



WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER



**Charakterisierung von Komponenten und Geräten
für die Präzisionshochspannungsmessung beim
KATRIN-Experiment und beim
CRYRING-Speicherring**

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

vorgelegt von
Maurice Friedrich

2015

Dekan: Prof. Dr. C. Weinheimer
Erster Gutachter: Prof. Dr. C. Weinheimer
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. A. Khoukaz
Datum: 20.10.2015

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

.....
.....
.....

selbstständig verfasst habe, und dass ich keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken - auch elektronischen Medien - dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

Ort, Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	8
1.1 Einführung und Motivation	8
1.2 Allgemeines zur Neutrino-Physik	9
1.3 Bestimmung der Neutrinomasse	12
1.4 Kalibrierung und Zielsetzung der Arbeit	13
1.5 Gliederung der Arbeit	14
2 Das KATRIN-Experiment	16
2.1 Übersicht	16
2.2 Kurze Vorstellung einzelner Komponenten	17
2.2.1 Quell- und Transportsektion	17
2.2.2 Spektrometer	18
2.2.3 Detektor	19
2.3 Die beiden Spannungsteiler K35 und K65	19
2.4 Kalibrierung und Maßstabsfaktor	21
2.5 Systematische und statistische Unsicherheiten	22
3 Der CRYRING-Speicherring	24
3.1 Übersicht	24
3.2 Das Prinzip der Elektronenkühlung	25
3.3 Ausblick auf den Bau eines dritten Spannungsteilers	25
4 Messungen und Auswertungen	28
4.1 Motivation: Kalibrierung und Hochspannungsmessungen	28
4.2 Stabilität der Präzisionsmultimeter und 10 V-Referenzquelle	29
4.3 Charakterisierung des Fluke 335A Kalibrators	34
4.4 Stabilität der Fluke 752A Referenzteiler	39
4.4.1 Messung 1: RT I: „A“ (kalibriert); RT II: „B“ (kalibriert)	41
4.4.2 Messung 2: RT I: „A“ (kalibriert); RT II: „B“ (nicht kalibriert)	45
4.4.3 Messung 3: RT I: „B“; RT II: „A“ (Multimeter getauscht)	47
4.4.4 Messung 4: RT I: „B“ (nicht kalibriert); RT II: „C“ (kalibriert)	48
4.4.5 Messung 5: RT I: „B“ (kalibriert); RT II: „C“ (nicht kalibriert)	49
4.4.6 Messung 6: RT I: „C“ (nicht kalibriert); RT II: „A“ (kalibriert)	50
4.4.7 Zusammenfassung aller Stabilitätsmessungen	52
4.5 Charakterisierung des Fluke 5720A Kalibrators	57
4.6 Stabilitätsmessungen von Hochspannungsnetzgeräten	59
5 Zusammenfassung und Ausblick	64
A Anhang	68
A.1 Selbstgeschriebenes gnuplot-Skript	68
A.2 Zusätzliche bzw. ergänzende Diagramme zu Kapitel 4	69

Kapitel 1

EINLEITUNG

1 Einleitung

1.1 Einführung und Motivation

Die Physik ist eine Naturwissenschaft, die verschiedenste Phänomene in der Natur untersucht. Ob nun diverse Eigenschaften, Verhaltensweisen oder Charakteristika von Systemen untersucht werden, immer weiter ist das Wissen der Menschheit in der Vergangenheit gewachsen und scheint kein Ende zu finden. Dabei hat jede zugrunde liegende Theorie ihre Grenzen und Schwächen, sodass fortlaufend Erweiterungen des Wissens vonnöten sein werden, soll die Welt, in der wir leben, immer besser verstanden werden. So wie auch der berühmte Physiker Sir Isaac Newton einst verlautete:

„Was wir wissen, ist ein Tropfen, was wir nicht wissen, ein Ozean.“
[New27]

In diesem „Tropfen“ steckt dennoch schon eine große Menge an Wissen, welches auch das heute verwendete Standardmodell der Teilchenphysik beinhaltet.

Dieses beschreibt die zurzeit bekannten Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander. Die folgenden Teilchenarten sind enthalten: Die Materienteilchen (Fermionen), aus denen die für uns sichtbare Materie aufgebaut ist und die Kraftteilchen (Bosonen), welche für die Wechselwirkungen zwischen diesen verantwortlich sind. Zudem gilt als weiterer Bestandteil des Standardmodells das erst kürzlich nachgewiesene Higgs-Teilchen, das weder Materie- noch Kraftteilchen zu sein scheint¹. Vielmehr verleiht das bestehende Higgs-Feld den Elementarteilchen ihre Masse. Darüber hinaus hat jedes Teilchen ein entsprechendes Antiteilchen².

Ob Menschen, Tiere, Pflanzen, Erde und Planeten, alles besteht aus Materienteilchen, von denen es zwölf verschiedene gibt. Diese werden zudem in jeweils sechs Quarks und Leptonen unterteilt, die wiederum aus Teilchen dreier Familien bestehen. Im Laufe der Entwicklung des Universums sind allerdings die Teilchen der ersten Familie durch Zerfallsprozesse übrig geblieben, aus der die uns umgebende sichtbare Materie aufgebaut ist. Somit bestehen wir letztlich aus Teilchen wie den Up- und Down-Quarks und den Elektronen³. Protonen und Neutronen hingegen, die aus den Quarks aufgebaut sind, bilden zusammen mit den Elektronen die Bestandteile eines Atoms. In Teilchenbeschleunigern wie dem LHC (*Large Hadron Collider*) am CERN können die anderen Teilchen jedoch künstlich (oftmals nur für Bruchteile einer Sekunde) erzeugt werden. [Bun15]

Das Elektron und das Elektron-Neutrino sind Leptonen aus der ersten Familie. Die anderen Familien enthalten noch das Myon und das Tau, sowie das entsprechende Neutrino.

Die Neutrinos werden im Standardmodell als masselos angesehen. Doch seit durch Neutrinooszillationsexperimente nachgewiesen werden konnte, dass diese Teilchen

¹Man beachte, dass das Teilchen noch nicht vollständig verstanden und charakterisiert ist.

²Einige Teilchen (wie das Photon) sind ihre eigenen Antiteilchen.

³Diese machen jedoch nur einen kleinen Teil unserer Gesamtmasse aus. Den größten Teil machen Gluonen und Seequarks aus.

eine Masse besitzen⁴, hat man durch neue Experimente versucht, diese genauer zu untersuchen. Mithilfe des bald (voraussichtlich Ende 2016) in Betrieb genommenen KATRIN-Experiments soll die Masse des Elektron-Antineutrinos aus dem β -Zerfallsspektrum von Tritium bestimmt werden. Bei KATRIN (**K**Arlsruhe **T**RItium **N**eutrino-Experiment) handelt es sich um ein Hochpräzisionsexperiment, bei dem die statistischen und systematischen Unsicherheiten sehr genau bekannt sein müssen. Die meisten Messgrößen werden daher mit einer Präzision im ppm⁵-Bereich überwacht (mehr siehe Kap. 2), sodass bereits sehr geringe absolute Abweichungen großen Einfluss auf mögliche Messerfolge haben können. [Kat04]

Im Rahmen dieser Arbeit werden zum einen relevante Komponenten und Geräte für die im Zusammenhang für das KATRIN-Experiment durchgeföhrten Messungen charakterisiert. Zum anderen dienen diese Charakteristika gleichwohl auch den Entwicklungen am CRYRING-Speicherring, welcher ein Beitrag Schwedens (Manne-Siegbahn-Labor in Stockholm) zum FAIR-Experiment ist. Untersucht werden dabei genauer Verhaltensweisen verschiedener Geräte, vor allen Dingen wie hoch die Stabilität bei angelegter Spannung ist.

Zu Beginn werden zunächst theoretische Grundlagen zur Neutrinophysik und der Kalibrierungsmethode der Komponenten erläutert, bevor anschließend die beiden zugrunde liegenden Experimente näher vorgestellt werden. Schließlich folgt eine genaue Beschreibung und Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeföhrten Messungen und deren Auswertungen. Zum Schluss folgt noch einmal eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und es wird ein Ausblick gegeben, inwiefern die Messungen und Charakteristika der Komponenten den Fortschritten der betreffenden beiden Experimenten dienen können.

1.2 Allgemeines zur Neutrinophysik

Allgemein sind Neutrinos extrem leichte, elektrisch neutrale, schwach wechselwirkende Elementarteilchen, die in sehr großer Menge⁶ überall im Universum existieren. Beispielsweise durchströmen nur von der Sonne kommend jede Sekunde 70 Milliarden Neutrinos allein den menschlichen Daumennagel. Neutrinos wechselwirken extrem selten mit der uns bekannten sichtbaren Materie. Erkennbar ist dies z.B. an dem sehr geringen Wirkungsquerschnitt oder der mittleren freien Weglänge von etwa 1000 Lichtjahren. Im Falle einer Wechselwirkung mit einem Atomkern wandelt sich dabei ein Proton p in ein Neutron n um (inverser β -Zerfall) und erzeugt zudem, je nach Zerfall, ein Elektron e^- bzw. Positron e^+ . Dies wird auch als β -Zerfall bezeichnet, wobei das Elektron bzw. Positron das Betateilchen ist.

$$\beta^+ \text{-Zerfall : } p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (1)$$

$$\beta^- \text{-Zerfall : } n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

$$\text{inverser } \beta \text{-Zerfall : } \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (3)$$

⁴Dafür gab es dieses Jahr den Nobelpreis für Physik. [Nob15]

⁵parts per million, 10^{-6}

⁶Allein die fortlaufende Fusion in der Sonne erzeugt etwa $2 \cdot 10^{44}$ Neutrinos pro Sekunde! [Son44]

Eingeordnet in das Standardmodell der Elementarteilchen (vgl. Abb. 1) gehören die Neutrinos zur Teilchengruppe der Leptonen. Diese sind punktförmig⁷, d.h. sie haben keinerlei Ausdehnung im Raum. Ferner lassen sich drei neutrale Fermionen finden: So wie es das Elektron, das Myon und das Tau gibt, gibt es das Elektron-Neutrino ν_e , das Myon-Neutrino ν_μ und das Tau-Neutrino ν_τ . Weitere Elementarteilchen bilden die Eichbosonen (Kraftteilchen), die Quarks (ebenfalls Fermionen) und das Higgs-Teilchen. [Mue15] Das Besondere am Neutrino ist nun, dass es das erste Teilchen

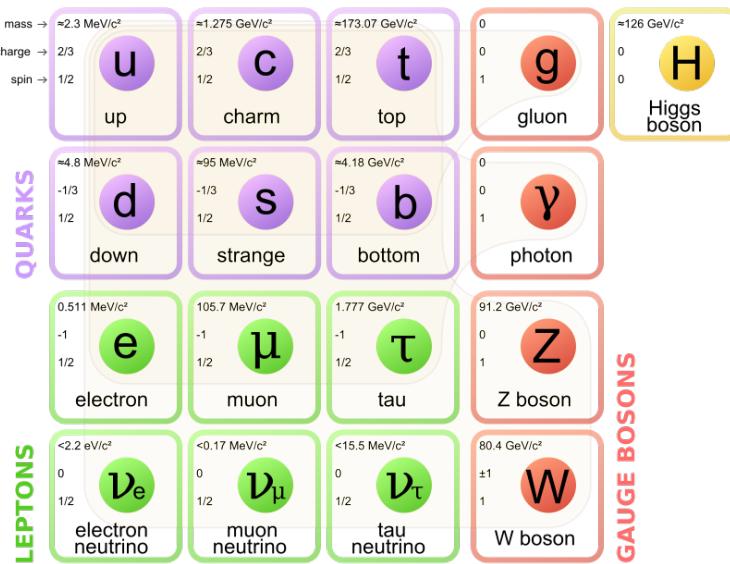


Abbildung 1: **Übersicht über das Standardmodell der Elementarteilchen.** Die Elementarteilchen lassen sich neben dem Higgs-Boson (gelb) in zwei große Bereiche aufteilen, den Eichbosonen (rot) und den Fermionen, wobei diese weiter in Quarks (violett) und Leptonen (grün) unterschieden werden. Unter diesen ordnet sich auch das Neutrino in seinen drei Formen ein. [Sta15]

in der Geschichte der Physik war, welches theoretisch vorhergesagt wurde. Viele Phänomene in der Physik, wie der α - oder γ -Zerfall konnten mithilfe diverser Experimente gut vorhergesagt und verstanden werden. Betrachtet wurden dabei vor allen Dingen die Erhaltungssätze, wie Energie- und Impulserhaltung. Im Jahre 1914 war es James Chadwick, der das Energiespektrum des β -Zerfalls näher untersuchte und dabei eine Entdeckung machte. Entgegen seiner Erwartung eines für einen angenommenen Zwei-Körper-Zerfall typisches diskretes Energiespektrum, konnte ein kontinuierliches Spektrum beobachtet werden. Dies stellte einen entscheidenden Widerspruch zur geforderten Erhaltung der Energie und u.a. des Impulses dar.

Im Jahre 1930 war es daraufhin Wolfgang Pauli [Pau30], der als Erklärung für diesen Widerspruch ein neues hypothetisches neutral geladenes Teilchen postulierte.⁸ Mithilfe des neuen Teilchens konnte demnach der beobachtete β -Zerfall als ein Dreikörper-Problem erklärt werden.

⁷ Auch die Quarks sind punktförmig nach heutigem Wissen.

⁸ Interessanterweise wurde dieses „erdachte“ Teilchen zunächst als „Neutron“ bezeichnet. Später korrigierte man die Bezeichnung in Anlehnung an das heute bekannte Neutron im Atomkern zu „Neutrino“ (kleines Neutron).

Was den experimentellen Nachweis des Neutrinos anbelangt, gelang dieser Cowan und Reines et al. 26 Jahre nach der Postulierung im Jahre 1956. Die Grundidee des Experiments war, dass ein Elektron-Antineutrino aus einem Kernreaktor mit einem Proton innerhalb eines Wassertanks in Wechselwirkung tritt. Durch den Prozess des inversen β -Zerfalls (vgl. Gleichung (3)) entstehen ein Positron und ein Neutron. Während das Positron mit einem Elektron unter Emission zweier Photonen annihielt, wird das Neutron eingefangen, wodurch ebenfalls ein Photon emittiert wird. Die Photonen können letztlich mithilfe von Szintillatoren und Photomultipliern detektiert werden. Für den experimentellen Nachweis des Neutrinos wurde Frederick Reines 1995 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet, während Clyde Cowan 1974 verstarb und sein Beitrag daher nicht in der Form gewürdigt werden konnte.

Ein weiterer Aspekt der Neutrinophysik umfasst das Thema Neutrinooszillation. Ein wichtiges Element ist dabei das solare Neutrinoproblem, dessen genaue Erklärung den (Astro-) Physikern lange Zeit verwehrt blieb. Durch Kenntnis der thermonuklearen Prozesse im Sonneninnern und möglicher Sekundärreaktionen kann die Bildungsrate von Neutrinos angeben werden. So wird aufgrund der Reaktionsgleichungen die bevorzugte Reaktion von nur einem Neutrinentyp aus der Familie, dem Elektron-Neutrino, erwartet. Ferner beträgt der solare Neutrinofluss auf der Erde etwa 70 Milliarden Neutrinos pro Quadratzentimeter und Sekunde. Diese Rate der solaren Neutrinos hat man in zahlreichen Experimenten⁹ versucht zu messen. Wie alle Experimente ergaben, erbrachte die Messung immer weniger solare Neutrinos als erwartet. Es stellte sich folglich die Frage, was mit den Elektron-Neutrinos auf ihrem Weg von der Sonne zur Erde geschieht.

Die Lösung des Problems ist die Neutrinooszillation. Ein gewisser Teil der Neutrinos hat sich in eine andere Familie transformiert. Aus Elektron-Neutrinos wurden auf dem Weg vom Sonneninnern bis hin zum irdischen Detektor Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos. Nachdem diese Möglichkeit eines Typenwechsels lange Zeit nicht in Betracht gezogen und auch im Experiment nicht alle drei Typen empfindlich genug detektiert wurden, konnten 1998 die Super-Kamiokande-Messungen in der Kamioka-Mine in Japan beweisen, dass dieser Prozess der Neutrinooszillation geschieht. Wesentliches Resultat der Messungen war, dass Neutrinos eine Ruhemasse haben und dass die Masseneigenzustände eine nichttriviale Superposition der Flavoureneigenzustände sind. Da bislang allerdings nur die Quadrate der Differenzmassen der drei Familien von Neutrinos aus Oszillationsexperimenten bekannt sind, ist die Kenntnis der absoluten Neutrinomassen von großem Interesse. Diskutiert wird ein Massenbereich zwischen 0,05 und 3 eV [Mue15]; genaue Ergebnisse erhofft man sich aktuell vom KATRIN-Experiment (vgl. Kap. 2).

⁹wie in den berühmten Experimenten Kamiokande und Superkamiokande

1.3 Bestimmung der Neutrinomasse

Um eine möglichst exakte Angabe über die Neutrinomasse machen zu können, bieten sich zur Bestimmung verschiedene Methoden an. Eine Möglichkeit ist der neutrinolose Doppel- β -Zerfall, wie ihn z.B. das GERDA-Experiment (The **G**ERmanium **D**etector **A**rray) untersucht. Ein Nachweis wäre dabei für die Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik relevant, da dieser Zerfall vom Standardmodell nicht vorhergesagt wird. Weitere Möglichkeiten sind Aufbauten wie z.B. das MARE-Experiment (The Microcalorimeter **A**rrays for a **R**henium **E**xperiment) mit kryogenen Bolometern und dem Element Rhenium, welche auf eine direkte Neutrinomassenbestimmung ausgerichtet sind. Die Erfahrung der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass eine der sensitivsten Möglichkeiten zur Bestimmung der Neutrinomasse die kinematische Bestimmung über das Spektrum des β -Zerfalls ist. Der Vorteil dieser Methode liegt u.a. darin, dass keine Modellannahmen einfließen. [Bau10]

Beim β -Zerfall (vgl. auch Gleichungen (1)-(3)) zerfällt ein Mutterkern in einen Tochterkern, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino. Mithilfe der Anwendung von Fermis Goldener Regel¹⁰ unter der Verwendung einer Phasenraumdichte der möglichen Endzustände für das β^- -Spektrum ergibt sich, dass der Einfluss der Neutrinomasse auf den Phasenraumfaktor bedeutender wird, je näher die Elektronenenergie an der Endpunktsenergie liegt. Aus dem β^- -Spektrum kann folglich die Neutrinomasse bestimmt werden. Wichtig ist somit, dass der Einfluss der Neutrinomasse größer wird, je näher man dem kinematischen Endpunkt des Energiespektrums kommt, dieser Bereich folglich möglichst genau untersucht werden sollte. [Kat04]

Weitere Vorteile bei der kinematischen Bestimmung der Neutrinomasse sind beim Zerfall von Tritium gegeben. Ein Tritiumatom zerfällt in ein Heliumion, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino. Die wichtigsten Vorteile von Tritium sind, neben der einfachen Konfiguration, vor allen Dingen die niedrige Endpunktsenergie von $E_0 = 18,6$ keV, die kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren (d.h. eine im Vergleich zu anderen Quellen hohe Aktivität) und die Klassifikation eines übererlaubten Übergangs (wichtig im Bezug auf Fermis Goldene Regel). Analysiert man das Spektrum des Elektrons, lässt sich die gesuchte Masse des Neutrinos bestimmen, da sich die Form des Spektrums im Bereich der Endpunktsenergie abhängig von der Ruhemasse des Neutrinos ändert. [Kat04]

In Abbildung 2 ist zu erkennen, wie sich das Energiespektrum der Elektronen für zwei unterschiedliche Neutrinomassen ändert. In die Region von 1 eV unterhalb der Endpunktsenergie fällt jedoch nur ein sehr geringer Anteil aller Zerfallselektronen, sodass für eine direkte Bestimmung der Neutrinomasse ein Spektrometer mit hoher Luminosität und einer hohen Energieauflösung vollauf benötigt ist.¹¹ [Kat04]

¹⁰Diese beschreibt die Übergangswahrscheinlichkeit pro Zeit, mit der ein Anfangszustand unter dem Einfluss einer Störung in einen anderen Zustand übergeht. (Quantenmechanische Störungstheorie)

¹¹Ein Spektrometer vom MAC-E-Filter Typ erfüllt diese Voraussetzungen und wurde bereits in Experimenten in Mainz und Troizk zur Bestimmung von Obergrenzen für die Neutrinomasse verwendet.

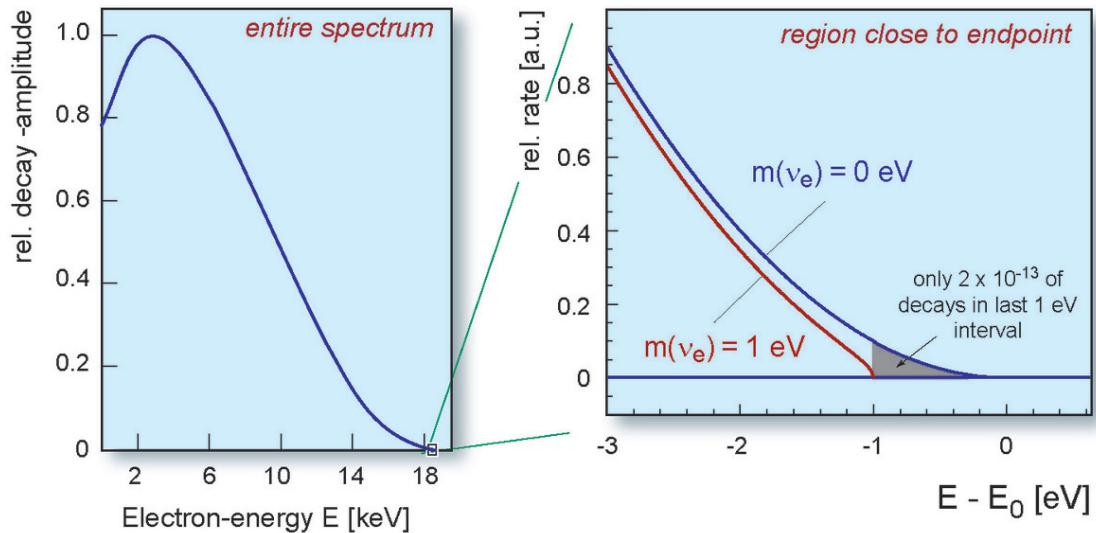


Abbildung 2: **Übersicht über das Energiespektrum des Elektrons beim Tritium- β -Zerfall.** Während in der linken Abbildung das gesamte Spektrum des Tritium- β -Zerfalls gezeigt wird, ist es in der rechten Abbildung auf den Bereich von 3 eV unterhalb des Endpunkts vergrößert worden. Darin beschreibt die blaue Kurve das Spektrum für masselose Neutrinos und die rote Kurve das Spektrum für eine hypothetische Neutrinosmasse von 1 eV. Bei hinreichender Sensitivität kann durch Analyse der Form des Endpunktbereichs des Energiespektrums die Masse des Elektron-Antineutrinos bestimmt werden. [Kat15]

1.4 Kalibrierung und Zielsetzung der Arbeit

Um die geforderte hohe Präzision bei der Vermessung der Endpunktsenergie beim Tritium- β -Zerfall zu gewährleisten, ist eine sorgfältige und zuverlässige Dokumentation der Eigenschaften und Charakteristika der Komponenten und Geräte des Experiments unerlässlich. Besonders wichtig ist dabei eine Kalibrierung der verwendeten Gerätschaften.

