Befestigungsstäben befinden, weniger stark gekürzt werden müssen als die übrigen Widerstände.

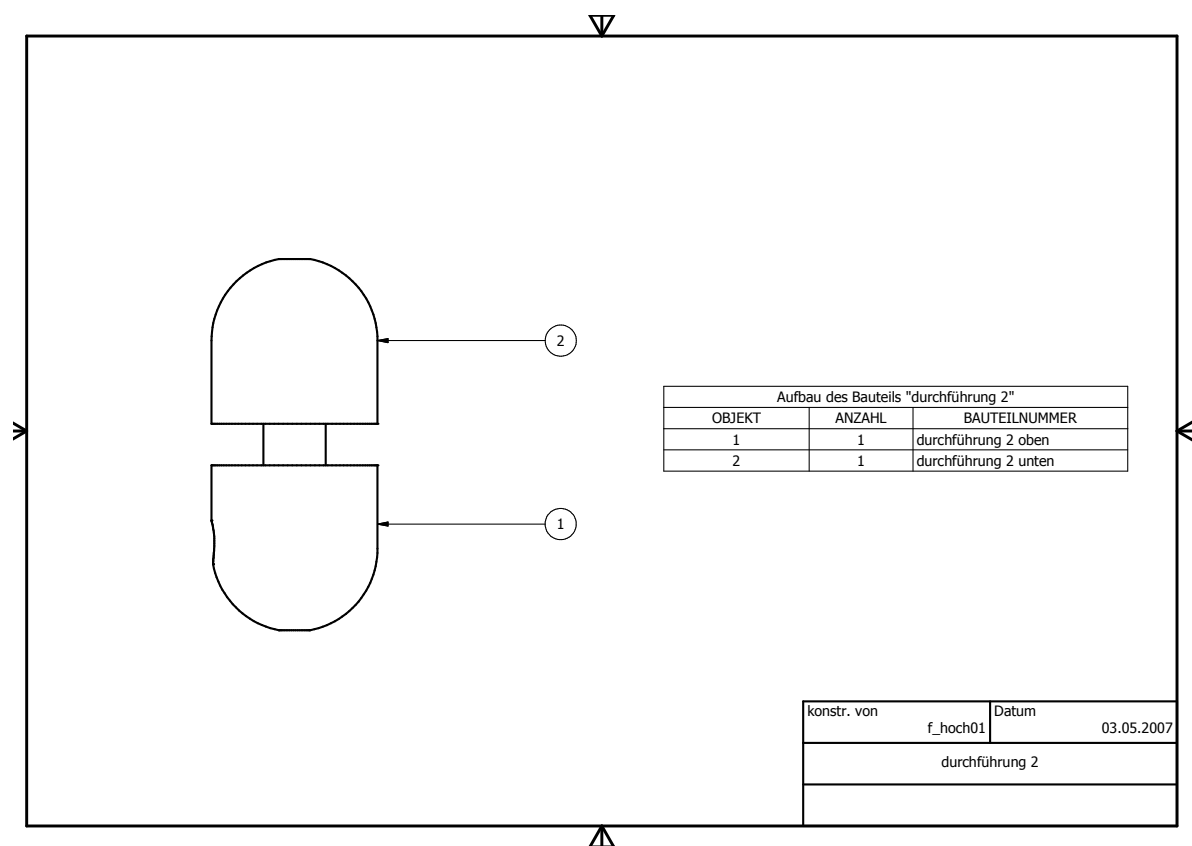
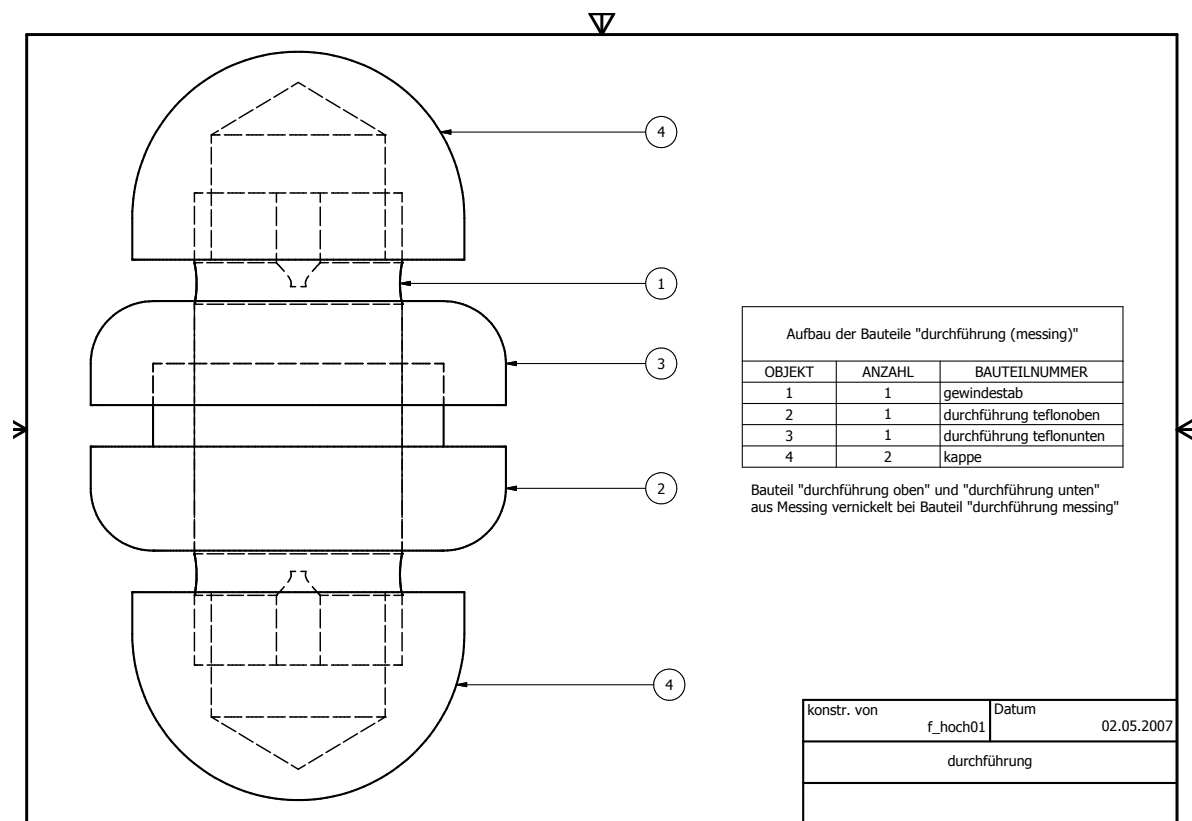
B.2. Baupläne





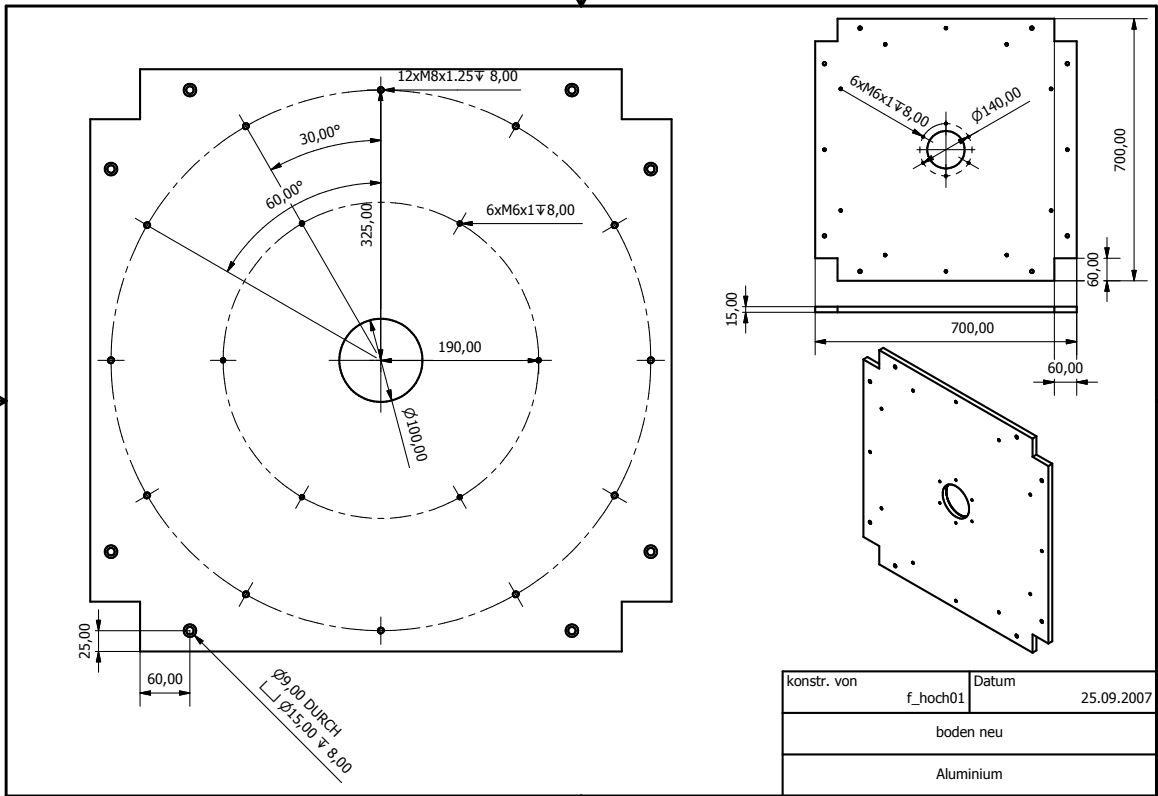


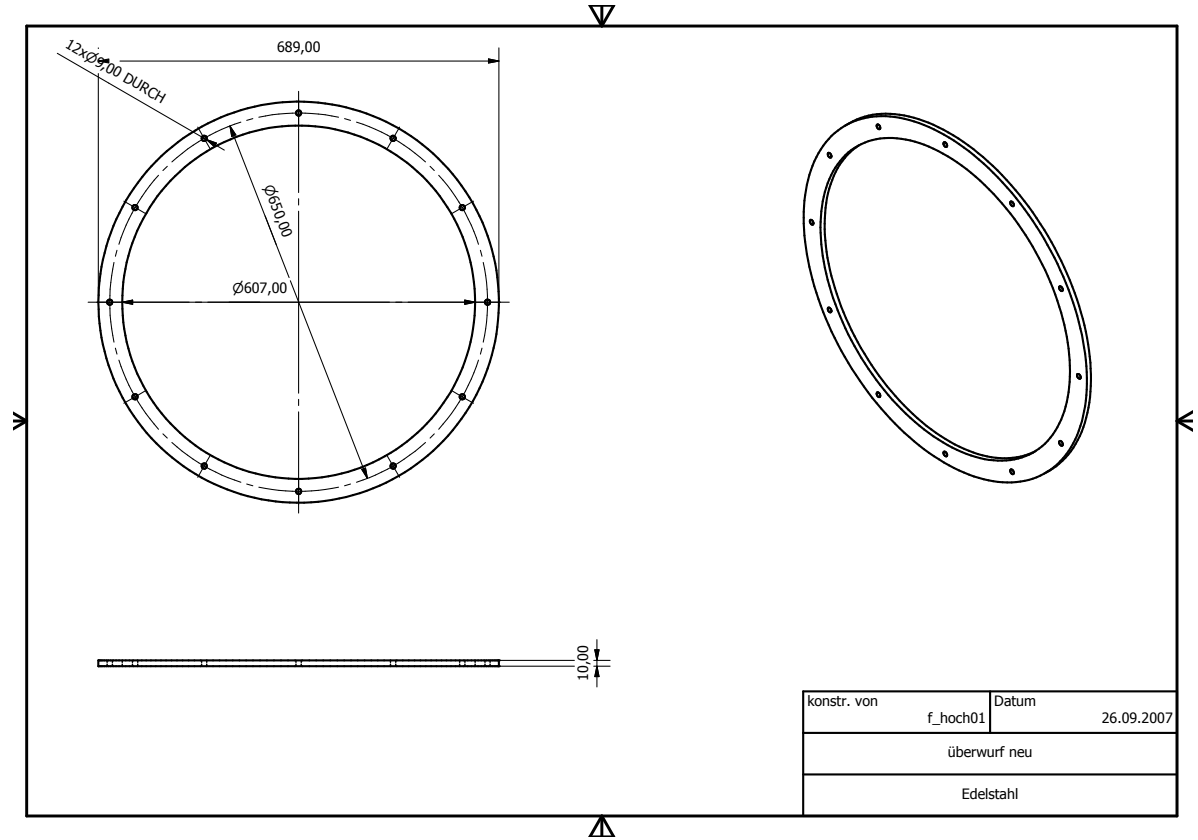
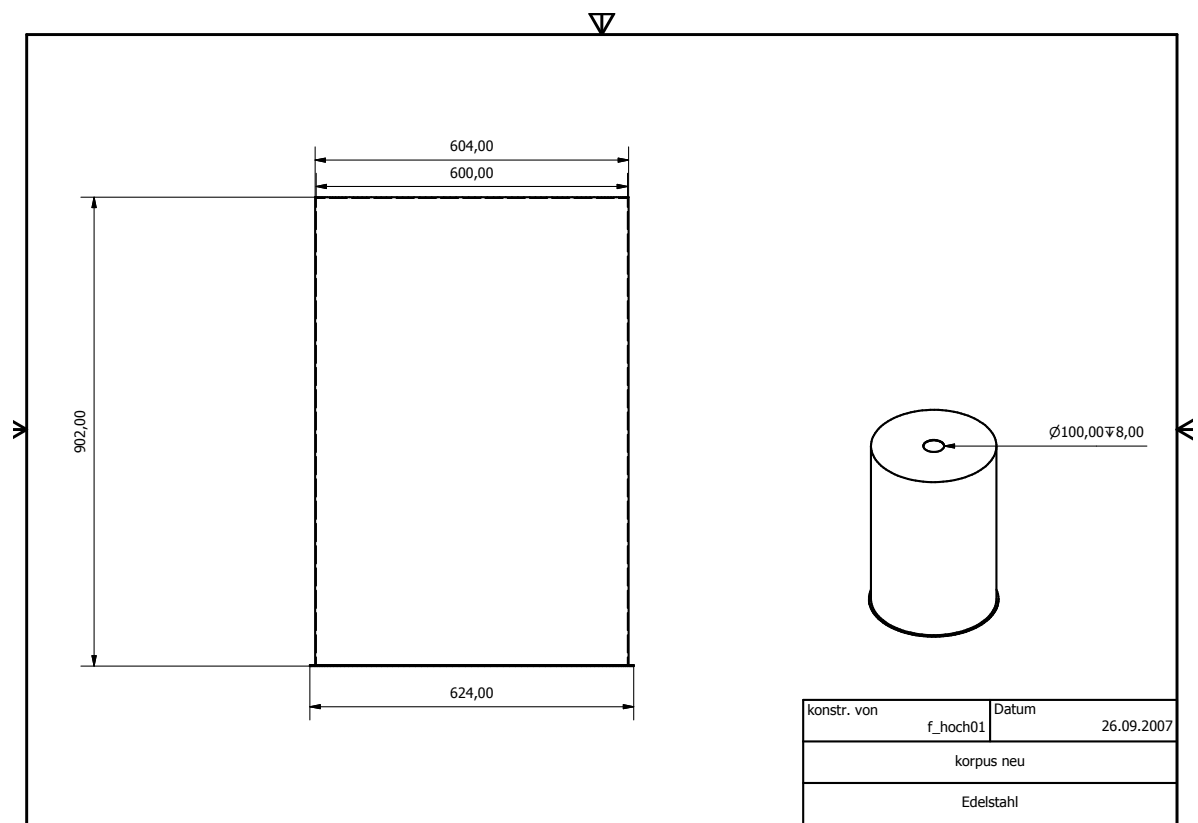


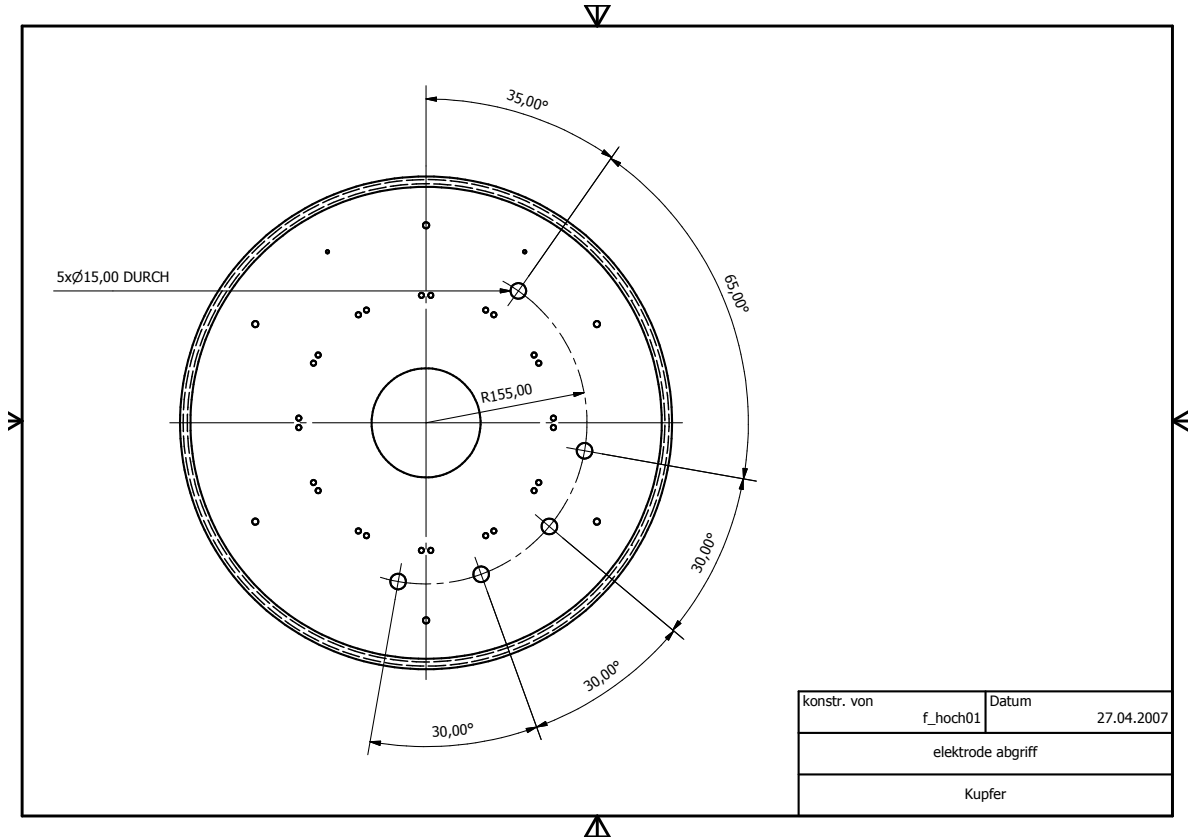
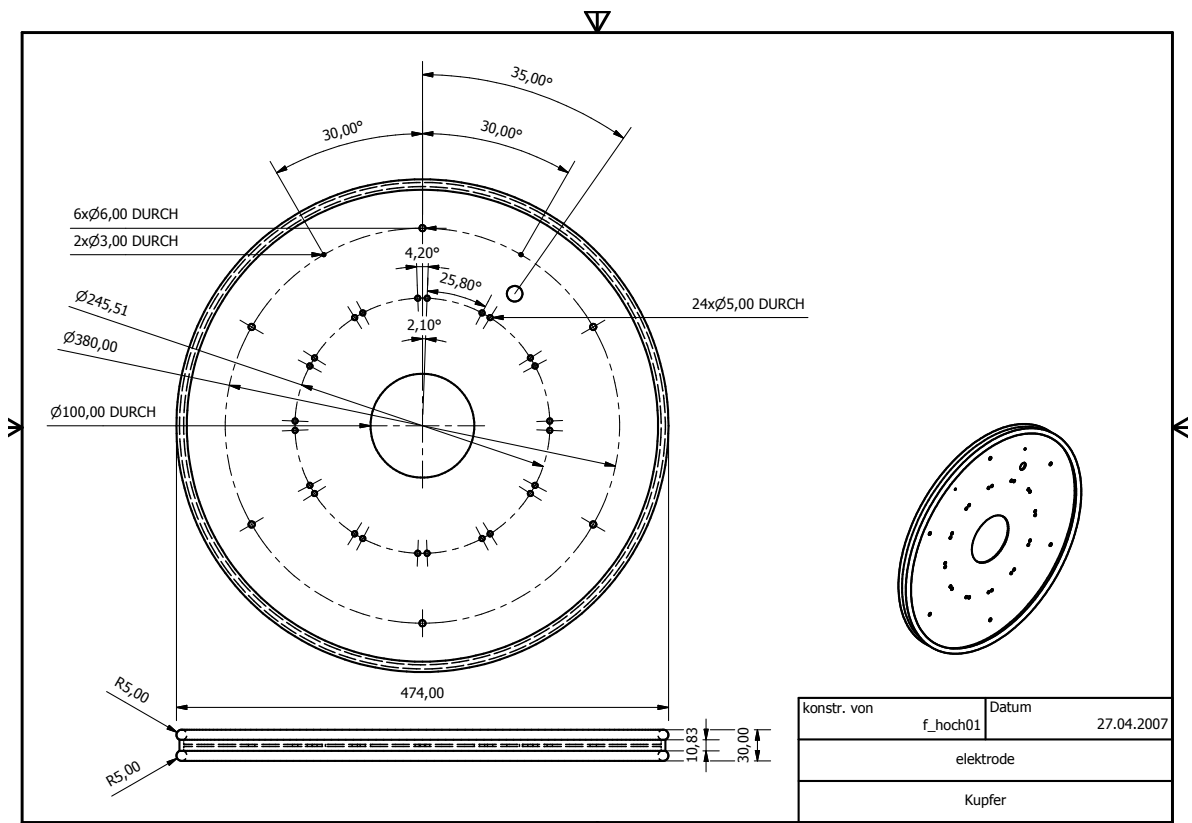


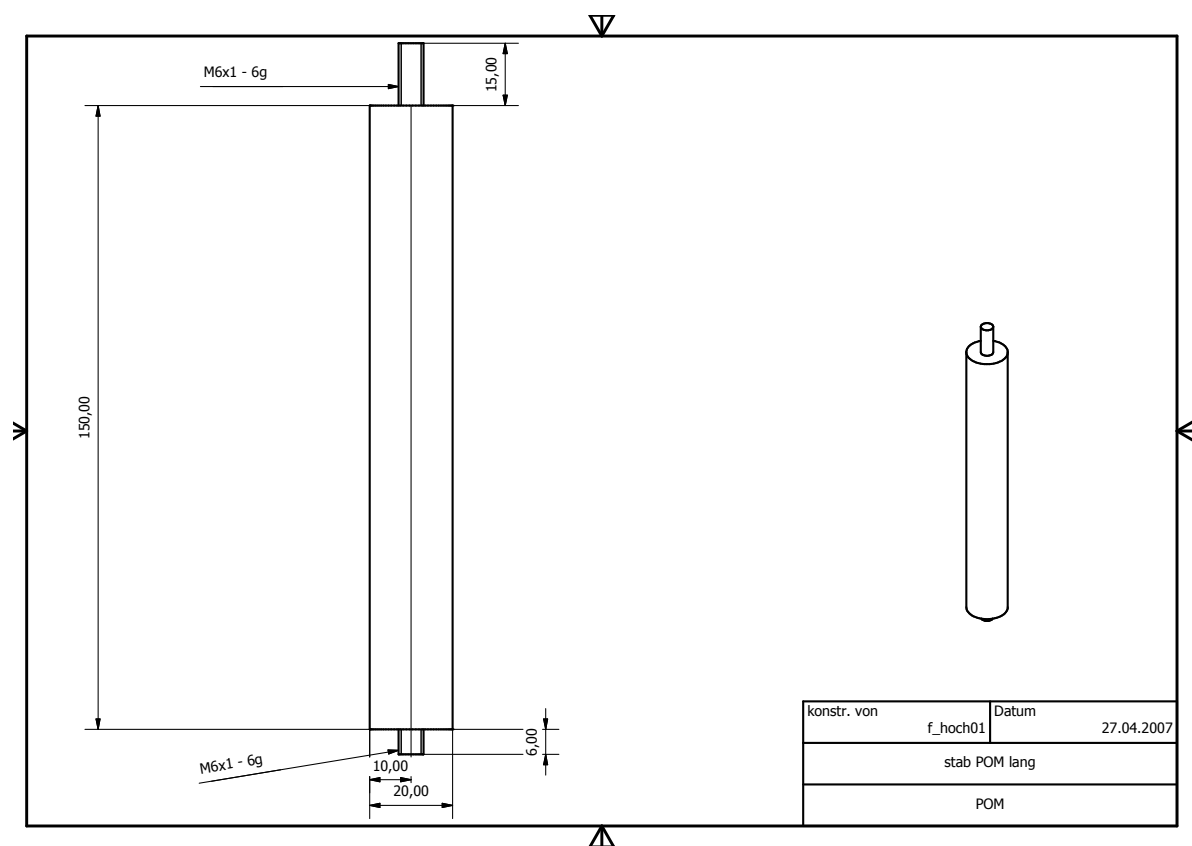
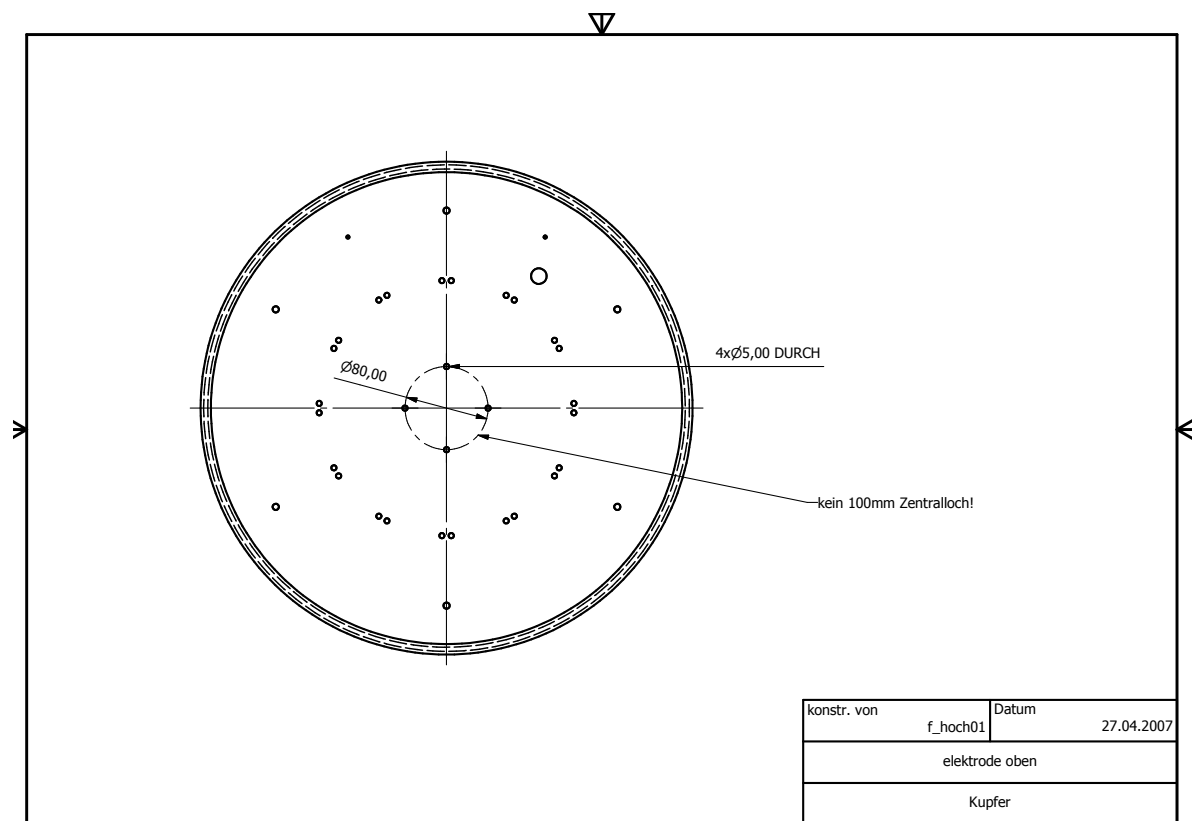
Teilleiste aller nicht kommerziellen Bauteile	
ANZAHL	BAUTEILNUMMER
1	boden neu
1	korpus neu
1	überwurf neu
5	elektrode
1	elektrode abgriff
1	elektrode oben
6	stab POM lang
36	stab POM
10	stab abgriff
2	stab abgriff 4
5	stab A
10	stab B
10	stab C
10	stab D
25	stab E
144	stäbchen
165	Tstueck
18	Kstueck
183	kugel
11	gewindestab
22	kappe
2	durchführung messingoben
9	durchführung teflonoben
2	durchführung messingunten
9	durchführung teflonunten
14	durchführung 2 oben
14	durchführung 2 unten
1	arretierung oben
1	arretierung unten
1	tunnelrohr
1	halterung ausgleichsbehälter
2	halterung wärmetauscher außen
1	halterungsplatte 1
1	kontakt oben