„Unter Kalibrieren versteht man das Feststellen und Dokumentieren der Abweichung der Anzeige eines Messgerätes oder einer Steuereinheit vom richtigen Wert der Messgröße.“ [Kal15]

Bei der Kalibrierung der in dieser Arbeit verwendeten Geräte handelt es sich bei der zu vermessenden Größe in aller Regel um die angelegte Spannung, deren richtiger Wert nach Einberechnung der Unsicherheiten möglichst genau bekannt sein muss. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die für die beiden betreffenden Experimente (KATRIN und CRYRING) verwendeten Komponenten und Geräte möglichst genau zu charakterisieren. Eine zentrale Rolle spielt dabei die Analyse der Stabilität des ausgegebenen Spannungswerts abhängig vom jeweiligen Gerät, um gesicherte Erfahrungen im Umgang damit zu sammeln.

1.5 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung von Komponenten und Geräten für die Präzisionshochspannungsmessung beim KATRIN-Experiment und beim CRYRING-Speicherring. Dabei werden Ergebnisse von Stabilitätsmessungen der verwendeten Multimeter, Charakterisierungen der eingesetzten Kalibratoren und - als Hauptthema der Arbeit - die Messungen zur Stabilität der Referenzteiler präsentiert. Außerdem werden Charakterisierungen weiterer Geräte vorgestellt.

- **Kapitel 1** gibt neben einer Einführung und der Motivation für diese Arbeit einen allgemeinen Einblick in die Neutrinosphysik. Ferner wird nach der Bedeutsamkeit der Vermessung der Neutrinomasse im Rahmen des KATRIN-Experiments die Zielsetzung dieser Arbeit vorgestellt.
- **Kapitel 2** stellt das erste betreffende Experiment vor. Nach einer Übersicht über das KATRIN-Experiment und dessen einzelner Komponenten wird die Methode der Kalibrierung und Bestimmung eines Maßstabsfaktors erläutert. Außerdem werden die bereits gebauten und eingesetzten Spannungsteiler K35 und K65 in diesem Zusammenhang präsentiert. Zuletzt folgt eine kurze Vorstellung der statistischen und systematischen Unsicherheiten des Experiments.
- In **Kapitel 3** folgt darauf eine Vorstellung des zweiten Experiments in Form des CRYRING-Speicherrings. Nach einer kurzen Vorstellung des Prinzips der Elektronenkühlung, folgt eine Hinführung zum dort in Zukunft eingesetzten Spannungsteiler, der als dritter seiner Art nach dem K35 und dem K65 in Planung ist.
- **Kapitel 4** bietet die ausführliche Vorstellung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen. Neben der Motivation für Hochspannungsmessungen, folgen die Darstellungen der Messergebnisse der Charakterisierungen der einzelnen Komponenten und Geräte. Zunächst geht es um die Stabilität der Multimeter und verwendeter 10 V-Referenz und Charakterisierung der Kalibratoren. Anschließend folgt das Hauptthema der Arbeit in Form der Stabilitätsmessungen der Referenzteiler. Abschließend werden drei Hochspannungsnetzgeräte untersucht.
- **Kapitel 5** fasst die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammen und vergleicht die gewonnenen Resultate mit Herstellerangaben. Mögliche Verbesserungen der Messungen werden diskutiert. Abschließend wird noch ein Ausblick auf weitere Aufgaben und des Nutzens dieser Arbeit in Form einer neu entwickelten Kalibrierungsmethode gegeben.

Kapitel 2

DAS KATRIN-EXPERIMENT

2 Das KATRIN-Experiment

In diesem Kapitel wird das primär betreffende Experiment, das **K**Arlsruhe **T**RItium Neutrino-Experiment näher vorgestellt und auf dessen zentrale Komponenten im Hinblick auf Funktion und Zweck eingegangen. Anschließend werden die im Rahmen dieses Projektes bereits gebauten und verwendeten beiden Spannungsteiler K35 und K65 präsentiert und die Methode der Kalibrierung mitsamt Bestimmung eines Maßstabsfaktors erläutert. Abschließend folgt eine Betrachtung der statistischen und systematischen Unsicherheiten und Fehlerbetrachtung der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Geräte.

2.1 Übersicht

Allgemein ist das Ziel des in Karlsruhe aufgebauten KATRIN-Experiments die direkte Bestimmung der Neutrinomasse aus dem Endpunkt des Tritium- β -Zerfalls. Es befindet sich auf dem Gelände des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), da dort vom TLK (Tritiumlabor Karlsruhe) die für die Durchführung des Experiments erforderliche Menge an Tritium direkt zur Verfügung gestellt werden kann.

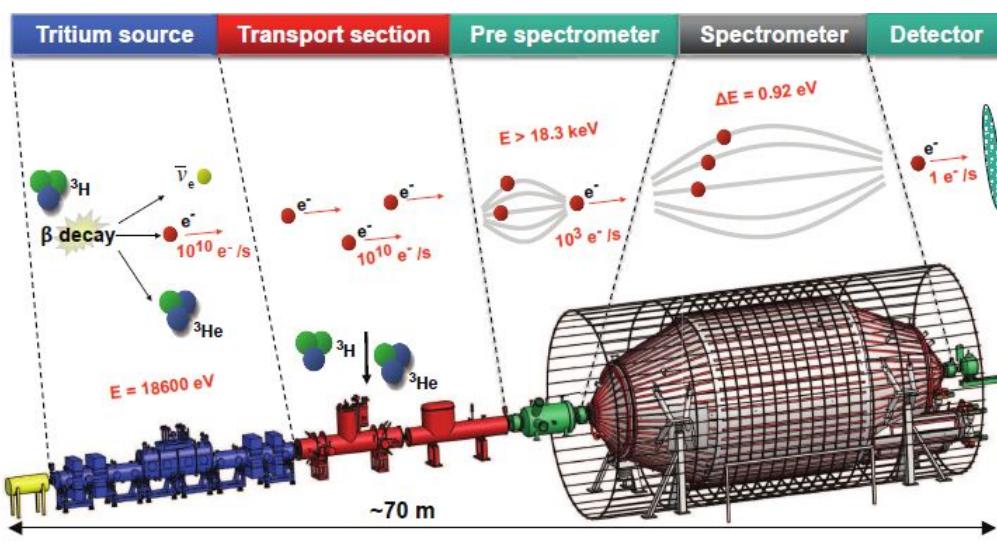


Abbildung 3: **Übersicht über den Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments.** Links im Bild befindet sich die fensterlose Tritiumquelle, in der Tritium unter Emission eines Elektrons und eines Elektron-Antineutrinos zu ${}^3\text{He}$ zerfällt. Danach werden die Elektronen durch magnetische Felder zur Transportsektion geführt, die zur Filterung der Zerfallselektronen vom Gas dient. Im Vor- und Hauptspektrometer findet daraufhin eine Energieselektion der Elektronen statt (Prinzip des MAC-E-Filters). Zuletzt können die transmittierten Elektronen im Detektor nachgewiesen werden. [Kit15]

Mithilfe eines großen Hauptspektrometers wird die Energie der beim Tritium- β -Zerfall entstehenden Elektronen bestimmt, um anschließend aus dem Verlauf des Energiespektrums im Endpunktbereich die gesuchte Masse des Elektron-Antineutrinos zu erhalten. Im Vergleich zu den beiden Vorgängerexperimenten in Mainz und Troizk

sind die technischen Anforderungen für das KATRIN-Experiment signifikant größer. Die bisherige Obergrenze der Neutrinomasse von etwa 2 eV soll unterschritten und eine Sensitivität von $m_\nu = 0,35$ eV (5σ) erreicht werden. Auch falls keine direkte Massenbestimmung möglich sein sollte, kann eine neue Obergrenze von $m_\nu < 0,2$ eV (90% C.L.) bestimmt werden. Der bereits im letzten Kapitel angeführte Vorteil der Neutrinomassenbestimmung mittels einer kinematischen Betrachtung des Tritium- β -Zerfalls bietet den Vorteil eines modell-unabhängigen Messprinzips. Der Aufbau des Experiments im Einzelnen ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Zu erkennen sind auch die Komponenten des Gesamtaufbaus, die im folgenden Teil des Kapitels nun näher erläutert werden. [Kat04]

2.2 Kurze Vorstellung einzelner Komponenten

2.2.1 Quell- und Transportsektion

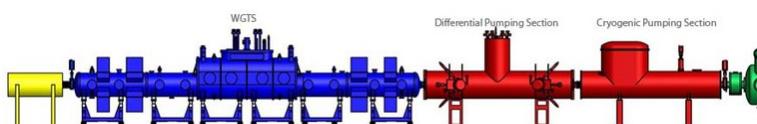


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Transportsektion des KATRIN-Experiments. Zu erkennen sind die einzelnen Komponenten der Quell- und Transportsektion mit der fensterlosen Tritiumquelle (blau), einer differentiellen Pumpstrecke (rot, links) und einer kryogenen Pumpstrecke (rot, rechts). [Tra15]

Die fensterlose Tritiumquelle (*windowless gaseous tritium source*, WGTS) besteht aus einem 10 m langen zylindrischen Rohr mit einem Durchmesser von 90 mm (vgl. Abb. 4, blau). Das für den Versuch benötigte Tritium-Gas hat eine Isotopenreinheit von über 95 % und wird nach Herunterkühlen auf 30 K über mehrere Kapillare in der Mitte des Rohres mit einem Druck von $p = 3,4 \cdot 10^{-3}$ mbar eingelassen. Dabei muss die Temperatur mit einer Genauigkeit von 30 mK stabilisiert sein und gewährleistet werden, dass der Einlassdruck des Tritiums zeitlich konstant ist. Durch Diffusionsprozesse breitet sich das Gas nach Einlass zu beiden Enden des Rohres aus und die durch den β -Zerfall emittierten Elektronen werden durch ein Magnetfeld adiabatisch dorthin geführt. Überschüssiges Gas wird abgepumpt und nach Prüfung der Reinheit in die Quelle zurückgeführt. Erreicht werden kann eine Zerfallsrate von 10^{11} Elektronen pro Sekunde. [Kat04]

Die anschließende Transportsektion besteht aus einer differentiellen (DPS2F) und einer kryogenen (CPS) Pumpstrecke, die dazu dient, das Tritium bzw. dessen Zerfallsprodukte aus dem Flussschlauch zu entfernen. Auf der einen Seite dient die DPS2F (*differential pumping section*) dazu, die durch Diffusionsprozesse neutralen Tritiummoleküle und Ionen mithilfe von Turbomolekularpumpen abzupumpen, während die Elektronen durch den Flussschlauch geführt werden. Dabei reduziert sich der Tritiumfluss von etwa $3 \cdot 10^{17}$ auf etwa $3 \cdot 10^{12}$ Moleküle pro Sekunde. Auf der anderen Seite besteht auch die CPS (*cryogenic pumping section*) aus verwinkelten

Rohrsegmenten, um eine mögliche direkte Diffusion von Tritiummolekülen zu verhindern. Dieser Teil sorgt dafür, dass das Tritium an der etwa 3 K kalten und mit Argonfrost bedeckten Oberfläche gefangen wird, um den Tritiumfluss noch einmal deutlich auf etwa $10^{-14} \frac{\text{mbar l}}{\text{s}}$ abfallen zu lassen. [Kat04]

2.2.2 Spektrometer

Einen großen Teil des gesamten KATRIN-Experiments stellt die Sektion der Spektrometer dar. Sie besteht aus drei eigenständigen elektrostatischen Spektrometern, die alle nach dem Prinzip eines MAC-E-Filters (*Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter*) [Mac15], [Kat01] arbeiten.

Zunächst filtert das Vorspektrometer die Elektronen, die 300 eV unter dem Endpunkt des Tritium- β -Zerfalls liegen, da diese keine zugänglichen Informationen zur Neutrinomasse tragen. Es handelt sich um einen zylindrischen Tank mit einer Länge von etwa 3,50 m, umgeben von zwei Magnetspulen zur Formung des magnetischen Feldes. So werden bereits die meisten für die letztendliche Neutrinomassenbestimmung unbrauchbaren Elektronen aussortiert. [Kat01]



Abbildung 5: **Transport des Hauptspektrometers.** Das Beispielfoto demonstriert, welche Ausmaße die Größe des Hauptspektrometers des KATRIN-Experiments hat. Der Transport erfolgte vom Konstruktionsort Deggendorf nach Karlsruhe. [Spe15]

Anschließend werden im Hauptspektrometer (vgl. Abb. 5) die kinetische Energie der Elektronen im Endpunktbereich des Tritium- β -Zerfalls nach dem Prinzip eines integrierenden Hochpass-Filters bestimmt. Nach dem Prinzip des MAC-E-Filters hängt dessen Auflösung direkt von dem Verhältnis zwischen minimaler und maximaler magnetischer Feldstärke ab. Mit den im Experiment verbauten Magneten wird eine maximale magnetische Feldstärke von etwa $B_{max} = 3,5$ T erreicht, während die Feldstärke in der Analysierebene auf etwa $B_{min} = 3 \cdot 10^{-4}$ T abfällt. Zur Feinjustierung des anliegenden elektrischen Feldes und zur Untergrundreduktion befindet sich

innerhalb des Tanks zusätzlich ein Drahtelektrodensystem¹². Der Spektrometertank weist einen Durchmesser von bis zu 9,80 m auf bei einer Gesamtlänge von 23,28 m und einem Volumen von 1400 m³ auf. Der Druck von 10⁻¹¹ mbar bei diesem Tankvolumen wurde dabei erstmals weltweit in dieser Größenordnung erreicht.

Mithilfe des dritten Spektrometers, dem Monitorspektrometer, werden die Position der monoenergetischen Konversionselektronenlinien von radioaktivem Krypton vermessen. Es dient zur Spannungsüberwachung des Hauptspektrometers und ist lediglich über das Retardierungspotential mit dem restlichen Aufbau verbunden. [Kat01] Bei Inbetriebnahme des gesamten Aufbaus befinden sich die Spannungsteiler K35 und K65 im Gebäude des Hauptspektrometers direkt beim Hauptspektrometer.

2.2.3 Detektor

Den letzten großen Teil des Aufbaus stellt der Detektor dar. Dorthin gelangen Elektronen mit ausreichend hoher Energie, um das Retardierungspotential zu überwinden und werden nachgewiesen. Den Detektor bildet eine Silizium-PIN-Diode mit einem Durchmesser von 90 mm, bestehend aus 148 gleich großen Segmenten, die wiederum in 12 Ringen mit je 12 Pixeln angeordnet sind. Zur besseren Nachweisbarkeit werden die Elektronen zuvor mit einer Spannung von bis zu 30 kV nachbeschleunigt, um Untergrundeffekte zu minimieren. Die Unterteilung der Diode führt daher, mögliche Inhomogenitäten im elektrischen und magnetischen Feld später in der Datenanalyse zu berücksichtigen. Ferner benötigt der Detektor zwar aufgrund der bereits im Hauptspektrometer erfolgten Energiebestimmung keine hohe Energieauflösung, muss jedoch für den Betrieb in sehr starken Magnetfeldern konstruiert sein, sollte eine hohe Nachweiseffizienz für Elektronen und eine geringe Untergrundzählrate vorweisen. [Kat04]

2.3 Die beiden Spannungsteiler K35 und K65

Die im KATRIN-Experiment hochpräzise zu vermessene Energie der beim Tritium-β-Zerfall emittierten Elektronen ist etwa 18,6 keV. Die Energie der schnellsten Elektronen wird dabei über das elektrostatische Analysierpotential des Hauptspektrometers gemessen. Der fehlende Energiebeitrag entspricht der Masse der Neutrinos. Zur Messung und Überwachung der Potentialdifferenz zwischen Quelle und Spektrometer wurden dafür am Institut für Kernphysik der Universität Münster in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zwei Spannungsteiler (K35 und K65) gebaut, die für Gleichspannungen bis 35 kV bzw. 65 kV konstruiert wurden.

Zur direkten Messung des Retardierungspotentials von -18,6 kV teilen die Spannungsteiler die Spannung auf etwa 10 V herunter, um diese so präzise wie möglich mit kommerziellen Präzisionsmultimeter messen zu können. Der eigentliche Grund der Konstruktion lag darin, dass keine kommerziellen Spannungsteiler mit diesem hohen Grad an Präzision zur Verfügung standen.

¹²mehr Informationen vgl. [Kat04]



Abbildung 6: Archivfoto (Bildausschnitt) des etwa 1,70 m hohen Spannungsteilers K35 während der Testmessungen im Labor der PTB Braunschweig. [Thu07]

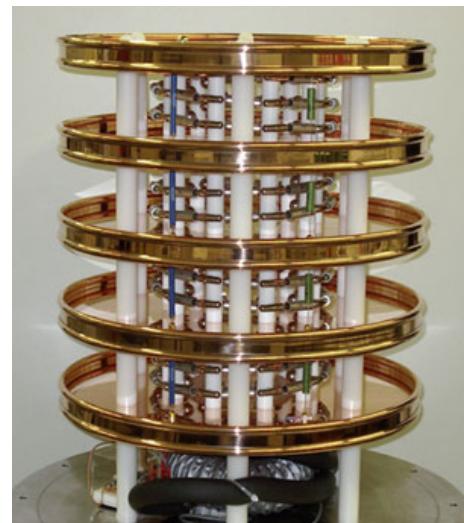


Abbildung 7: Zum Vergleich ist der innere Aufbau des K35 gezeigt. Man erkennt den durch die Kupferelektroden vierstufig unterteilten Aufbau und die beiden Teilerketten. [Spa15]

Der erste entwickelte Teiler mit der Bezeichnung K35 (vgl. Abb. 6 und 7) ist für Spannungen bis zu 35 kV ausgelegt. Die Weiterentwicklung stellt der K65 dar, der entsprechend seiner Bezeichnung für Spannungen bis zu 65 kV ausgelegt ist¹³. Beide Teiler sind nach dem gleichen Prinzip eines in der PTB entwickelten 100-kV-Normalspannungsteilers¹⁴ aufgebaut, wobei der Unterschied darin besteht, dass der K65 eine größere Teilerkette mit mehr Widerständen besitzt und im Gegensatz zum K35 aus 6 Ebenen besteht.

Zum Schutz vor äußeren Einflüssen sind sie in einem gasisolierten Behälter abgeschirmt und temperaturstabilisiert. Außerdem konnte die belastungsabhängige Drift des Teilungsverhältnisses durch Selektion der Teilerwiderstände reduziert werden. Zusätzlich führte eine Temperaturstabilisierung auf $\pm 0,2$ K zu extrem stabilen Teilungsverhältnissen (und damit konstantem Maßstabsfaktor, vgl. Kap. 2.4). Schließlich konnte auch bei Belastung die Unsicherheit des Teilungsverhältnisses bei 18 kV auf unter $2 \mu\text{V}/\text{V}$ und damit unter den für KATRIN geforderten Grenzwert von $3 \mu\text{V}/\text{V}$ gebracht werden. [Ptb15]

Eine Beschreibung des Aufbaus und der Kalibrierung der Teiler folgt im nächsten Unterkapitel.

¹³Der erste Teiler K35 wurde im Rahmen der Dissertation von [Thu07] gebaut. Der zweite Teiler K65 wurde in [Bau10] entwickelt und gebaut.

¹⁴Prinzip des MT100-Spannungsteilers der PTB [Mar01]

2.4 Kalibrierung und Maßstabsfaktor

Um die Funktionsweise eines Spannungsteilers besser verstehen zu können, soll zunächst das grundlegende Prinzip dargestellt werden. Durch die Reihenschaltung mehrerer ohmscher Widerstände R_i und Messung des Spannungsabfalls über einem oder mehreren Abgriffwiderständen R_{meas} der Teilerkette, kann eine angelegte Spannung herunter geteilt werden. Es lässt sich ein Maßstabsfaktor M wie folgt definieren als das Verhältnis von Eingangsspannung U_{in} zur Ausgangsspannung U_{out} :

$$M := \frac{U_{in}}{U_{out}} = \frac{\Sigma R_i + R_{meas}}{R_{meas}}. \quad (4)$$

Bei Hochspannungsteilern besteht die Teilerkette aus vielen hochohmigen (meist $M\Omega$ bis $G\Omega$) in Reihe geschalteten Widerständen und die Spannung wird über einem Niederspannungswiderstand abgegriffen, der sich im hinteren Teil der Kette befindet. Die grundlegende Schaltung zeigt Abbildung 8 am Beispiel des K65.

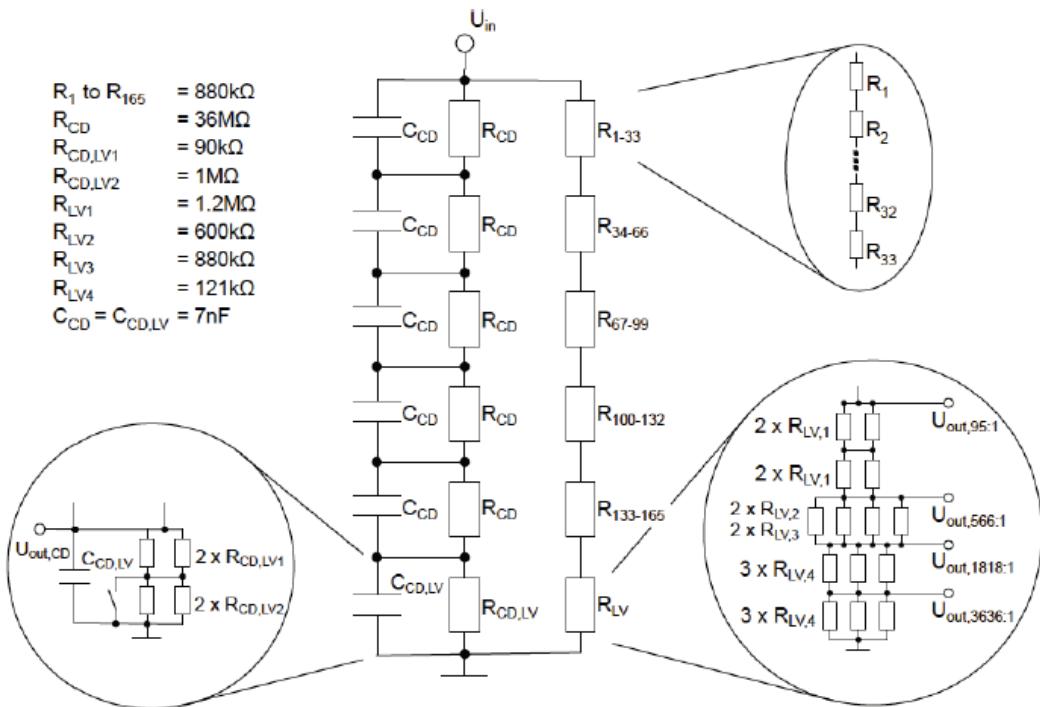


Abbildung 8: **Übersicht über die Schaltkizze des K65.** Der linke Teil stellt den Kontrollteiler (*control divider*) dar, der aus den Kondensatoren C_{CD} , die parallel zu den Widerständen R_{CD} geschaltet sind, besteht. Der rechte Teil zeigt die Widerstände $R_1 \dots 165$, die die Präzisionsteilerkette (auch Primärteilerkette) bilden. Die Spannung wird dabei an den Widerständen R_{LV} (*low voltage*) abgegriffen. [Bau13]

Wie in der Schaltkizze zu erkennen, besitzt der K65 eine Primär- und eine Kontrollteilerkette. Der Primärteiler besteht aus insgesamt 165 in Reihe geschalteten $880 \text{k}\Omega$ Präzisions- und zusätzlich den jeweiligen Abgriffwiderständen. Es sind verschiedene Maßstabsfaktoren realisiert, deren Spannungsabgriffe sich am Ende der Teilerkette im Niederspannungsbereich befinden. Die Unterteilung des Aufbaus in 6 Ebenen

beim K65 röhrt daher, ein möglichst homogenes elektrisches Feld zu formen, welches die Präzisionswiderstände umgibt. In der jeweils untersten Ebene befinden sich die Abgriffwiderstände. Der Kontrollteiler hingegen besteht aus 6 in Reihe geschalteten Kondensatoren, die mit einem ohmschen Widerstand parallel geschaltet sind. Seine Funktion besteht darin, zum einen die primäre Teilerkette vor Hochspannungstransienten zu schützen und zum anderen die Eingangsspannung auf Wechselspannungsanteile hin zu überprüfen. Die verwendeten Widerstände der Präzisionsteilerkette werden gesondert durch zahlreiche Messungen ausgewählt. Widerstände mit einem negativen und einem positiven Temperaturkoeffizienten wurden gemeinsam zu einer bestmöglichen Kompensierung von Temperaturänderungen zusammengestellt. Ziel ist eine bestmögliche Stabilisierung der Temperatur ($\pm 0,1$ K).

Wird die angelegte Spannung mithilfe der Spannungsteiler auf etwa 10 V reduziert, wird sie mit Präzisionsmultimetern (Fluke 8508A¹⁵) gemessen. Für eine ppm-genaue Messung sind regelmäßige Kalibrierungen notwendig. Dazu wird eine kommerzielle 10 V Referenzquelle (Fluke 732A¹⁵) verwendet, um die Spannungsverstärkung der Multimeter zu ermitteln. Der Spannungswert der Referenzquelle ist dabei fest definiert und ist als absoluter Wert auf dem Gerät angegeben.¹⁶ Neben der Verstärkung (abgekürzt G für *gain*) der Multimeter wird noch die Offsetspannung (abgekürzt U_0) berücksichtigt, indem man die Eingänge kurzschließt. Diese Effekte sind zwar in der Regel sehr klein, dennoch dürfen sie aufgrund der erforderlichen Präzision nicht vernachlässigt werden und sollten vor jeder Präzisionsmessung bestimmt werden. Weitere Erläuterungen und Ausführungen zur Kalibrierung der Spannungsteiler und anderer Komponenten folgen in Kapitel 4.

2.5 Systematische und statistische Unsicherheiten

Es sind die systematischen und statistischen Unsicherheiten, die die Sensitivität des KATRIN-Experiment für eine Neutrinomasse im Sub-eV-Bereich definieren. Ausführliche Beschreibungen, Simulationen und Diskussionen der Unsicherheiten sind bereits in [Kat04] oder [Thu07] dokumentiert. An dieser Stelle wird lediglich ein kurzer Überblick über diese gegeben.

Im Wesentlichen hängen die Unsicherheiten von der Breite des Analyseintervalls um den Endpunkt des Spektrums ab. Die systematische Unsicherheit setzt sich hauptsächlich aus fünf großen Anteilen zusammen, wie z.B. der Transmissionsfunktion und der Energieverlust der WGTS oder der Überwachung des Retardierungspotentials und Bestimmung der Spannungsdifferenz zwischen Quelle und Hauptspektrometer. Die Obergrenze für jeden Teil ist $0,0078 \text{ eV}^2/\text{c}^4$, was auf eine Obergrenze für die Standardabweichung von $\sigma = 0,061 \text{ eV}$ führt. Da die Endpunktsenergie des Tritium- β -Zerfalls bei etwa 18,6 keV liegt, muss die erforderliche relative Stabilität und Reproduzierbarkeit (z.B. der Maßstabsfaktoren der Spannungsteiler) bei 3,3 ppm liegen. Für eine genaue Betrachtung der Fehler der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Geräte sei auf Kapitel 4 verwiesen.

¹⁵vgl. Kap. 4.2

¹⁶An der PTB wird diese Quellen regelmäßig gegen das Josephson-Spannungsnormalkalibriert.

Kapitel 3

DER CRYRING-SPEICHERRING

3 Der CRYRING-Speicherring

In diesem Kapitel wird das zweite betreffende Experiment näher vorgestellt. Im Rahmen der internationalen Beschleuniger-Anlage FAIR¹⁷ entsteht der sogenannte CRYRING-Speicherring¹⁸. Dieser enthält u.a. einen Elektronenkuhler, dessen Betriebsspannung mit Hilfe eines neuen Präzisionsteilers überwacht werden soll. Der Ring und die Funktionsweise des Elektronenkuhlers werden im Folgenden kurz vorgestellt.

3.1 Übersicht

Gefertigt und betrieben wurde der CRYRING-Speicherring zunächst im Manne-Siegbahn-Labor in Stockholm (Schweden) und anschließend an die zukünftige Beschleunigeranlage FAIR geliefert. Diese ist eine neue und einzigartige internationale Anlage zur Forschung mit Antiprotonen und Ionen. In der Nähe von Darmstadt (Hessen) wird sie in den nächsten Jahren in Betrieb genommen und soll mehr als 3000 Forschern aus ca. 50 Ländern vielfältige innovative Forschungsmöglichkeiten bieten. Weitreichende Erkenntnisse über bisher unerforschte Zustände von Materie und zur Entstehung des Universums sollen hervorgebracht werden [Fai15].

Der CRYRING hat einen Durchmesser von 18 Metern. Nach Tests an der bestehenden GSI-Beschleunigeranlage ist geplant, ihn langfristig für die atomphysikalische Forschung mit langsamen Ionen an FAIR einzusetzen. Abbildung 9 zeigt den in Schweden zu Forschungszwecken aufgebauten CRYRING, der zurzeit an der GSI wieder aufgebaut wird [Cry15].

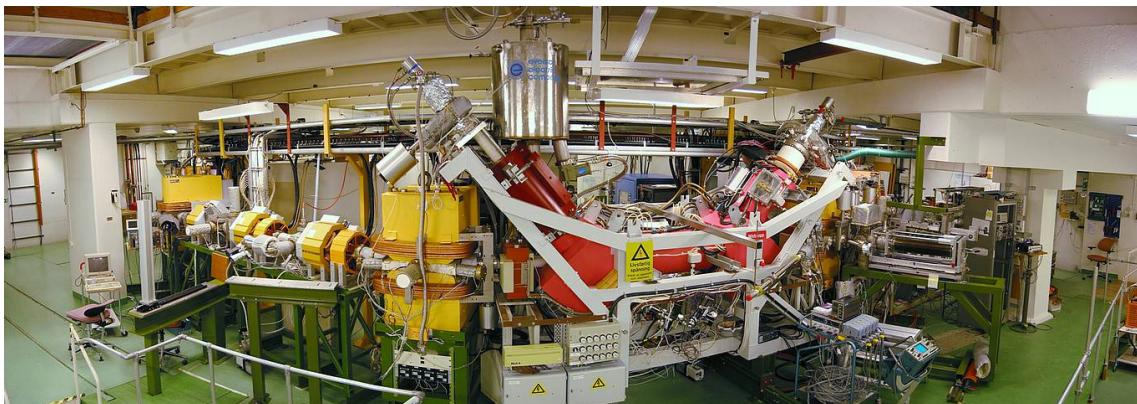


Abbildung 9: **Übersicht über den Aufbau des CRYRING-Speicherrings.** Bisher wurde an dem gezeigten Speicherring in Schweden geforscht. Daraufhin wurde er schrittweise in mehreren LKW-Ladungen zur GSI geliefert, wo er aktuell wieder aufgebaut wird [Cry15].

¹⁷Facility for Antiproton and Ion Research

¹⁸Cryebis Storage Ring

Ein Teil der CRYRING-Lieferung ist eine eigene Ionenquelle, die eine eigenständige Nutzung des Speicherrings ermöglicht während die GSI-Anlage nicht verfügbar ist. Ein neues Beschleunigerkontrollsysteem für die FAIR-Anlage soll erstmals mithilfe des neuen Speicherrings getestet und optimiert werden. Im Ring selber können Ionen zur Kollision mit Materialproben gebracht werden und Stöße der gespeicherten Ionen mit Elektronen, Photonen oder Gasatomen beobachtet werden. Interessant sind diese neben der Atomphysik und der Materialforschung auch für die Plasma- und Kernphysik.

Zu den technischen Besonderheiten des CRYRINGS gehört ein leistungsstarker Elektronenkühler, der genutzt wird, um die Breite der Impulsverteilung der gespeicherten Ionen zu minimieren.

3.2 Das Prinzip der Elektronenkühlung

Ende der sechziger Jahre entwickelte der Physiker Gersch Izakowitsch Budker [Wik15] in Nowosibirsk eine Methode, um Protonen, Antiprotonen oder allgemein Ionen in einem Speicherring eine einheitliche Sollgeschwindigkeit aufzuprägen. Bei der so genannten Elektronenkühlung werden Elektronen möglichst exakt auf Betrag und Richtung der Sollgeschwindigkeit gebracht. In einem mit dieser Sollgeschwindigkeit bewegten Koordinatensystem, erscheinen die abweichenden Geschwindigkeiten der einzelnen Ionen als unregelmäßige Bewegungen. Diese können mit einer Temperatur charakterisiert werden.

Die Idee ist, dass die Temperatur des Ionenstrahls sinkt, wenn die Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit kleiner werden. Dem Ionenstrahl wird dazu auf einer Strecke von etwa zwei Metern ein paralleler Strahl von Elektronen mit wohldefinierter Geschwindigkeit überlagert. Damit die Ionen exakt die Geschwindigkeit des Elektronenstrahls erhalten, tauscht jedes im Speicherring zirkulierende Ion mehr als eine Million Mal pro Sekunde Energie mit dem Elektronenstrahl aus und gleicht dabei seine Geschwindigkeit den Elektronen an. Dadurch verringert sich der Durchmesser des Ionenstrahls auf wenige Millimeter und seine Divergenz wird stark reduziert. Durch diese Kühlung erreicht man für viele Minuten bis Stunden ein für die Experimente geforderten energiescharfen Ionenstrahl, der im Ultrahochvakuum des Speicherrings kreist.¹⁹ [Ele15]

3.3 Ausblick auf den Bau eines dritten Spannungsteilers

Der CRYRING-Speicherring liefert die Möglichkeit, Berechnungen von atomaren Strukturen mit Strahlen langsamer exotischer Ionen bei Energien von 0,3 MeV/u bis 15 MeV/u zu kontrollieren. Um die Ionen zu kühlen und eine möglichst geringe Impulsverteilung des Strahls zu erreichen, findet ein Elektronenkühler Anwendung. Der Ionenstrahl wird dabei mit einem monoenergetischen Elektronenstrahl überlagert. Beim LIBELLE-Experiment zur Vermessung der Hyperfeinstruktur in Lithium-ähnlichen Bismut am ESR²⁰ war die einschränkende Unsicherheit die Mes-

¹⁹Eine weitere Methode stellt die sogenannte stochastische Kühlung dar.

²⁰Experimental Storage Ring

sung der Spannung des Elektronenkühlers, welche die Impulsverteilung der Ionen festlegt. Diese Unsicherheit konnte bei neuesten Experimenten jedoch durch lokale Präzisionsmessung der Kühlerspannung beseitigt werden. Möglich war dies mithilfe eines Präzisionshochspannungsteilers, der vorübergehend von der PTB bereitgestellt werden konnte. Für den Einsatz am CRYRING wird derzeit ein neuer, dritter Präzisionshochspannungsteiler nach Vorbild der beiden schon existierenden Teiler K35 und K65, die in Münster für das KATRIN-Experiment konstruiert wurden, entwickelt. Dieser soll für Spannungen bis 35 kV eingesetzt werden und speziell den Bedürfnissen bei der Vermessung der Kühlerspannung am CRYRING angepasst sein. Die Präzision des Teilers soll im niederen ppm-Bereich liegen und damit Messunsicherheiten unter 10^{-5} erlauben. [Win15]

Kapitel 4

MESSUNGEN UND AUSWERTUNGEN

4 Messungen und Auswertungen

4.1 Motivation: Kalibrierung und Hochspannungsmessungen

Wie in Kapitel 2.4 bereits angedeutet, stellen die beiden Präzisionsspannungsteiler K35 und K65 zentrale Komponenten zur Spannungsüberwachung des Hauptspektrometers im Rahmen des KATRIN-Experiments dar. Um die erforderliche Präzision bei der Messung des Retardierungspotentials erreichen zu können, wird die Spannung im 18,6 kV-Bereich in einen für die Präzisionsmultimeter optimalen Bereich von 0-20 V geteilt. Für die Kenntnis eines absoluten Teilverhältnisses der beiden KATRIN Spannungsteiler sind regelmäßige Kalibrierungen der betreffenden Komponenten vonnöten.

Die Niederspannungskalibrierung stellt eine zuverlässige Kalibrierungsmethode der beiden Teiler K35 und K65 bis zu 1 kV dar. Da im (für den Messbetrieb erforderlichen) Spannungsbereich von 18,6 kV jedoch u.a. mit Erwärmungseffekten und Leckströmen zu rechnen ist, die das Teilverhältnis beeinflussen könnten, ist eine Erweiterung des Verfahrens unter Hochspannungsbedingungen erforderlich. Die Entwicklung einer neuen Absolutkalibrierung in [Res18] der Spannungsteiler in diesem Spannungsbereich ermöglicht eine genaue Maßstabsbestimmung unabhängig von der Kalibrierung an der PTB.

Zunächst müssen die 10 V-Referenzquellen (Fluke 732A) kalibriert werden. Diese werden von der PTB bereitgestellt und werden dort regelmäßig gegen das Josephson-Spannungsnormal kalibriert. Die mit Spannungen bis zu 20 V verwendeten Präzisionsmultimeter (Fluke 8508A und Agilent 3458A) können mit Hilfe der Referenzquellen kalibriert werden. Um Hochspannungen bis zu 1 kV ppm-genau messen zu können, werden Referenzteiler (Fluke 752A) verwendet, die Hochspannungen im Verhältnis 10:1 bzw. 100:1 herunter teilen können. Diese werden vor jeder Messung einer Selbstkalibrierung unterzogen. Zudem ist das Stabilitätsverhalten der einzelnen Geräte von Interesse. Die Referenzteiler werden daher hinsichtlich ihrer Stabilität untersucht, da mit deren Hilfe auch die Maßstabsfaktoren der beiden KATRIN Spannungsteiler bestimmt werden. Geprüft wird, ob die Referenzteiler gemäß der Herstellerangaben stabil sind.

Zur Berechnung eines Maßstabsfaktors ist wichtig, regelmäßig den Offset U_0 und die Verstärkung G der verwendeten Multimeter zu bestimmen. Werden diese Werte nicht neu ermittelt, sind entweder aus bereits bekannten Messungen die Werte übernommen, oder diese zu $U_0 = 0$ V und $G = 1$ angenommen worden.

Um bestmögliche Ergebnisse zu erreichen, sind stabile äußere Bedingungen von Bedeutung. Neben der Abschirmung von elektromagnetischen Störquellen (z.B. durch Schaltschränke) ist eine Temperaturstabilisierung der Versuchsaufbauten entscheidend. Näher wird dazu in den einzelnen Unterkapiteln eingegangen. Um Abweichungen aufgrund von Erdschleifen zu vermeiden, sind die betrachteten Systeme auf das Schutzleiterpotential des HV-Labors bezogen.

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen beschrieben und ausgewertet. Zu Beginn werden Stabilitätsmessungen der Präzisionsmultimeter und der 10 V-Referenzquelle analysiert. Zudem sind Charakterisierungen der verwendeten Kalibratoren (Fluke 5720A und Fluke 335A) vonnöten, da Spannungsquellen u.a. ein Einlaufverhalten zeigen, welches aufgrund der hohen Änderung der Spannungswerte beachtet werden muss. In Kapitel 4.4 folgt mit den zentralen Messungen dieser Arbeit die Stabilitätsanalyse der Referenzteiler. Abschließend sollen im letzten Unterkapitel weitere Geräte (u.a. MCP 14-1250M) hinsichtlich ihrer Stabilität untersucht werden.

4.2 Stabilität der Präzisionsmultimeter und 10 V-Referenzquelle

Zunächst soll es in diesem Unterkapitel ganz allgemein um die Analyse der Stabilität der verwendeten Präzisionsmultimeter gehen. Gleichzeitig bietet sich dieses Vorgehen an, um Aussagen über die als Spannungsquelle eingesetzte 10 V-Referenzquelle (Fluke 732A) zu machen. Um eine so präzise Untersuchung wie möglich zu erlangen, wählt man einen Spannungsbereich von 0-20 V, da in diesem Intervall die Präzisionsmultimeter am genauesten arbeiten. [Man02], [Man03] Optimal liegt somit der durch die Referenzquelle vorgegebene Bereich um 10 V. Die bei jedem Gerät gegebenen Unsicherheiten werden folglich minimiert, müssen dennoch mit berücksichtigt werden.

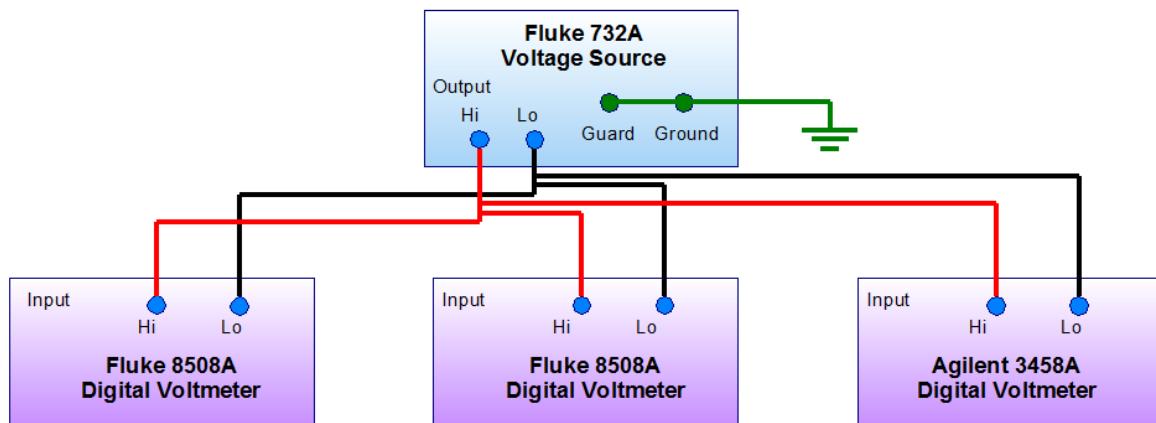


Abbildung 10: Schematische Übersicht der ersten Stabilitätsmessung der Präzisionsmultimeter. Mit Hilfe der Referenz D (Fluke 732A), die als Spannungsquelle (blau unterlegt) dient, werden die drei damit verbundenen Präzisionsmultimeter (violett unterlegt) mit einer Spannung von exakt bekannten etwa 10 V versorgt. Gemessen über einen langen Zeitraum kann die Stabilität sowohl der beiden Multimeter von der Firma Fluke als auch des Multimeters von der Firma Agilent untersucht werden. Gleichzeitig können Rückschlüsse auf die Stabilität der 10 V-Referenzquelle gezogen werden. Alle Komponenten sind über das gleiche Potential geerdet.

Bei den untersuchten Multimetern handelt es sich zum einen um ein Gerät der Firma Agilent (3458A) und zum anderen um zwei baugleiche Geräte der Firma Fluke (8508A), die wie in Abbildung 10 zu erkennen, mit der 10 V-Referenzquelle verbunden sind. Alle Komponenten sind dabei über das gleiche Bezugspotential geerdet.

Um sinnvolle Aussagen über die Stabilität der Komponenten treffen zu können, werden Langzeitmessungen über viele Stunden durchgeführt. Dadurch kann ein mögliches Einlaufverhalten der Multimeter nach Einschalten der Spannung überprüft und Aussagen über das Driftverhalten und damit verbundener Stabilität getätigert werden.

Wichtig bei jeder Messung ist die Bestimmung der beiden zentralen Korrekturen der vom jeweiligen Gerät angezeigten Spannung. Dazu wird mit den drei Multimetern, die zur Spannungsmessung der Referenzquelle verwendet werden, zunächst der Offset U_0 durch Kurzschließen der Eingänge bestimmt. Außerdem werden die Multimeter an die von der PTB kalibrierten Referenz angeschlossen und die angezeigte Spannung um den Offset korrigiert. Die Verstärkung G ergibt sich dann aus dem Quotienten des Referenzwertes U_{ref} zur tatsächlich gemessenen Spannung U :

$$G = \frac{U_{ref}}{U - U_0}. \quad (5)$$

Der von der PTB bestimmte Wert für die Referenzspannung U_{ref} (Referenz D) [Ref15] lautet

$$U_{ref} = (10,0001540 \pm 0,0000001 \text{ V}). \quad (6)$$

Nach Bestimmung des Offsetes der drei Multimeter werden diese mit der 10 V-Referenzquelle verbunden und die gemessenen Spannungswerte aufgezeichnet. Um eine ausreichende Statistik der Werte für den Offset zu erhalten, werden diese über einen Zeitraum von 5 Minuten gemessen, wobei alle 10 Sekunden ein Messwert aufgezeichnet wird (30 Messwerte). Die Verstärkung wurde ermittelt, indem der Mittelwert der ersten 30 Spannungswerte (korrigiert um den Offset) der jeweiligen Messung nach (5) in Relation zu U_{ref} gesetzt wurden. Abbildung 11 zeigt die erste Langzeitmessung, in der die Werte für den Offset und die Verstärkung bereits mit eingerechnet worden sind.