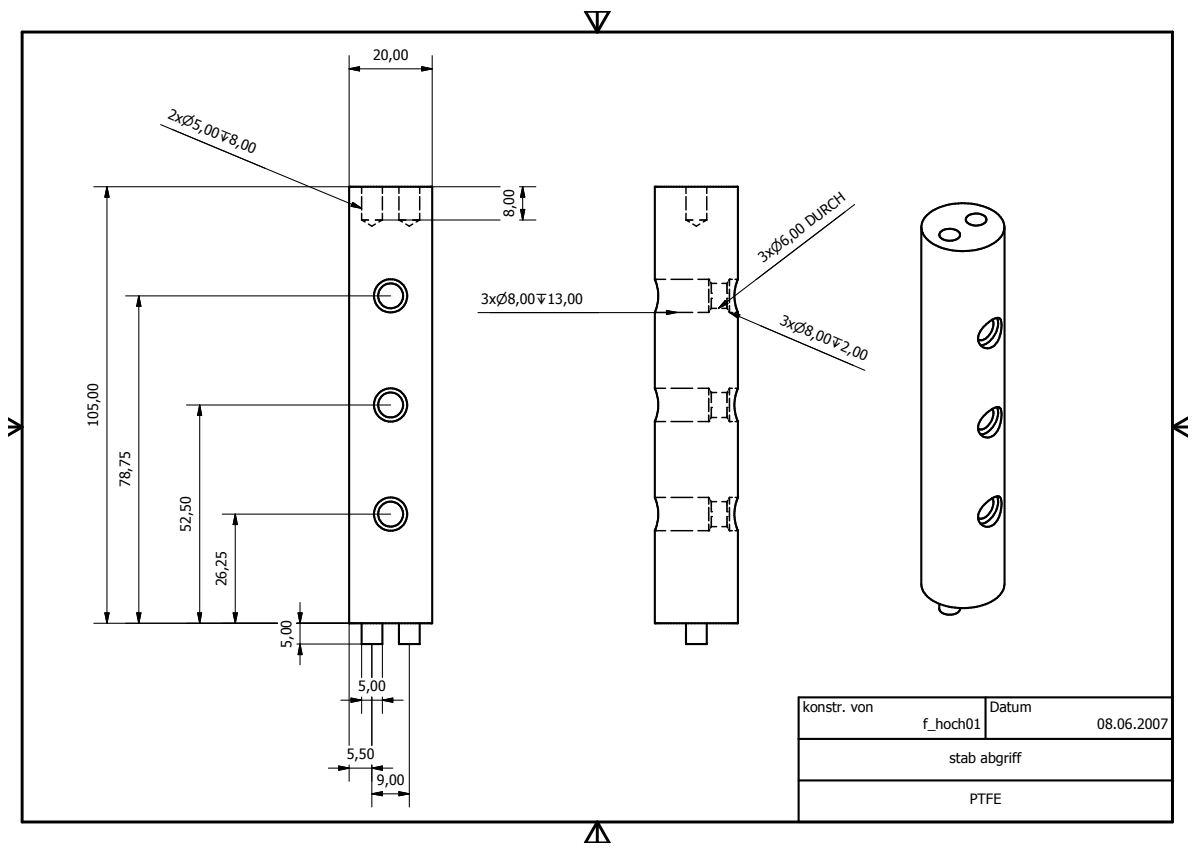
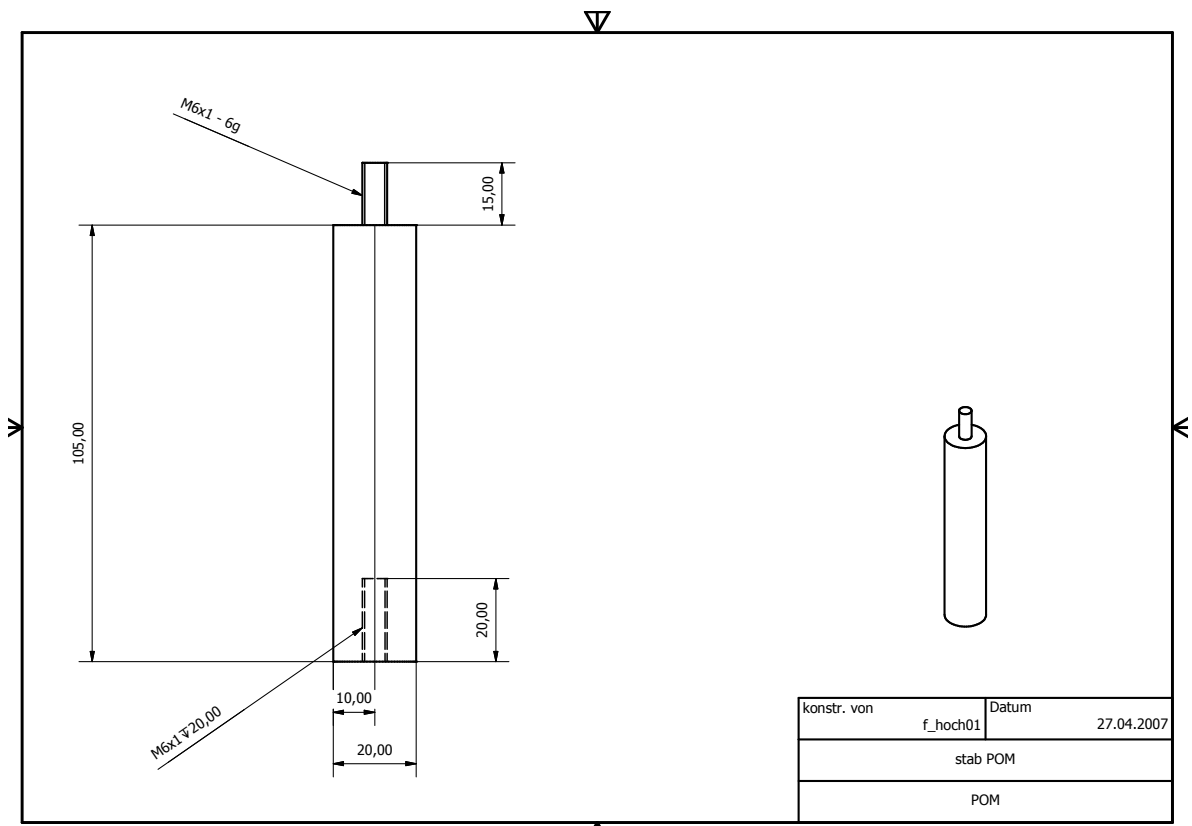
Teilleiste aller kommerzieller Bauteile	
ANZAHL	BAUTEILNUMMER
6	vishay 121k
4	vishay 1,2M
5	sek. Widerstand
5	tert. Kondensator
1	pumpe
2	p&c 1.8in gerade
2	p&c 1.8in winkel
1	wärmetauscher aussen
1	papst 8412NH Lüfter
1	wärmetauscher innen
2	p&c 1.4in winkel
3	p&c p&c winkel
1	pumpen platine
1	netzteil
1	ausgleichsbehälter
174	vishay 880k
1	12V Steckdose
1	kontakt oben

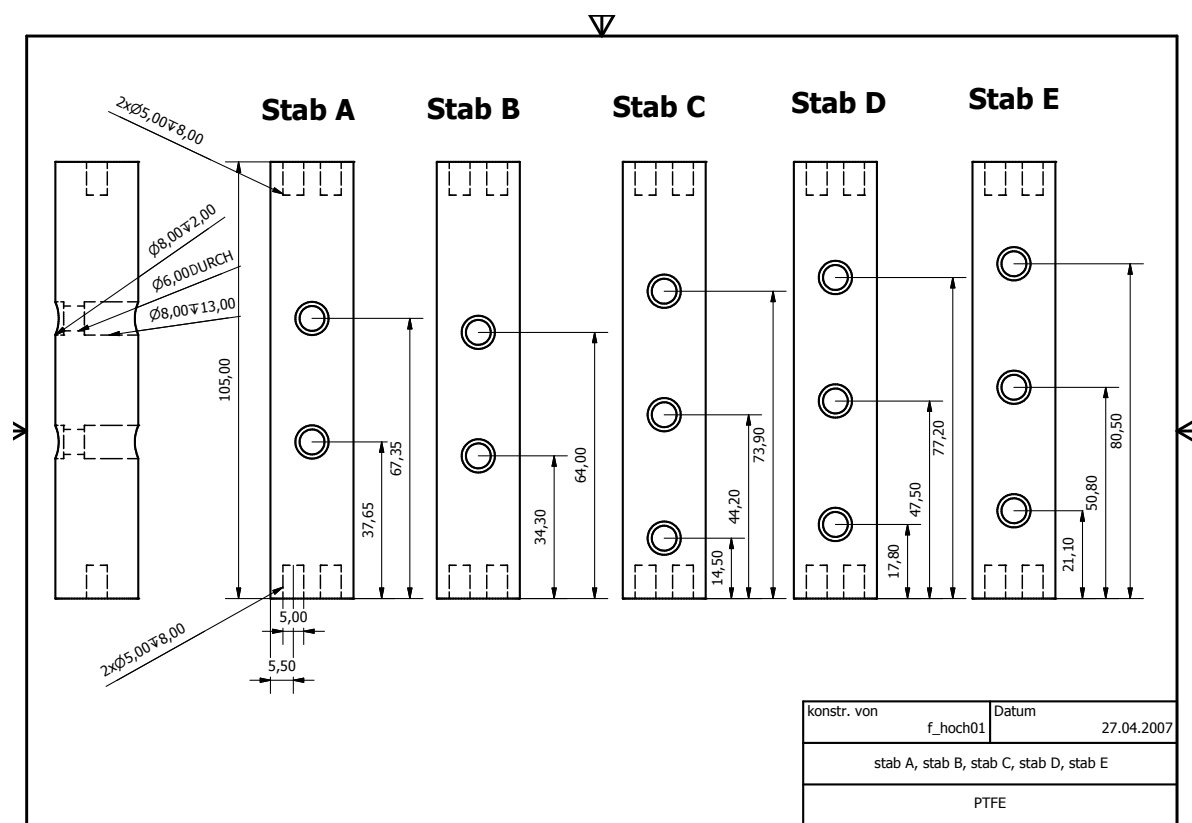
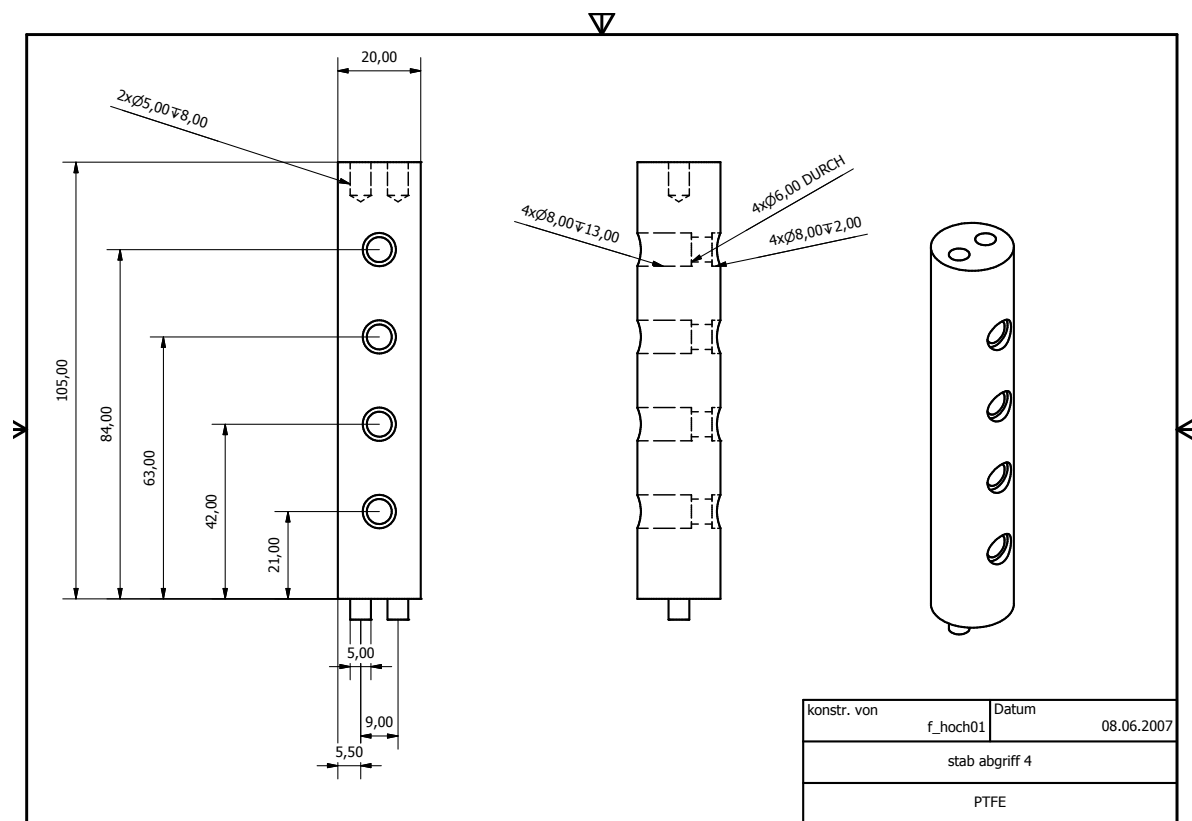




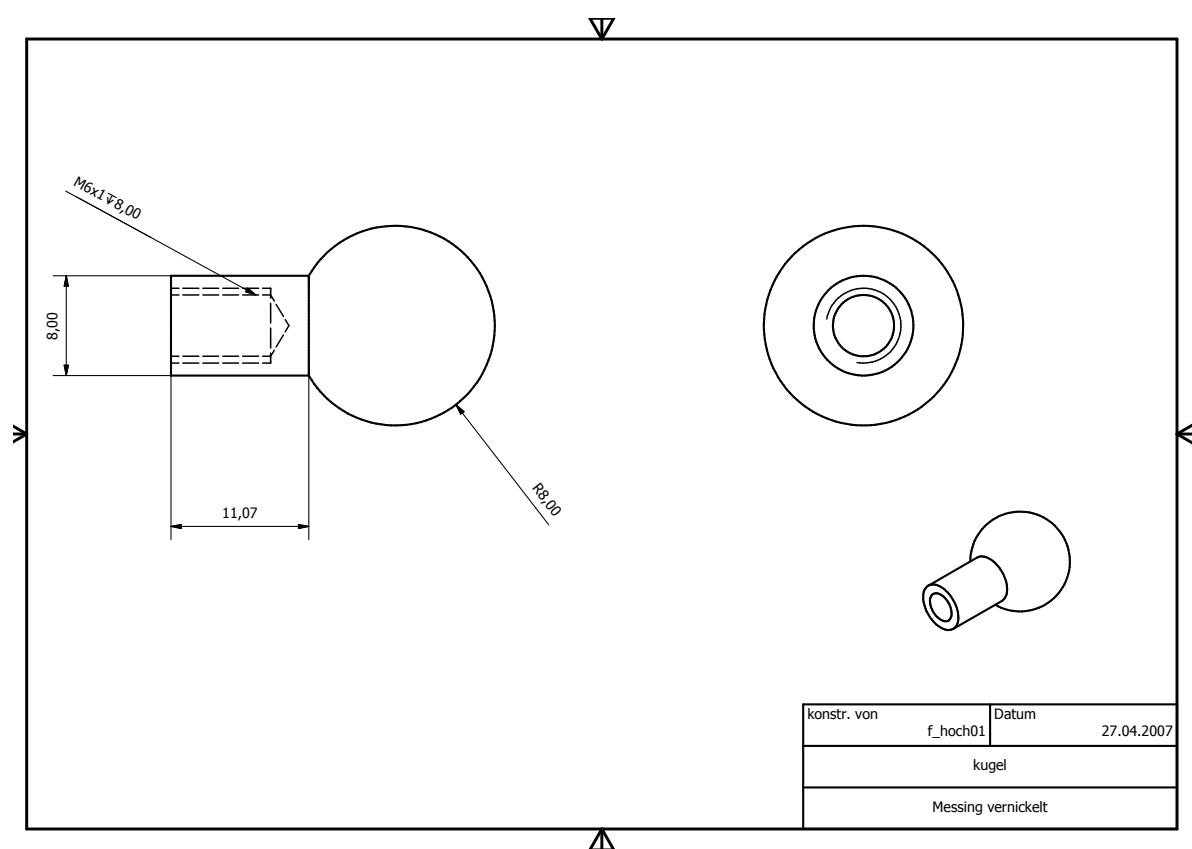
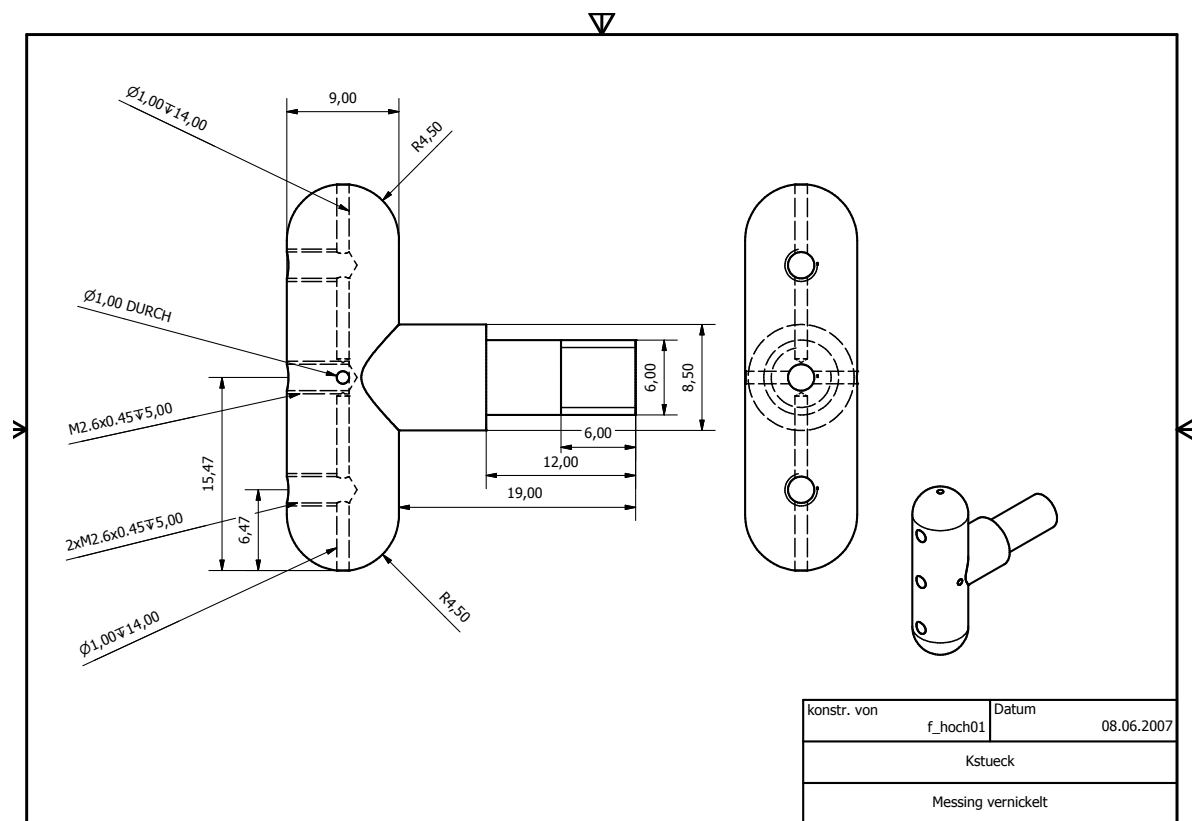


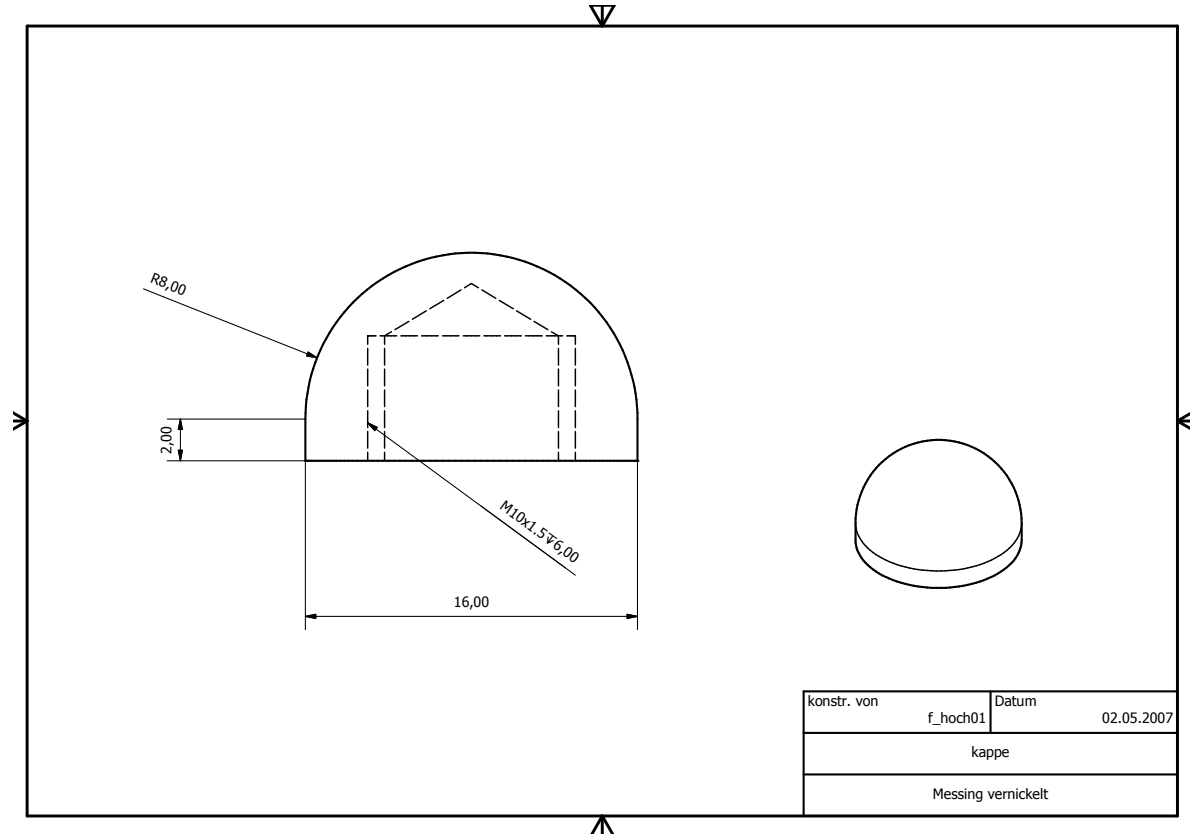
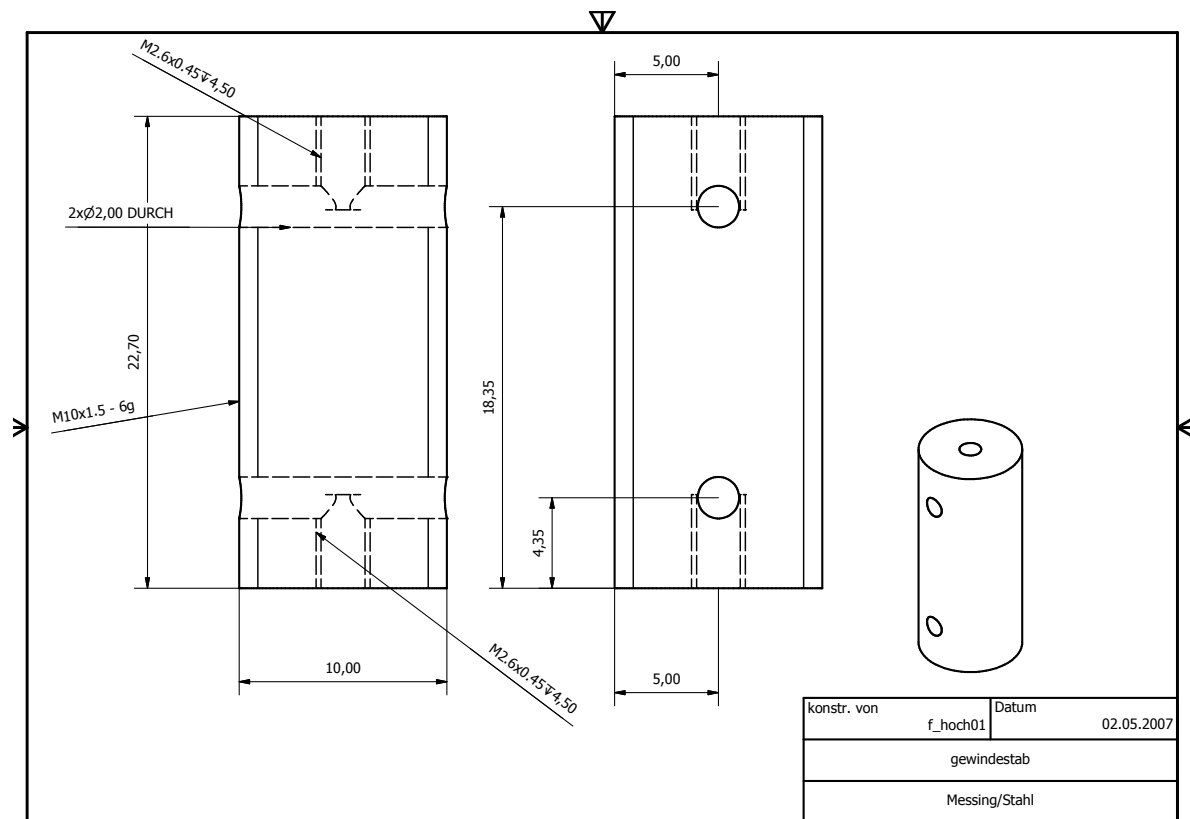


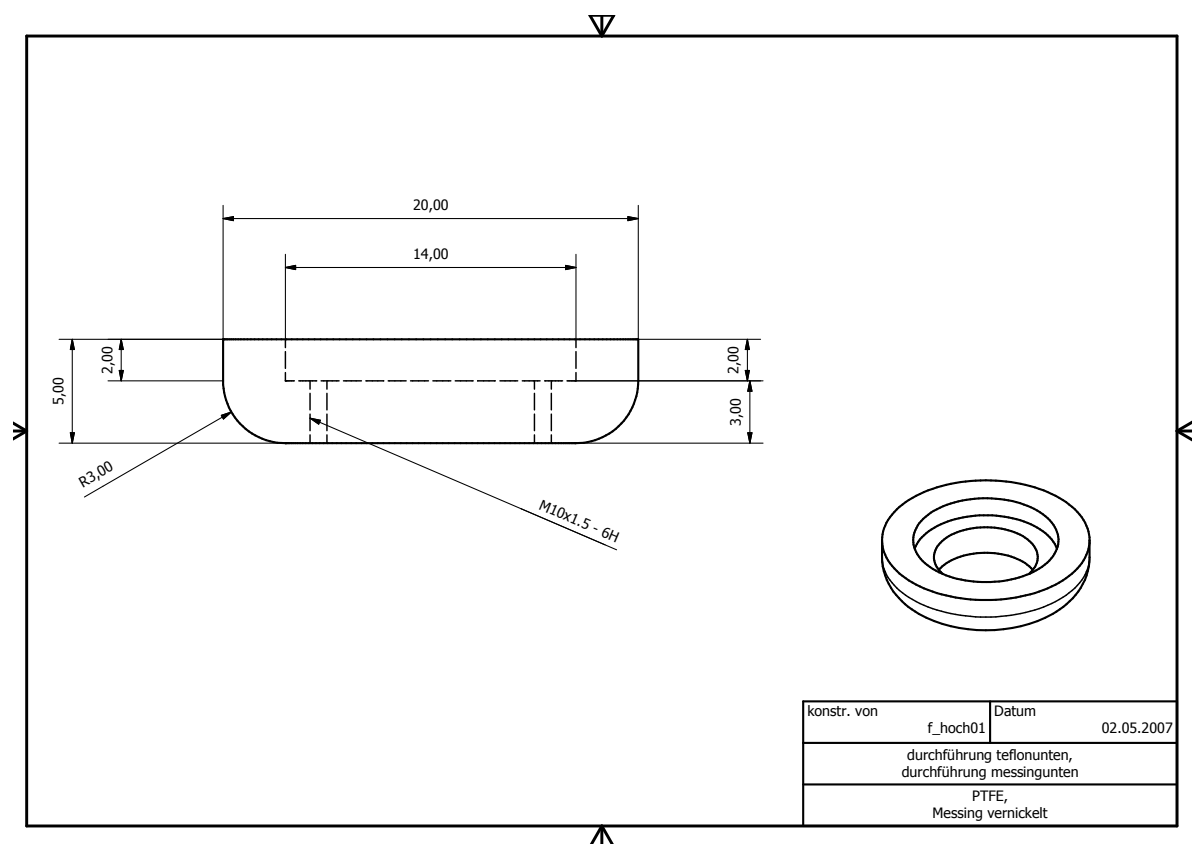
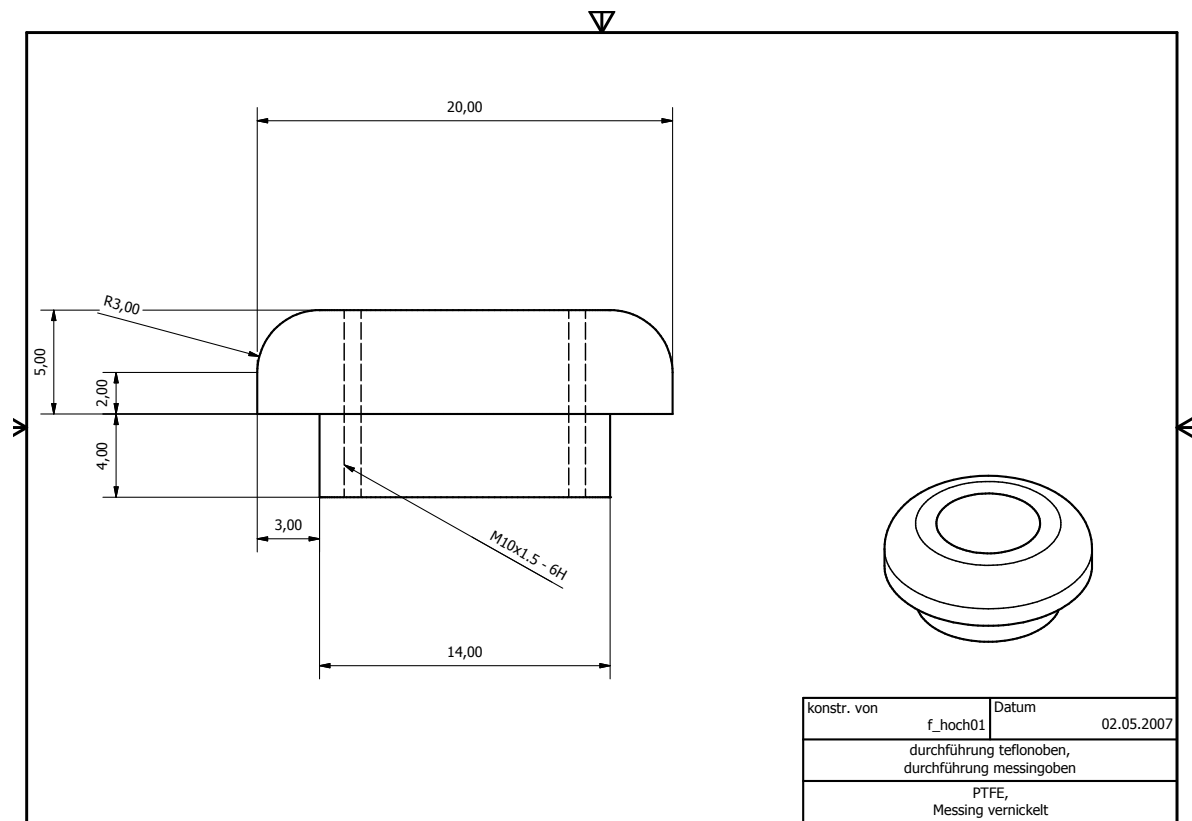