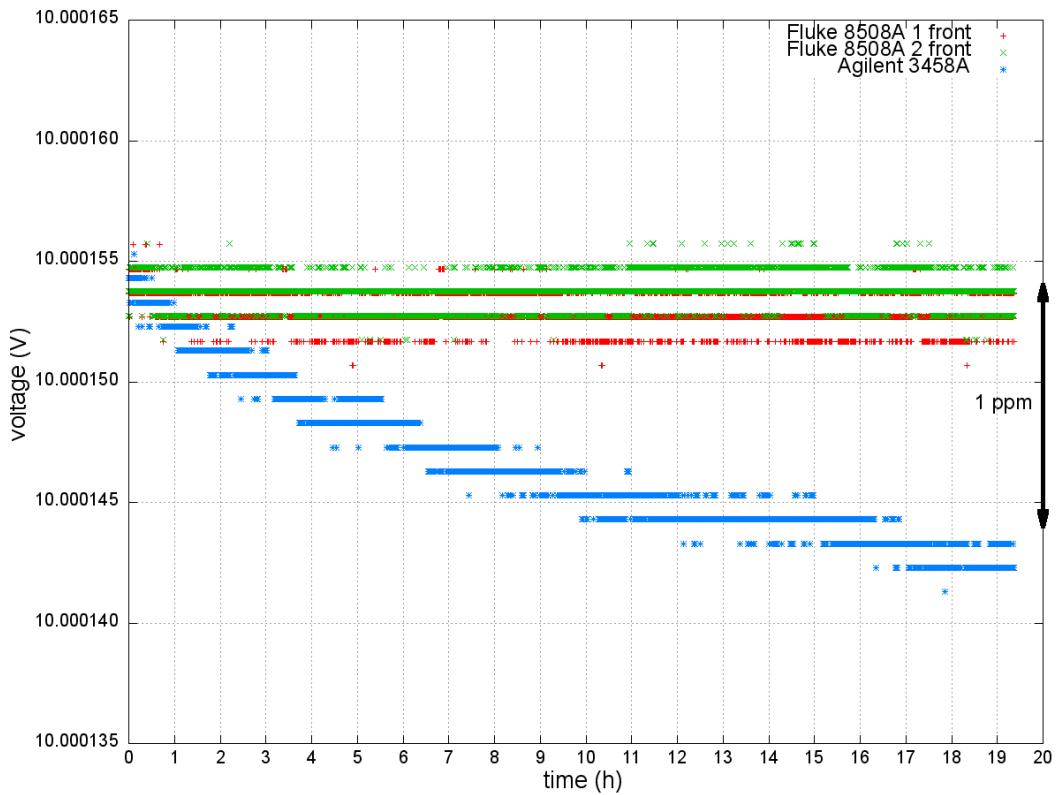


Abbildung 11: **Erste Stabilitätsmessung der drei Präzisionsmultimeter.** Aufgetragen ist die um Offset und Verstärkung der jeweiligen Geräte korrigierte Spannung über den Verlauf fast eines Tages. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese wurden Tabellenwerten aus [Bau13] für die Geräte entnommen (vgl. Tab. 1). Zur besseren Bestimmung der Stabilität zeigt der eingezeichnete Doppelpfeil die Abweichung von einem ppm relativ zum Startwert (dieser entspricht per Definition U_{ref} , da darauf kalibriert wurde).

Die für die Messwerte gewählten Unsicherheiten entstammen dabei stets Tabellenwerten aus der Arbeit von S. Bauer [Bau13], die in Tabelle 1 gesondert notiert sind.

Auffällig ist, dass die beiden Präzisionsmultimeter der Firma Fluke eine höhere Stabilität aufweisen als jenes der Firma Agilent. Vergleicht man jeweils die Spannungswerte zu Beginn mit denen am Ende der Messung, ergibt sich eine Drift von etwa 1,4 ppm/Tag für das Agilent 3458A, während die beiden Fluke 8508A nahezu konstant bleiben. Verglichen mit den Herstellerangaben aus Tabelle 1 zeigt sich für die beiden Fluke Multimeter keine Auffälligkeit, während das Agilent Multimeter etwa um einen Faktor 2 instabiler ist als erwartet.

Tabelle 1: Übersicht über die für die einzelnen Geräte gewählten Unsicherheiten (gesondert notiert aus [Bau13]) und den Herstellerangaben zur Stabilität (beim Fluke 752A für den 100:1-Abgriff)

Instrument	Device	Rel. Uncertainty (ppm)	Manufacturer's Data (ppm)
Fluke 752A	Ref. Divider	0.17	0.5 (in 8 hours) [Man01]
Fluke 8508A	Voltmeter	0.45	0.5 (in 24 hours) [Man02]
Agilent 3458A	Voltmeter	0.32	0.6 (in 24 hours) [Man03]

Im zweiten Teil der Stabilitätsmessungen wurde zusätzlich der hintere Eingang des ersten Fluke 8508A Multimeters an die 10 V-Referenz angeschlossen, wie in Abbildung 12 zu erkennen.

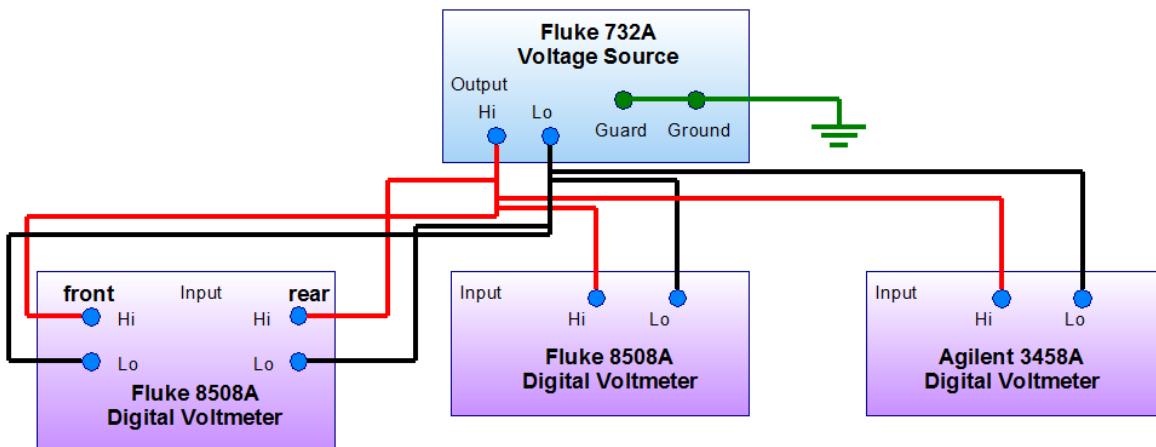


Abbildung 12: **Schematische Übersicht der zweiten Stabilitätsmessung der Präzisionsmultimeter.** Mit Hilfe der Referenz D (Fluke 732A) werden wiederum die einzelnen Präzisionsmultimeter mit einer Spannung von exakt bekannten etwa 10 V versorgt. Zusätzlich zur vorherigen Messkette wird der hintere, zweite Eingang (*rear*) des ersten Multimeters der Firma Fluke mit vermessen. Dadurch kann die Stabilität der beiden Eingänge eines Multimeters untereinander verglichen werden. Alle Komponenten sind über das gleiche Potential geerdet.

Abbildung 13 zeigt die zweite Langzeitmessung, in der wiederum die Werte für den Offset und die Verstärkung bereits mit eingerechnet worden sind.

Genau wie in Abbildung 11 weisen die beiden Präzisionsmultimeter der Firma Fluke eine höhere Stabilität auf als jenes der Firma Agilent. Vergleicht man wiederum jeweils die Spannungswerte zu Beginn mit denen am Ende der Messung, ergibt sich eine Drift von etwa 0,6 ppm/Tag für das Agilent 3458A, während die beiden Fluke 8508A wiederum nahezu konstant bleiben. Im Vergleich zur ersten Messung driften die Werte allerdings um etwa 0,2 ppm/Tag. Trotz dieser leichten Drift liegen die Werte der beiden Fluke Multimeter innerhalb der in Tabelle 1 notierten Her-

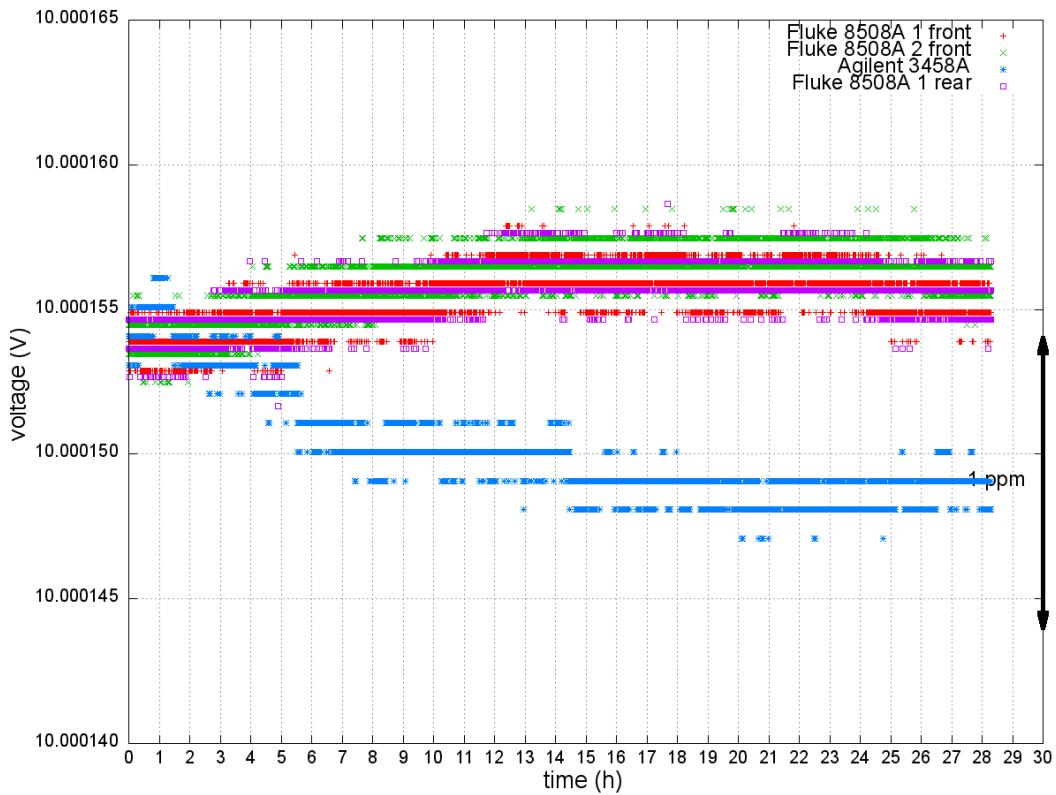


Abbildung 13: **Zweite Stabilitätsmessung der drei Präzisionsmultimeter.** Aufgetragen ist wiederum die um Offset und Verstärkung der jeweiligen Geräte korrigierte Spannung über den Verlauf gut eines Tages. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese wurden Tabellenwerten aus [Bau13] für die Geräte entnommen (vgl. Tab. 1). Zur besseren Bestimmung der Stabilität zeigt der eingezeichnete Doppelpfeil die Abweichung von einem ppm relativ zum Startwert (dieser entspricht per Definition U_{ref}).

stellerangaben. Auch die Werte des Agilent Multimeters sind verträglich mit den Herstellerangaben von 0,6 ppm/Tag.

Interessant ist in Abbildung 13 zudem, dass alle Spannungsverläufe der Fluke Multimeter überlagern und daher sogar eine Drift der 10 V-Referenzquelle aufgelöst werden kann. Der Fall, dass beide Fluke Multimeter gleich drifteten, ist sehr unwahrscheinlich. Mit dem Agilent Multimeter kann man hingegen die Drift der 10 V-Referenzquelle nicht auflösen, da es nach Abbildung 11 eine zu große eigene Drift zeigt. Folglich driften mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht die Fluke Multimeter, sondern die Referenzquelle um etwa 0,2 ppm/Tag.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass das Agilent 3458A Multimeter instabiler ist als die beiden Fluke 8508A Multimeter. Jedoch zeigt nur die Auswertung der ersten Messung (vgl. Abb. 11) eine deutlich höhere Drift des Agilent Multimeters als nach den Herstellerangaben (vgl. Tab. 1) zu erwarten wäre. Zusätzlich ist festzuhalten, dass nach Berücksichtigung von Offset und Verstärkung die beiden Eingänge des ersten Fluke Multimeters einen nahezu identischen Spannungsverlauf aufweisen.

Der hintere Eingang kann demnach zuverlässig und gleichwertig zum vorderen Eingang zur Messwertaufnahme benutzt werden.

Da die Spannungsverläufe der drei Multimeter keinem gemeinsamen Trend folgen (vgl. Abb. 11 und 13), lässt sich daher zunächst nicht auf die Stabilität der 10 V-Referenzquelle (Referenz D) schließen. Da jedoch die Spannungsverläufe der Fluke Multimeter überlagern und eine gemeinsame Drift sehr unwahrscheinlich ist, kann eine Drift der Referenzquelle von etwa 0,2 ppm/Tag bestimmt werden. Berücksichtigt wurde allerdings nicht eine mögliche Änderung der äußeren Bedingungen (wie die Raumtemperatur). Referenz D weist daher insgesamt eine hohe Stabilität auf, wie auch in vorherigen Arbeiten (wie in [Res14]) bereits untersucht und beschrieben.²¹ Solange die eingesetzten Referenzen regelmäßig kalibriert werden, dienen sie als zuverlässige Spannungsquellen mit einer hohen Stabilität und zur Kalibrierung weiterer Geräte.

4.3 Charakterisierung des Fluke 335A Kalibrators

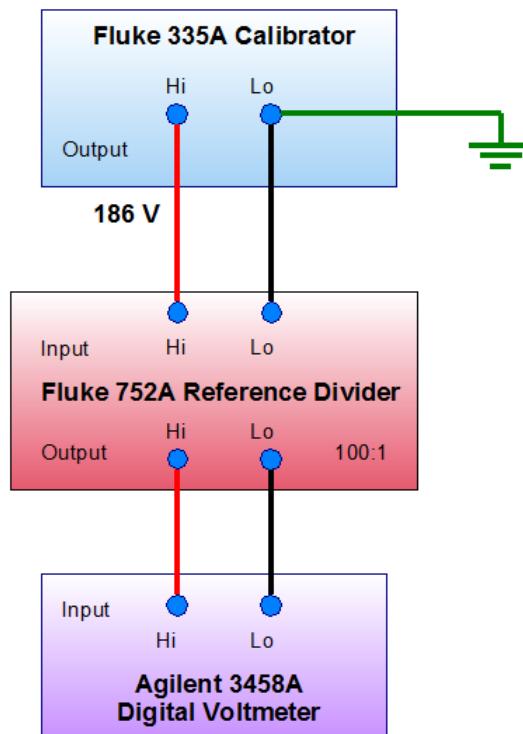


Abbildung 14: Schematische Übersicht der Stabilitätsmessung des Fluke 335A Kalibrators. Das als Spannungsquelle zu untersuchende Fluke 335A (blau unterlegt) liefert eine Spannung von 186 V, die mit Hilfe eines Referenzteilers (Fluke 752A, rot unterlegt) auf etwa 1,86 V herunter geteilt wird. Das Agilent 3458A Multimeter (violett unterlegt) liest diese Spannung aus. Alle Komponenten sind über das gleiche Potential geerdet.

²¹Laut Herstellerangaben weisen die Referenzquellen, die von der PTB kalibriert werden, eine Stabilität von 1,2 ppm/Jahr auf.

Eine weitere zu untersuchende Komponente der neuen Absolutkalibrierung in [Res18] stellt der Fluke 335A Kalibrator dar. Neben dem neueren zweiten Fluke 5720A Kalibrator (vgl. Kap. 4.5) dient dieser als Spannungsquelle und soll für das betreffende System stabil und zuverlässig eine bekannte Spannung vorgeben. Zunächst wird eine Stabilitätsmessung des Fluke 335A Kalibrators mit einem Fluke 752A Referenzteiler bei 186 V²² näher untersucht, während anschließend das Oszillationsverhalten des Kalibrators mit Hilfe eines Oszilloskops der Firma Tektronix MSO4054 charakterisiert wird.

In Abbildung 14 ist der schematische Aufbau zur Stabilitätsmessung des Kalibrators festgehalten. Als Spannungswert werden 186 V gewählt, die mit Hilfe eines Fluke 752A Referenzteilers auf etwa 1,86 V herunter geteilt werden, um sie mit dem Agilent 3458A Multimeter optimal auslesen zu können. Abbildung 15 zeigt den gemessenen Spannungsverlauf.

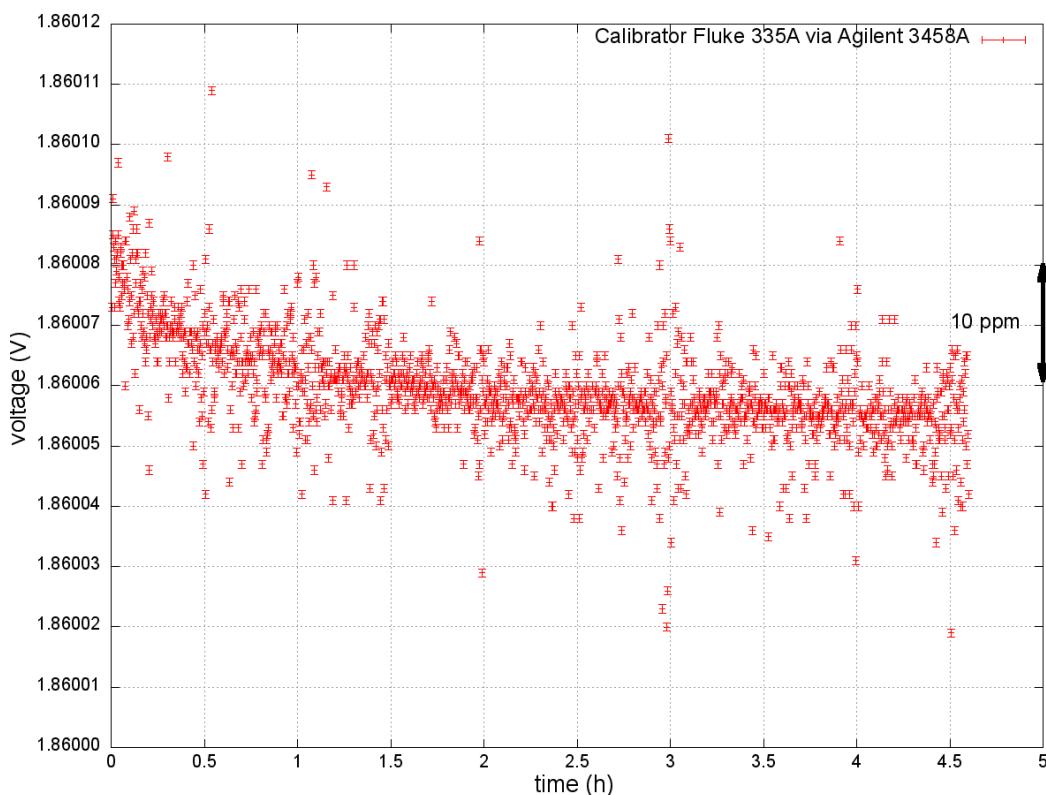


Abbildung 15: **Stabilitätsmessung des Fluke 335A Kalibrators.** Aufgetragen ist die gemessene Spannung über einen Verlauf von etwa 5 Stunden. Als Unsicherheit wurde der quadratisch addierte Wert aus (9) gewählt. Ein Einlaufverhalten ist bis etwa 2 Stunden nach Beginn der Messung auszumachen. Zur besseren Bestimmung der Stabilität zeigt der eingezeichnete Doppelpfeil die Abweichung von 10 ppm relativ zum Startwert (dieser wurde gemittelt zu 1,86008 V bestimmt).

²²Dieser Wert steht im Zusammenhang mit der bekannten Endpunktsenergie des Tritium- β -Zerfalls von etwa 18,6 keV und einer erforderlichen Spannung von 18,6 kV (mehr in [Res18] und Kap. 5).

Da auch der Referenzteiler eine Unsicherheit hat (vgl. Tab. 1), müssen die Unsicherheiten der einzelnen Komponenten quadratisch addiert werden.

$$\Delta y^2 = \Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 \quad (7)$$

Δy stellt dabei die Gesamtunsicherheit dar, die sich aus den beiden einzelnen Unsicherheiten Δx_1 und Δx_2 der Komponenten zusammensetzt. Da Gleches auch in den nächsten Unterkapiteln beachtet werden muss, folgen an dieser Stelle die sich ergebenden Gesamtunsicherheiten, je nachdem, welches Multimeter betrachtet wird (Δy_1 : Fluke 752A mit Fluke 8508A, Δy_2 : Fluke 752A mit Agilent 3458A).

$$\Delta y_1 = \sqrt{(0,17 \text{ ppm})^2 + (0,45 \text{ ppm})^2} = 0,48 \text{ ppm} \quad (8)$$

$$\Delta y_2 = \sqrt{(0,17 \text{ ppm})^2 + (0,32 \text{ ppm})^2} = 0,36 \text{ ppm} \quad (9)$$

Betrachtet man die Stabilität des Spannungswerts des Fluke 335A aus Abbildung 15, so ist ein Einlaufverhalten bis etwa 2 Stunden nach Beginn der Messung auszumachen. In dieser Zeit ändert sich der Wert um etwa 12 ppm, während er insgesamt bis zum Ende der Messung um etwa 14 ppm sinkt. Die Stabilität liegt folglich in einer Größenordnung von 10^{-5} . Nach den ersten 2 Stunden verläuft der Spannungswert stabiler, wenngleich häufig Ausreißer auftreten, die sowohl statistischer als auch systematischer Natur sein könnten. Nach dem Einlaufen ergibt sich (bis auf die Ausreißer) eine ähnliche Stabilität von etwa 10-15 ppm. Da für [Res18] eine Stabilität auf ppm-Niveau wünschenswert ist bzw. diese zunächst erwartet wurde, stellt sich die Frage, warum der Fluke 335A Kalibrator eine höhere Stabilität der Werte ausschließt. Sicherlich kann in einer Größenordnung von 10^{-5} der Einfluss des Multimeters vernachlässigt werden. Im Folgenden wurde daher das Oszillationsverhalten näher untersucht.

Um das Oszillationsverhalten näher zu untersuchen, wird der Fluke 335A Kalibrator mit Hilfe eines Oszilloskops der Firma Tektronix MSO4054 genauer vermessen. Insgesamt 10 Einzelmessungen werden aufgenommen, um zu beobachten, ob sich etwas während der Messungen ändert und um die statistische Unsicherheit zu reduzieren. Gemessen wird jeweils über einen Zeitraum von 10 Sekunden (vgl. Abb. 16), da diese der Integrationszeit der Multimeter entsprechen. Wie zuvor werden 186 V eingestellt, jedoch wird mit Hilfe des Oszilloskops der Gleichspannungsanteil nicht betrachtet. Damit kann bei hinreichend präzisen Einstellungen des Oszilloskops der Wechselspannungsanteil (AC) sichtbar gemacht und somit das Oszillationsverhalten des Kalibrators analysiert werden.²³ Abbildung 16 zeigt exemplarisch eine der 10 einzelnen Messwertaufnahmen.

²³Das Setting bzw. die Einstellungen am Oszilloskop sind dem Anhang zu entnehmen (Tab. 4).