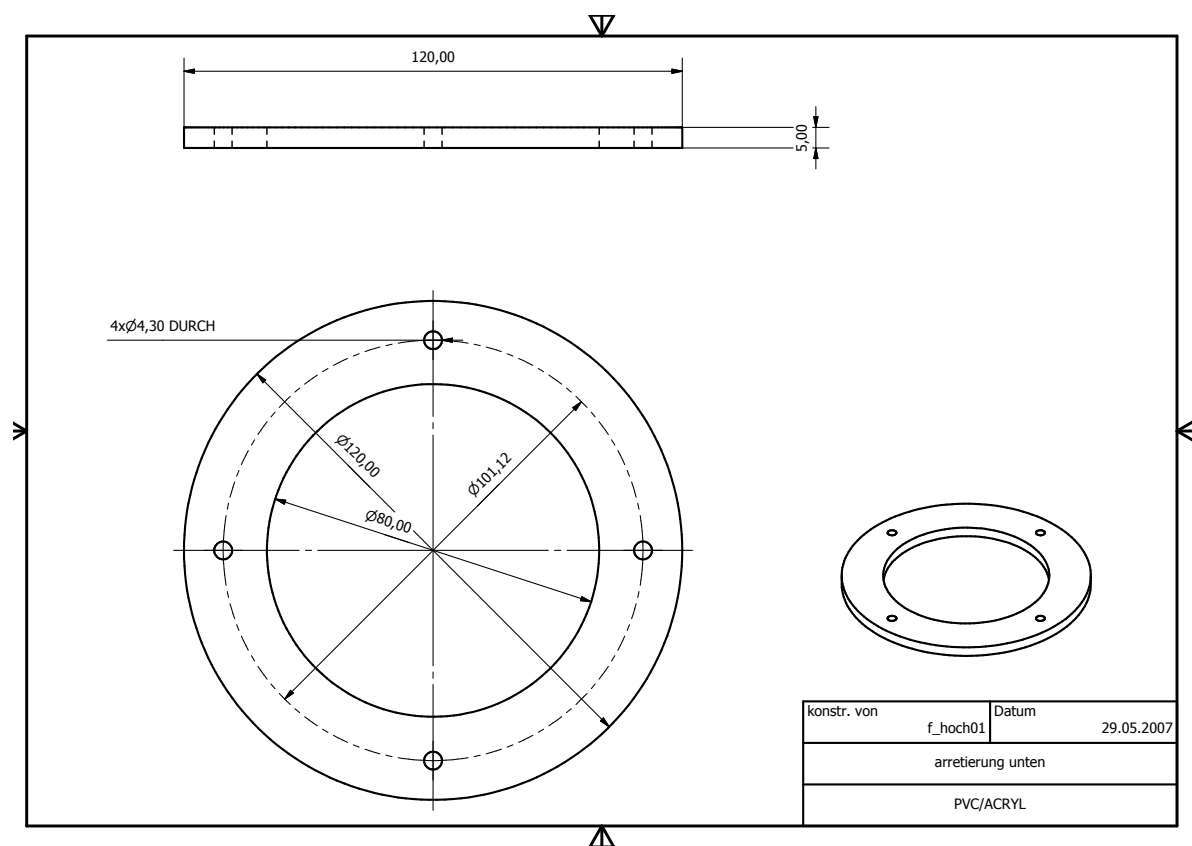
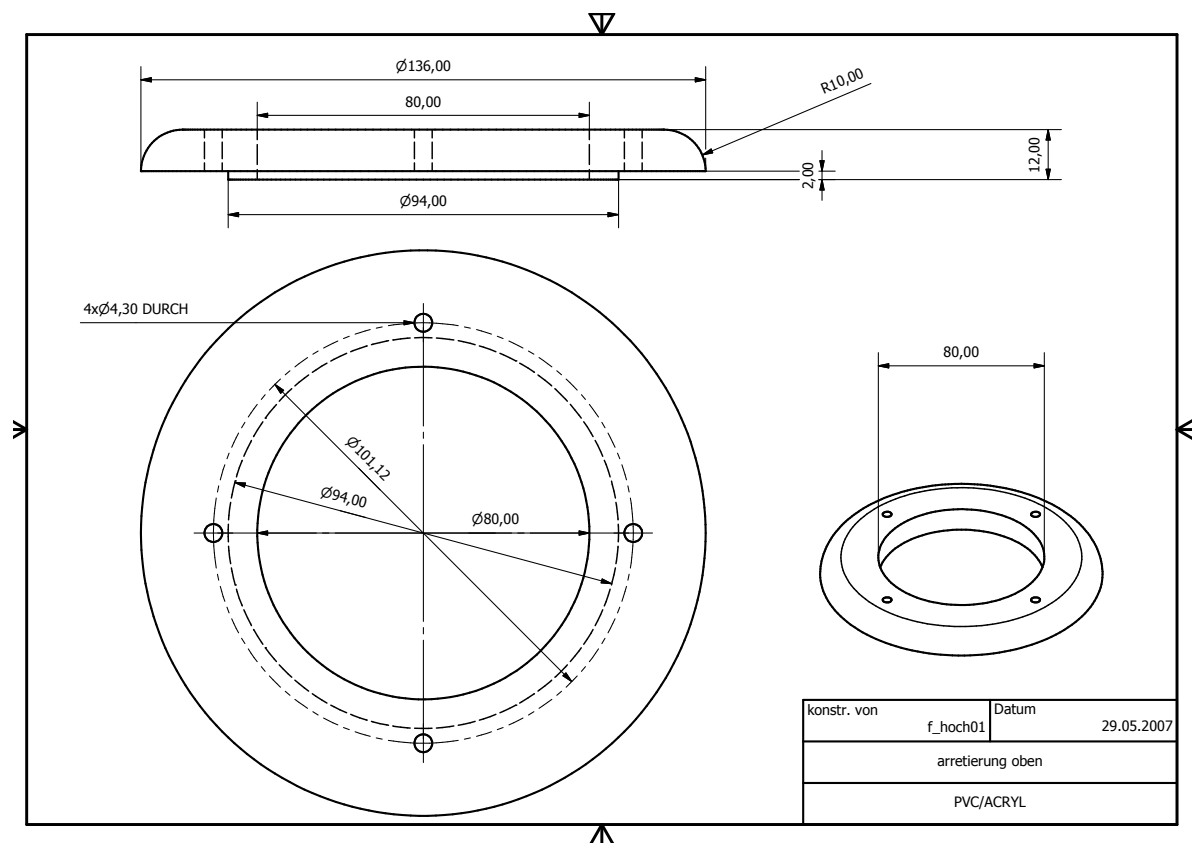


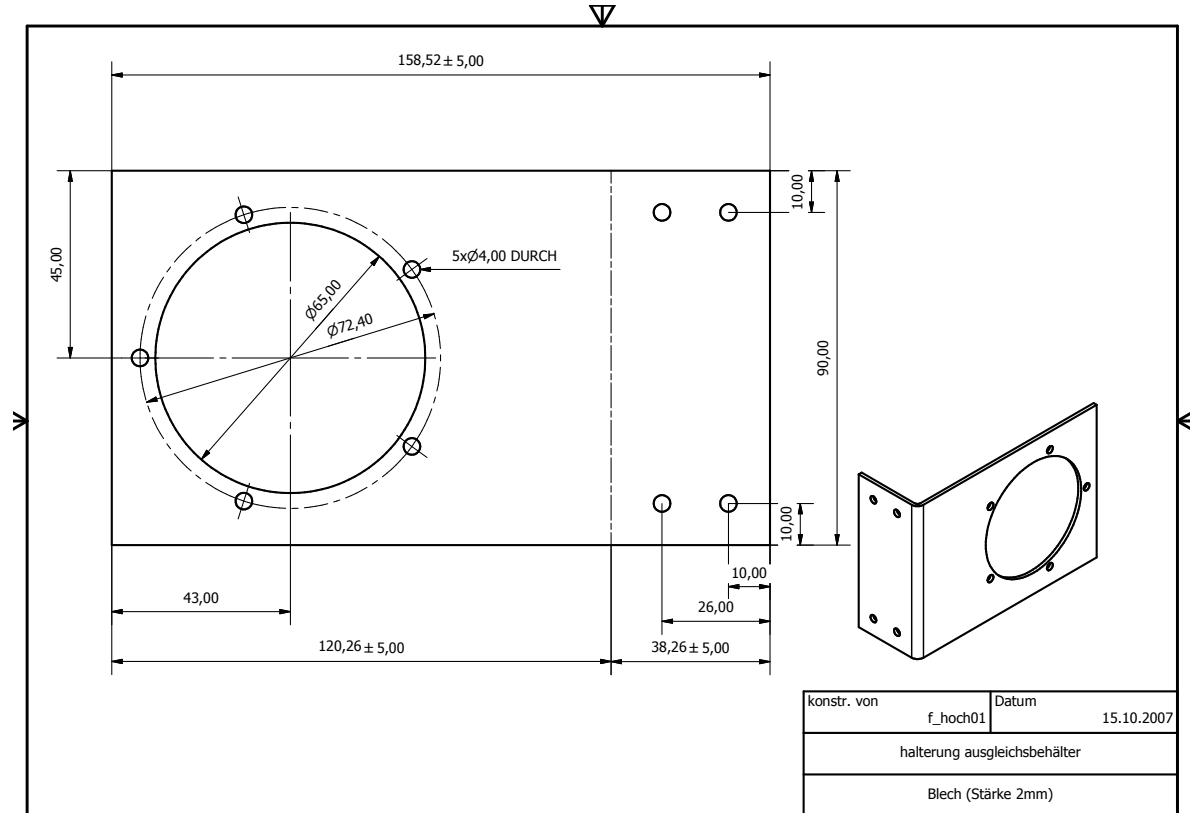
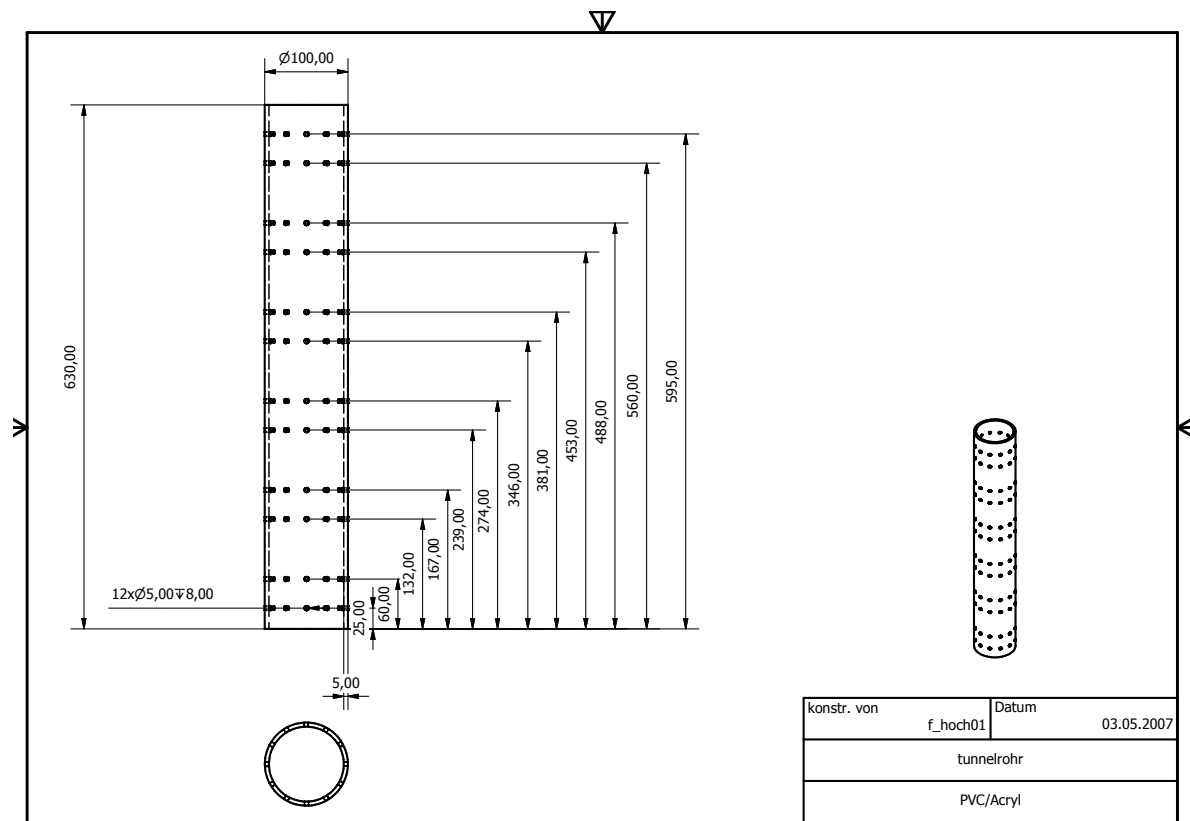


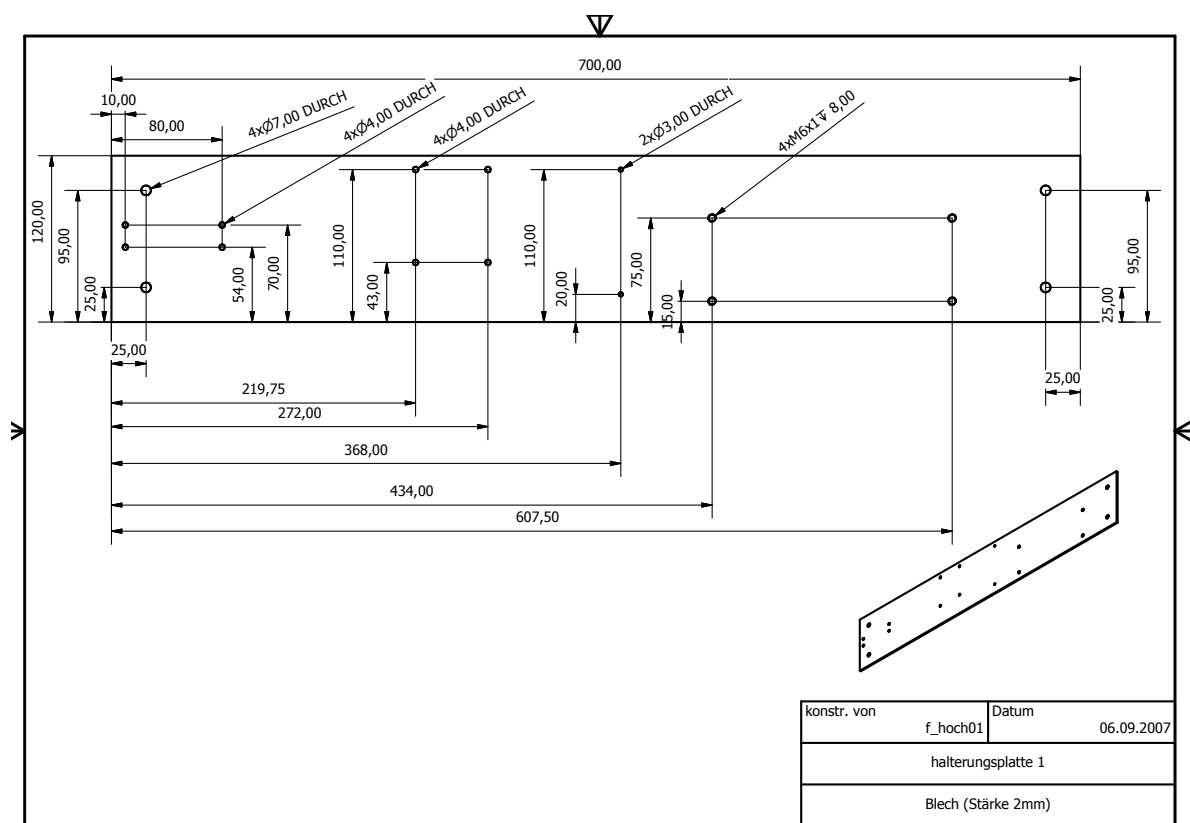
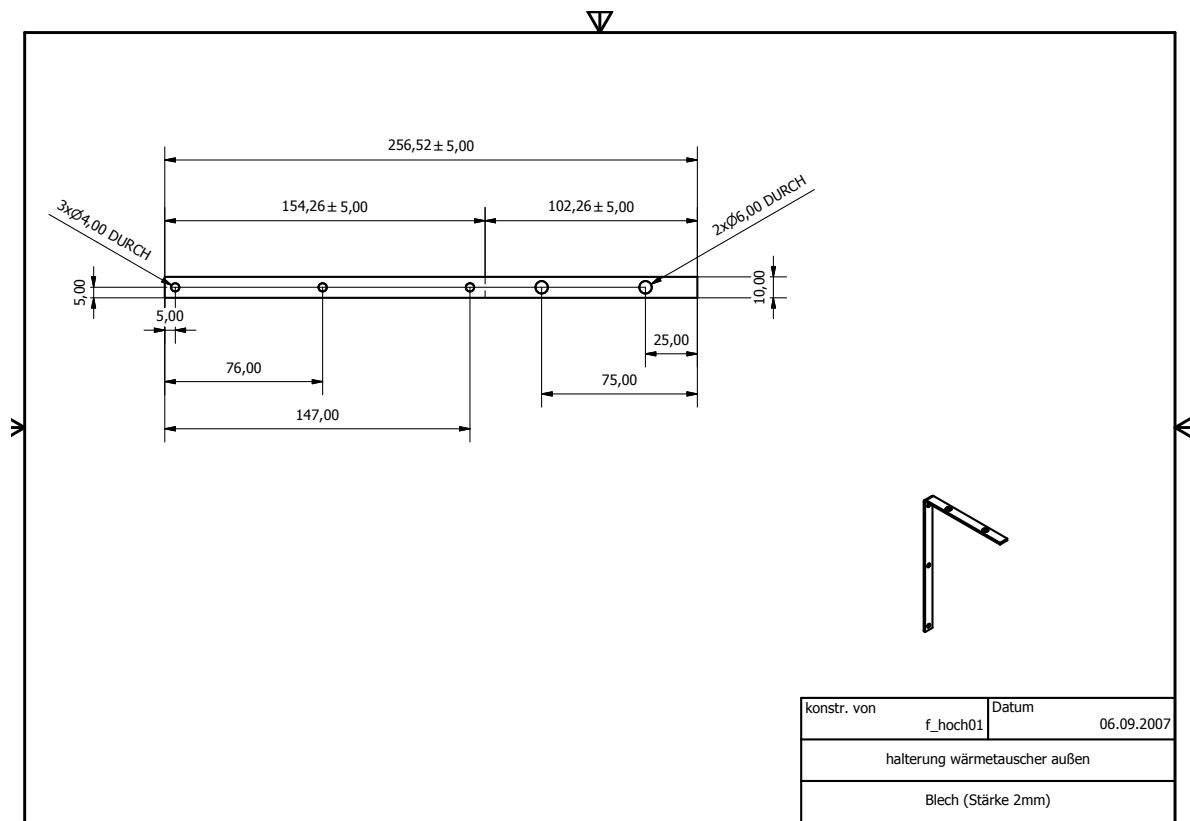


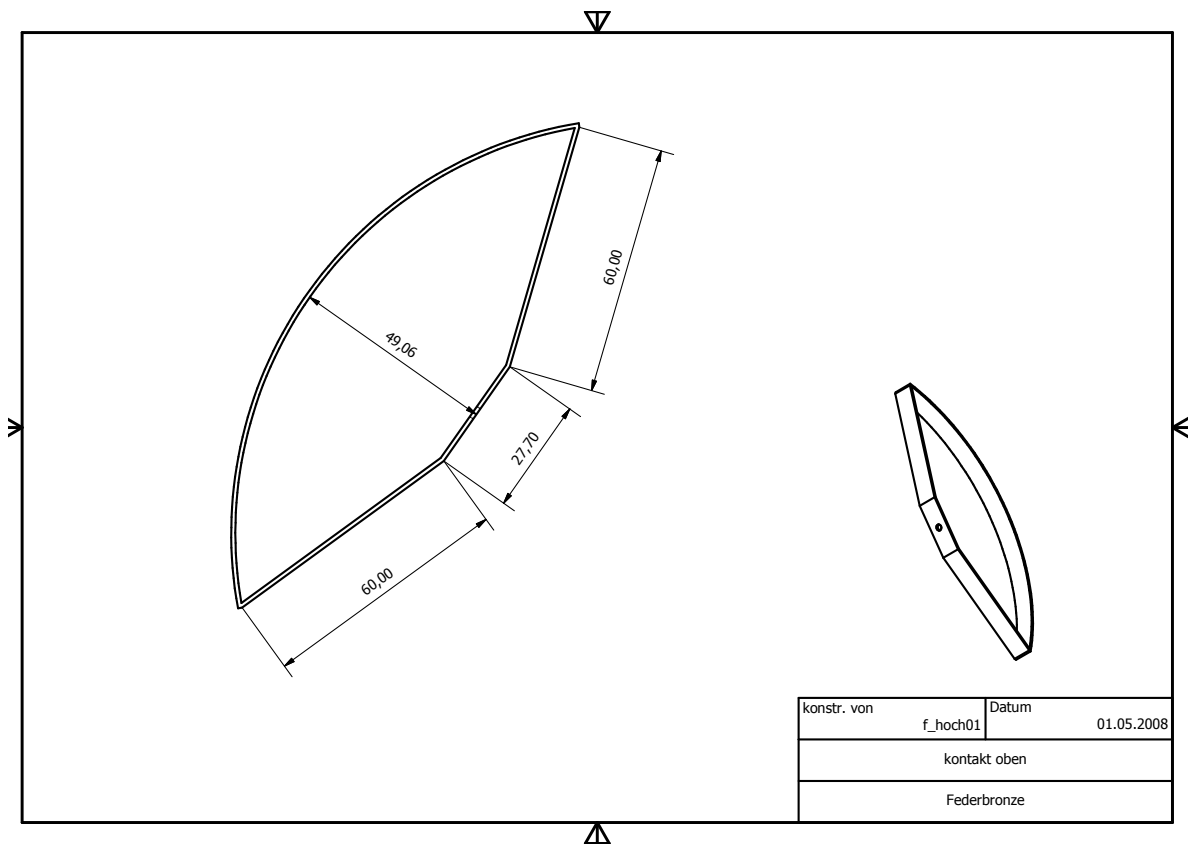








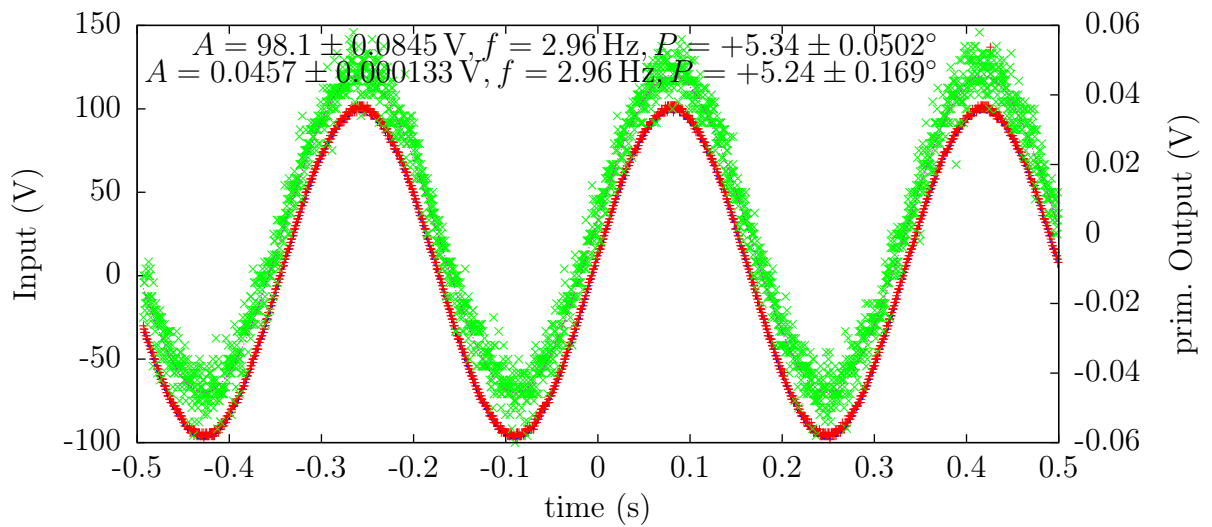
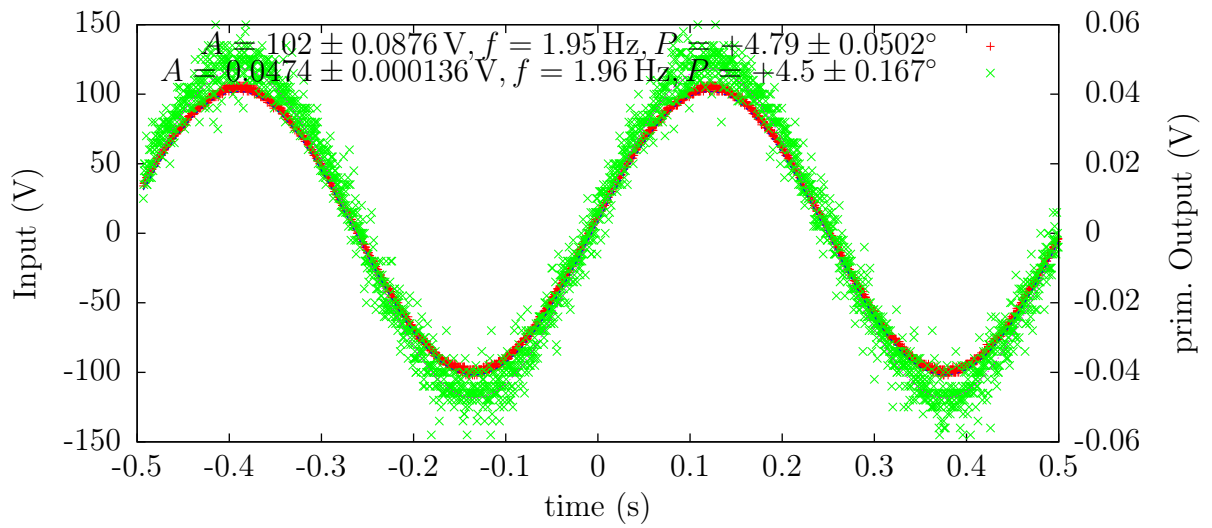
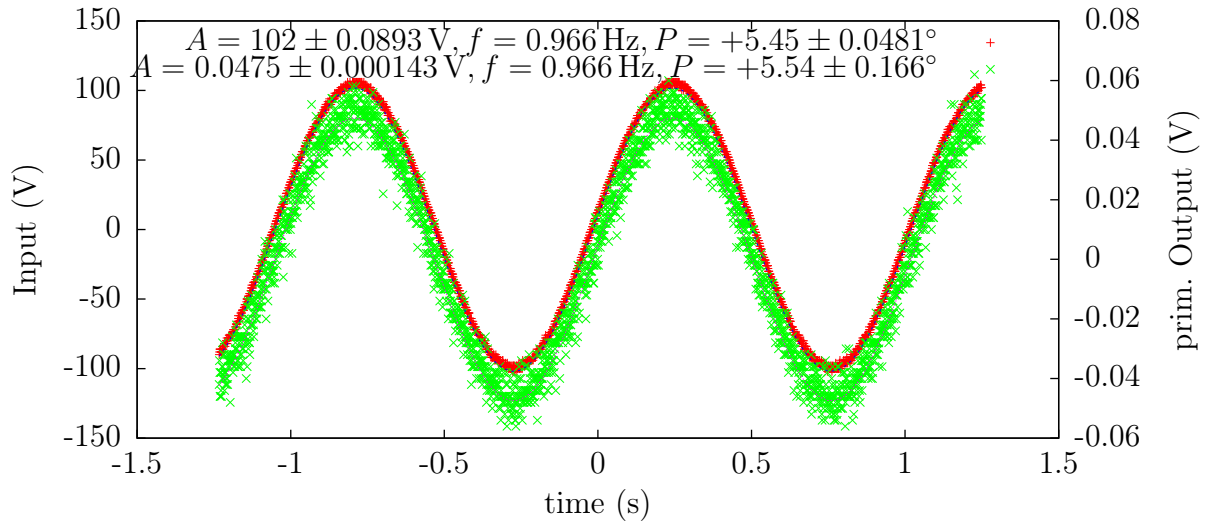


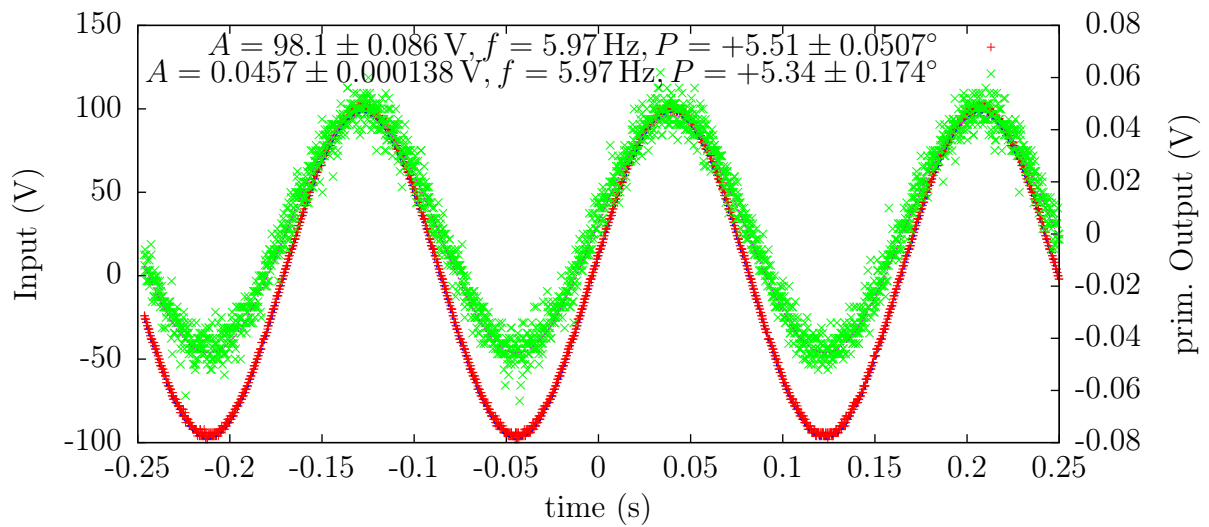
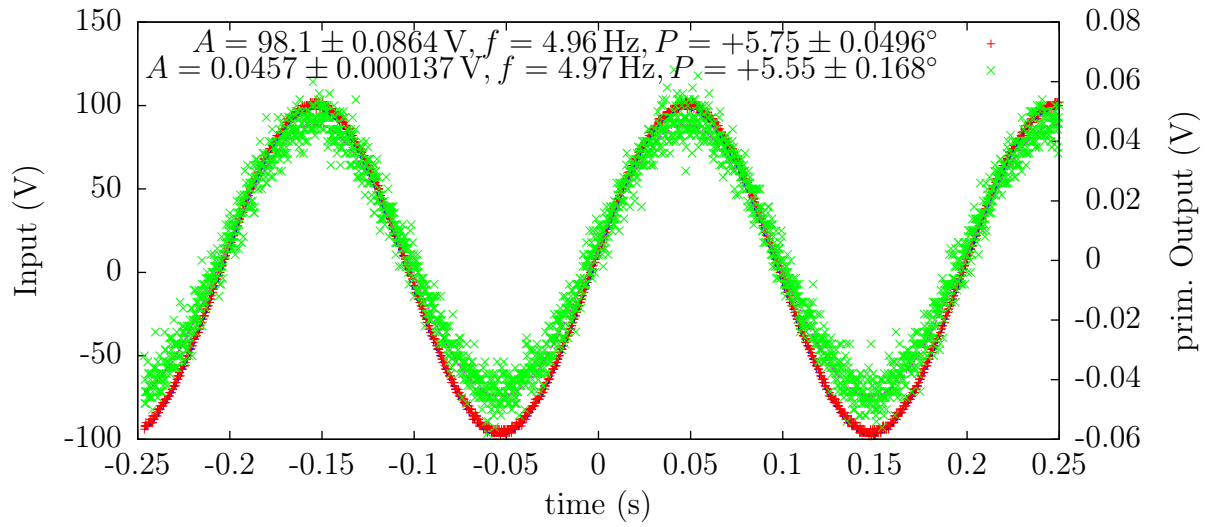
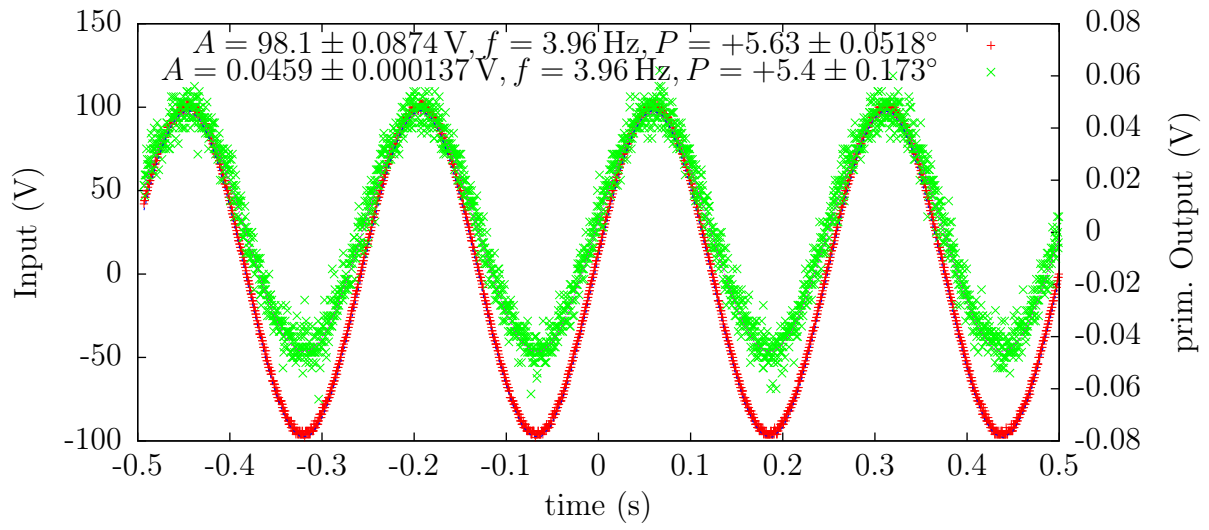


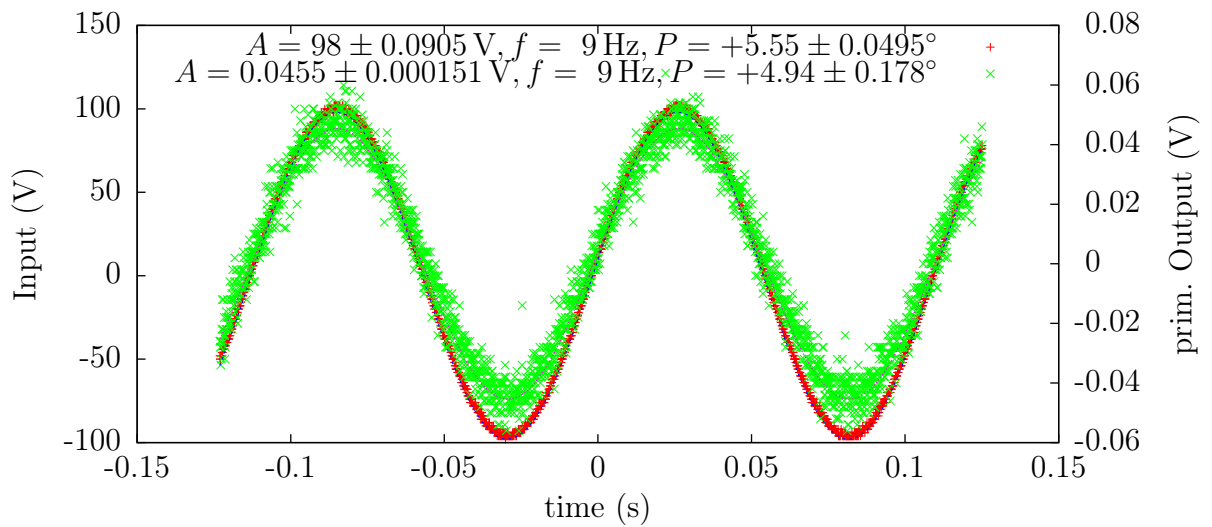
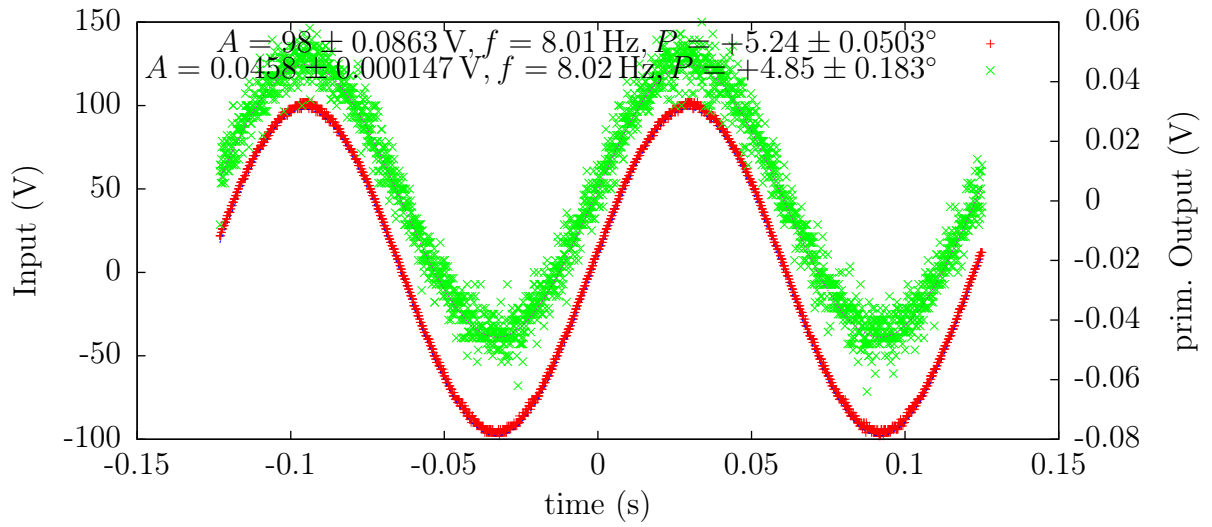
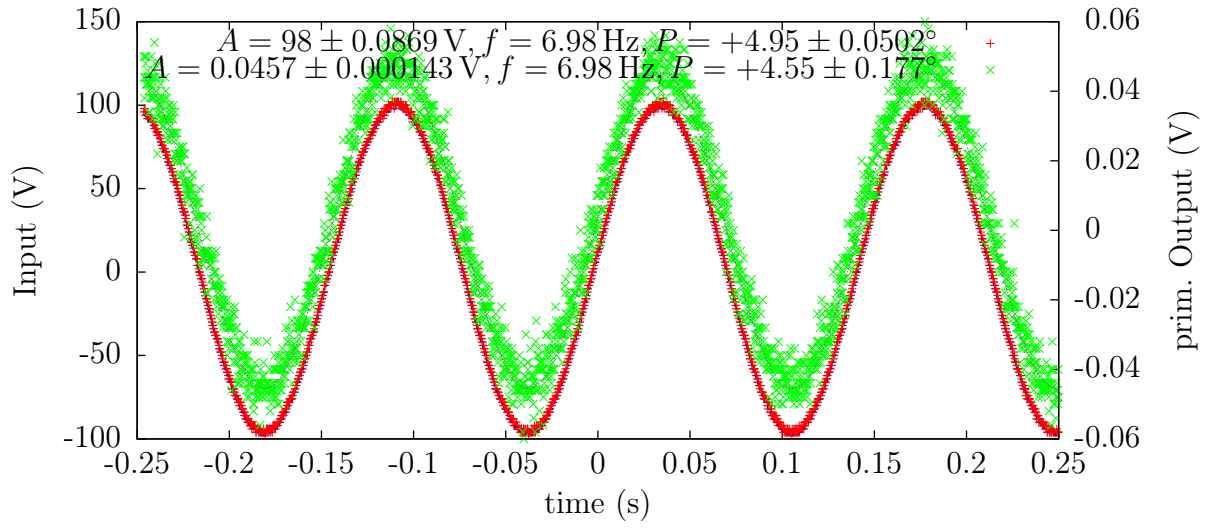
ANHANG C

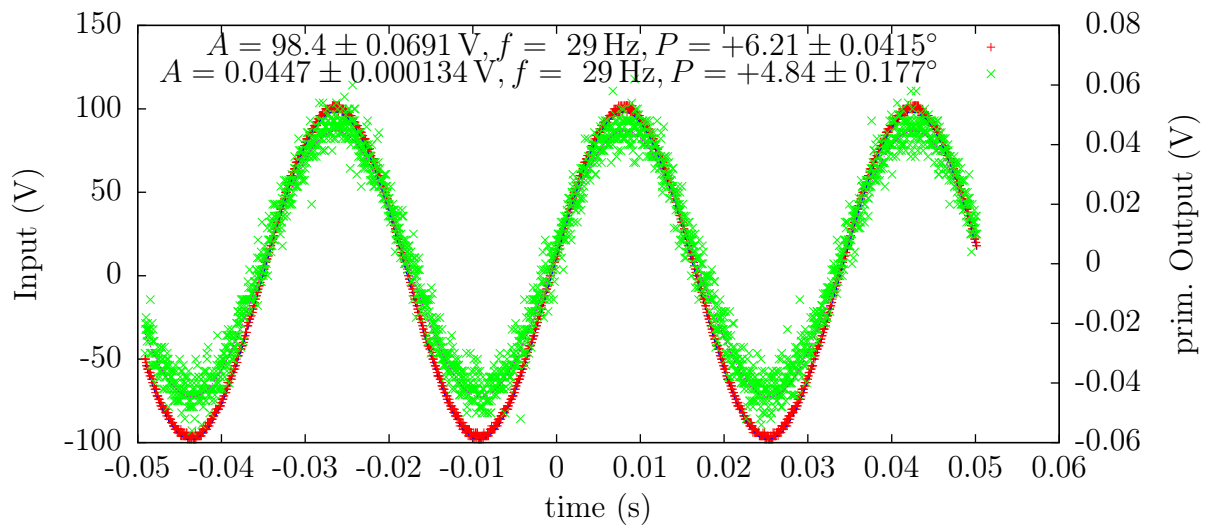
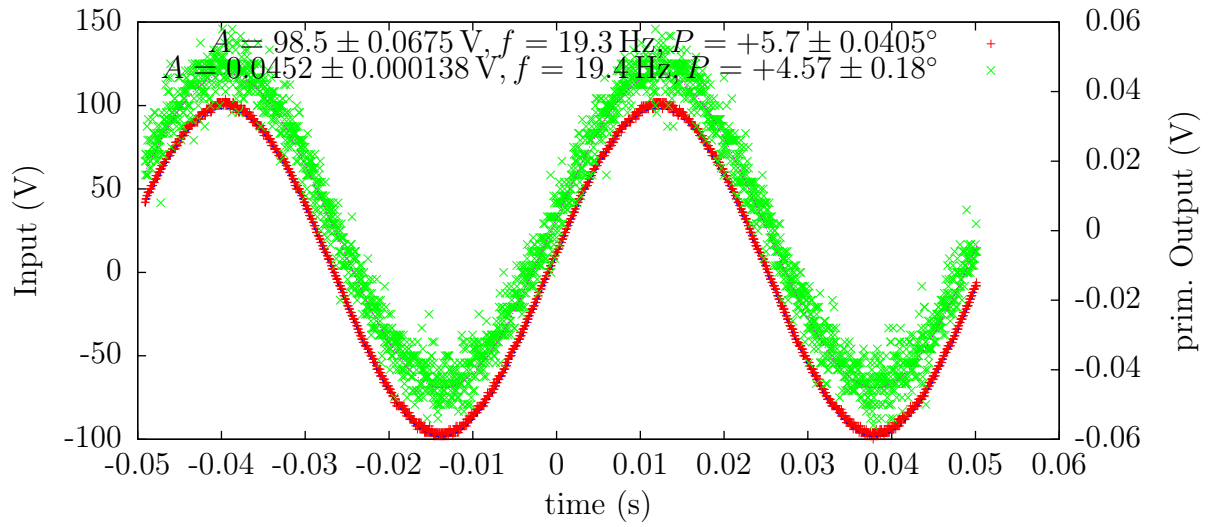
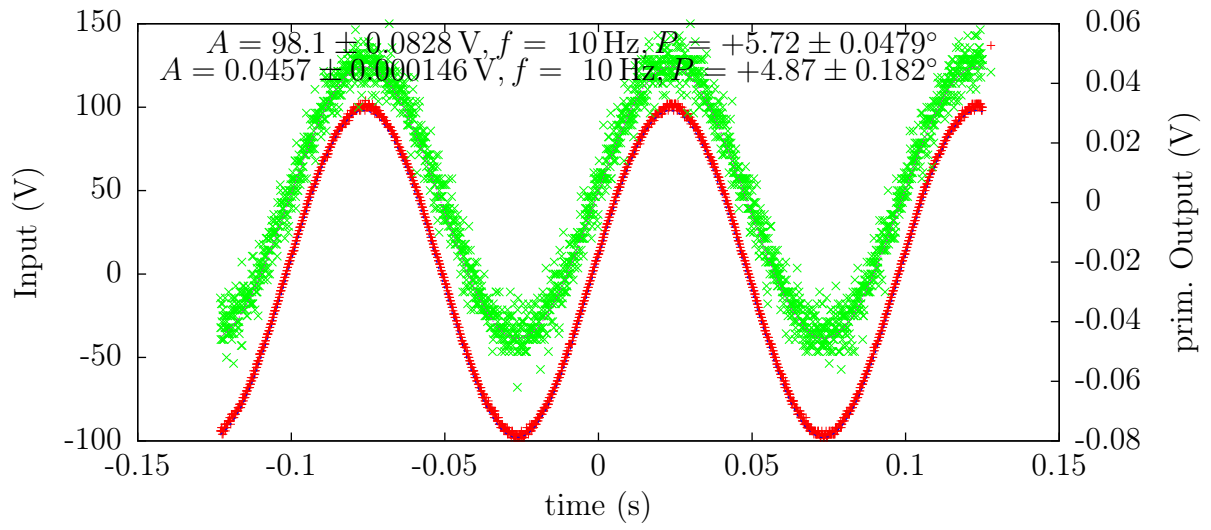
AC MESSUNG

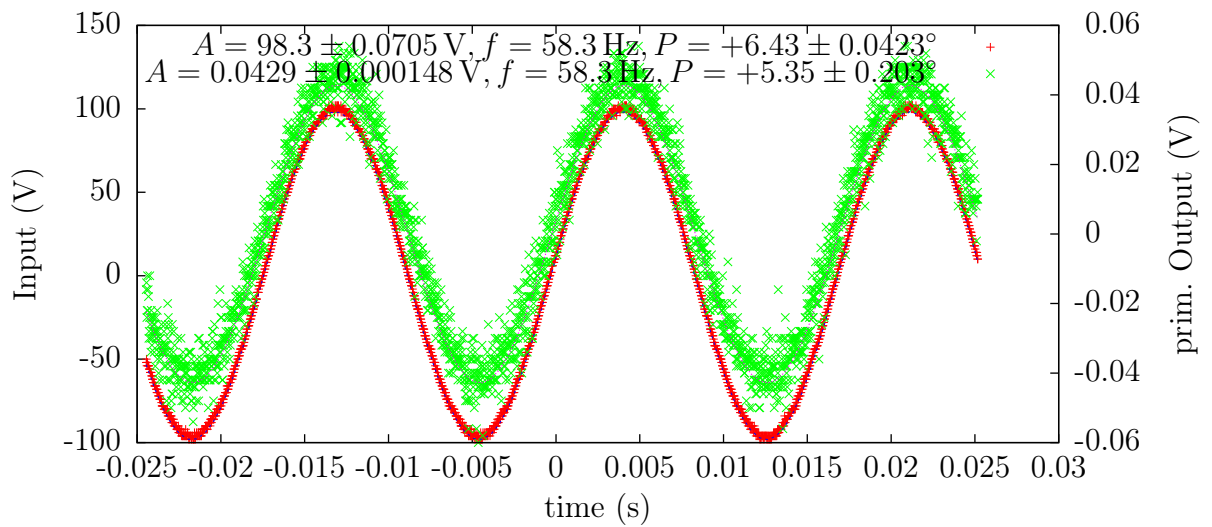
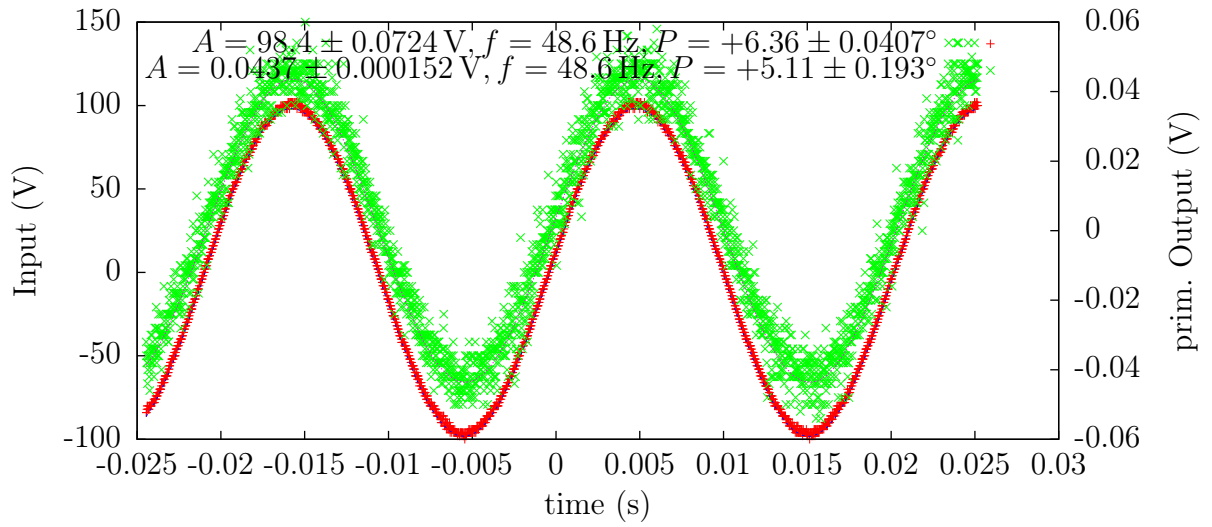
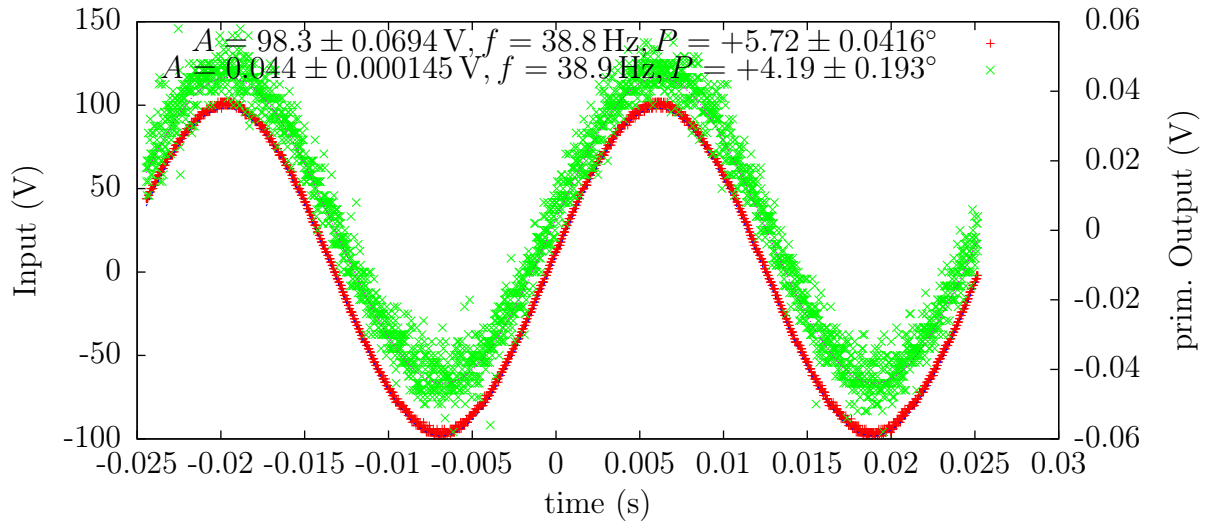
C.1. Primärer Abgriff

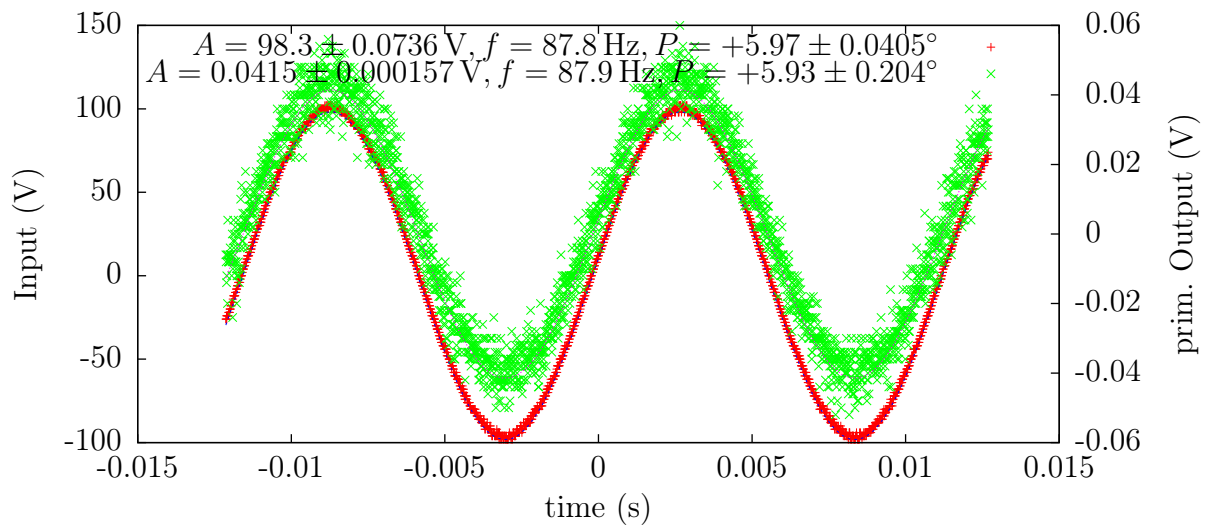
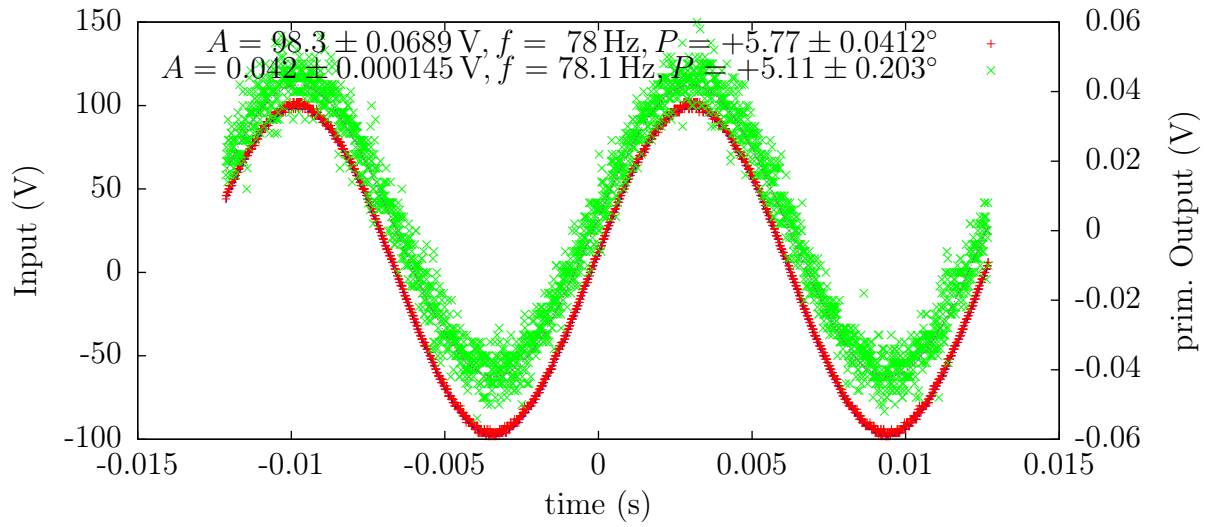
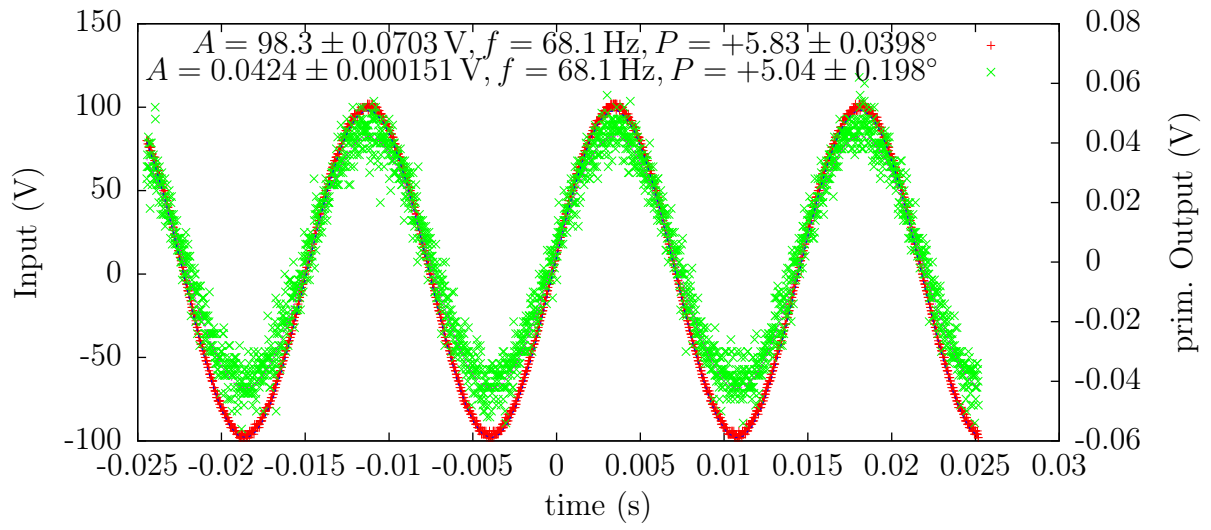


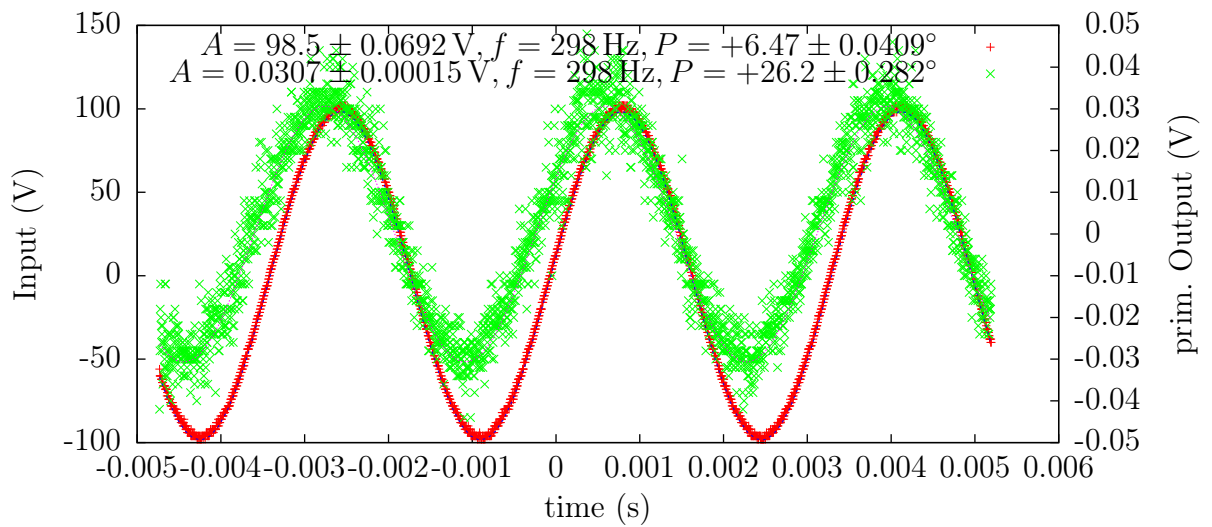
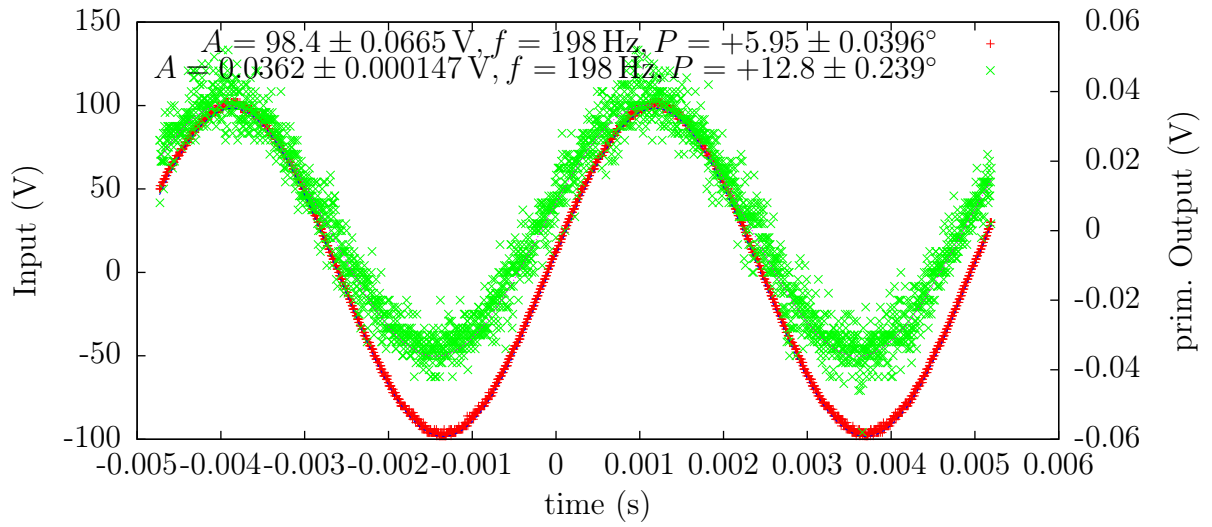
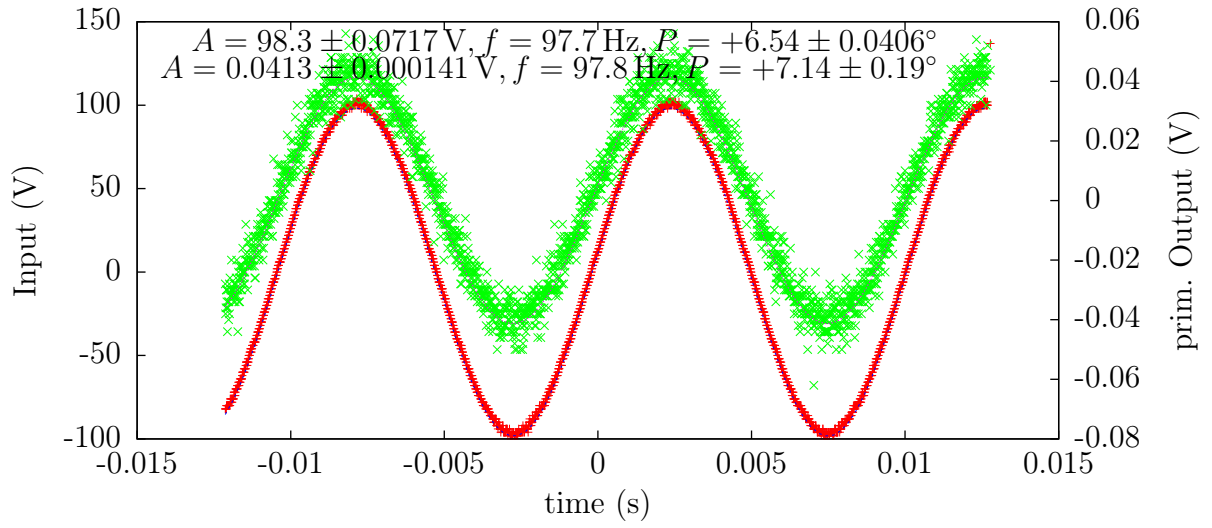