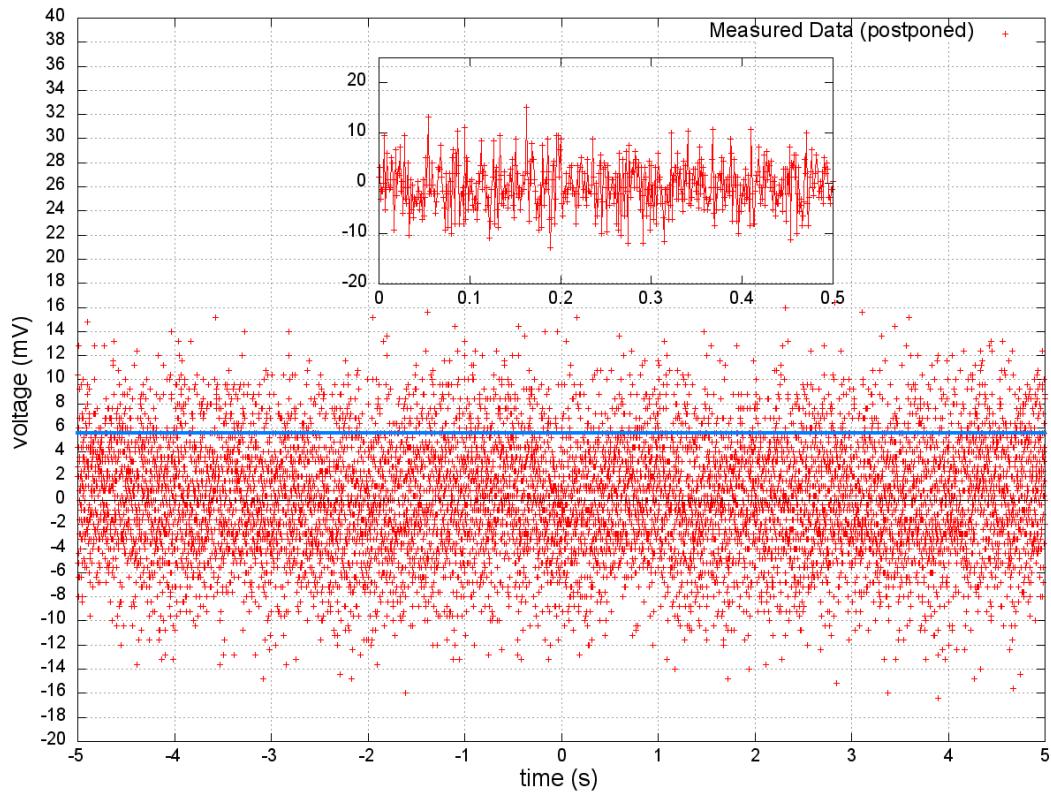


Abbildung 16: **Oszillationsverhalten des Fluke 335A Kalibrators.** Aufgetragen ist die vom Oszilloskop Tektronix MSO4054 gespeicherte Spannung (in mV umgewandelt) über eine Zeitdauer von 10 s. Am Fluke 335A Kalibrator wurde eine Spannung von 186 V eingestellt und mit Hilfe des Oszilloskops der Wechselspannungsanteil vermessen. Insgesamt wurden 10 derartige Messungen aufgenommen, die jedoch alle sehr ähnliche Charakteristika zeigen (vgl. Tab. 2). Zur besseren Darstellung wurden die Messwerte derart vertikal verschoben, dass der Nullpunkt der Ordinate mittig liegt. Die blaue Linie gibt den Effektivwert der Wechselspannung an (hier: $U_{eff} = 5,5754$ V) und die schwarze Linie markiert den Nullpunkt. Eine Substruktur der Messwerte ist nicht auszumachen (vgl. Inset, das einen vergrößerten Ausschnitt (0-0,5 s) zeigt).

Zur besseren Darstellung und Berechnung der Effektivwerte U_{eff} (vgl. Gleichung 11) wurden in Abbildung 16 die Messwerte vertikal verschoben, dass der Nullpunkt der Ordinate mittig liegt. Die dazu notwendige Verschiebung Δ der Spannungswerte ist abhängig von den Extremwerten U_{min} und U_{max} aller Messwerte einer jeweiligen Messung (vgl. Tab. 2) und lautet:

$$\Delta = U_{max} - \frac{U_{max} - U_{min}}{2}. \quad (10)$$

Die in Tabelle 2 berechneten Effektivwerte der Wechselspannung erhält man durch Mittelwertbildung aller quadrierten Messwerte zur Zeit t $u_i^2(t)$ und anschließendem Radizieren [Eff01] (gekennzeichnet in Abb. 16 durch die horizontale blaue Linie).

$$U_{eff} = \sqrt{\overline{u_i^2(t)}} \quad (11)$$

Unter dem Effektivwert versteht man allgemein den quadratischen Mittelwert einer zeitlich veränderlichen physikalischen Größe. Er gibt denjenigen Wert der zugehörigen Gleichspannung an, der die gleiche Wirkung hat wie das entsprechende Quadrat der Wechselspannung. [Eff02] Er ist positiv definiert.

Tabelle 2: Übersicht über Charakteristika der 10 Einzelmessungen am Oszilloskop der Firma Tektronix MSO4054 mit dem Fluke 335A Kalibrator

No.	U_{min} (mV)	U_{max} (mV)	U_{eff} (mV)
1	-16.4	18.8	5.3766
2	-22.4	25.2	5.7056
3	-18.0	20.8	5.7769
4	-18.4	18.0	5.6173
5	-16.8	21.6	5.6044
6	-13.6	19.2	5.5754
7	-15.2	21.2	5.6144
8	-22.0	22.0	5.6465
9	-15.6	20.0	5.5921
10	-14.8	22.4	5.6725
Extremum	-22.4	25.2	5.7769
Average	-17.32	20.92	5.6182

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Analyse des Wechselspannungsanteils des Fluke 335A Kalibrators bei einer Spannung von 186 V einen maximalen Amplitudenzwert von 25,2 mV ergibt. Der Spitze-Tal-Wert liegt bei 47,6 mV und der maximale Effektivwert bei 5,7769 mV. Eine Periodendauer konnte nicht exakt bestimmt werden (vgl. Abb. 16, Inset). Berechnet man den Mittelwert aller Extremwerte U_{min} und U_{max} , ergibt sich ein Wert von 1,82 mV, der etwas über Null liegt. Vergleicht man den Amplitudenzwert von etwa 25 mV mit der angelegten Spannung von 186 V, ist eine Unsicherheit von der Größenordnung 10^{-4} festzuhalten. Betrachtet man neben dem Effektivwert U_{eff} , der lediglich auf die umgesetzte elektrische Leistung schließen lässt, noch den Mittelwert von 1,82 mV, ist eine Unsicherheit von der Größenordnung 10^{-5} festzuhalten. Ist eine hohe Präzision im ppm-Bereich gefordert (vgl. [Res18]), ist der Fluke 335A Kalibrator zu instabil.

Die Unsicherheit von der Größenordnung 10^{-5} bei der Oszilloskopmessung entspricht somit von der Größenordnung her der Unsicherheit der Stabilitätsmessung mit einem Multimeter. Der vergrößerte Ausschnitt in Abbildung 16 lässt zwar keine Substruktur erkennen, dennoch kann etwa die Netzfrequenz von 50 Hz abgeschätzt werden. Eine mögliche Fourieranalyse könnte weitere Klarheit bringen (vgl. Kap. 5).

4.4 Stabilität der Fluke 752A Referenzteiler

Den zentralen Teil der Stabilitätsmessungen stellt das folgende Unterkapitel dar. Wie in Kap. 4.3 bereits verwendet, bilden die Referenzteiler der Firma Fluke (752A) (vgl. Abb. 17) eine weitere wichtige Gerätekategorie. Um sehr hohe Spannungen (z.B. 18,6 kV) mit den Präzisionsmultimetern möglichst präzise messen zu können, werden diese in den für die Multimeter optimalen Bereich herunter geteilt. Die Referenzteiler müssen regelmäßig (am besten vor jeder Messung) kalibriert werden, um der geforderten hohen Präzision zu genügen. Das Stabilitätsverhalten nach der Kalibrierung ist dabei von Interesse, da mit Hilfe der Referenzteiler auch die beiden KATRIN Spannungsteiler K35 und K65 regelmäßig kalibriert werden. Um zuverlässige Erfahrungswerte der Kalibrierung²⁴ und damit hochpräzise Werte für die Maßstabsfaktoren der beiden Spannungsteiler zu bekommen, ist eine möglichst genaue Charakterisierung der Referenzteiler vonnöten.



Abbildung 17: **Beispieldfoto eines Fluke 752A Referenzteilers.** Zu sehen ist exemplarisch ein Referenzteiler der Firma Fluke 752A (Frontansicht). Zu erkennen sind diverse Bedienelemente wie die zur Kalibrierung benötigten drei Drehregler (10:1, Balance, 100:1; oben links). Im Handbuch [Man01] sind detailliertere Beschreibungen u.a. auch zur Selbstkalibrierung des Referenzteilers zu finden.

Die Idee ist, die zur Verfügung stehenden Referenzteiler möglichst genau hinsichtlich ihrer Stabilität zu charakterisieren, um die Erfahrungswerte mit der Kalibrierung der beiden KATRIN Spannungsteiler zu optimieren. Zu unterscheiden ist dabei, ob ein Referenzteiler vor einer Messung kalibriert worden ist oder nicht.

Wie Abbildung 18 zeigt, wird die vom Fluke 5720A Kalibrator gelieferte Spannung von 1 kV²⁵ mit Hilfe der jeweils zu untersuchenden beiden Referenzteiler auf etwa 10 V herunter geteilt²⁶. Diese Spannung kann von den zugehörigen Präzisionsmultimetern ausgelesen werden. Zusätzlich wird die Eingangsspannung von dem KATRIN

²⁴auch für die neue Absolutkalibrierung in [Res18]

²⁵max. Eingangsspannung für die Fluke 752A Referenzteiler liegt knapp darüber bei 1100 V [Man01]

²⁶Untersucht wird der 100:1-Abgriff, da für die Kalibrierung der Spannungsteiler verwendet.

Spannungsteiler K65 auf etwa 10 V reduziert, um einen Referenzwert zu erhalten, da der Maßstabsfaktor des K65 besonders stabil ist. [Bau13], [Res14] Dadurch kann zudem der Fluke 5720A Kalibrator charakterisiert werden (siehe Kap. 4.5).

Ein wichtiger Aspekt bei der Durchführung der Messungen sind möglichst stabile äußere Bedingungen. Daher wurden die betreffenden Geräte nahe nebeneinander im Raum positioniert und in den dafür vorgesehenen elektrostatisch abgeschirmten Geräteschrank gestellt. Zusätzlich wurden zu charakteristischen Zeiten (u.a. Beginn und Ende der Messung) jeweils die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit im Raum notiert (vgl. Tab. 4, Kap. 4.4.7). Ferner wurden der Offset U_0 und die Verstärkung G der Multimeter regelmäßig mit Hilfe von Referenz D (10,0001540 V) gemessen und in die Messdaten eingerechnet (vgl. auch Gleichung (5)). Insgesamt drei Referenzteiler wurden in den Messungen verwendet, die mit „A“, „B“ und „C“ gekennzeichnet sind.

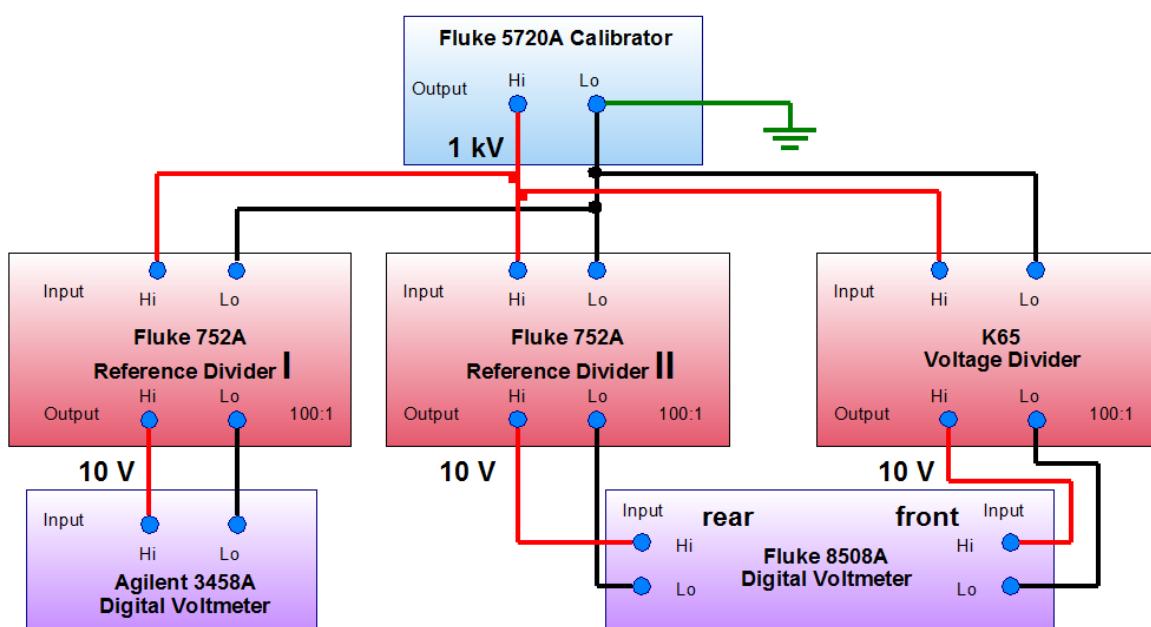


Abbildung 18: Schematische Übersicht der Stabilitätsmessungen der Fluke 752A Referenzteiler. Der Fluke 5720A Kalibrator (blau unterlegt) liefert eine Spannung von 1 kV, die von den beiden eingesetzten Referenzteilern I und II (genauer „A“, „B“ und „C“, je nach Messung) und dem KATRIN Spannungsteiler K65 (rot unterlegt) auf etwa 10 V herunter geteilt werden. Die Präzisionsmultimeter Agilent 3458A und Fluke 8508A (*front* und *rear*) (violett unterlegt) lesen diese Spannung aus. Alle Komponenten sind über das gleiche Potential geerdet.

Im Folgenden sind chronologisch alle 6 Messungen zur Stabilität der Referenzteiler (abgekürzt „RT“) aufgeführt. In einem abschließenden Teil sind die einzelnen Messergebnisse übersichtlich notiert (vgl. Tab. 3, Kap. 4.4.7) und zusammen in einem gemeinsamen Diagramm zusammengestellt (mit Berücksichtigung der Zeit zwischen den Messungen; vgl. Abb. 28).

4.4.1 Messung 1: RT I: „A“ (kalibriert); RT II: „B“ (kalibriert)

Wie in Abbildung 18 gezeigt, werden die betreffenden Komponenten für die Stabilitätsmessung verkabelt. Geerdet werden alle Geräte stets über dasselbe Potential (letztlich Laborerde, vgl. Kap. 4.1). Jede Messung stellt eine Langzeitmessung dar, die in den meisten Fällen über die Dauer fast eines Tages geht. Regelmäßig werden Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit zu charakteristischen Zeiten notiert (vgl. Tab. 3, Kap. 4.4.7). Der Offset und die Verstärkung der Multimeter werden regelmäßig bestimmt und in die gemessenen Spannungswerte mit eingerechnet. Der K65 Spannungsteiler wird hingegen aufgrund der hohen Stabilität des Maßstabsfaktors nicht kalibriert (vgl. Kap. 4.5). Für Spannungen bis zu 1 kV (Niederspannungskalibrierung) liegt dessen Wert (Stand: Mai 2015) [Res15] bei:

$$M100_{lvc}^{K65} = (100,51490 \pm 0,00001). \quad (12)$$

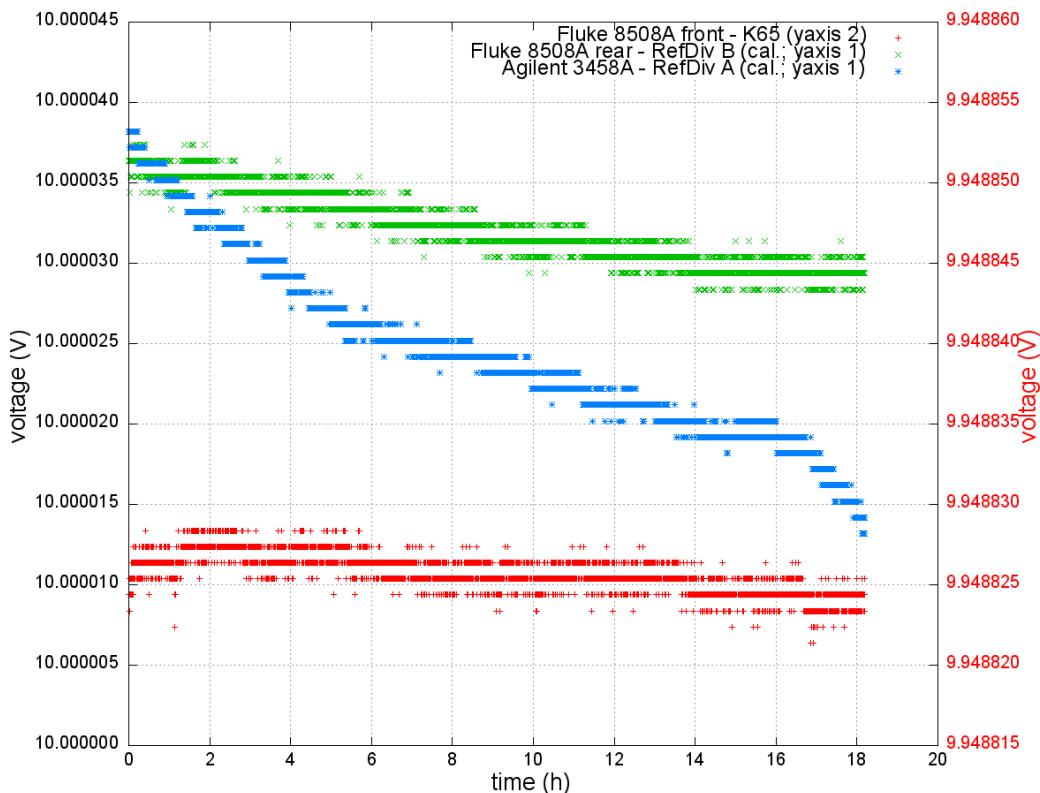


Abbildung 19: **Erste Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 04.08.15).** Aufgetragen ist die um Offset und Verstärkung der jeweiligen Multimeter korrigierte Spannung über den Verlauf fast eines Tages. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen der des Fluke 8508A Multimeters von 0,45 ppm (*yaxis 2*) bzw. den quadratisch addierten Werten aus (8) und (9) (*yaxis 1*). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde. Da der 100:1-Maßstabsfaktor des K65 leicht höher ist als der von den Referenzteilern, wurde zur besseren Darstellung eine zweite Ordinate verwendet (*yaxis 2*, rot).

In Abbildung 19 sind zunächst die Spannungsverläufe der drei Multimeter geplottet.²⁷

Da jedoch die Maßstabsfaktoren der Referenzteiler M_{RefDiv} interessant sind, werden diese in der Folge angegeben.²⁸ Dafür wird die Spannung des K65 U_{K65} (vermessen mit Fluke 8508A *front*) mit Hilfe des Maßstabsfaktors des K65 (siehe (12)) multipliziert, um auf die Spannung des Fluke 5720A Kalibrators zurück zu rechnen. Die Maßstabsfaktoren der Referenzteiler erhält man anschließend durch Division mit deren Spannungen U_{RefDiv} (vermessen mit Fluke 8508A *rear* und Agilent 3458A). Gleichzeitig lässt sich dadurch der Einfluss bzw. Spannungsschwankungen (wie ein mögliches Einlaufverhalten) des Kalibrators heraus rechnen, da dieser U_{K65} und U_{RefDiv} gleichermaßen beeinflusst.

$$M_{RefDiv} = \frac{U_{K65} \cdot M100_{lvc}^{K65}}{U_{RefDiv}} \quad (13)$$

Die relativen Unsicherheiten der jeweiligen Maßstabsfaktoren der Referenzteiler lassen sich mit Hilfe Gaußscher Fehlerfortpflanzung (vereinfachte Formel bei Multiplikation und Division der Werte) (vgl. Gleichung (7)) bestimmen.

$$\left(\frac{\Delta y}{y} \right)^2 = \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta x_3}{x_3} \right)^2 \quad (14)$$

Δy stellt dabei die relative Gesamtunsicherheit dar, die sich aus den einzelnen relativen Unsicherheiten Δx_1 , Δx_2 und Δx_3 der drei Werte zur Berechnung des jeweiligen Maßstabsfaktors (Gleichung (13)) zusammensetzt. Mit den bereits bekannten drei relativen Unsicherheiten der drei Werte ($\Delta U_{K65} = 0,45$ ppm, den quadratisch addierten Werten aus (8) und (9) für ΔU_{RefDiv} und $\Delta M100_{lvc}^{K65} = 0,00001$) ergeben sich somit relative Gesamtunsicherheiten von $\Delta y_1 \approx 0,66$ ppm und $\Delta y_2 \approx 0,58$ ppm, die den jeweiligen relativen Unsicherheiten der Maßstabsfaktoren ΔM_{RefDiv} entsprechen.²⁹

Um die Stabilität besser bestimmen zu können, wird die relative Abweichung zum jeweiligen Startwert $\Delta_{rel.}$ geplottet. Berechnet wird diese Abweichung, indem zunächst der Startwert M_{start} der berechneten Maßstabsfaktoren (nach Gleichung (13)) der jeweiligen Referenzteiler genommen und anschließend die relative Abweichung dazu in ppm bestimmt wird.

$$\Delta_{rel.} = \frac{M_{RefDiv} - M_{start}}{M_{start}} \cdot 10^6 \quad (15)$$

Auch die relative Unsicherheit von diesem Wert $\Delta(\Delta_{rel.})$ lässt sich mit Hilfe der beiden vereinfachten Formeln der Gaußschen Fehlerfortpflanzung aus (7) und (14)

²⁷Ab Messung 2 (Kap. 4.4.2) sind nur noch die jeweiligen Diagramme zur Stabilitätsanalyse des Maßstabsfaktors der Referenzteiler (Prinzip wie in Abb. 22) gezeigt. Die übrigen Diagramme können dem Anhang entnommen werden.

²⁸Zusätzlich sind im Anhang die Diagramme ohne Berücksichtigung des K65 und in Tab. 3, Kap. 4.4.7 die zugehörigen Stabilitäten zu finden.

²⁹(Δy_1 : Fluke 752A mit Fluke 8508A, Δy_2 : Fluke 752A mit Agilent 3458A)

berechnen. Beachtet werden muss, dass beide Formeln verwendet werden müssen, da zur Berechnung von $\Delta_{rel.}$ sowohl eine Subtraktion, als auch eine Division notwendig ist. Da sich jedoch wie zuvor die relativen Unsicherheiten quadratisch addieren, kann abgeschätzt werden, dass diese in etwa von derselben Größenordnung sind. Es ergeben sich relative Gesamtunsicherheiten von $\Delta y_1 \approx 1,09$ ppm und $\Delta y_2 \approx 0,89$ ppm, die den jeweiligen relativen Unsicherheiten $\Delta(\Delta_{rel.})$ entsprechen.