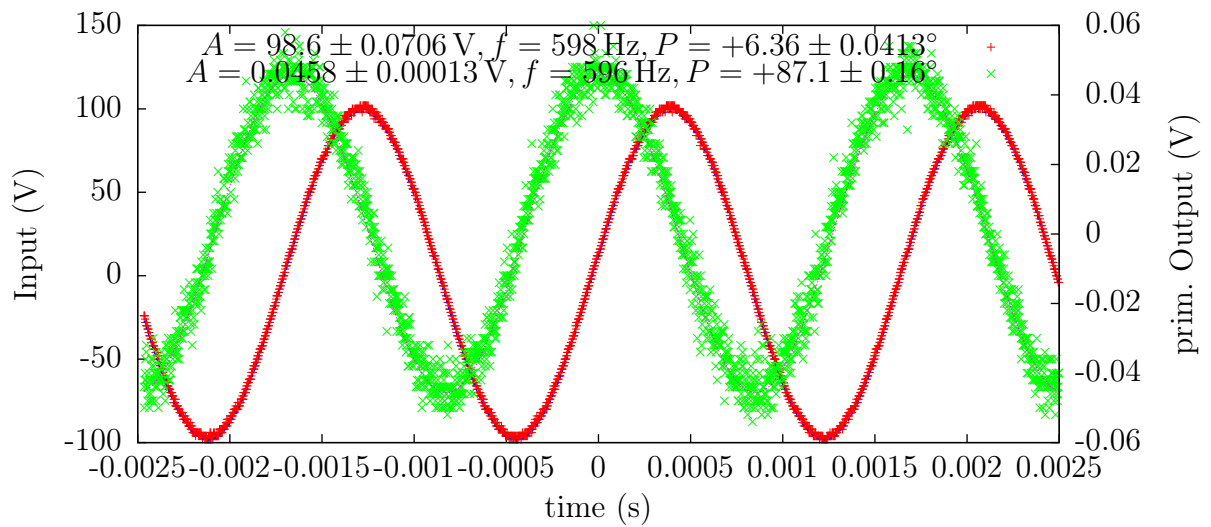
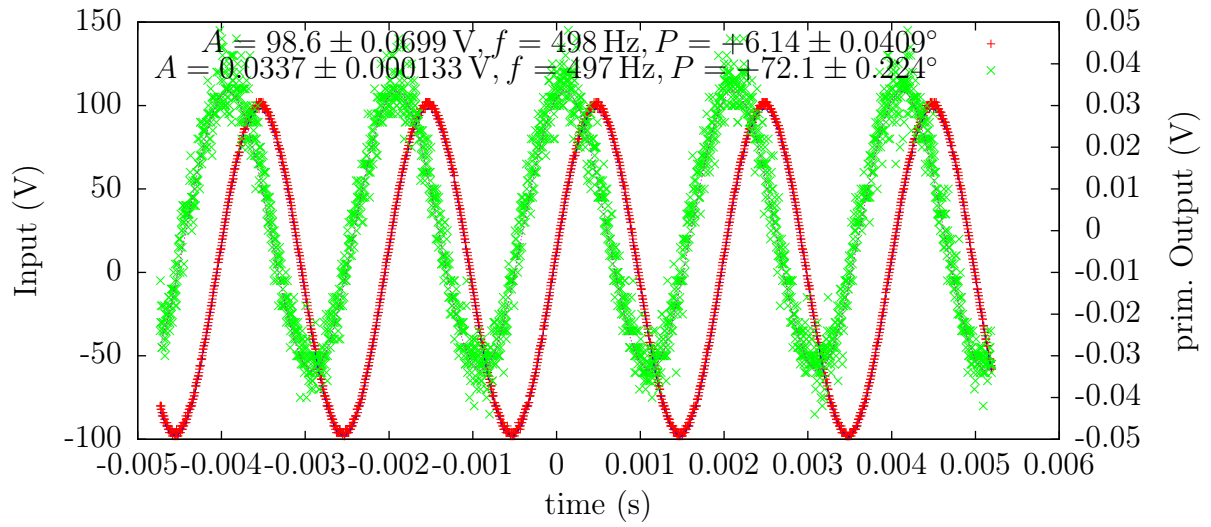
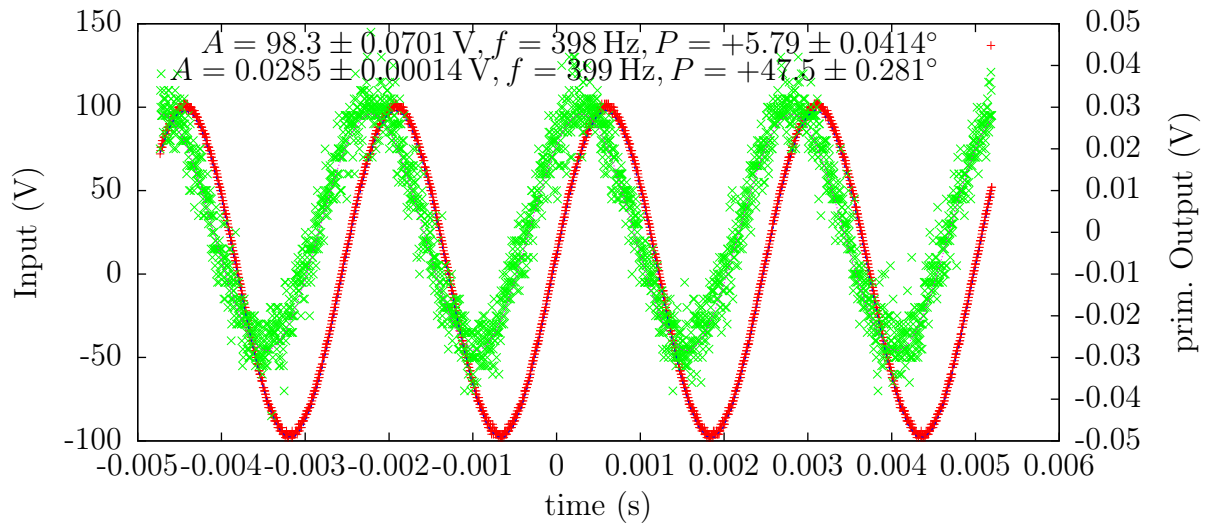


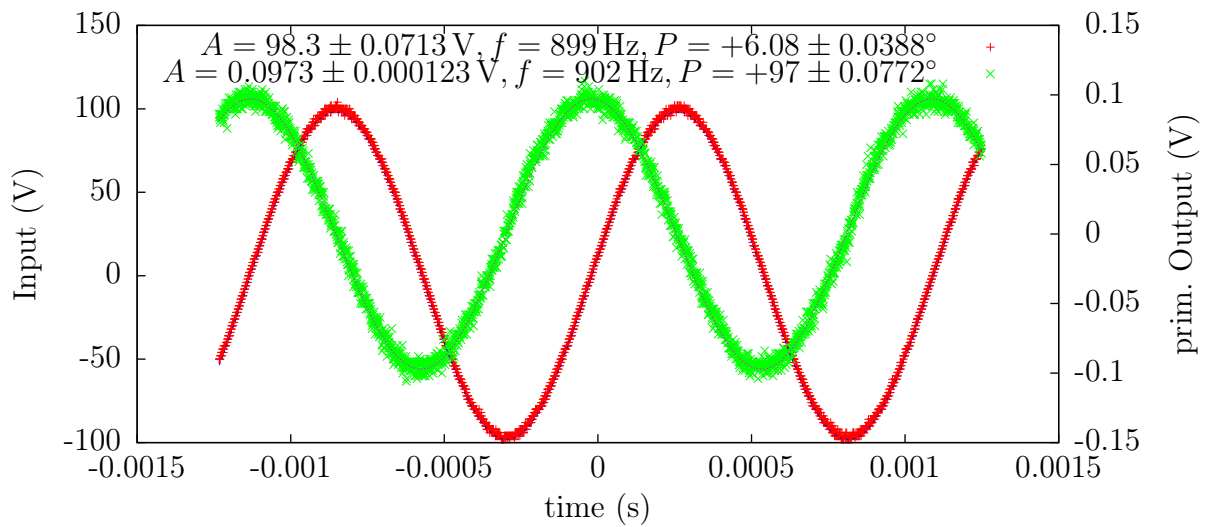
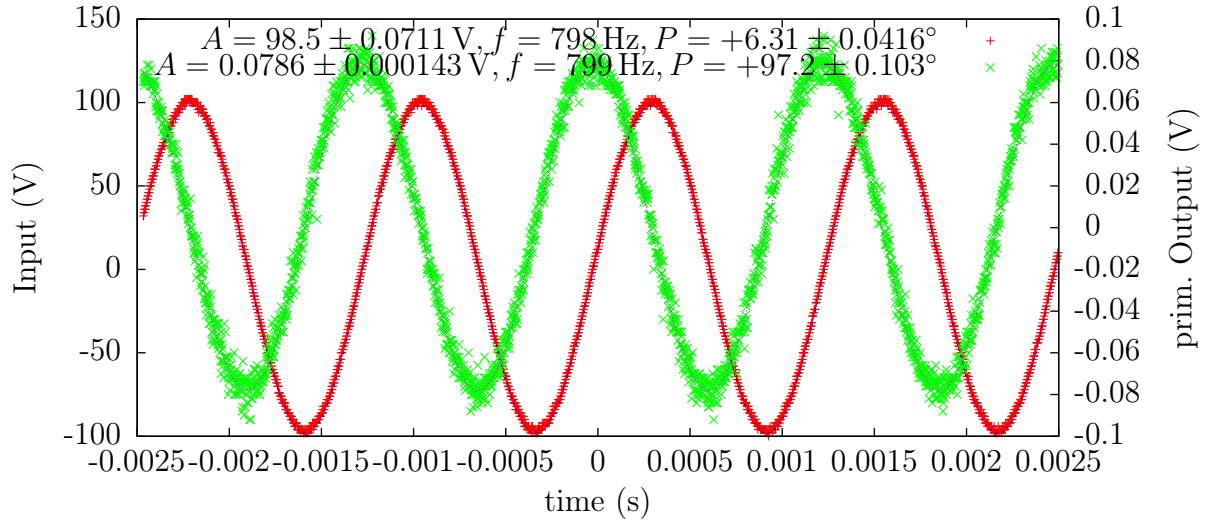
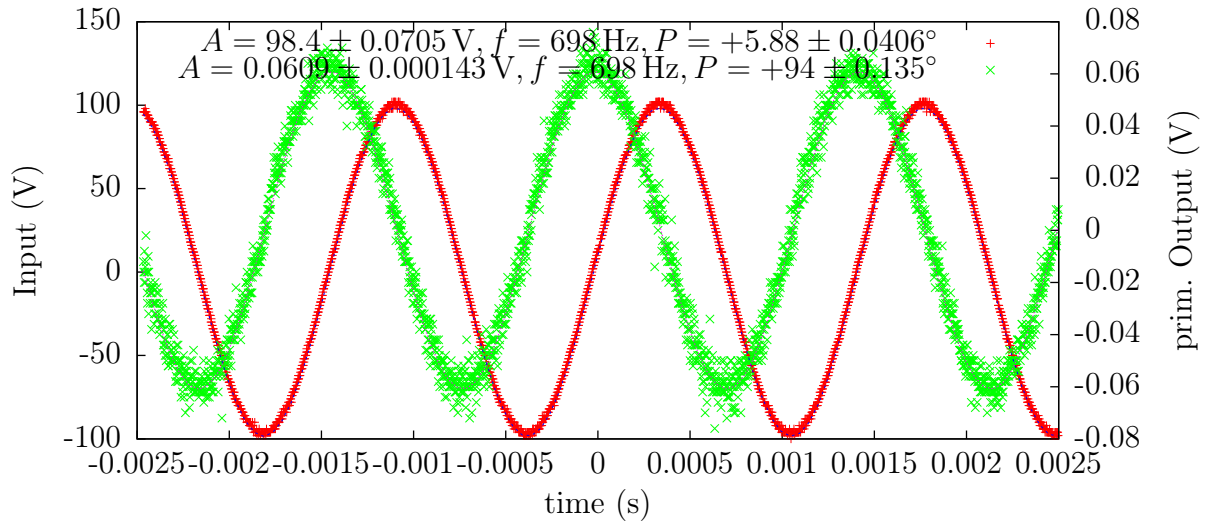


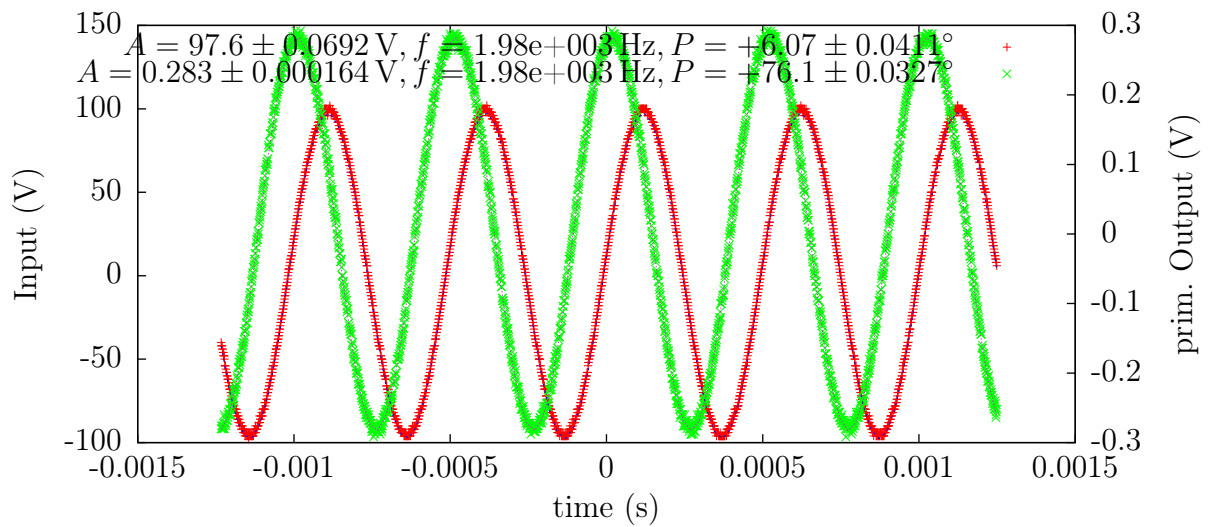
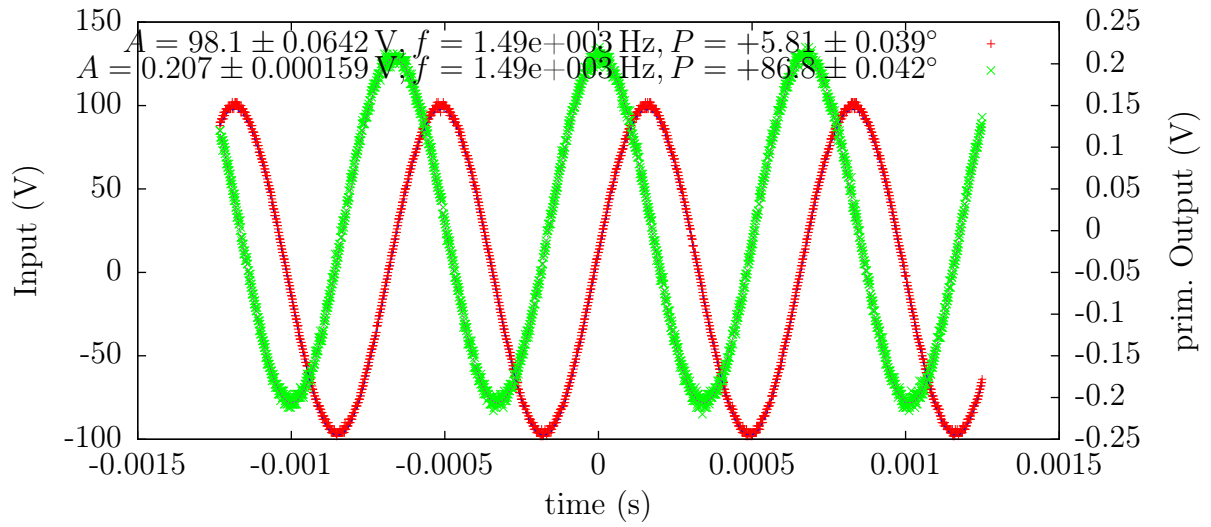
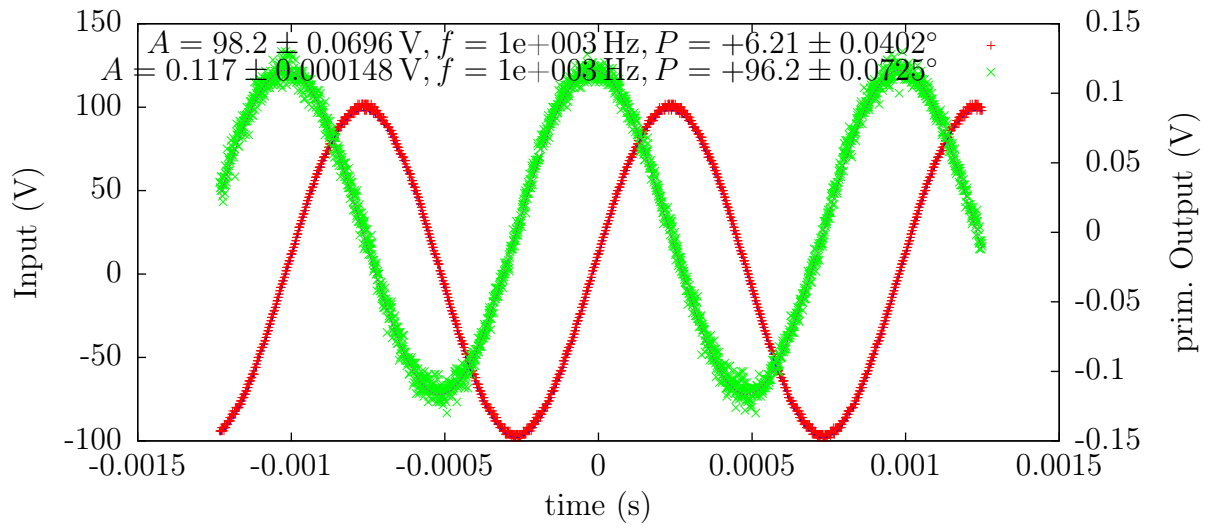


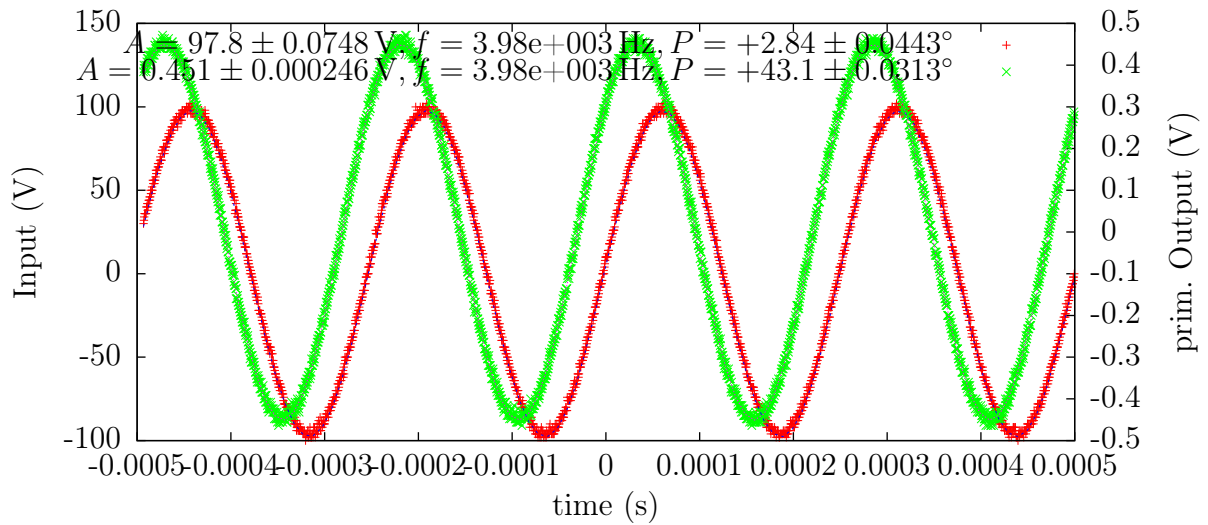
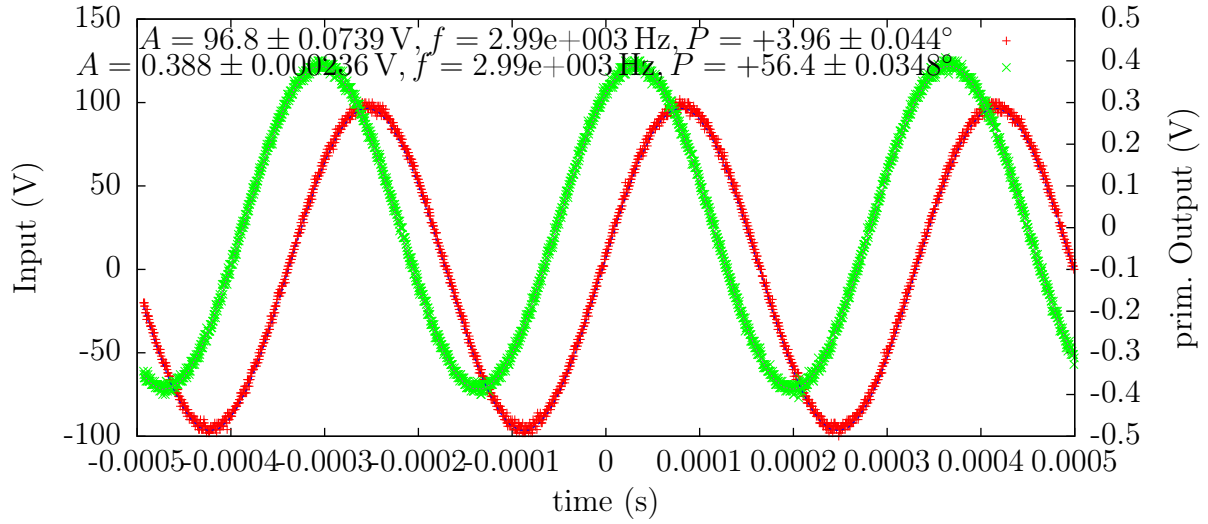
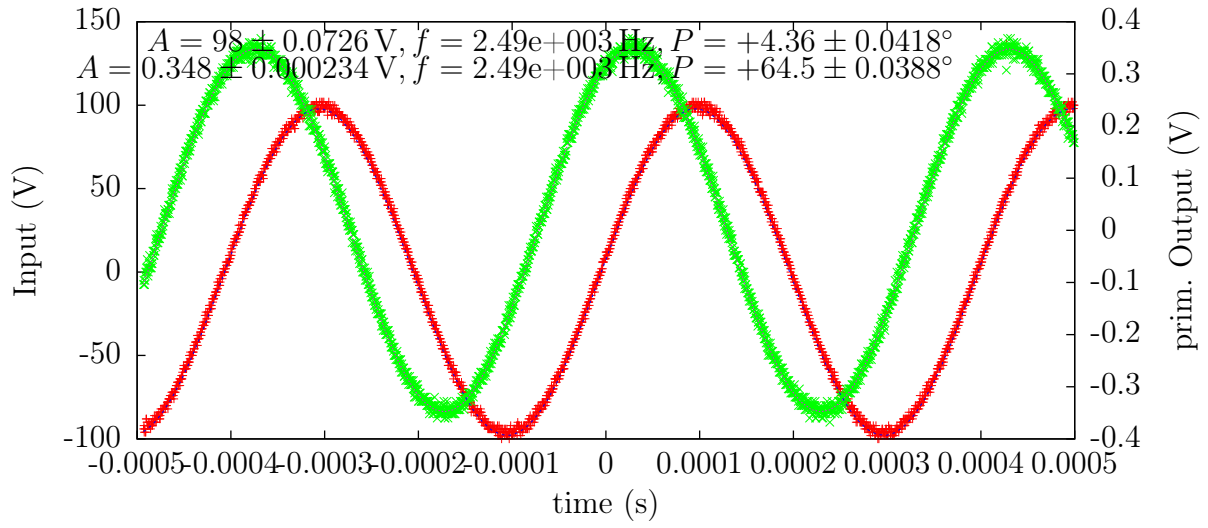


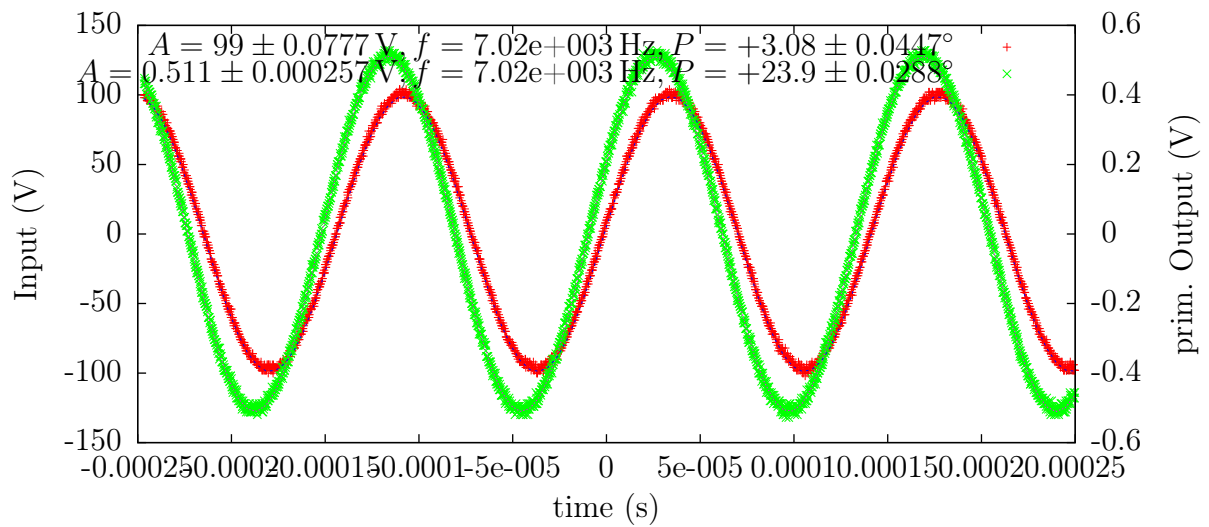
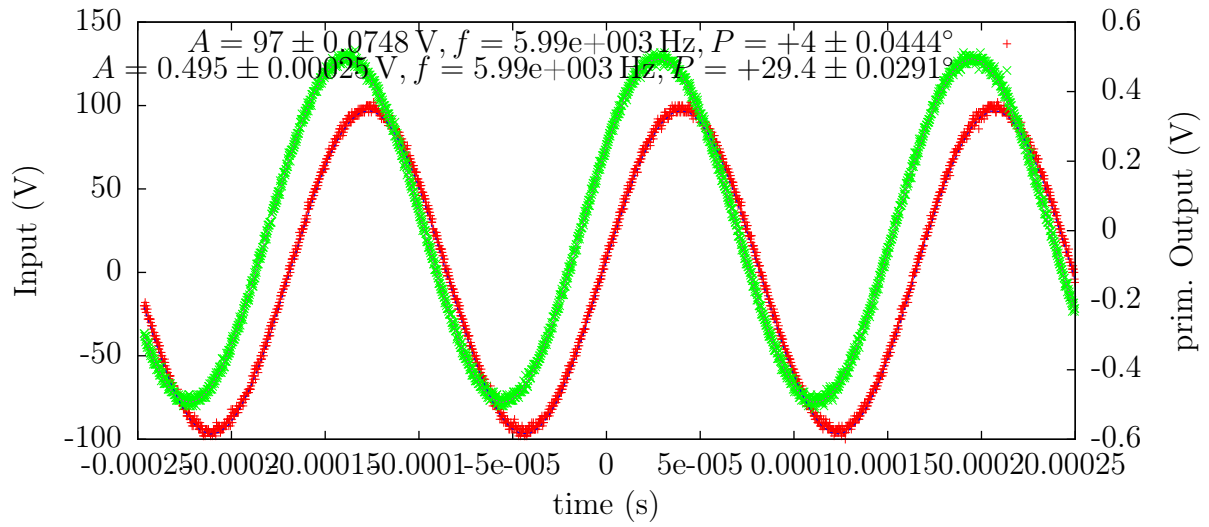
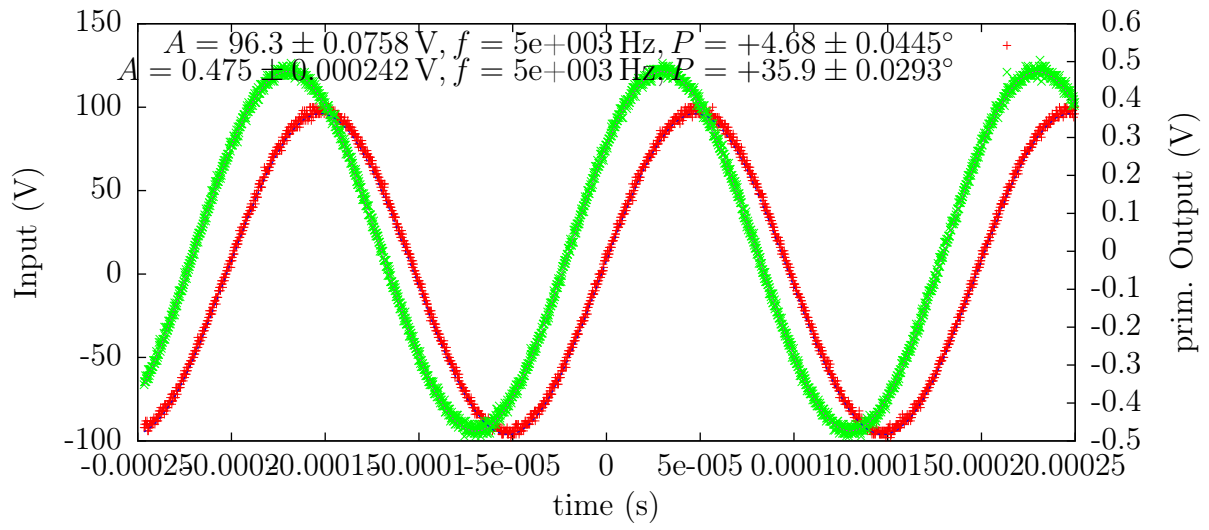


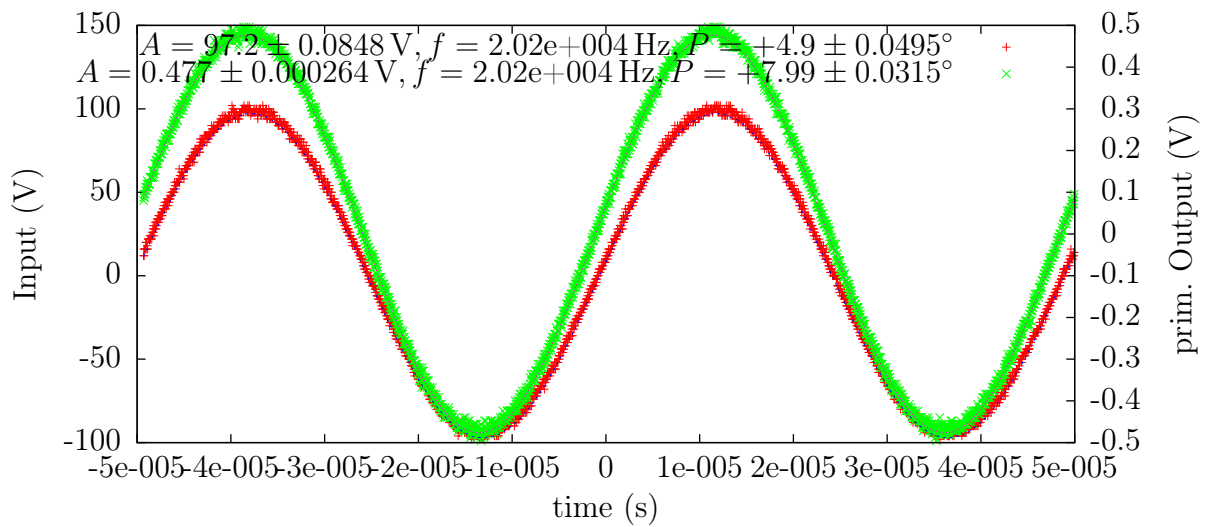
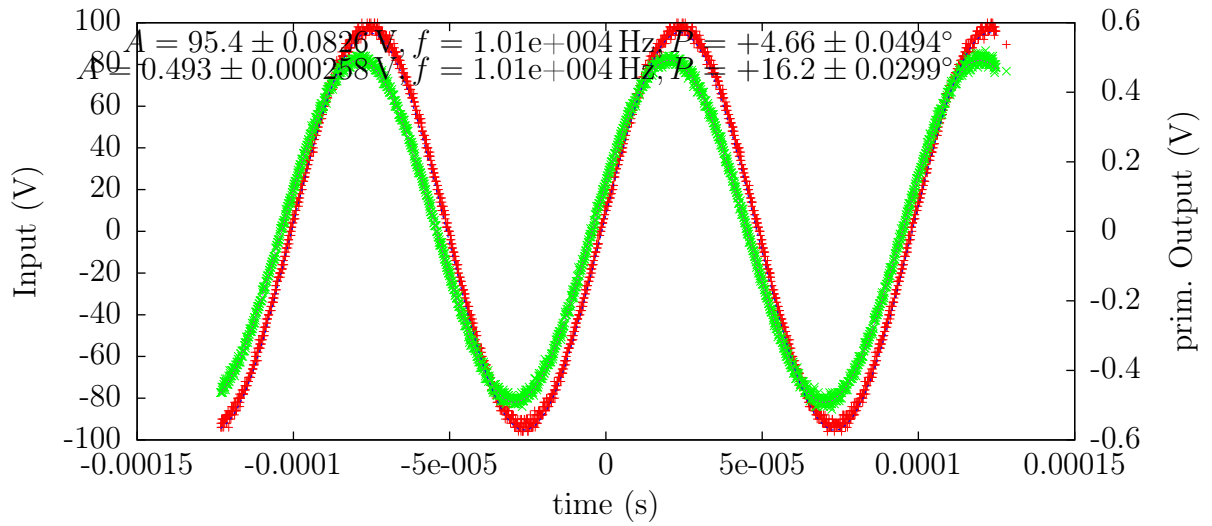
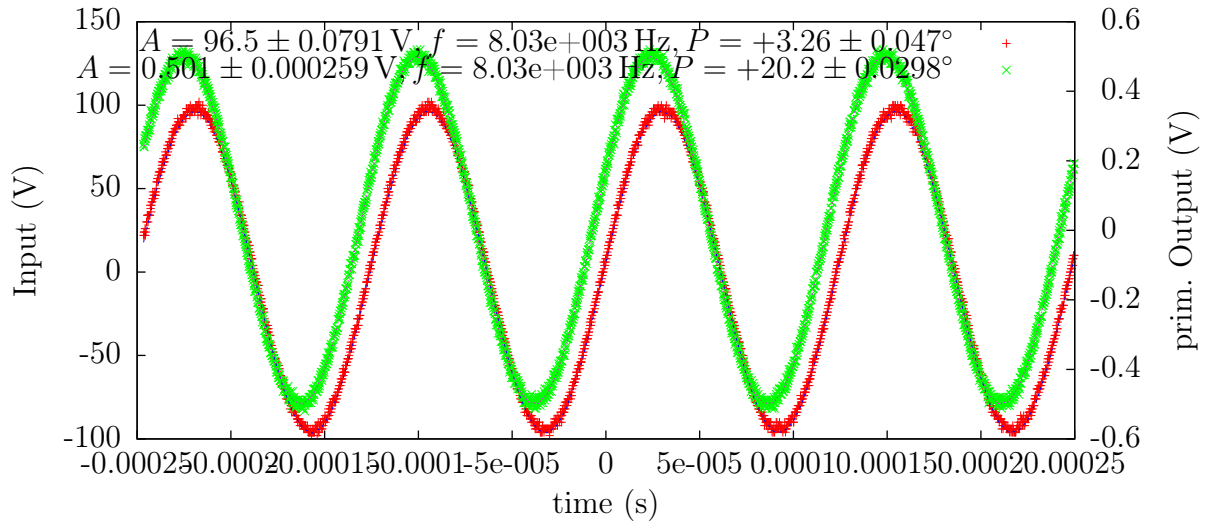


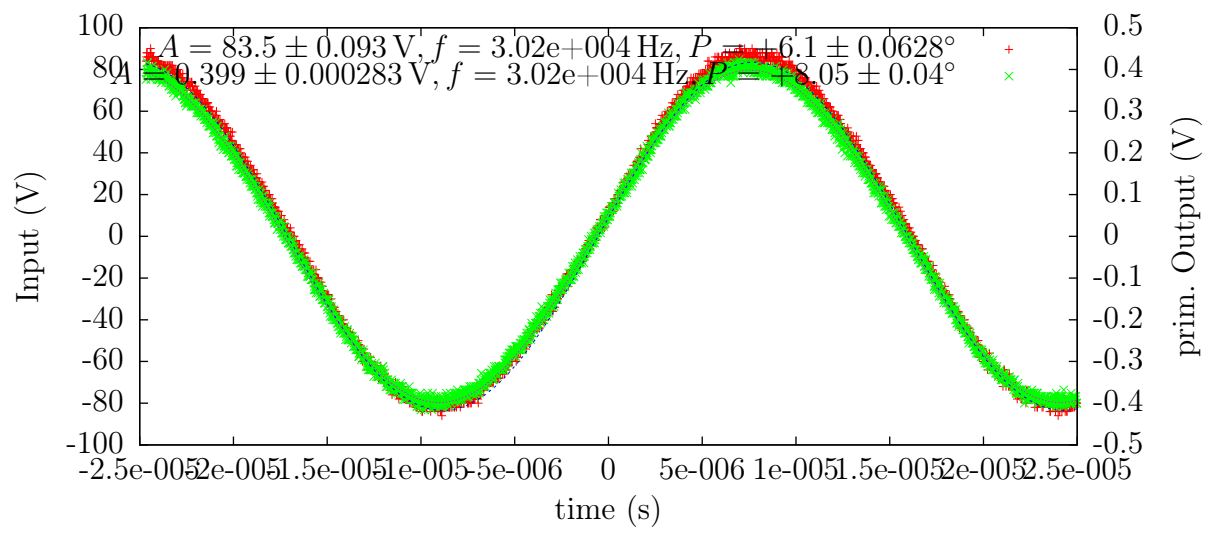




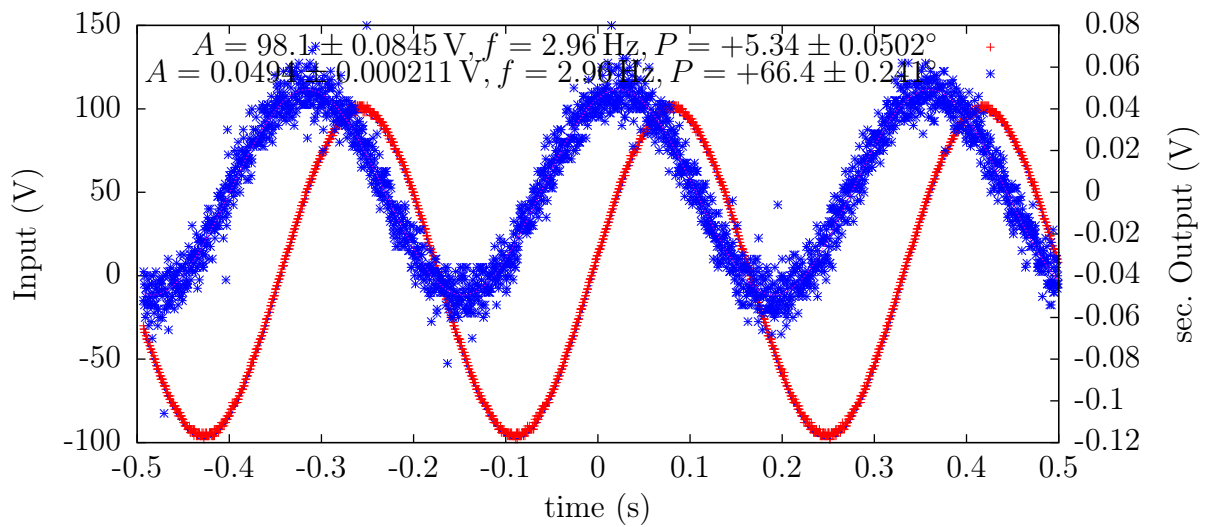
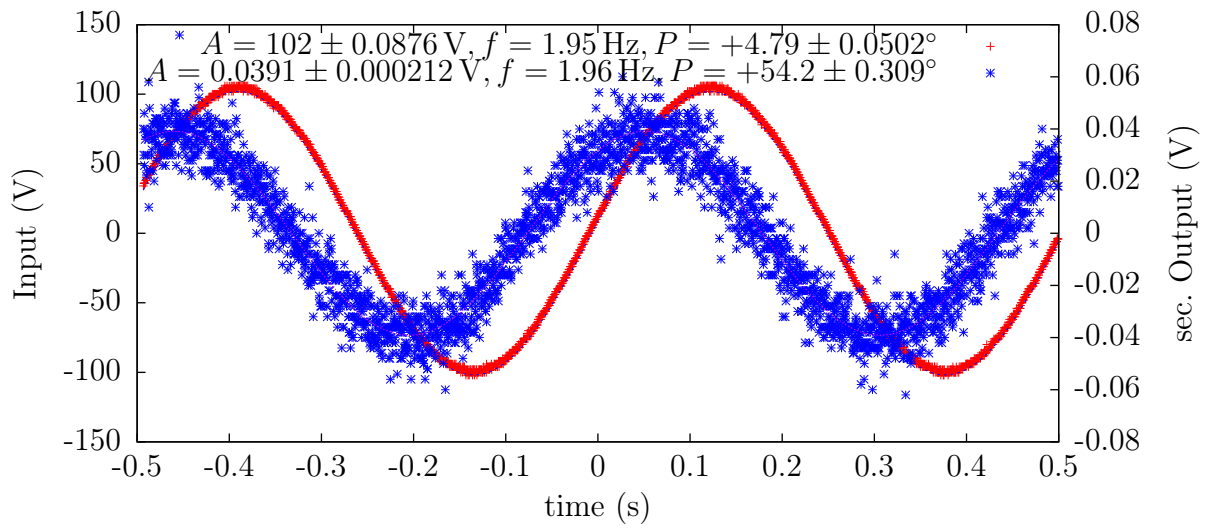
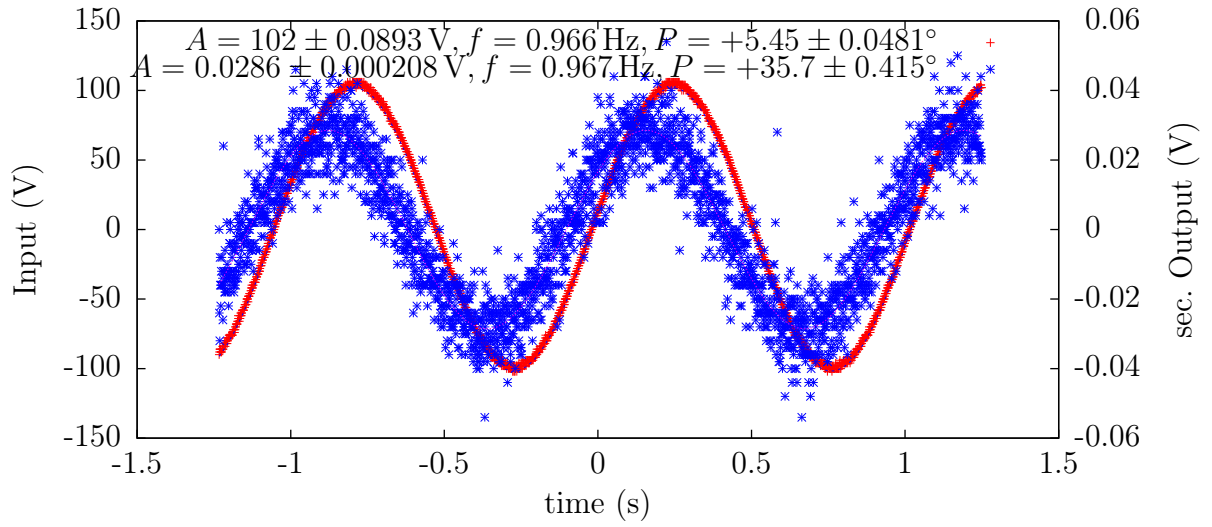


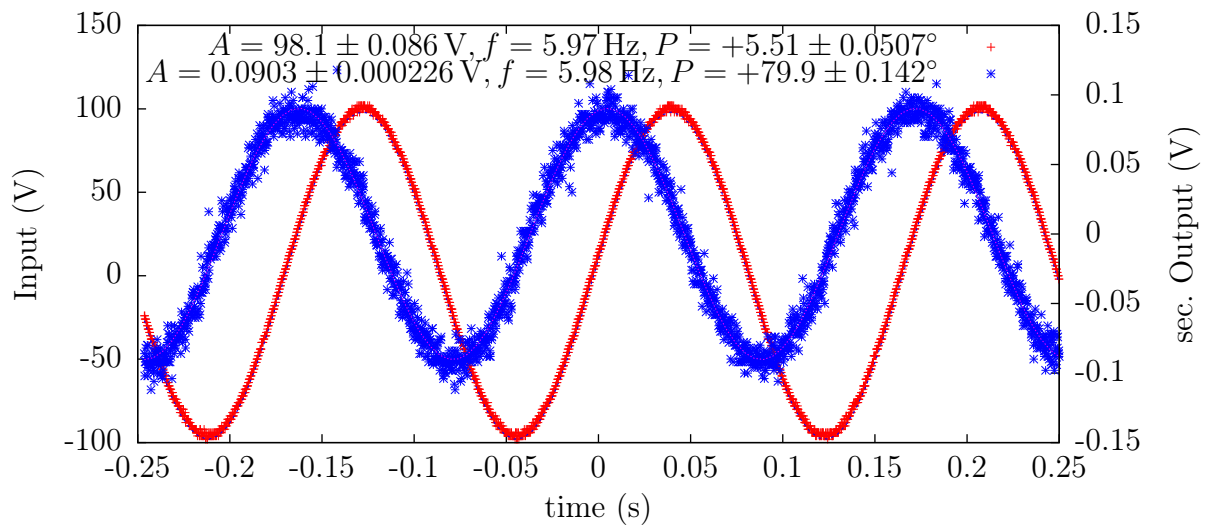
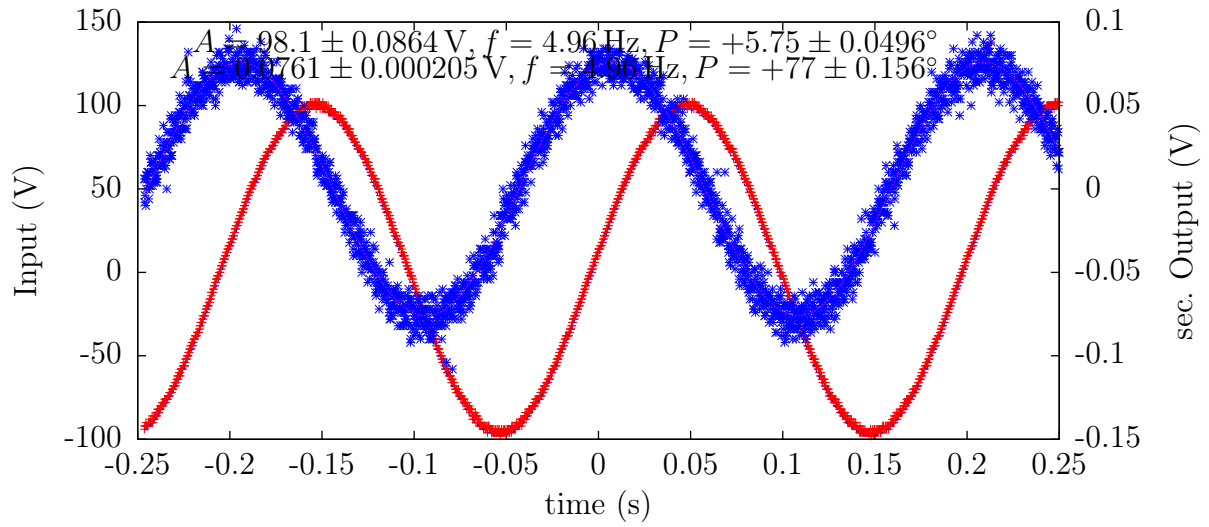
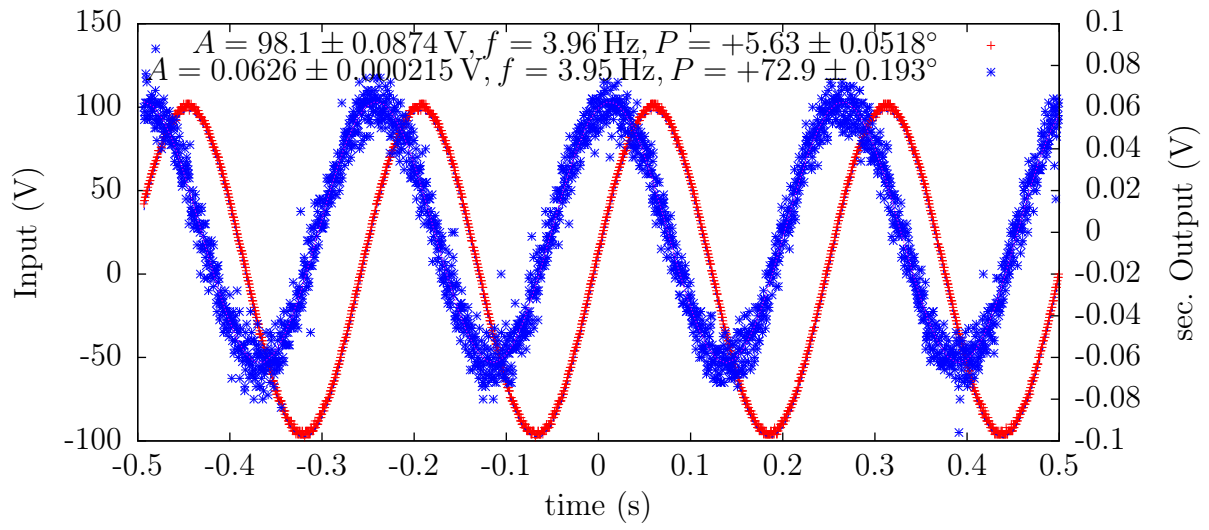


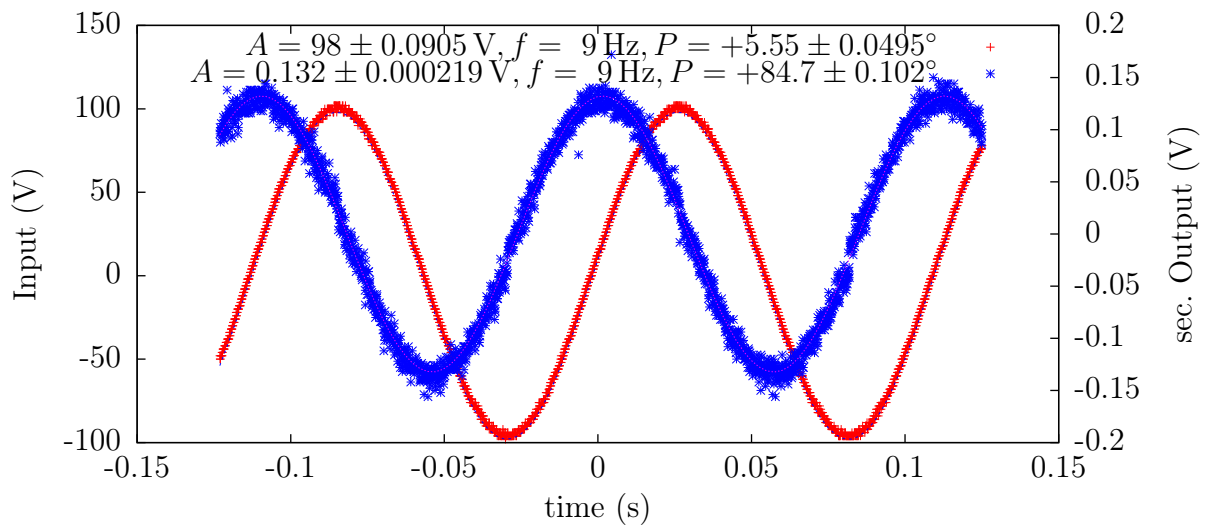
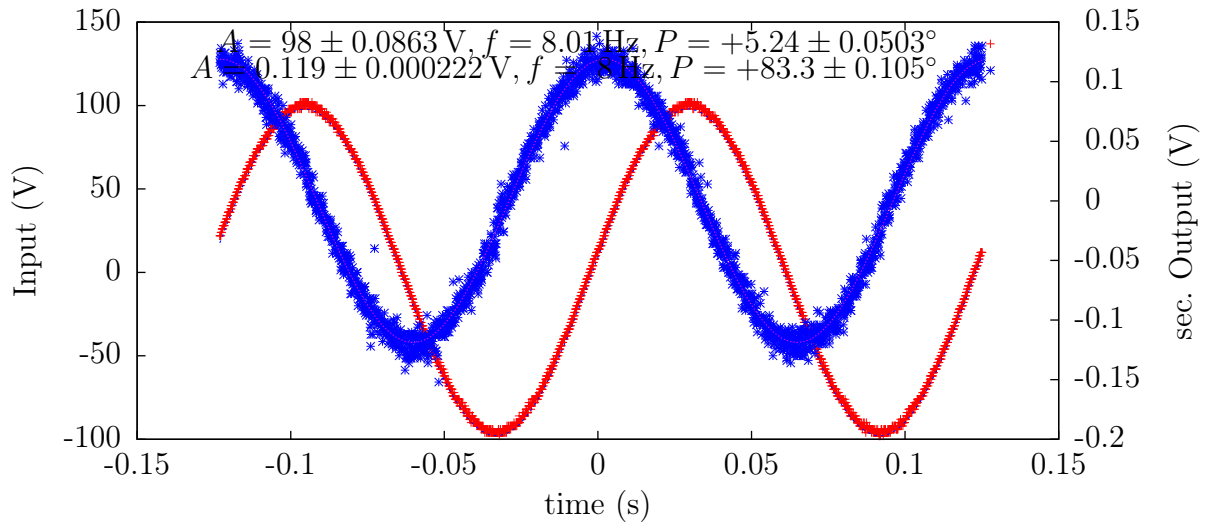
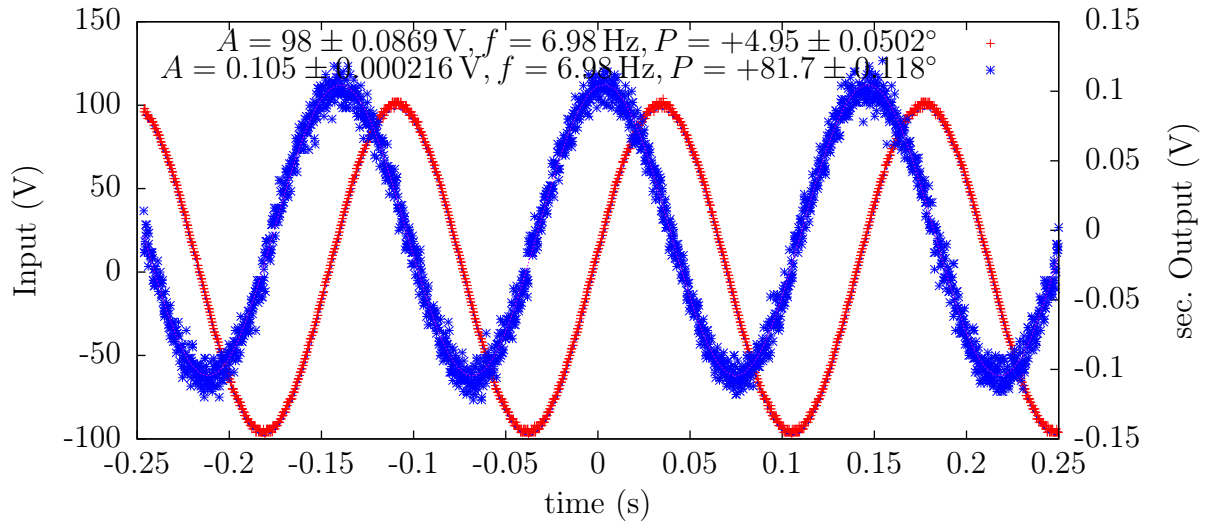


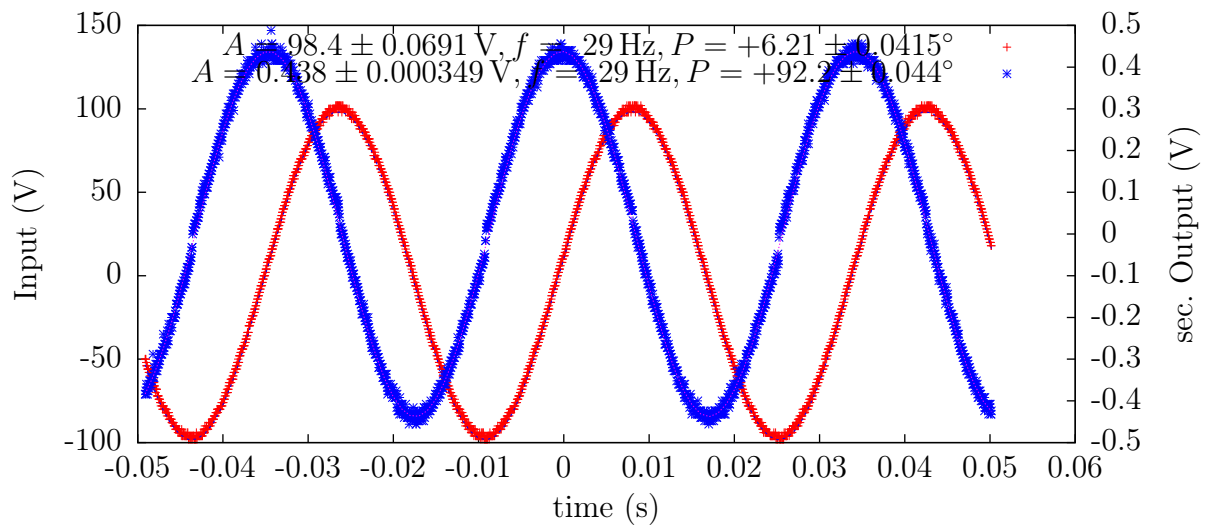
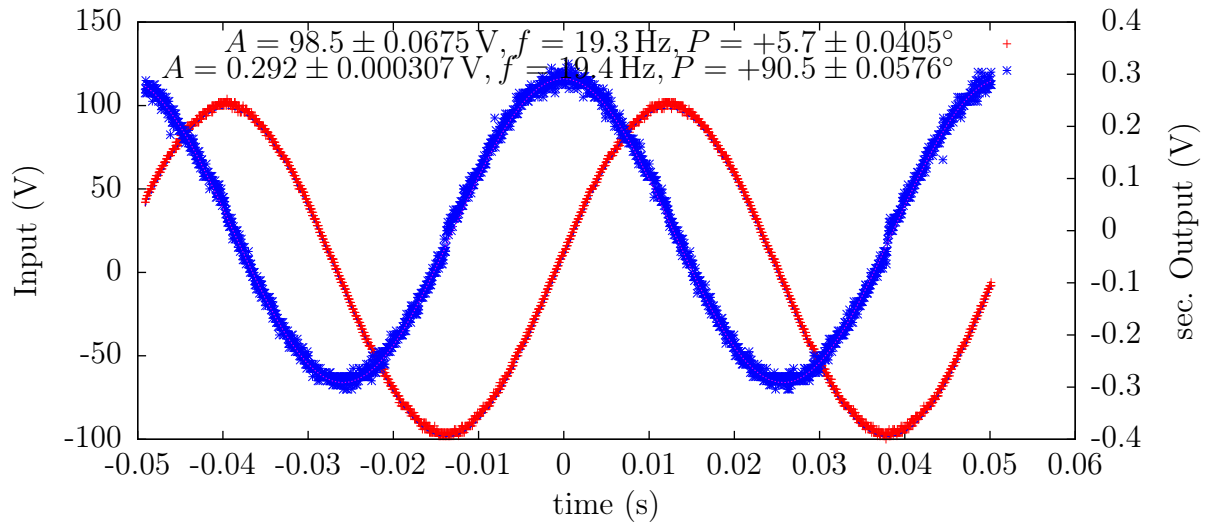
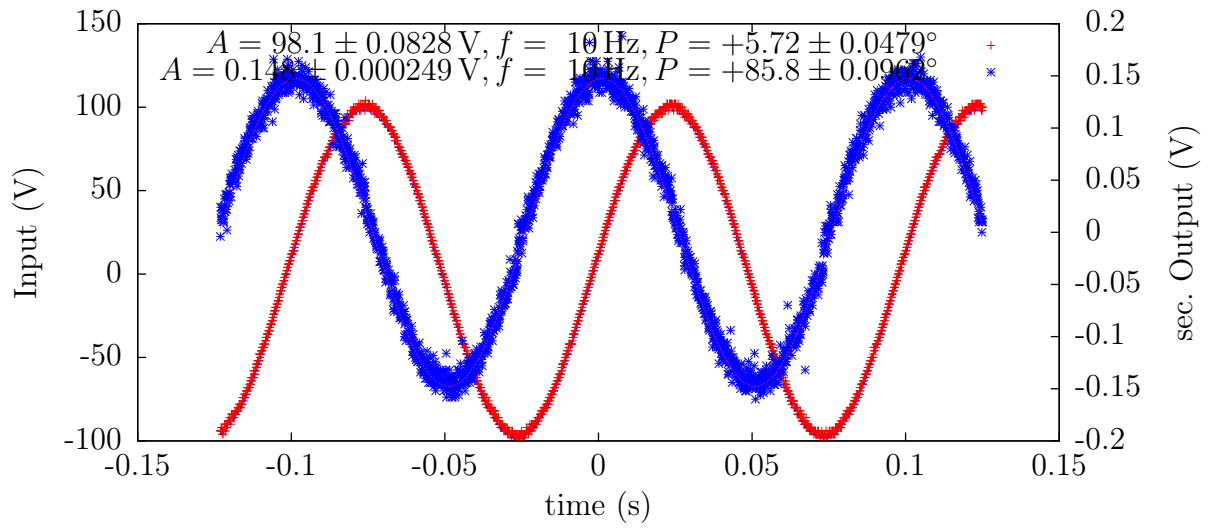