Für Messung 1 wird in Abbildung 20 die relative Abweichung zum jeweiligen Startwert U_{start} der um Offset und Verstärkung korrigierten Spannungen der Multimeter U_{RefDiv} aus Abbildung 19 geplottet (die Diagramme der anderen Messungen sind dem Anhang zu entnehmen). Für die drei Multimeter ergeben sich wie zuvor relative Unsicherheiten von etwa 0,61 ppm (K65 mit Fluke 8508A), etwa 0,67 ppm (Fluke 752A mit Fluke 8508A) und etwa 0,44 ppm (Fluke 752A mit Agilent 3458A). In Abbildung 21 sind die berechneten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler und in Abbildung 22 die relative Abweichung zum Startwert (nach Gleichung (15)) geplottet.

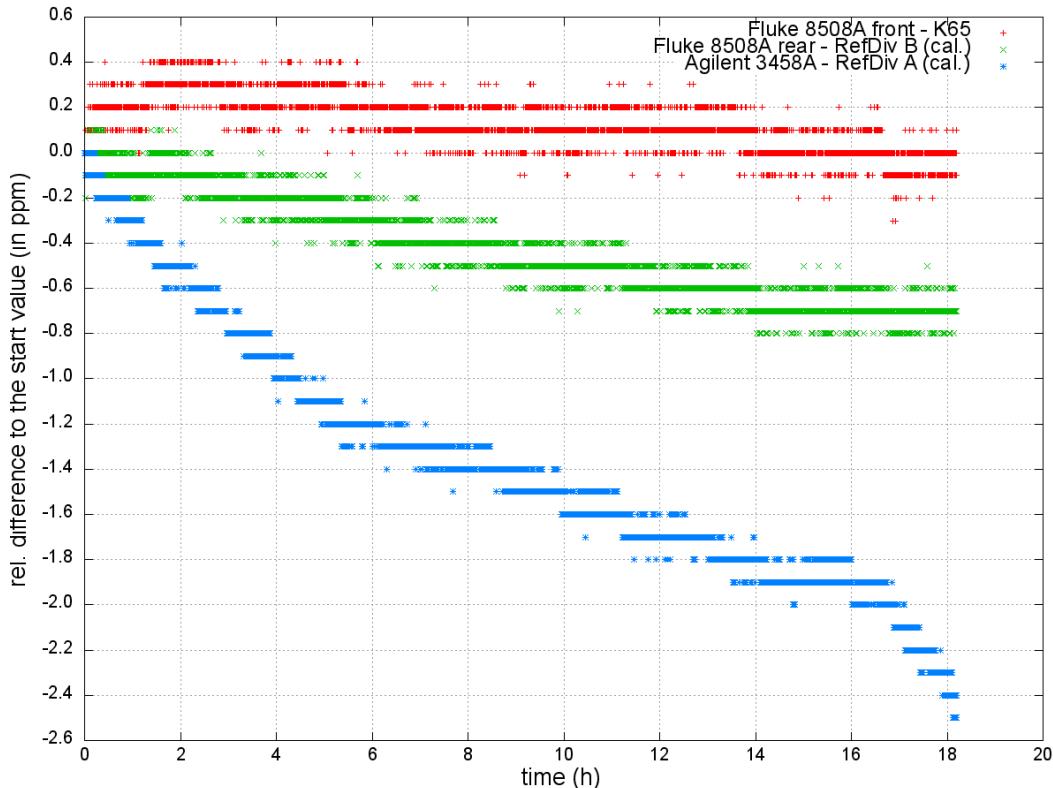


Abbildung 20: Erste Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 04.08.15). Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm für die Spannungen der drei Multimeter aus Abb. 19. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel.})$ für die Spannungen (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

Betrachtet man die Spannungsverläufe und die berechneten relativen Abweichungen zum jeweiligen Startwert lassen sich Aussagen über das Stabilitätsverhalten der Referenzteiler machen. Auffällig bei der ersten Messung ist, dass der berechnete Maßstabsfaktor (vgl. Abb. 22) von Referenzteiler A um etwa 2,6 ppm driftet und im Vergleich zu B mit etwa 1,0 ppm deutlich stärker vom Startwert abweicht. Offen bleibt hingegen zunächst die Frage, ob es sich dabei um eine Drift des Teilers A allein handelt oder inwieweit auch das Agilent 3458A Multimeter instabil ist. Die Drift nach den ersten 10 Stunden verhält sich ähnlich (sowohl für die Spannungen, als auch für die Maßstabsfaktoren). Mit 1,8 ppm (A) zu 0,8 ppm (B) zeigt sich ebenfalls ein deutlicher Unterschied. Die ersten 10 Stunden nach einer Kalibrierung der Referenzteiler werden daher gesondert ausgewertet, da die Niederspannungskalibrierungen der beiden KATRIN-Teiler in der Regel über diesen Zeitraum durchgeführt werden. Die Stabilität der Referenzteiler ist demnach besonders in den ersten Stunden nach Beginn der Messung interessant.

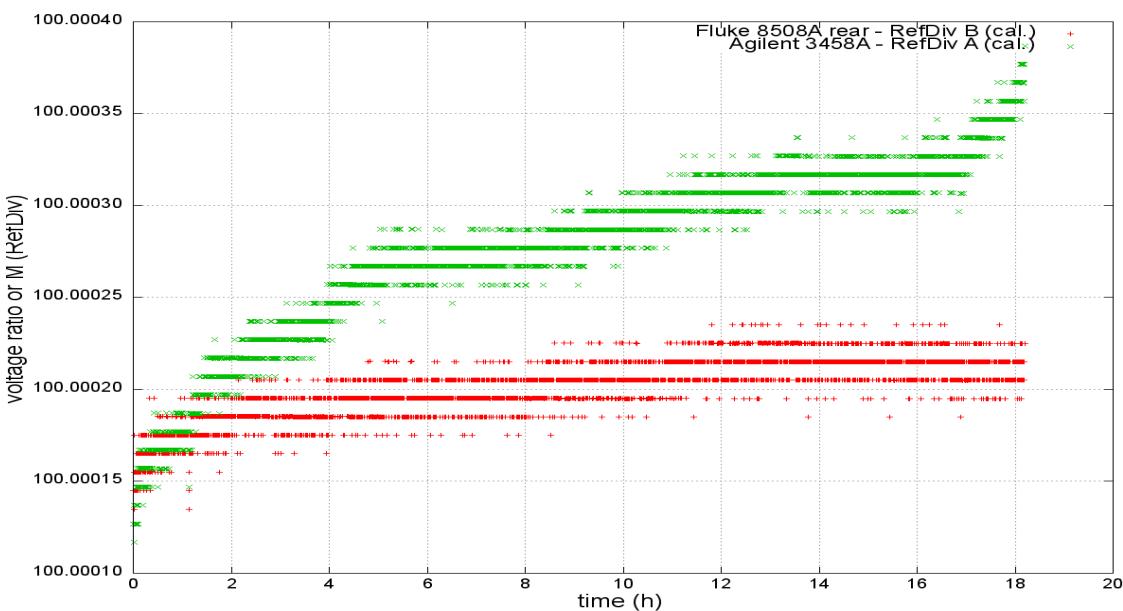


Abbildung 21: Erste Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 04.08.15). Aufgetragen sind die ermittelten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler M_{RefDiv} (vgl. (13)) über den Verlauf fast eines Tages. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit Gleichung (14) berechneten Werten für ΔM_{RefDiv} (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

Eine weitere Auffälligkeit in den Messwerten stellen die letzten etwa 90 Minuten dar. Man erkennt, wie z.B. in Abbildung 19 die Spannungswerte des Agilent Multimeters zum Ende der Messung hin noch einmal etwas stärker sinken als zuvor. Dies könnte aufgrund des Einschaltens der Klimaanlage im Raum verursacht worden sein, da die Raumtemperatur leicht gesenkt werden musste (von 22,9 °C auf 22,2 °C). Da jedoch auch das Fluke Multimeter eine ähnliche Drift zeigen müsste, könnte das Einschalten der Klimaanlage entweder nicht aufgelöst worden sein oder das Agilent Multimeter hat eine höhere Temperaturabhängigkeit.³⁰ Zieht man die Ergebnisse aus Kapitel 4.2 hinzu, könnte die erhöhte Drift in den letzten 90 Minuten auch der im Vergleich zum Fluke Multimeter höheren Instabilität des Agilent Multimeters geschuldet sein.

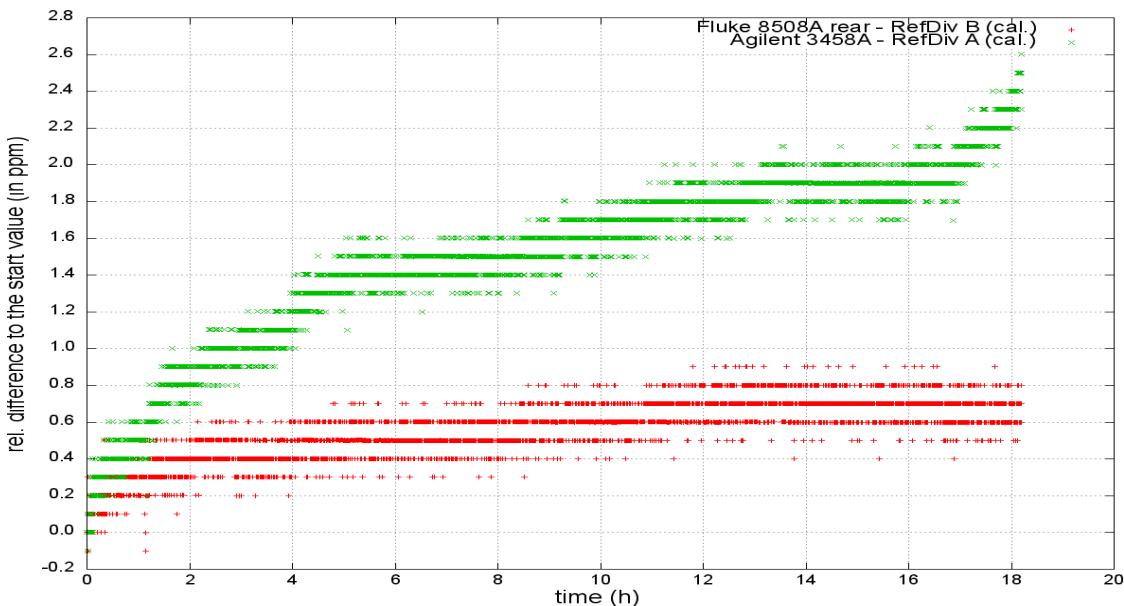


Abbildung 22: Erste Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 04.08.15). Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm $\Delta_{\text{rel.}}$ für die Referenzteiler nach Abb. 21. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{\text{rel.}})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

4.4.2 Messung 2: RT I: „A“ (kalibriert); RT II: „B“ (nicht kalibriert)

Bei der zweiten Stabilitätsmessung ist die Idee, einen der beiden Referenzteiler neu zu kalibrieren (hier A), während der andere unverändert bleibt (hier B). Somit lassen sich Rückschlüsse z.B. darauf ziehen, ob sich nach einer Kalibrierung zunächst ein Einstellverhalten der Referenzteiler einstellt oder ob der andere Teiler weiter wie zuvor driftet. Jedoch lässt sich wiederum nur feststellen, dass Referenzteiler A deutlich stärker driftet als B (vgl. Abb. 23). Damit bleibt die Frage weiter offen, ob lediglich Teiler A instabiler ist als B oder ob es an den Multimeter liegt. Darüber

³⁰mehr dazu in Kap. 5

gibt u.a. die nächste Messung ersten Aufschluss.

Abbildung 23 zeigt die relative Abweichung in ppm zum Startwert der Maßstabsfaktoren für die Referenzteiler (nach Gleichung (15)).

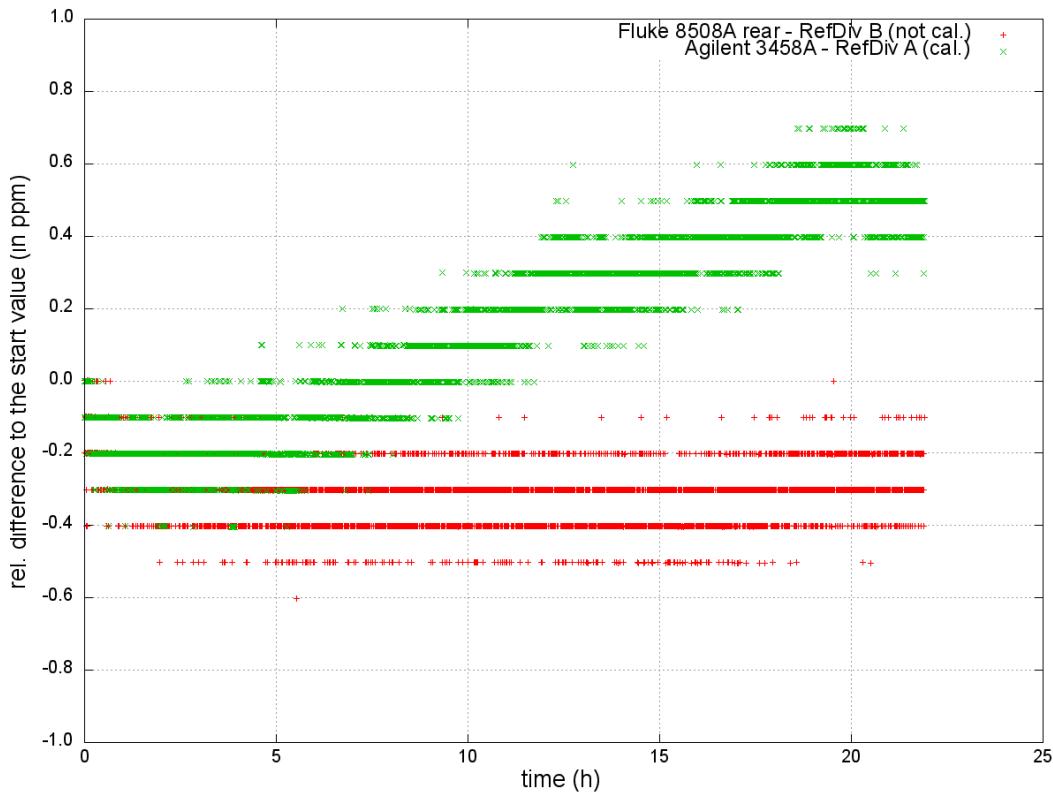


Abbildung 23: **Zweite Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 05.08.15).**
Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm Δ_{rel} für die Referenzteiler. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

Wie in der ersten Messung ist die Stabilität von Referenzteiler B mit etwa 0,6 ppm zu etwa 1,2 ppm deutlich höher als die von A. Auch bei Betrachtung der ersten 10 Stunden ist die Drift mit etwa 0,5 ppm zu etwa 0,8 ppm ähnlich. Insgesamt ist jedoch eine höhere Stabilität der beiden Referenzteiler festzuhalten.

Ein Vergleich mit den Herstellerangaben von 0,5 ppm in 8 Stunden (1,5 ppm in 24 Stunden) für die Fluke 752A Referenzteiler (vgl. Tab. 1) zeigt, dass die bestimmten Abweichungen in dieser Messung gut verträglich sind. Der mögliche Einfluss der Multimeter oder thermische Faktoren wurde noch nicht mit berücksichtigt.

Am Ende der Messung kann man erkennen, wie die Spannungswerte des Agilent Multimeters steigen (vgl. auch Abb. 28), was an einer Temperatursteigerung liegen könnte, die sich im Laufe der nächsten Messung fortsetzt (vgl. Tab. 3, Kap. 4.4.7). Ohne genaue Kenntnis über die Temperaturabhängigkeiten der Geräte, könnte diese Drift jedoch wie in der Messung zuvor an der Instabilität des Agilent Multimeters liegen.

4.4.3 Messung 3: RT I: „B“; RT II: „A“ (Multimeter getauscht)

Die vorherigen beiden Messungen dienen der folgenden als Motivation. Denn trotz erneuter Kalibrierung von Referenzteiler A zeigt dieser eine deutlich höhere Instabilität auf als Teiler B. Daher werden zum direkten Vergleich die beiden Multimeter miteinander vertauscht. Das Agilent 3458A Präzisionsmultimeter vermisst die mit Hilfe von Referenzteiler B herunter geteilte Spannung und das Fluke 8508A (rear) die des Teilers A. Beide Referenzteiler werden nicht kalibriert, um die Zeit für den Wechsel der Multimeter möglichst gering zu halten (etwa 3 Minuten, vgl. Tab. 3, Kap. 4.4.7) und somit auch den Einfluss des Kalibrators, da dieser zunächst ausgeschaltet (auf „StandBy“ geschaltet) werden muss. Ist für Teiler A eine ähnliche Drift trotz Wechsel des Multimeters wie in den beiden ersten Messungen auszumachen, kann darauf geschlossen werden, dass der Teiler selbst derart driftet. Wie Abbildung 24 zeigt, ist dies jedoch nicht der Fall. Trotz weniger Messzeit ist der Spannungsverlauf des Teilers B deutlich instabiler. Die Vermutung liegt nahe, dass zumindest nicht allein der Teiler A für die vorherigen Drifts verantwortlich war, sondern auch das Agilent Multimeter.

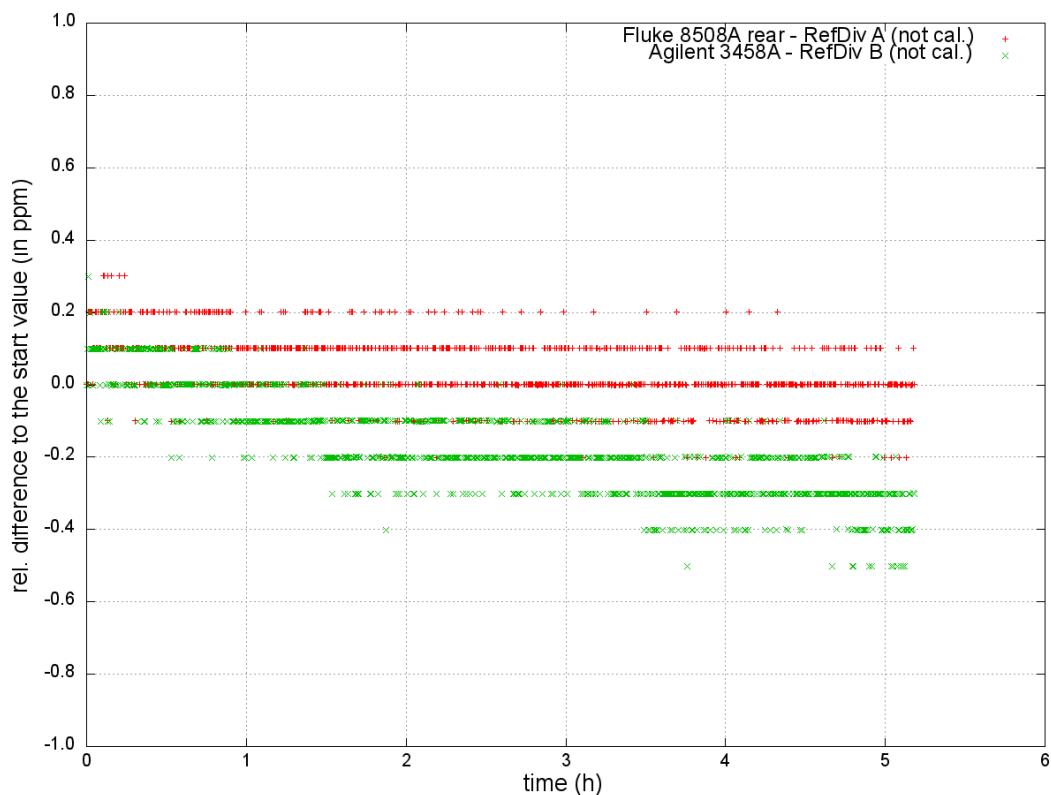


Abbildung 24: **Dritte Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 06.08.15).** Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm Δ_{rel} für die Referenzteiler. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

Die berechneten Abweichungen zum jeweiligen Startwert über die Dauer von etwa 5 Stunden sind etwa 0,8 ppm für Teiler B bzw. etwa 0,5 ppm für Teiler A. Berücksichtigt man, dass die ersten Stunden einer Messung ein Einlaufverhalten der Spannungswerte (verursacht vom Fluke 5720A Kalibrator) haben können, liegen die Stabilitäten wie zuvor im Rahmen der Herstellerangaben. Interessant war diese Messung jedoch vor allen Dingen, um den Tausch der Multimeter zu analysieren.

4.4.4 Messung 4: RT I: „B“ (nicht kalibriert); RT II: „C“ (kalibriert)

Um einen weiteren Referenzteiler zu untersuchen, wird vor Beginn der nächsten Messung zunächst ein dritter Teiler (C) kalibriert. Dieser wird mit dem Fluke Multimeter vermessen, während Teiler B unverändert bleibt. Die Drift des Agilent Multimeters soll weiterhin beobachtet werden. Die gesamte Messzeit beträgt etwas mehr als 8 Stunden, was an einem nicht beabsichtigtem Abbruch der Messung lag.³¹

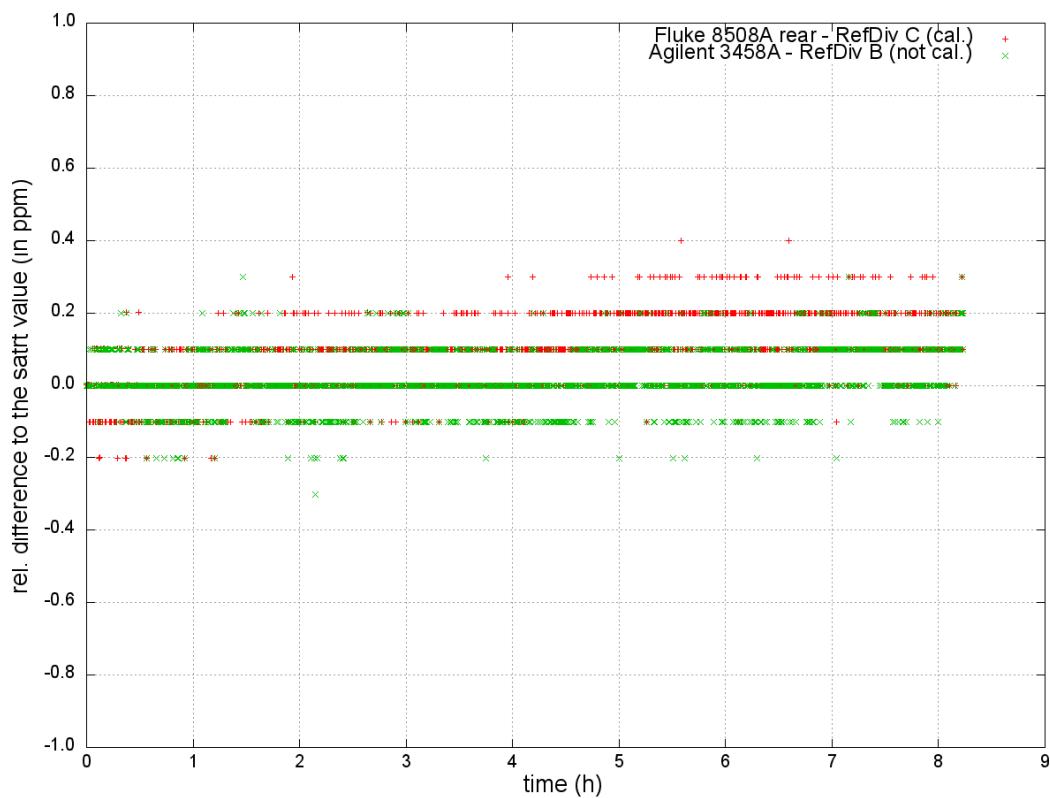


Abbildung 25: **Vierte Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 06.08.15).** Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm $\Delta_{rel.}$ für die Referenzteiler. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel.})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

³¹ Als Grund hat sich ein Stromausfall (nächtliches Gewitter) herausgestellt. Geräte sind dabei jedoch nicht zu Schaden gekommen.

Die bestimmten Abweichungen vom jeweiligen Startwert über die Dauer von etwa 8 Stunden (vgl. Abb. 25) sind etwa 0,5 ppm für beide Teiler B und C. Berücksichtigt man, dass die ersten Stunden einer Messung ein Einlaufverhalten der Spannungswerte (verursacht vom Fluke 5720A Kalibrator) haben können, liegen die Stabilitäten wie zuvor im Rahmen der Herstellerangaben. Der dritte Referenzteiler C zeigt demnach keine Auffälligkeiten und auch der mit dem Agilent Multimeter vermessene Teiler B driftet kaum. Um das Stabilitätsverhalten besser zu untersuchen, wäre eine längere Messung (vgl. Messung 5) hilfreich, auch da diese aufgrund des Abbruchs nur wenige Stunden dauerte.

4.4.5 Messung 5: RT I: „B“ (kalibriert); RT II: „C“ (nicht kalibriert)

Um die Stabilitäten über einen etwas längeren Zeitraum zu beobachten, bietet sich eine Wochenendmessung an. Im Gegensatz zur vorherigen Messung wird nun Referenzteiler B kalibriert und Teiler C bleibt unverändert. Mit Hilfe dieser Messung soll ein mögliches Einlaufverhalten des Fluke 5720A Kalibrators erkennbar (vgl. auch Kap. 4.5) und das Langzeitverhalten des Agilent Multimeters untersucht werden. Abbildung 26 zeigt wiederum die relative Abweichung vom Startwert der nach Gleichung (13) berechneten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler. Ein mögliches Einlaufverhalten ist daher in diesem Diagramm nicht auszumachen. In den zusammenfassenden Diagrammen (Abb. 28 und 29, Kap. 4.4.7) über den Verlauf aller Messungen werden daher wie bereits in Messung 1 die Spannungswerte und die berechneten Maßstabsfaktoren gezeigt. Das Einlaufverhalten des Fluke 5720A Kalibrators wird jedoch in Kap. 4.5 charakterisiert. An dieser Stelle stehen die Stabilitäten im Fokus.

Die berechneten Abweichungen zum jeweiligen Startwert über die Dauer mehrerer Tage sind jeweils etwa 1,2 ppm für beide Teiler B und C (betrachtet werden wie zuvor die berechneten Maßstabsfaktoren). Auch die Werte von jeweils 0,6 ppm für die ersten 10 Stunden weisen eine insgesamt hohe Stabilität auf, die mit den Herstellerangaben verträglich sind. Da es sich um eine etwas längere Wochenendmessung handelt, sind die Stabilitäten sogar besser als erwartet. Beide Teiler und auch die Multimeter weisen somit keine Auffälligkeiten auf. Interessant beim Verlauf des Agilent Multimeters sind lediglich die Schwankungen, die daher röhren könnten, dass das Gerät eine höhere Temperaturabhängigkeit aufweist als das Fluke Multimeter. Da der einzige Unterschied darin besteht, dass zum einen der K65 und zum anderen der Referenzteiler C die Spannung teilt, die mit dem Fluke Multimeter vermessen wird, können aus der Differenz der beiden Spannungsverläufe (vgl. Abb. 28, Kap. 4.4.7) auch Drifts von Teiler C ausgemacht werden.³² Wie bereits in Kap. 4.2 ausgewertet, besteht zwischen den beiden Eingängen des Fluke 8508A Multimeters kein signifikanter Unterschied.

³²Immer unter der Annahme, dass der K65 sehr stabil ist (vgl. Kap. 4.4.1).

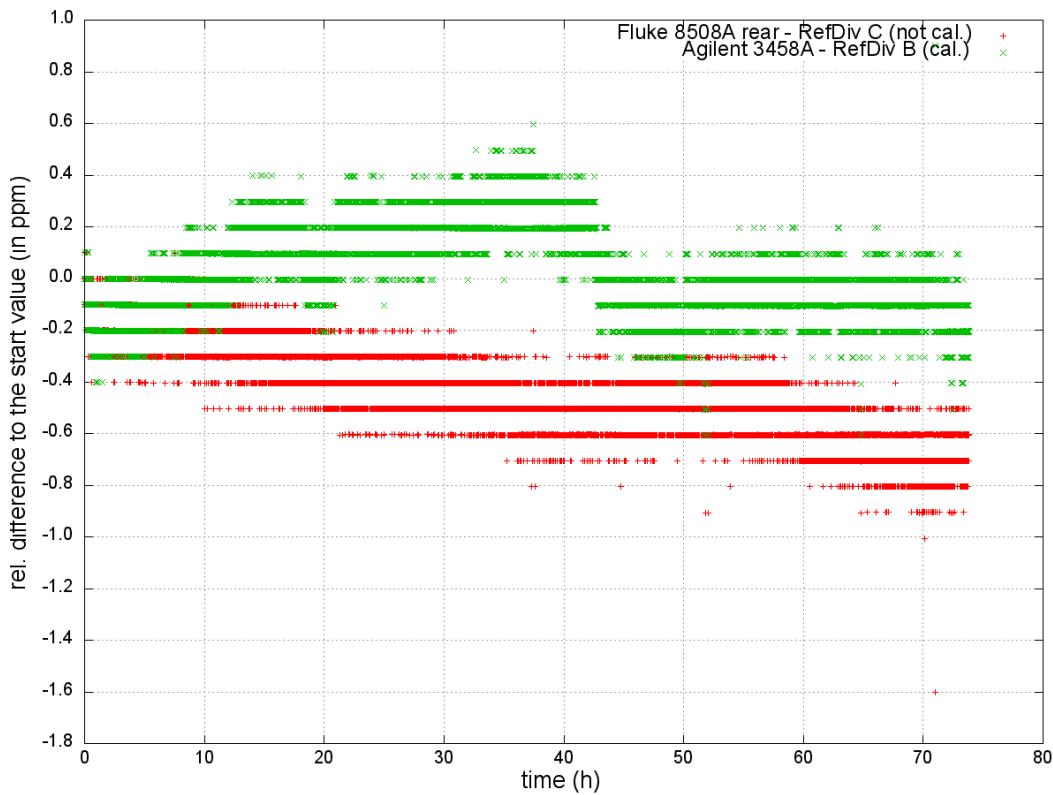


Abbildung 26: **Fünfte Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 07.08.15).**
 Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm Δ_{rel} . für die Referenzteiler. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

4.4.6 Messung 6: RT I: „C“ (nicht kalibriert); RT II: „A“ (kalibriert)

Die letzte der sechs Messungen zur Stabilität der Referenzteiler dient wie Messung 3 (Tausch der Multimeter) der Frage, ob Teiler A auch eine derart große Drift aufweist, wenn er nicht mit dem Agilent Multimeter vermessen wird. Da Messung 3 auf etwa 5 Stunden begrenzt war, soll diese die Stabilität von Teiler A (nach Kalibrierung) etwas länger beobachten. Zudem bietet sich Teiler C an, um abschließend das Agilent Multimeter zu charakterisieren, da dieser Teiler zuvor nur mit dem Fluke Multimeter vermessen worden ist und insgesamt eine hohe Stabilität aufwies.

Die berechneten Abweichungen zum jeweiligen Startwert über die Dauer fast eines Tages sind jeweils etwa 1,0 ppm für beide Teiler A und C (betrachtet werden wie zuvor die berechneten Maßstabsfaktoren). Auch die Werte von jeweils etwa 0,9 ppm für die ersten 10 Stunden weisen eine insgesamt hohe Stabilität auf, die im Rahmen der Herstellerangaben liegt. Das Agilent Multimeter weist in dieser Messung keine Auffälligkeiten auf und auch Referenzteiler A zeigt wie in Messung 3 keine große Drift.

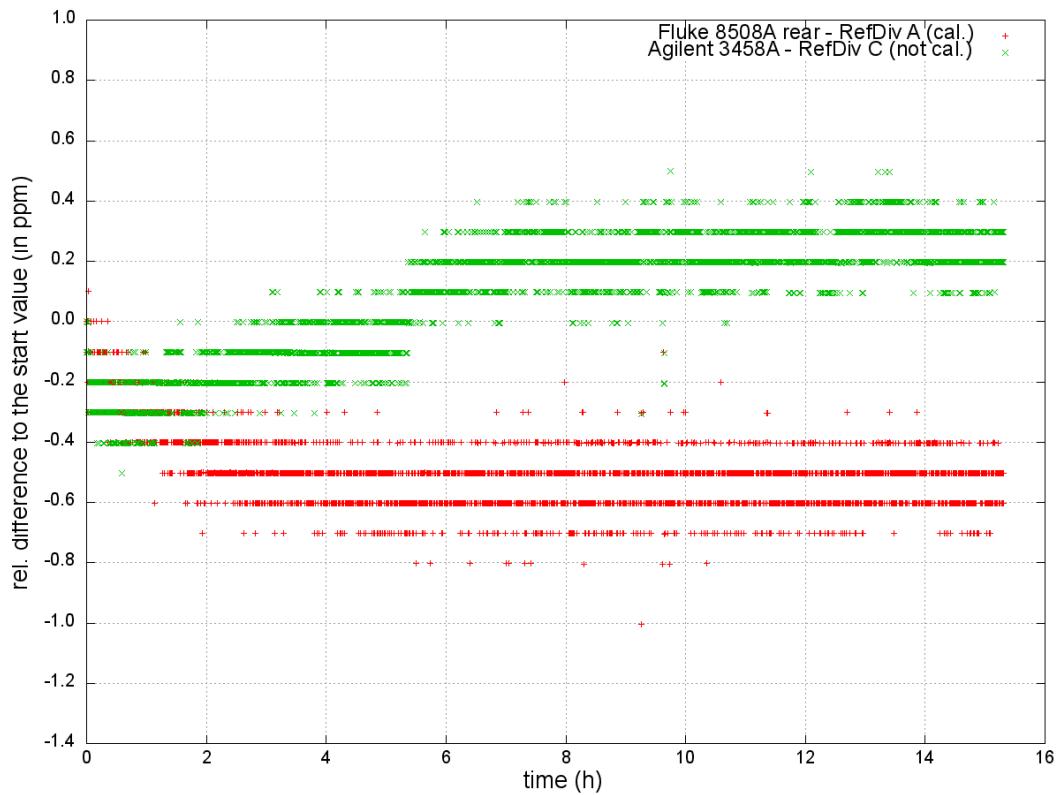


Abbildung 27: **Sechste Stabilitätsmessung der Referenzteiler (vom 10.08.15).** Geplottet ist die relative Abweichung zum Startwert in ppm $\Delta_{\text{rel.}}$ für die Referenzteiler. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{\text{rel.}})$ für die Maßstabsfaktoren (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) und mit welchem Multimeter vermessen wurde.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich die anfängliche Vermutung einer erhöhten Instabilität von Teiler A nicht bestätigen lässt und die beobachteten Drifts hauptsächlich vom Agilent Multimeter herrühren. Dass die Abweichungen in den ersten Stunden nach Beginn einer Messung (in Relation zur gesamten Dauer) erhöht sind, liegt zum Teil auch an dem Einfluss des Fluke 5720A Kalibrators (Einlaufverhalten, vgl. nächstes Unterkapitel).

4.4.7 Zusammenfassung aller Stabilitätsmessungen

Um an dieser Stelle noch einmal alle 6 Messungen zur Stabilität der Fluke 752A Referenzteiler zusammenzufassen, wurden zum einen in Abbildung 28 alle gemessenen Spannungsverläufe der drei Multimeter geordnet und unter Berücksichtigung der Zeiträume zwischen den jeweiligen Messungen geplottet. Abbildung 29 zeigt ebenso die berechneten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler. Zum anderen bietet Tabelle 3 eine abschließende Übersicht über alle wichtigen Daten und ausgewerteten Stabilitäten.

In Abbildung 28 ist zusätzlich markiert, wann jeweils neue Messungen zur Bestimmung von Offset und Verstärkung der Multimeter vorgenommen worden sind. Die verschiedenen Werte könnten u.a. erklären, warum die einzelnen Spannungsverläufe nicht exakt durchgehend sind, sondern an diesen Stellen etwas „springen“. Ein anderer Grund ist, dass die Referenzteiler an den Multimetern wechseln und somit leicht unterschiedliche Maßstabsfaktoren die Spannungsdifferenzen verursachen. Ferner ist es ein Unterschied, ob ein Referenzteiler vor einer Messung kalibriert worden ist oder nicht. Besonders zu Beginn von den Messungen 1, 5 und 6 erkennt man, dass die jeweiligen Spannungen nahezu identisch sind, bevor sie auseinander driften. Am genauesten ist dies bei der ersten Messung der Fall, da dort beide Referenzteiler kalibriert wurden.

Insgesamt ist auffällig, dass der Spannungsverlauf der jeweiligen Referenzteiler II (genauer „A“, „B“ und „C“, je nach Messung) grob dem des K65 entspricht. Das liegt daran, dass beide mit dem Fluke 8508 Multimeter vermessen wurden, wobei dessen beide Eingänge nach Kap. 4.2 keine signifikanten Unterschiede aufwiesen. Der Verlauf des Agilent 3458A Multimeters zeigt hingegen z.T. deutliche Unterschiede, voraus sich schließen lässt, dass die beobachteten Drifts vor allen Dingen durch dessen Instabilität verursacht wurden.

Verglichen mit den Herstellerangaben aus Tabelle 1 liegen die Messwerte überwiegend innerhalb des erwarteten Rahmens und weisen z.T. noch höhere Stabilitäten auf. Berücksichtigt man neben dem möglichen Einlaufverhalten des Fluke 5720A Kalibrators auch die Stabilitäten der Multimeter (Herstellerangaben), zeigen alle Auswertungen ein hohes und gutes Stabilitätsverhalten der Referenzteiler. Bis auf Messung 1 liegen die Stabilitäten auch ohne Berücksichtigung dieser Faktoren im Rahmen der geforderten 1,5 ppm in 24 Stunden. Besonders die etwas längere Messung 5 lieferte hohe Stabilitäten der Spannungswerte bzw. der ausgewerteten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler.

Betrachtet man die für die Stabilität wichtigen äußeren Bedingungen wie die in Tabelle 3 notierten Werte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sind keine großen Schwankungen von mehr als 1 K über die Dauer der einzelnen Messungen auszumachen. Die Fluke 752A Referenzteiler haben nach [Man01] eine Temperaturabhängigkeit von 0,1 ppm pro Kelvin (15-30 °C). Die Raumtemperatur lag während der Messungen zwischen 22 °C und 24 °C, wobei auch leichte Abweichungen (z.B. während die Messungen über Nacht liefen) aufgrund der installierten Klimaanlage nicht außerhalb des geforderten Bereichs liegen dürften. Mit einer Temperaturabhängigkeit von $\frac{\Delta M}{\Delta T} < 10^{-7}/K$ [Res14] der KATRIN-Spannungsteiler ist die hohe Stabilität

der Spannungswerte des K65 nachzuvollziehen. Die aus den Werten her am höchsten einzuschätzende Temperaturabhängigkeit hat das Agilent 3458A Multimeter, wobei eine genauere Analyse hilfreich wäre, um diese Vermutung weiter zu bekräftigen.

Abschließend ist zu untersuchen, wie lange die Referenzteiler ab ihrer Kalibrierung stabil sind. Da die Auswertungen der relativen Abweichungen zum Startwert der jeweiligen Maßstabsfaktoren ergeben haben, dass (bis auf Messung 1 mit erhöhter Drift des Agilent Multimeters) die Stabilitäten der drei Referenzteiler im Rahmen der Herstellerangaben von maximal 1,5 ppm Drift pro Tag liegen, ist ein Zeitraum in dieser Größenordnung anzugeben. Berücksichtigt man wiederum die verschiedenen Einflussfaktoren und dass z.T. auch höhere Stabilitäten gemessen wurden, sind die Referenzteiler auch über einen noch längeren Zeitraum als stabil einzustufen. Ob ein Teiler vor einer Messung kalibriert wurde, hat hingegen auf das Stabilitätsverhalten keine großen Auswirkungen (vgl. Abb. 28 und 29).

Die maximale über alle Messungen beobachtete Drift zeigt Messung 1 mit hochgerechnet etwa 3 ppm/Tag, wobei die äußeren Einflüsse und der des Agilent Multimeters nicht berücksichtigt wurden. Ansonsten zeigen die Messungen eine gemäß der Herstellerangaben maximale Drift von 0,5 ppm in 8 Stunden und somit eine maximale Abweichung von einem ppm in etwa 16 Stunden. Einen großen Unterschied zwischen den drei Referenzteilern ist nicht auszumachen, auch da sich die anfängliche Vermutung, dass der Teiler A deutlich instabiler ist, nicht bestätigen ließ.

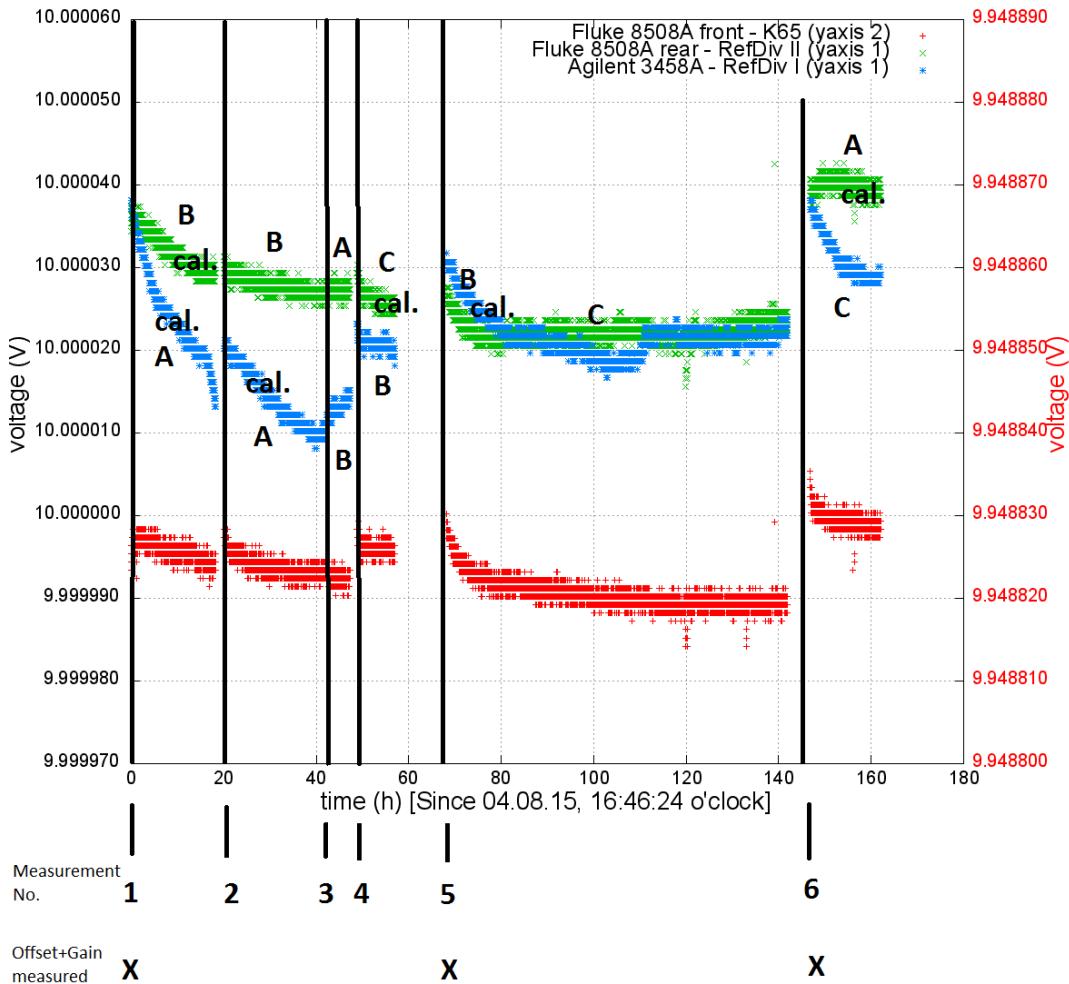


Abbildung 28: Alle Stabilitätsmessungen der Referenzteiler (vom 04.08.15 bis 11.08.15). Aufgetragen ist die um Offset und Verstärkung der jeweiligen Multimeter korrigierte Spannung über den Verlauf fast einer Woche. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen der des Fluke 8508A Multimeters von 0,45 ppm (*yaxis 2*) bzw. den quadratisch addierten Werten aus (8) und (9) (*yaxis 1*). Die Legende zeigt, mit welchem Multimeter gemessen wurde. Da der 100:1-Maßstabsfaktor des K65 leicht höher ist als der von den Referenzteilern, wurde zur besseren Darstellung eine zweite Ordinate verwendet (*yaxis 2*, rot). Zusätzlich ist eingetragen, wann welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) wurde und wann Offset und Verstärkung gemessen wurden.