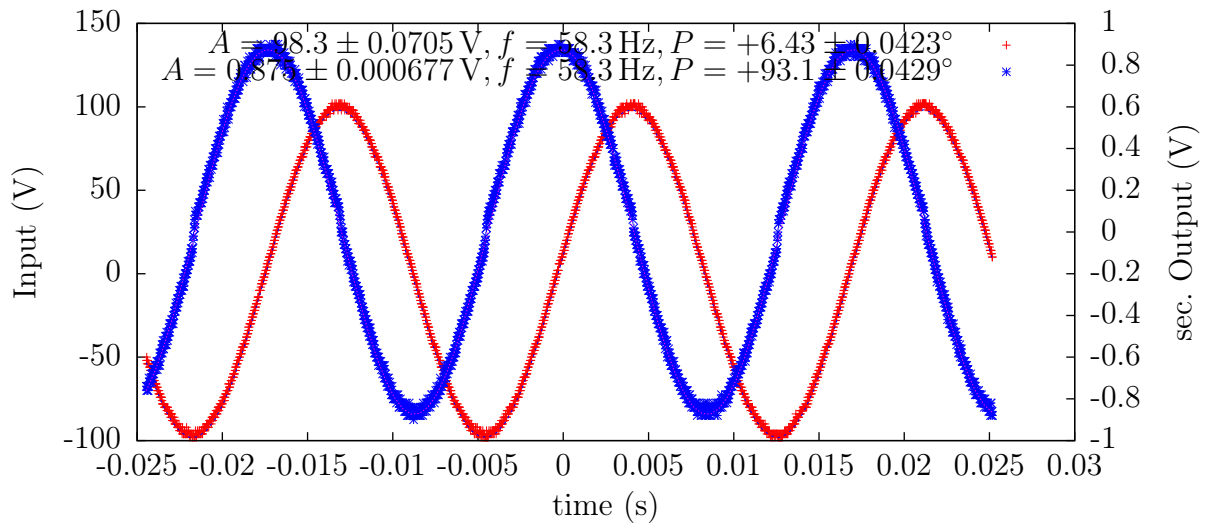
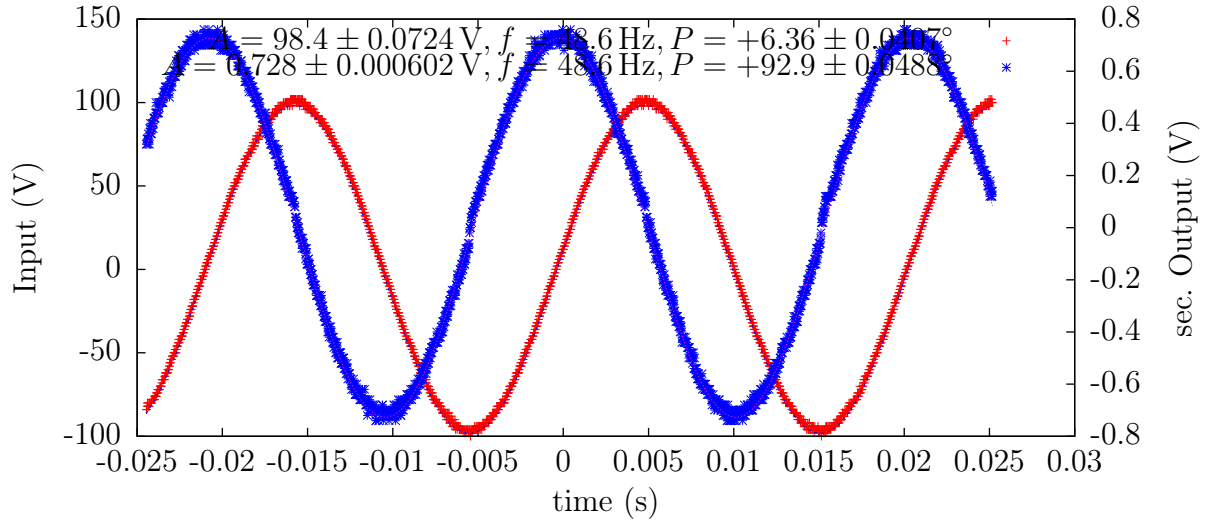
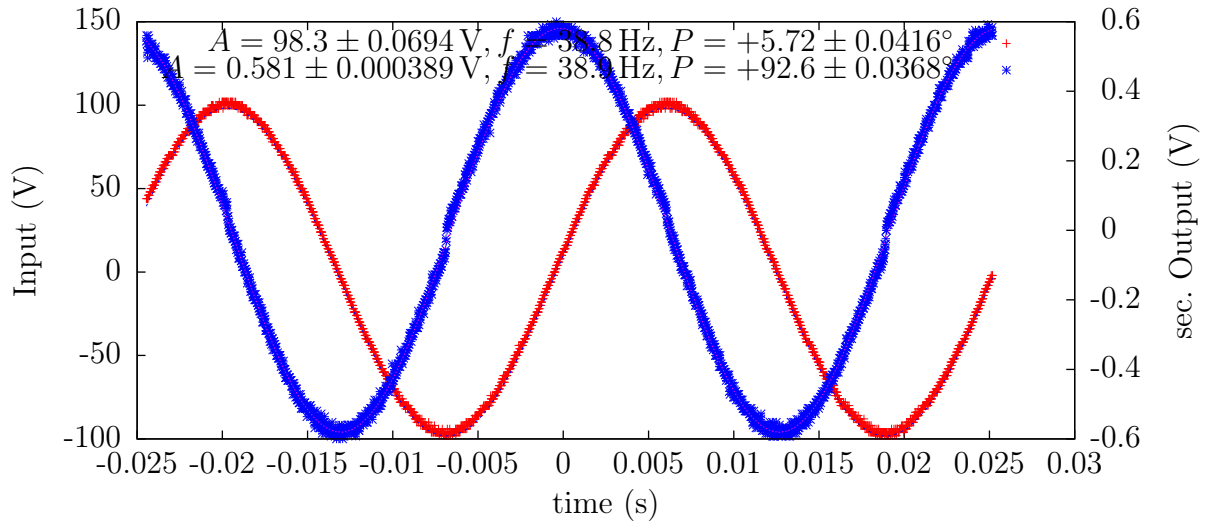
C.2. Sekundärer Abgriff

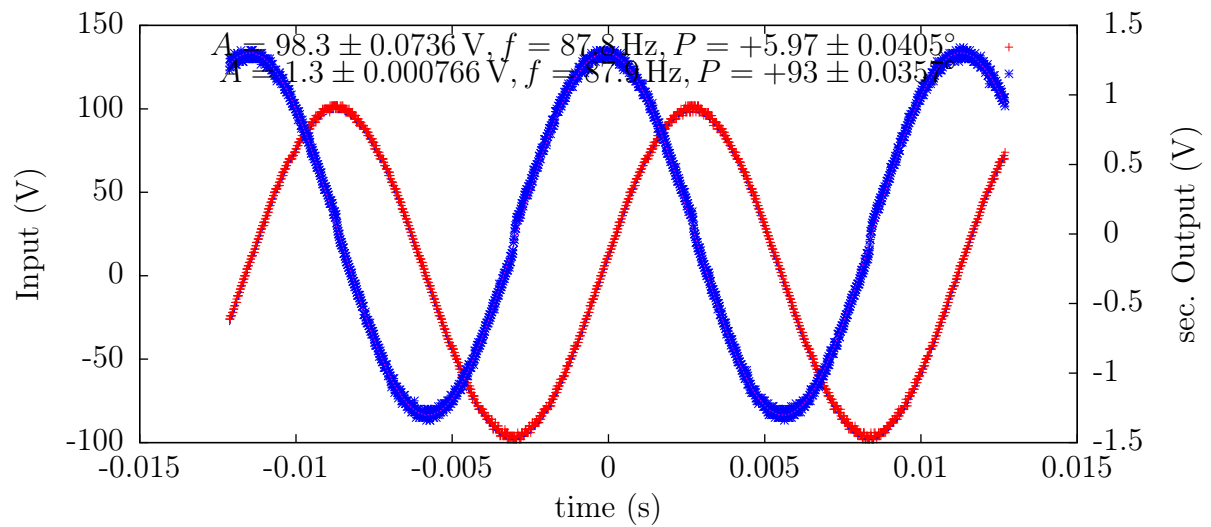
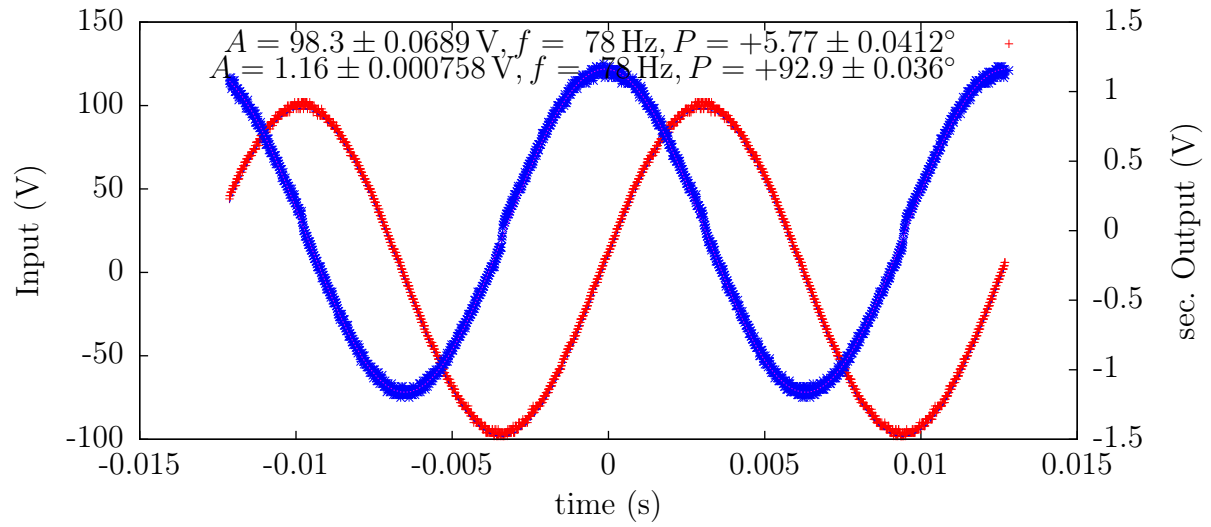
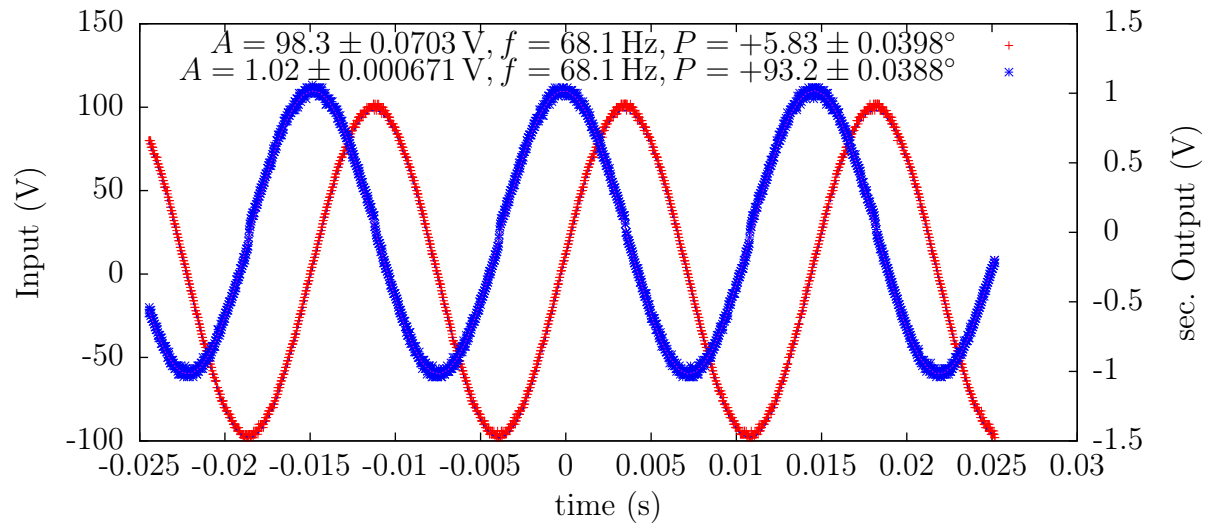


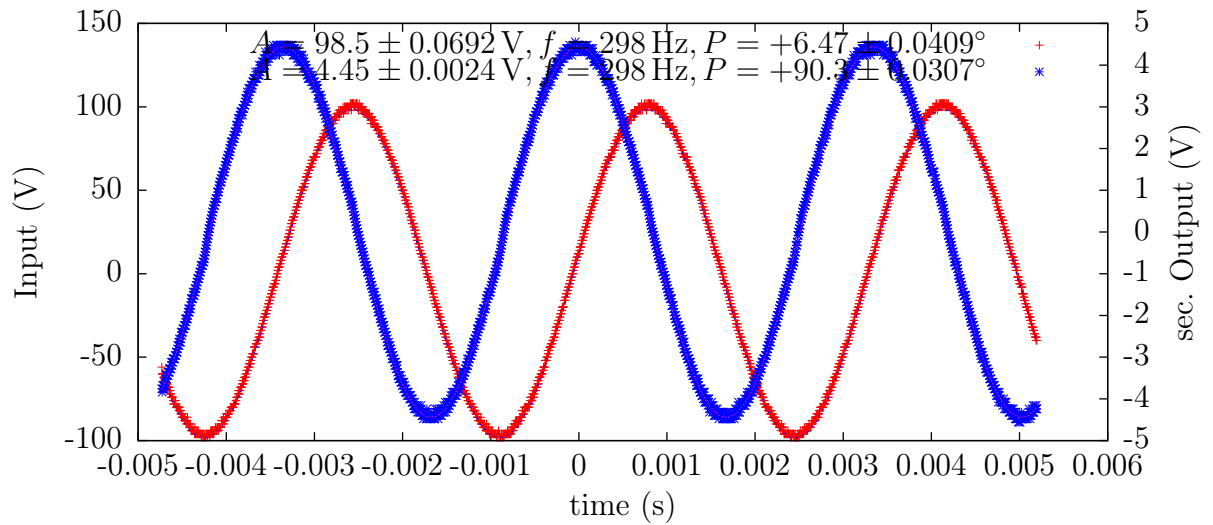
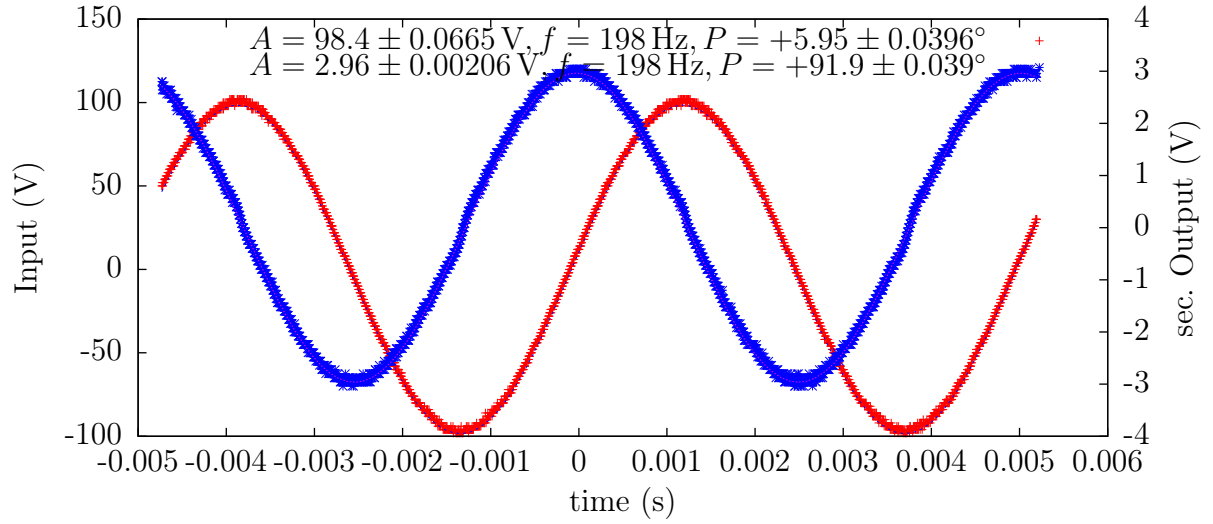
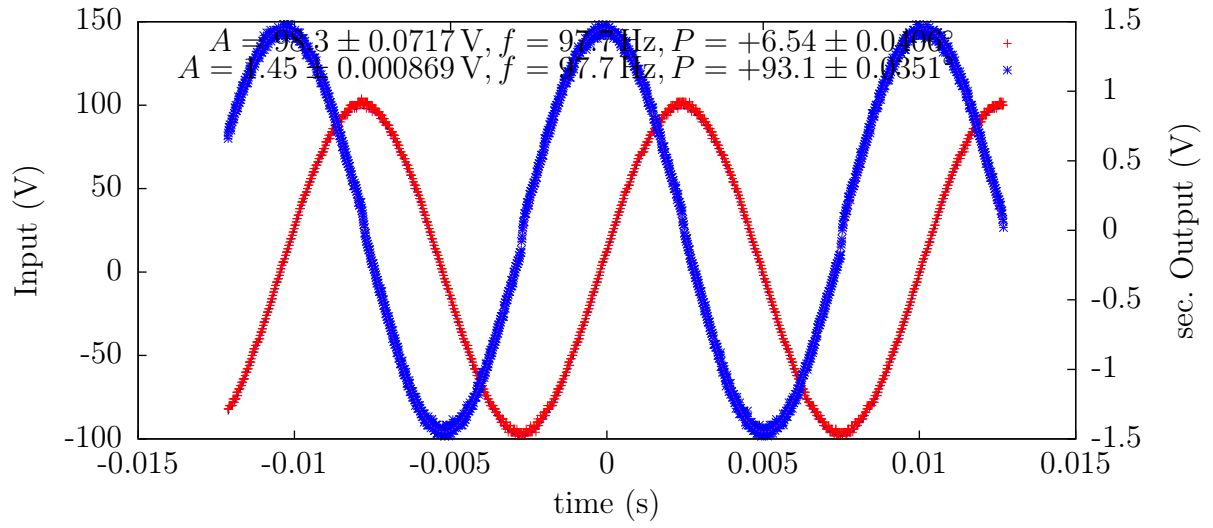


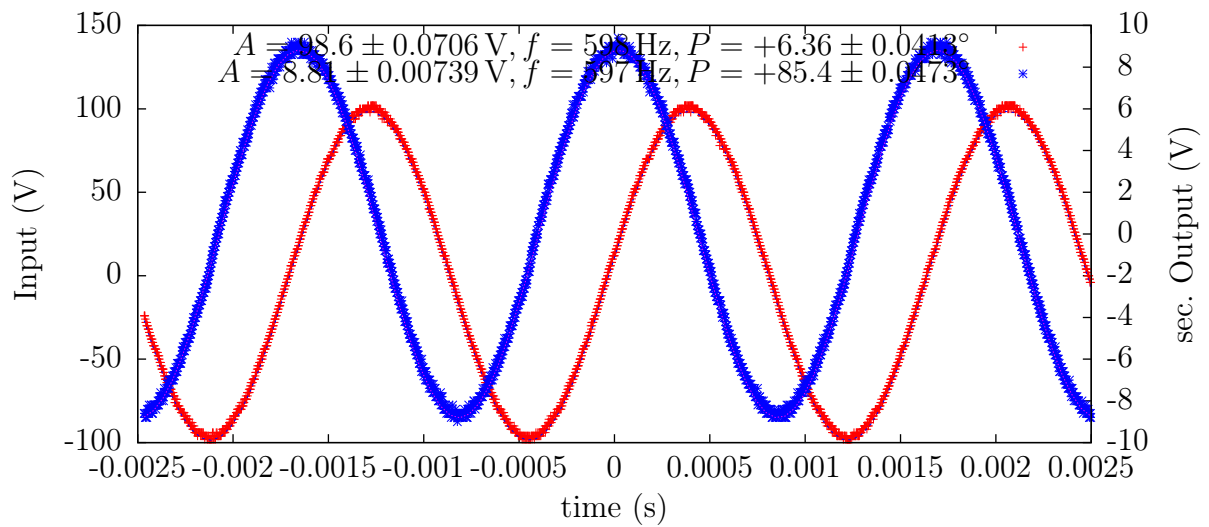
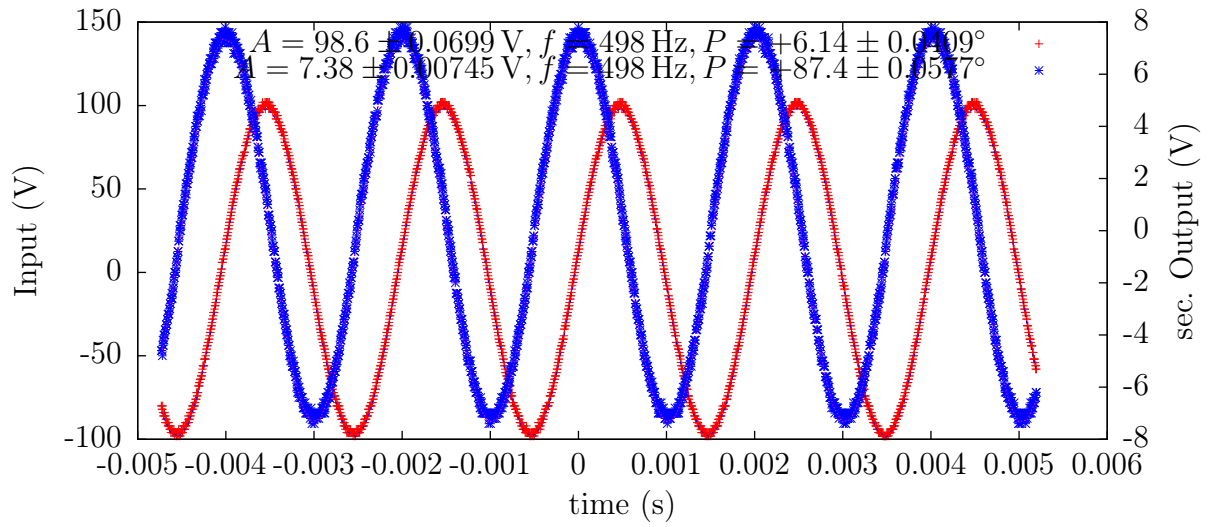
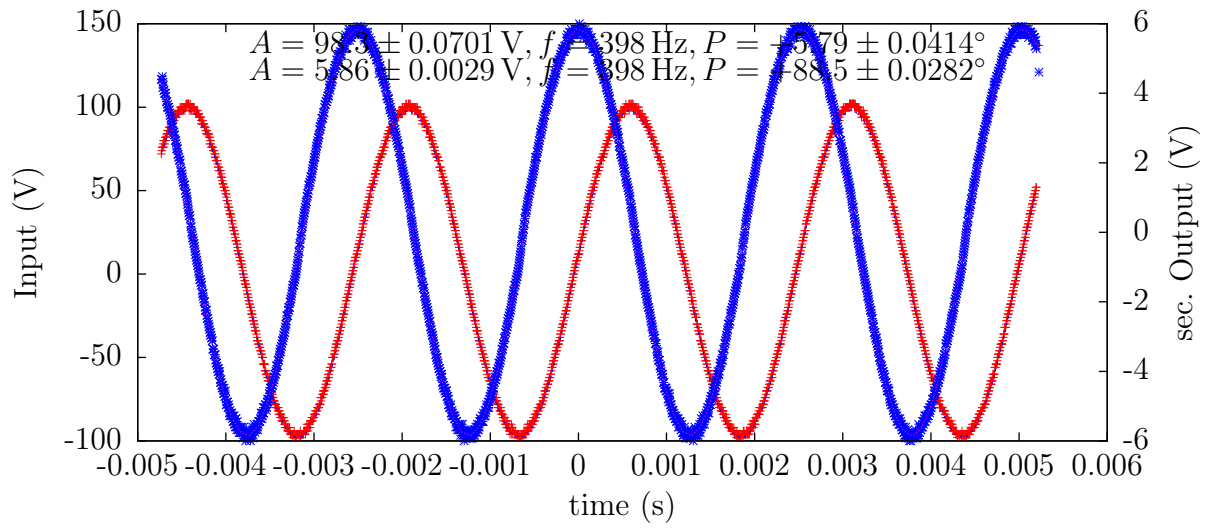


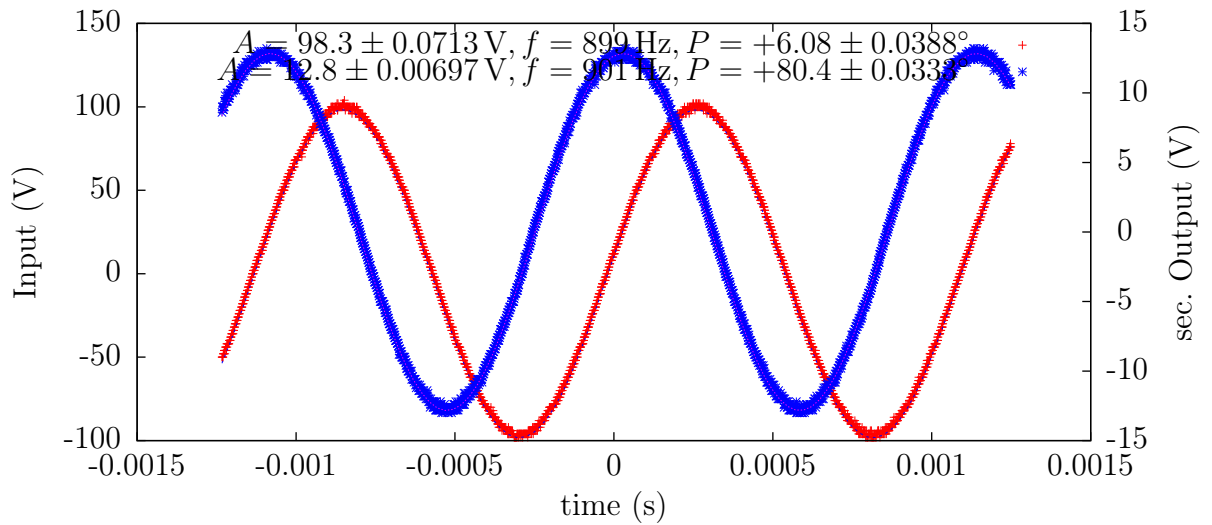
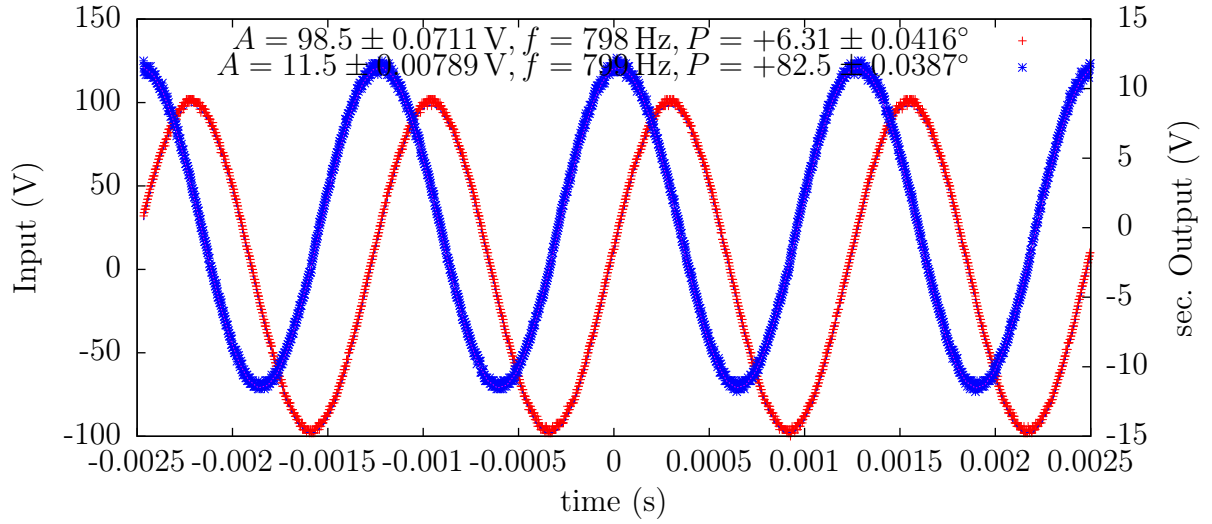
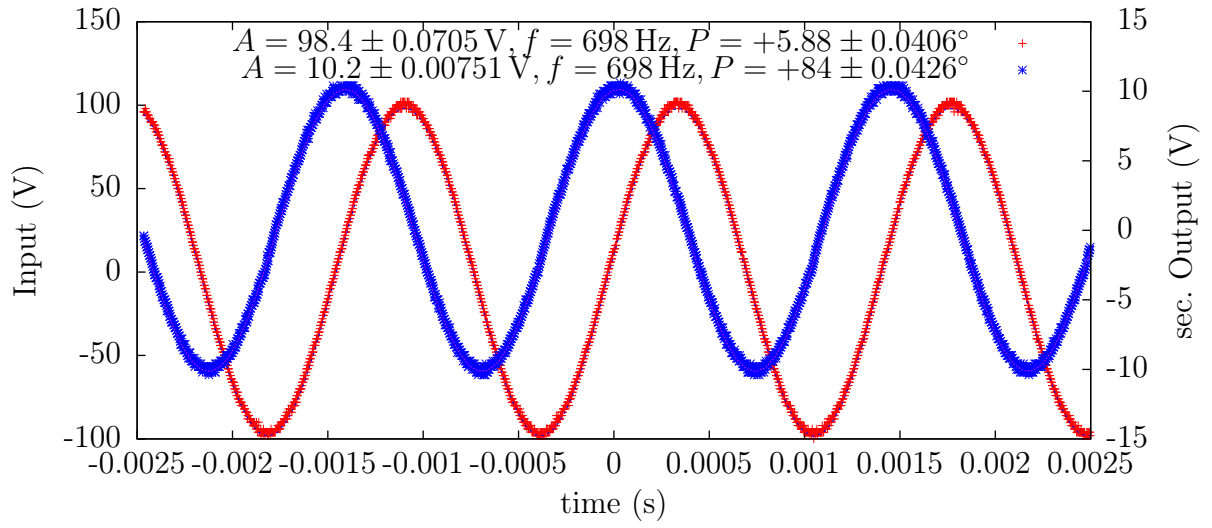


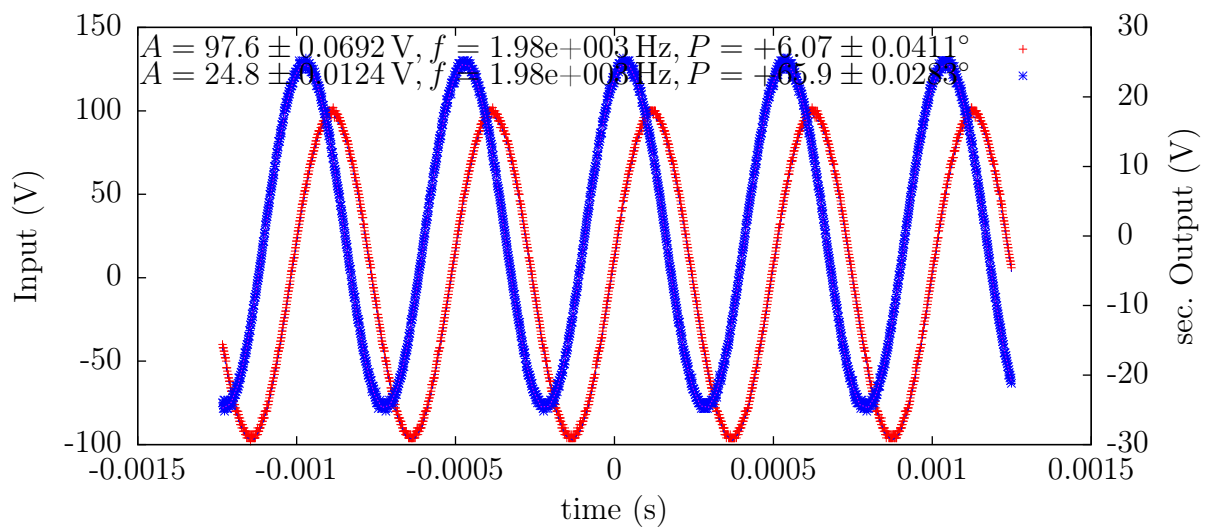
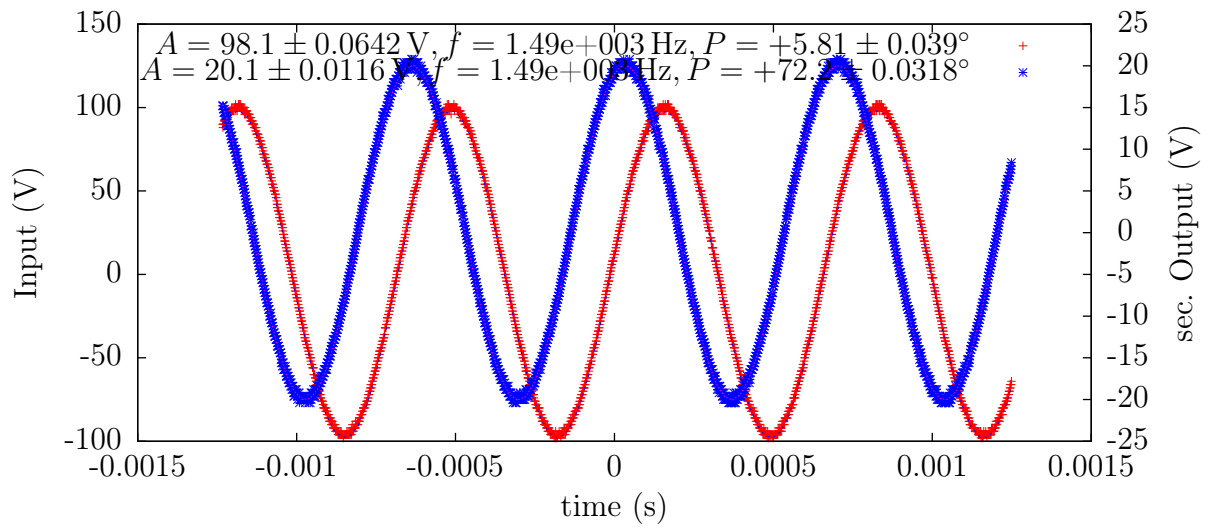
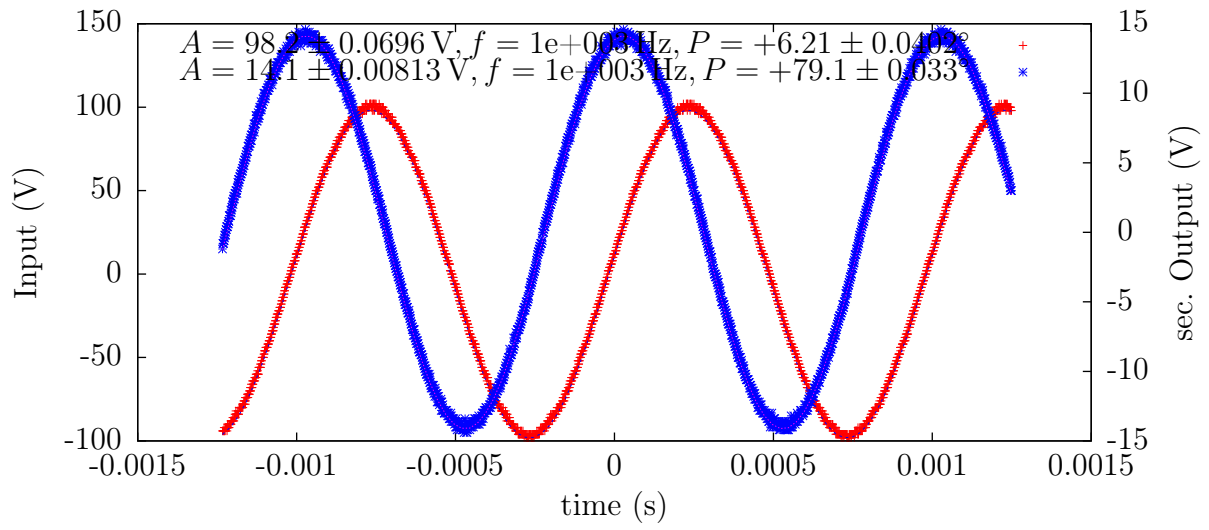


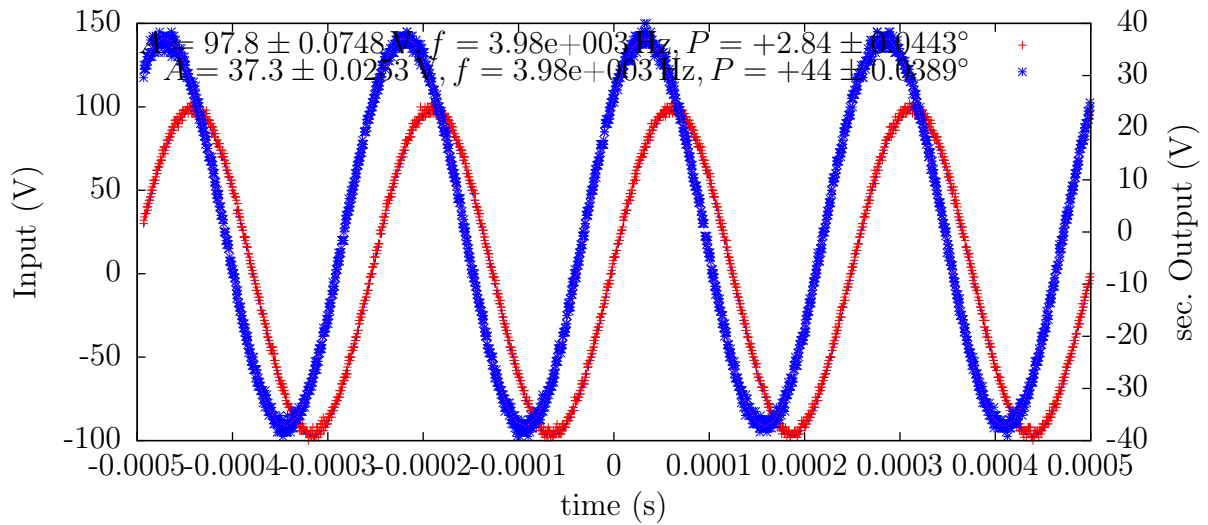
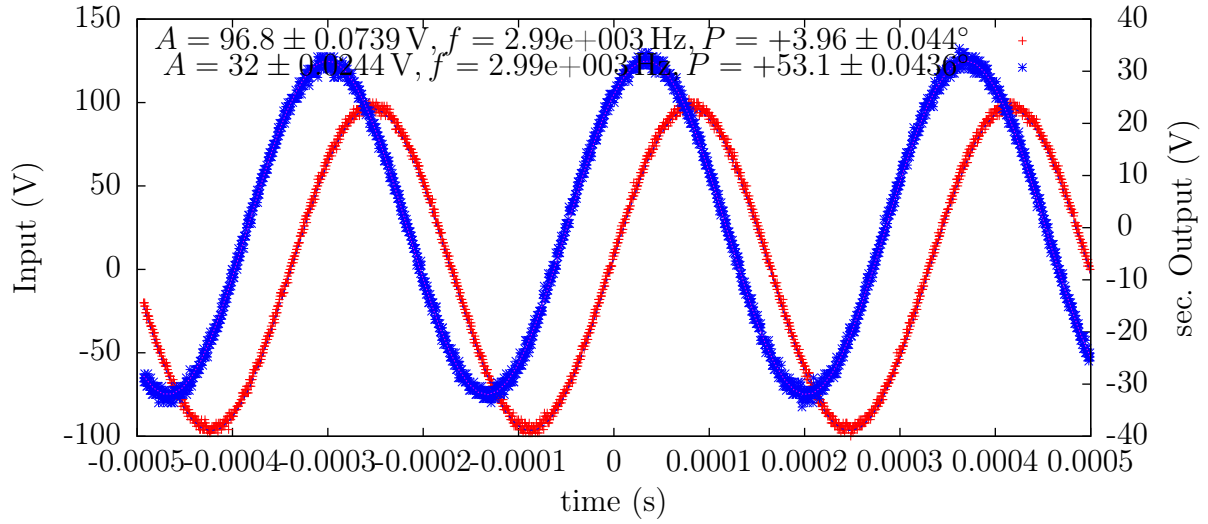
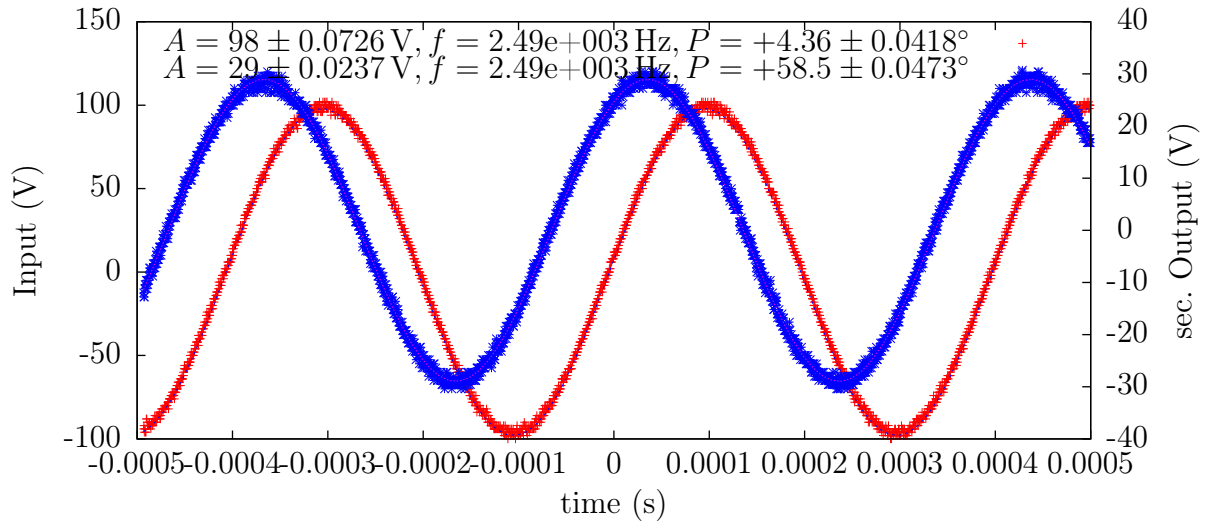


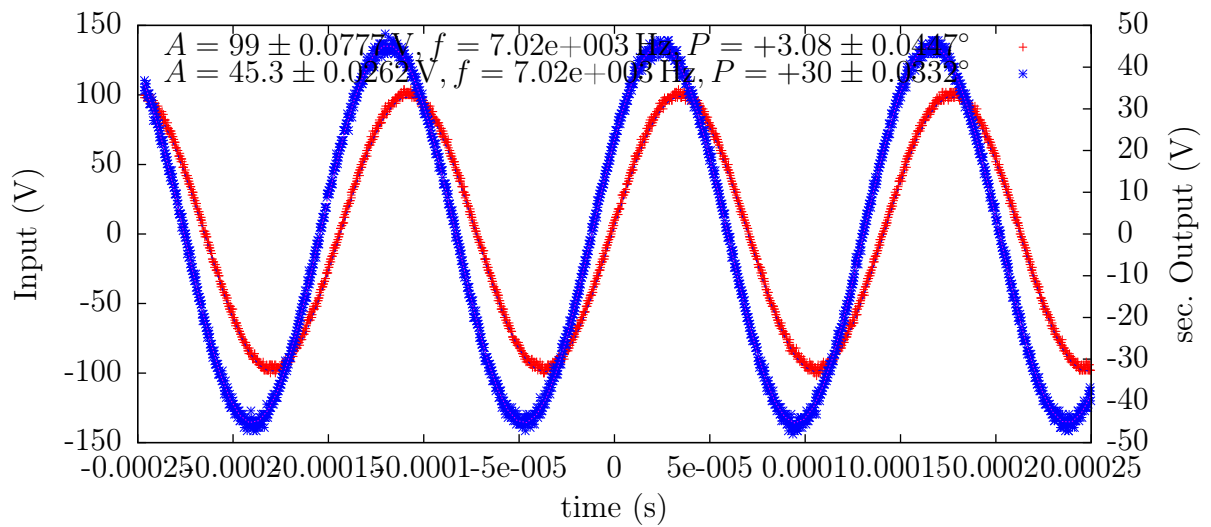
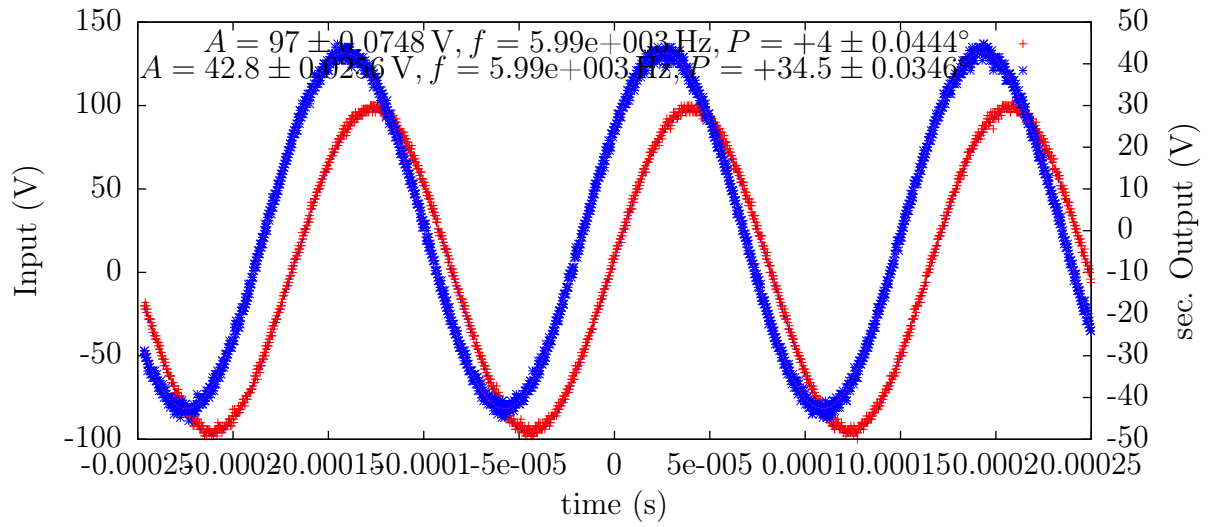
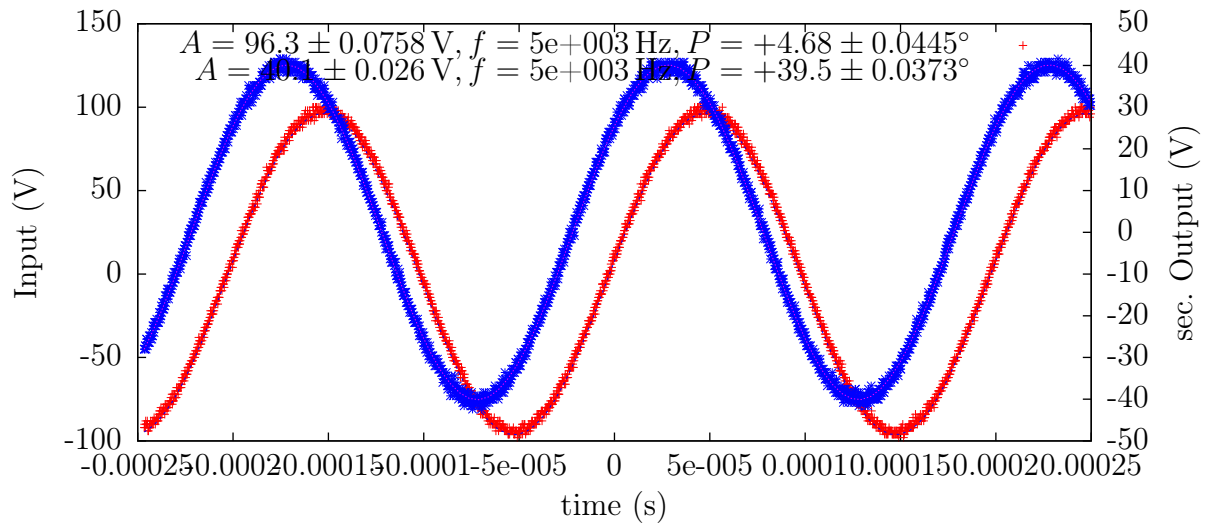


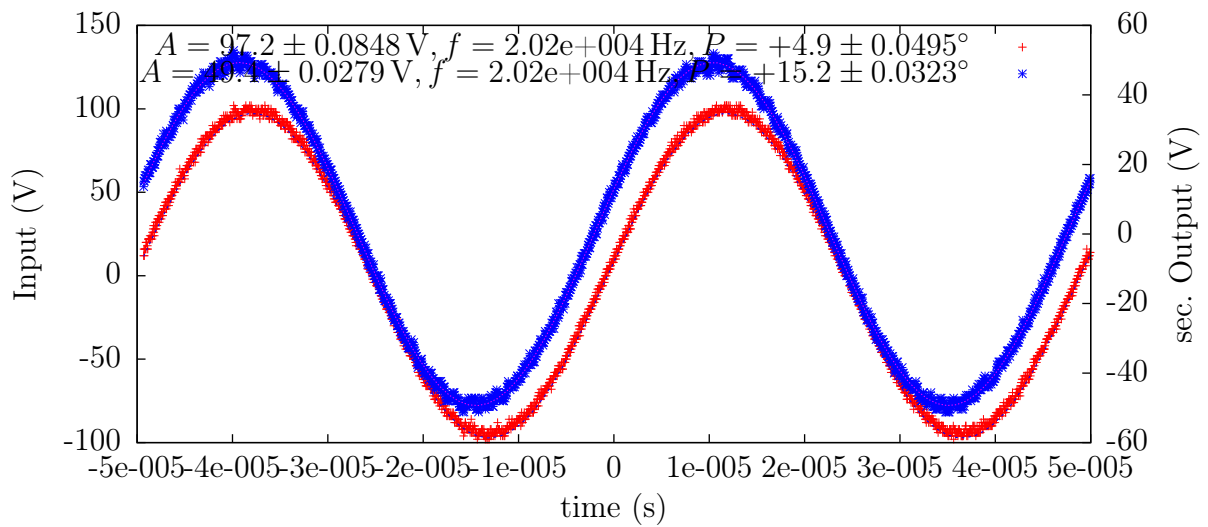
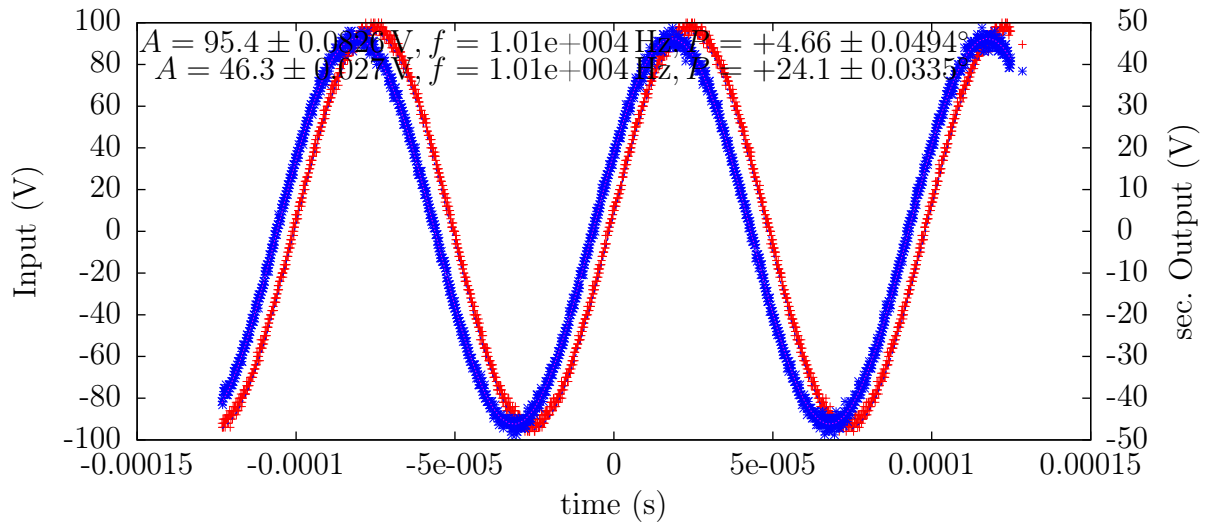
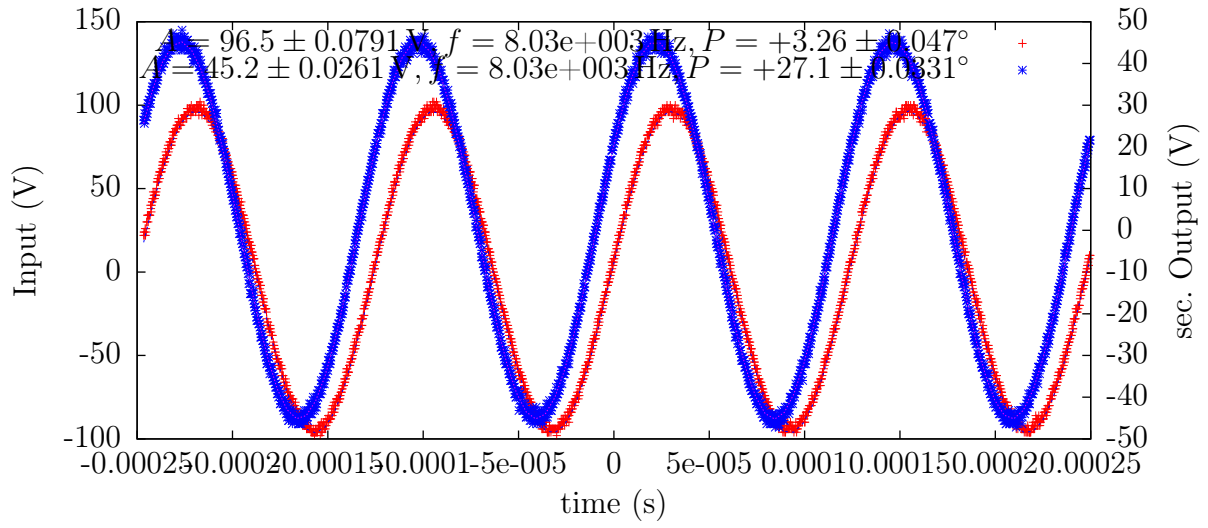


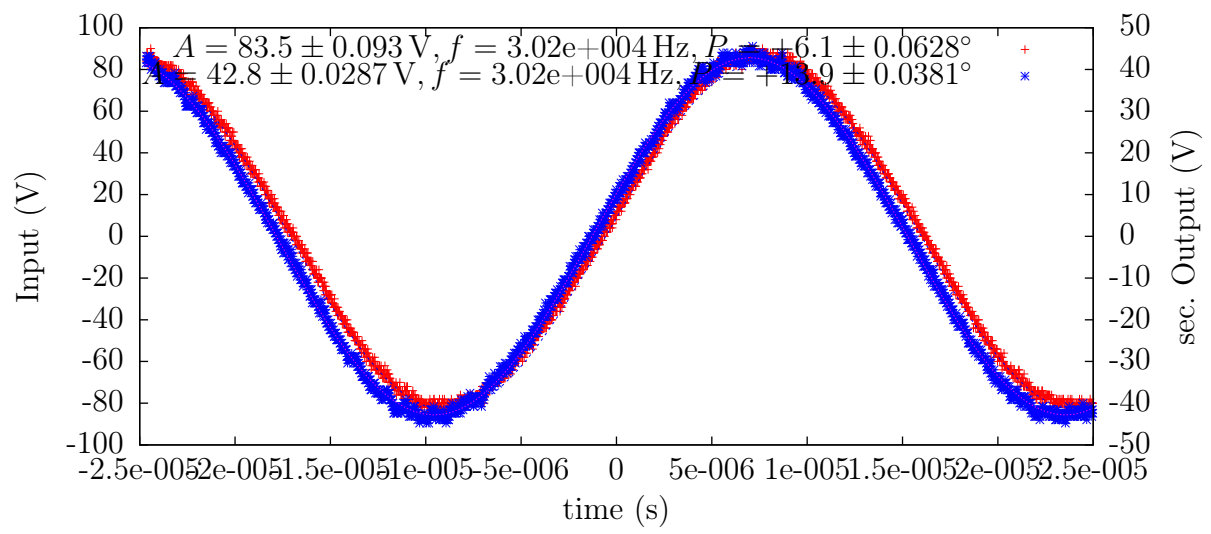












LITERATURVERZEICHNIS

- [Agi34] „Agilent Technologies 3458A Multimeter User’s Guide“, Agilent, Dez.2000, Edition 4
- [ALE89] „Determination of the Number of Light Neutrino Species“, The ALEPH Collaboration, Physics Letters B, Volume 231, Issue 4, Pages 519-529 (1989)
- [Alt03] „Laboratory Limits on Neutrino Masses“, C.Weinheimer, in G. Altarelli and K. Winter (Eds.), Neutrino Mass, Springer, 2003
- [Bau09] Diplomarbeit von S. Bauer, voraus. 2009
- [Bec03] „On Radioactivity, a New Property of Matter“, A. H. Bequerel, Nobel Lectures, Physics 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1967
- [Bet06] „Nuclear Charge Radius Measurements of Radioactive Beryllium Isotopes“, CERN-INTC-2006-024+INTC-P-214, Apr. 06
- [Cad04] „Type USF Ultra-Stable Low TC Film Resistors 200 Series and 300 Series“, CADDOCK Electronics, Inc.,
http://www.caddock.com/Online_catalog/Mrktg_Lit/TypeUSF.pdf
abgerufen am 17.04.2008
- [CAD08] „Type MX Precision High Voltage Resistors“
http://www.caddock.com/Online_catalog/Mrktg_Lit/TypeMX.pdf
abgerufen am 30.4.2008
- [Cer86] „Catalogue Magasins“, Cern, Mai.1986
- [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)

- [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
- [Flu85] „8508A Digital Reference Multimeter User Manual“, Fluke, July 2002
- [Ger99] „Paul Villard and his Discovery of Gamma Rays“, Leif Gerward, Physics in Perspective 1 (1999), 367-383.
- [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
- [Gol58] „Helicity of Neutrinos“, M. Goldhaber, L. Grodzins und A.W. Sunyar, Phys. Rev. 109, 1015 - 1017 (1958)
- [Goo06] „The neutrino mass bound from WMAP-3, the baryon acoustic peak, the SNLS supernovae and the Lyman- α forest“, A. Goobar, S. Hannestad, E. Mörtzell, Huitzu Tu, arXiv:astro-ph/0602155v2
- [Han06] „Neutrino masses and cosmic radiation density: Combined analysis“, S. Hannestad and Georg G. Raffelt, arXiv:astro-ph/0607101v1
- [Has73] „Search for elastic muon-neutrino electron scattering“, F. J. Hasert et. al., Phys. Lett. B 46, 121-124 (1973)
- [Hil10] Dissertation B. Hillen, voraus. 2010
- [Hug08] Diplomarbeit K. Hugenberg, voraus. 2008
- [Kar07] „Besprechung der HV-Versorgung und der Messung von M.Prall am Vorspektrometer“, Protokoll von T. Thümmler, 31.10.2007
- [Kas04] „Effect of energy scale imperfections on results of neutrino mass measurements from β -decay“, J. Kaspar, M. Rysavý, A. Spalek, O. Dragoun, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 527, Issue 3, Pages 423-431 (2004)
- [KAT04] „KATRIN Design Report 2004“, KATRIN Collaboration, FZK Scientific Report 7090, <http://www-ik.fzk.de/katrin>
- [Kau98] „Die magnetische Ablenkbarkeit elektrostatisch beeinflusster Kathodenstrahlen“, W.Kaufmann, Annalen der Physik Volume 301, Issue 6, Date: 1898, Pages: 431-439
- [Kla04] „Search for neutrinoless double beta decay with enriched ^{76}Ge in Gran Sasso 1990-2003“, H. V. Klapdor-Kleingrothaus, I. V. Krivosheina, A. Dietz und O. Chkvorets, Physics Letters B Volume 586, Issues 3-4, Apr. 2004, Pages 198-212
- [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. Thümmler, 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)

- [Lin02] „Transportphänomene in Festkörpern“, A. Lindbaum, Oktober 2002
http://www.ifp.tuwien.ac.at/forschung/andreas.lindbaum/habil_vorlesung_transport.pdf
abgerufen am 27.6.08
- [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)
- [Lor02] „Bayesian analysis of neutrinos observed from supernova SN 1987A“, T. J. Lored, D. Q. Lamb, PHYSICAL REVIEW D, VOLUME 65, 063002, Feb. 02
- [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)
- [Ned37] „Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles“, S. H. Nedermeyer, Phys. Rev. 51, 884 - 886 (1937)
- [Noe07] „Einsatz eines präzisen Spannungsteilers bei der kollinearen Laserspektroskopie, insbesondere bei der Spektroskopie an Be⁺ Ionen – INTERNES MEMO –, 27.Nov.07
- [Ott08] „Neutrino mass limit from tritium β -decay“, E. W. Otten und C. Weinheimer, bisher unveröffentlicht.
- [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
- [PDG07] W.-M. Yao et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 33, 1 (2006)
<http://pdg.lbl.gov/2007/tables/lxxx.pdf>
abgerufen am 24.Apr.08
<http://pdg.lbl.gov/2007/listings/s066.pdf>
abgerufen am 07.Jul.08
- [Per75] „Evidence for Anomalous Lepton Production in e⁺-e⁻ Annihilation“, M. L. Perl et al., Phys. Rev. Lett. 35, 1489 - 1492 (1975)
- [Rei05] „How to detect Big Bang Relic Neutrinos?“, A. Ringwald, arXiv:hep-ph/0505024v1 (2005)
- [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)
- [Rob88] „Direct Measurements of Neutrino Mass“, R. G. H. Robertson, D. A. Knapp, Annual Review of Nuclear and Particle Science, Vol. 38: 185-215 (1988)
- [Rut08] „The Chemical Nature of the Alpha Particles from Radioactive Substances“, E. Rutherford, Nobel Lectures, Chemistry 1901-1921, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1966

- [S-K98] „Constraints on neutrino oscillation parameters from the measurement of day-night solar neutrino fluxes at Super-Kamiokande“, The Super-Kamiokande Collaboration, arXiv:hep-ex/9812009
- [Sch98] „Neutrinoless double- β decay in $SU(2) \times U(1)$ theories“, J. Schechter und J. W. F. Valle, Physical Review D, Volume 25, Number 11, 2951-2954, Jun.1982
- [Smo08] Diplomarbeit J. Smollich, voraus. 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)
- [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: 11.02.2008.
- [Thu08] Persönliche Mitteilung von Dr. T. Thümmeler, Jun.08
- [Tot98] „Electron Neutrino Mass Measurement by Supernova Neutrino Bursts and Implications on Hot Dark Matter“, T. Totani, arXiv:astro-ph/9801104v1
- [Val08] Dissertation K. Valerius, voraus. 2008
- [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/ $^{\circ}$ C, 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
- [WMAP08] „FIVE-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP) OBSERVATIONS: COSMOLOGICAL INTERPRETATION“, arXiv:0803.0547, Mar. 08
- [Wol78] „Neutrino oscillations in matter“, L. Wolfenstein, Physical Review D, Volume 17, Issue 9, Pages 2369-2374 (1978)
- [Zan08] Persönliche Mitteilung von Dr. F. Zandman, Chairman and CEO of Vishay Inter-technology, Inc.

Danksagung

Ich danke Prof. Weinheimer für die Möglichkeit eine sehr interessante Diplomarbeit in einer sehr angenehmen Gruppe bei so einem interessanten Experiment machen zu dürfen. Ich danke ihm außerdem für sein offenes Ohr trotz seines engen Zeitplans.

Ich danke Prof. Wessels dafür, dass er sich als Koreferent für diese Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Ich danke Dr. Thümmel für die sehr gute Betreuung und seine Unterstützung selbst nach seinem Wechsel zum Forschungszentrum Karlsruhe.

Ich danke Herr Ortjohann, Herr Baumeister, Herr Bourichter und der gesamten Feinmechanischen Werkstatt für die Unterstützung bei mechanischen Fragen und für die Fertigstellung von Bauteilen, trotz der hohen Ausbuchung der Werkstatt.

Ich danke Herr Berendes und der gesamten Elektronischen Werkstatt für die Unterstützung bei vielen Fragen und der schnellen Fertigstellung von vielen kleinen Arbeiten.

Ich danke der gesamten Arbeitsgruppe für die angenehme Zeit und die Hilfe bei vielen kleinen Problemen.

Ich danke W. Nörtershäuser und seiner Arbeitsgruppe für die Möglichkeit die Kalibrierungsmessungen am CERN durchführen zu können.

Ich danke R. Marx und der gesamten Physikalisch-Technischen Bundesanstalt für viele Tipps und den Einblick in ihre Arbeit.

Ich danke allen Freunden, Kommilitonen, Bekannten und allen anderen für die unvergesslich schöne Zeit neben dem Studium.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir in jeder Lebenslage geholfen und mir dieses Studium ermöglicht haben.

Besonderer Dank gilt auch meiner Freundin für ihre Unterstützung und ihr Verständnis vor allem in der stressigen Endphase des Studiums.