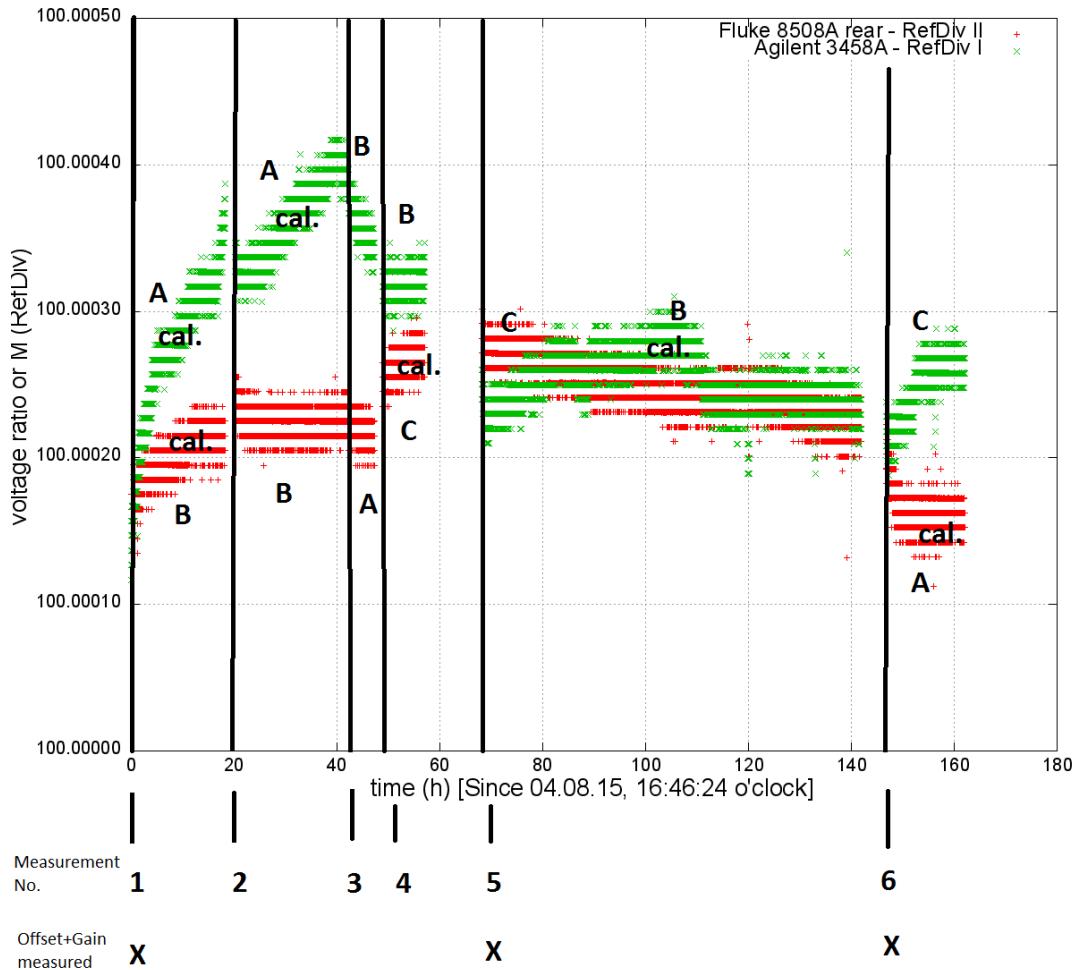


Abbildung 29: Alle Stabilitätsmessungen der Referenzteiler (vom 04.08.15 bis 11.08.15). Aufgetragen sind die ermittelten Maßstabsfaktoren der Referenzteiler M_{RefDiv} (vgl. (13)) über den Verlauf fast einer Woche. Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezzeichnet. Diese entsprechen den mit Gleichung (14) berechneten Werten für ΔM_{RefDiv} (vgl. S. 43). Die Legende zeigt, mit welchem Multimeter gemessen wurde. Zusätzlich ist eingetragen, wann welcher Referenzteiler kalibriert (*cal.*) wurde und wann Offset und Verstärkung gemessen wurden.

Tabelle 3: Übersicht über die Stabilitätsmessungen der drei Fluke 752A Referenzteiler. Aufgelistet sind für jede Messung neben dem genauen Zeitraum sowohl die notierten Werte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit als auch die bestimmten Stabilitäten für die Spannungen (jeweils ersten beiden Zeilen) und berechneten Maßstabsfaktoren. Die drei Referenzteiler werden wie zuvor mit „A“, „B“ und „C“ benannt. Mit Δ wird die Zeit zwischen zwei Messungen bezeichnet. Als Unsicherheit für die Stabilitäten wird ein Ablesefehler von $\pm 0,1$ ppm geschätzt.

No.	Date (DD.MM.YY)	Time (HH:MM:SS)	Temperature (°C)/ Humidity (%)	RefDiv I; RefDiv II/ Stability (ppm)
1	04.08.15	16:46:24	23.0 / 41	A (cal.); B (cal.)/ first 10 h: 1.6; 0.8 overall: 2.6; 1.0 first 10 h: 1.8; 0.8 overall: 2.6; 1.0
	05.08.15	10:58:03	22.2 / 37	
	Time Period::	18:11:39		
	Δ :	01:56:06		
2	05.08.15	12:54:09	23.4 / 35	A (cal.); B (not cal.)/ first 10 h: 0.8; 0.6 overall: 1.3; 0.7 first 10 h: 0.8; 0.5 overall: 1.2; 0.6
	06.08.15	10:48:15	22.8 / 34	
	Time Period:	17:54:06		
	Δ :	0:03:15		
3	06.08.15	10:51:30	22.8 / 34	B (not cal.); A (not cal.)/ first 10 h: -; - overall: 0.4; 0.4 first 10 h: -; - overall: 0.8; 0.5
	06.08.15	16:02:32	23.5 / 34	
	Time Period:	05:11:02		
	Δ :	01:33:41		
4	06.08.15	17:36:13	23.8 / 35	B (not cal.); C (cal.)/ first 10 h: -; - overall: 0.4; 0.6 first 10 h: -; - overall: 0.5; 0.5
	07.08.15	01:50:10	22.8 / 37	
	Time Period:	08:13:57		
	Δ :	11:04:19		
5	07.08.15	12:54:29	23.2 / 36	B (cal.); C (not cal.)/ first 10 h: 1.0; 0.8 overall: 1.5; 1.0 first 10 h: 0.6; 0.6 overall: 1.2; 1.2
	10.08.15	14:42:50	23.4 / 34	
	Time Period:	75:48:21		
	Δ :	04:49:09		
6	10.08.15	19:31:59	23.3 / 35	C (not cal.); A (cal.)/ first 10 h: 0.9; 0.4 overall: 1.0; 0.6 first 10 h: 0.9; 0.9 overall: 1.0; 1.0
	11.08.15	10:50:46	23.5 / 33	
	Time Period:	15:18:47		

4.5 Charakterisierung des Fluke 5720A Kalibrators

In diesem Unterkapitel soll als Ergänzung der vorherigen Stabilitätsmessungen der Fluke 752A Referenzteiler der Fluke 5720A Kalibrator charakterisiert werden. Wie bereits erwähnt, kann bei den meisten Geräten in den ersten Stunden nach Beginn der Messung ein Einlaufverhalten beobachtet werden. In der Wochenendmessung (Kap. 4.4.5) ist der Einfluss des Kalibrators am stärksten ausgeprägt. Dass es sich um keinen Effekt eines Multimeters handeln kann, liegt daran, dass die Spannung aller Geräte denselben Verlauf zu Beginn der Messung verfolgen und der Kalibrator als gemeinsame Spannungsquelle aller Geräte dient. Zu beachten ist, dass es sich lediglich um eine einzige Messung handelt und allgemeine Aussagen über die Charakteristik des Kalibrators nicht getroffen werden können.

Abbildung 30 zeigt zum einen die berechnete Spannung des Kalibrators, indem die Spannungswerte des K65 mit dem Maßstabsfaktor $M100_{lvc}^{K65}$ aus (12) von 100,5149 multipliziert werden. Zum anderen ist zum Vergleich der Spannungsverlauf des für diese Messung zuvor kalibrierten Referenzteilers B geplottet.

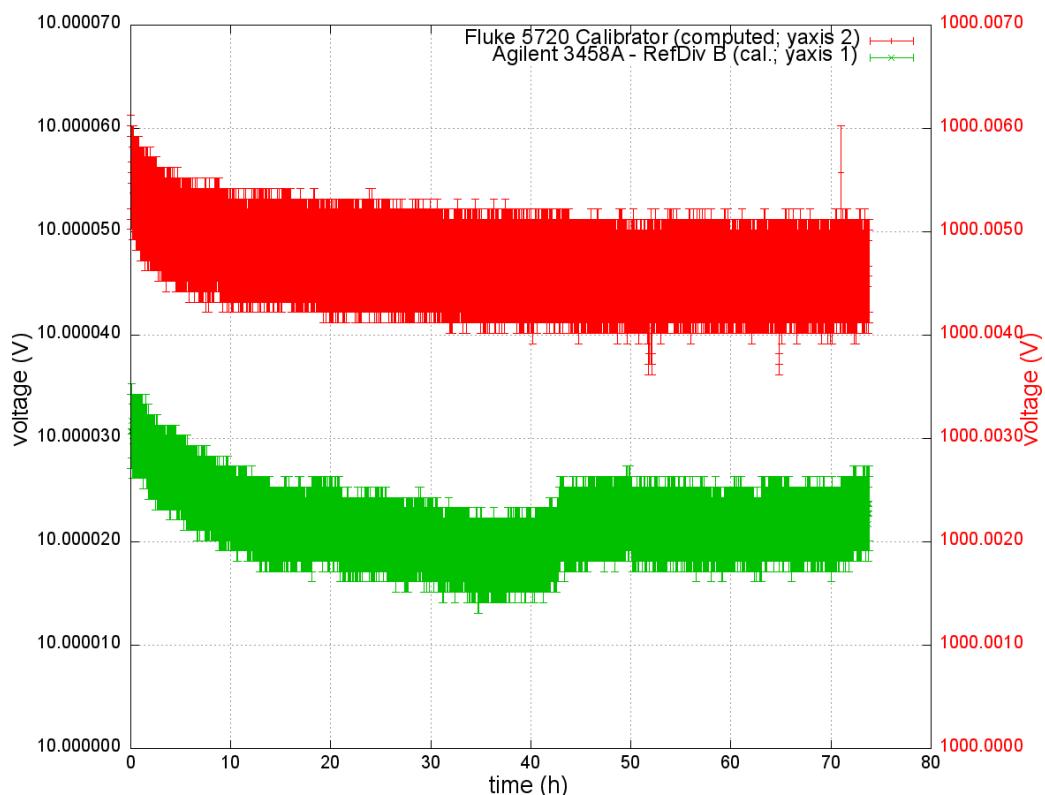


Abbildung 30: **Charakterisierung des Fluke 5720A Kalibrators (entnommen aus der Stabilitätsmessung vom 07.08.15).** Aufgetragen ist die mit Hilfe des Maßstabsfaktors des K65 berechnete Spannung des Kalibrators (*yaxis 2*, rot) und zum Vergleich der Spannungsverlauf des zuvor kalibrierten Referenzteilers B (*yaxis 1*). Die Unsicherheiten entsprechen der des Fluke 8508A Multimeters von 0,45 ppm (unter Berücksichtigung von $M100_{lvc}^{K65}$) und dem quadratisch addierten Wert von 0,36 ppm aus (9).

Bis auf kleine Abweichungen (verursacht hauptsächlich durch das Agilent Multimeter) ist eine Ähnlichkeit der beiden Verläufe gut zu erkennen (besonders in den ersten Stunden).

Dass der K65 eine derart hohe Stabilität aufweist ($\frac{\Delta M}{\Delta T} < 10^{-7}/K$ [Res14]) liegt vor allen Dingen darin begründet, dass dessen Teilerkette sehr große Widerstände besitzt (vgl. Kap. 2). Aus dem Ohmschen Gesetz $U = R \cdot I$ und dem Zusammenhang für die (elektrische) Leistung ($P = U \cdot I$) erkennt man, dass bei gleicher anliegender Spannung U höhere Widerstände R dazu führen, dass die Stromstärke I abnimmt. Nimmt allerdings die Stromstärke ab, sinkt auch die Leistung, was im Falle der Spannungssteiler für deren Temperaturstabilität verantwortlich ist. Je höher die Widerstände, desto höher die thermische Abschirmung. Aufgrund dieser hohen Stabilität und geringen Temperaturabhängigkeit lässt sich aus den gemessenen Spannungswerten des K65 und dessen Maßstabsfaktor auf die Spannung des Kalibrators schließen.

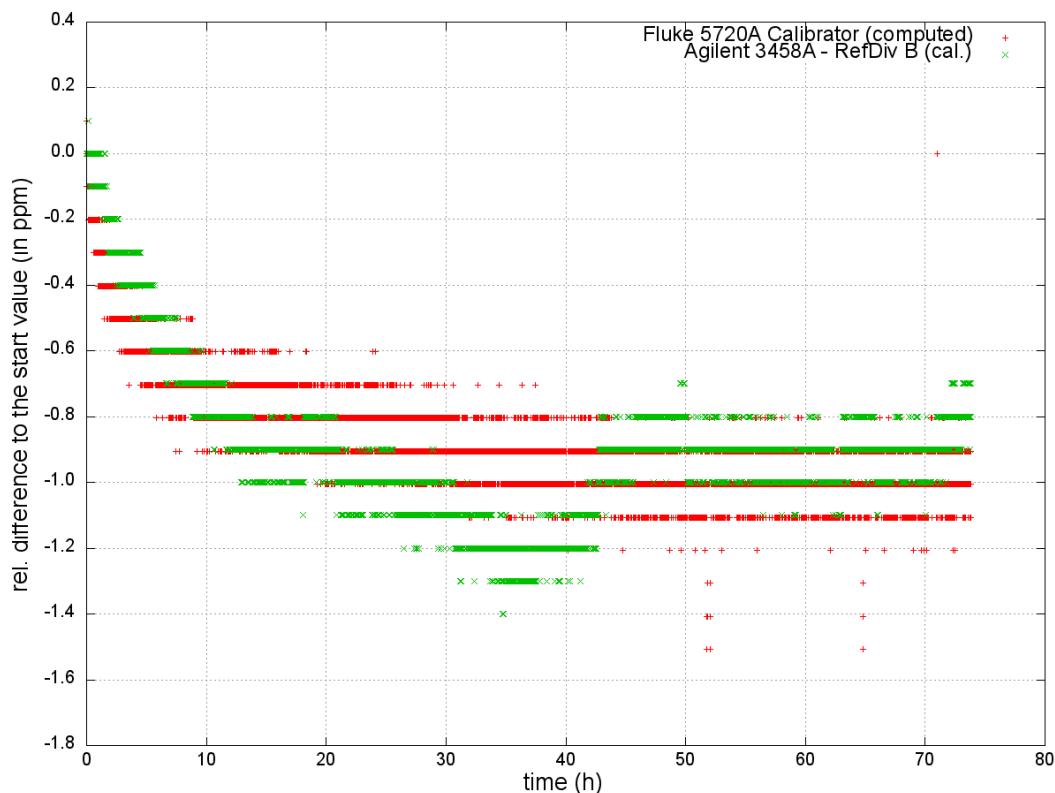


Abbildung 31: **Charakterisierung des Fluke 5720A Kalibrators (entnommen aus der Stabilitätsmessung vom 07.08.15)**. Geplottet ist die relative Abweichung zum jeweiligen Startwert (aus Abb. 30) in ppm (vgl. Gleichung (16)). Zur besseren Übersicht sind die Unsicherheiten nicht mit eingezeichnet. Diese entsprechen den mit den Gleichungen (7) und (14) berechneten Werten für $\Delta(\Delta_{rel.})$ für die Spannungen (vgl. S. 43).

Betrachtet man anschließend in Abbildung 31 die relative Abweichung zum Startwert (wie zuvor in Kap. 4.4), ergibt sich eine Stabilität von etwa 1,4 ppm über den Verlauf der gesamten Messung für den Fluke 5720A Kalibrator. Untersucht man das Einlaufverhalten näher, ist dieses etwa 10-15 Stunden nach Beginn der Messung

abgeklungen. Anschließend ist eine Stabilität von etwa 0,6 ppm zu beobachten. Ein Vergleich mit möglichen Herstellerangaben bietet sich nicht an, auch da es sich lediglich um eine Beispielmessung zum Verhalten eines Kalibrators handelt.

4.6 Stabilitätsmessungen von Hochspannungsnetzgeräten

In diesem letzten Unterkapitel sollen abschließend weitere wichtige Geräte, genauer Hochspannungsnetzgeräte hinsichtlich ihrer Stabilität untersucht werden. Sowohl das MCP 14-1250 (vgl. Abb. 33), als auch das HCL 35-35000 (vgl. Abb. 34) und das HCP 35M-70000 (vgl. Abb. 35) dienen bei Kalibrierungen als Spannungsquellen. Wie in den vorherigen Unterkapiteln interessiert neben der Stabilität die Dauer des Einlaufverhaltens, bevor sich die Spannungswerte auf einem Niveau stabilisieren.

Abbildung 32 gibt zunächst eine schematische Übersicht über das generelle Konzept der Stabilitätsmessungen. Das zu untersuchende Hochspannungsnetzgerät liefert eine Spannung, die mit parallel geschalteten Spannungsteilern (KATRIN-Teiler und Referenzteiler) herunter geteilt und mit Präzisionsmultimetern vermessen wird. Die Maßstabsfaktoren der beiden KATRIN-Spannungsteiler sind dabei aufgrund ihrer niedrigen Temperaturabhängigkeit als konstant anzusehen (vgl. Kap. 4.4).

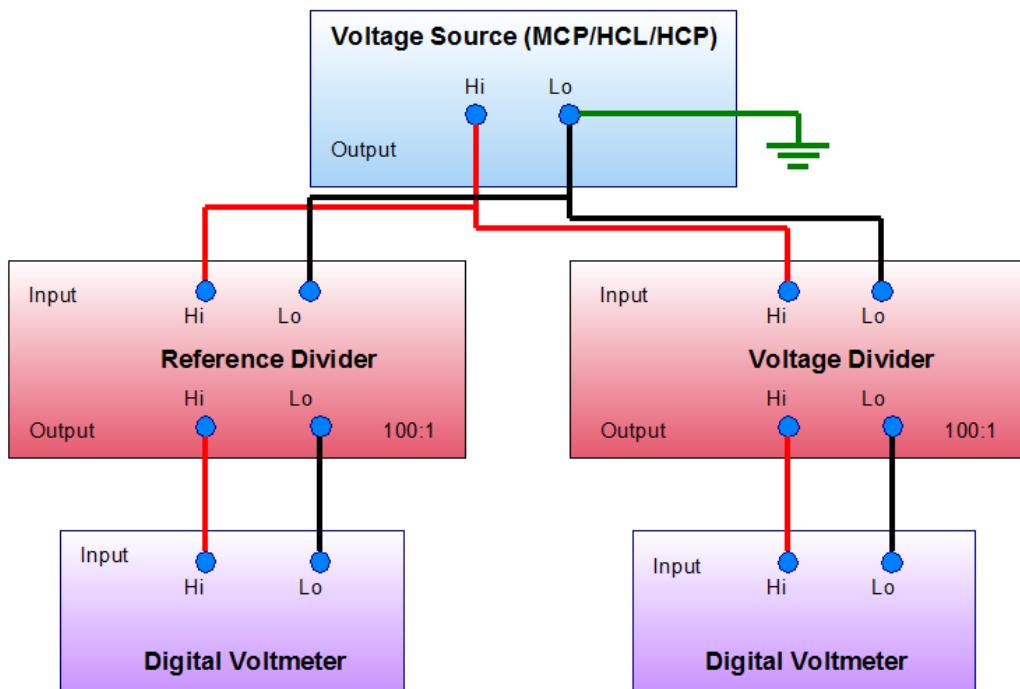


Abbildung 32: **Schematische Übersicht der Stabilitätsmessung der Spannungsquellen.** Die Spannungen der zu untersuchenden Hochspannungsnetzgeräte MCP 14-1250, HCL 35-35000 und HCP 35M-70000 (blau unterlegt) werden mit Hilfe von parallel geschalteten Spannungsteilern (Fluke 752A, K35 oder K65; rot unterlegt) herunter geteilt. Präzisionsmultimeter (Fluke 8508A oder Agilent 3458A; violett unterlegt) lesen die Spannung aus. Alle Komponenten sind über das gleiche Potential geerdet.

Bei der ersten Stabilitätsmessung des MCP 14-1250 wird dessen Spannung im Verhältnis 100:1 geteilt und mit den Multimetern vermessen. Beide Spannungsverläufe ähneln sich stark, trotz verschiedener Absolutwerte. Die möglichen Effekte der Multimeter oder des Referenzteilers auf die Stabilität sind offenbar zu gering. Das Einlaufverhalten ist nach etwa 3 Stunden abgeklungen und die Stabilität liegt in dieser Zeit bei etwa 20 ppm ($2 \cdot 10^{-5}$). Zur Bestimmung der Stabilität wird jeweils die relative Abweichung vom Maximalwert in ppm gewählt. Insgesamt ändern sich die Spannungswerte um etwa 25 ppm ($2,5 \cdot 10^{-5}$) und nach dem Einlaufen um etwa 5 ppm ($5 \cdot 10^{-6}$).

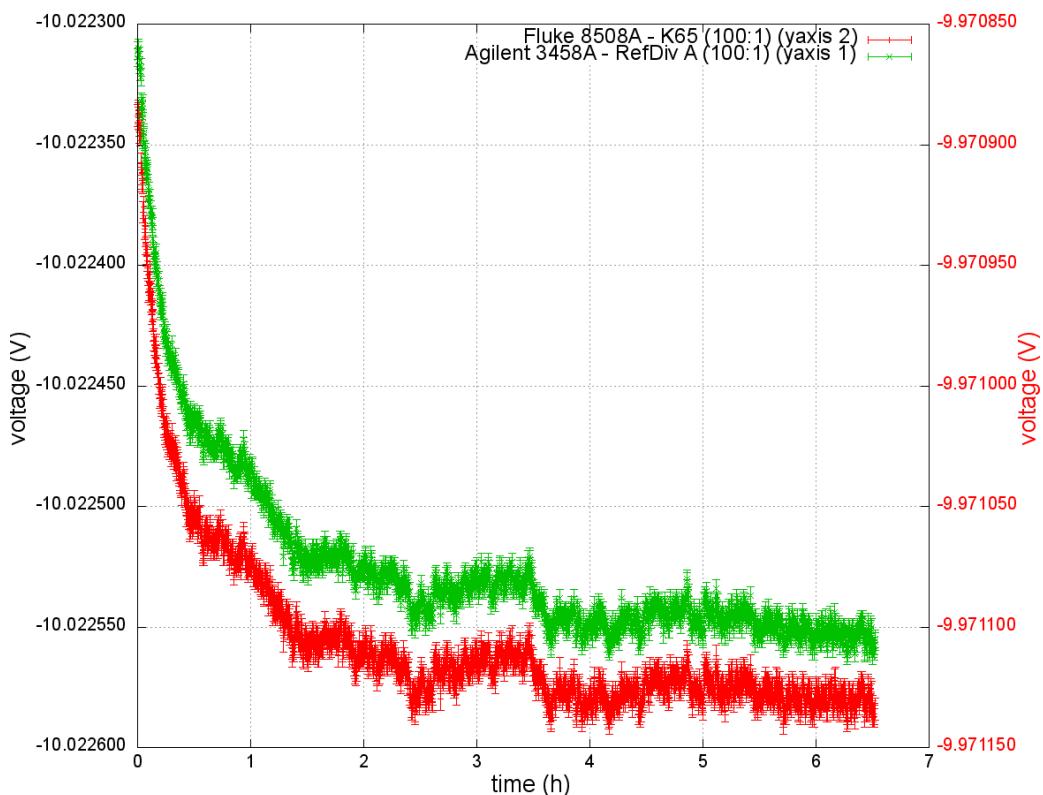


Abbildung 33: **Stabilitätsmessung des MCP 14-1250 (Messung vom 10.07.15).** Aufgetragen sind die von den Multimetern ausgelesenen Spannungen über den Verlauf einiger Stunden. Die Unsicherheiten entsprechen der des Fluke 8508A Multimeters von 0,45 ppm und dem quadratisch addierten Wert von 0,36 ppm aus (9). Die Legende zeigt, welcher Teiler mit welchem Multimeter vermessen wurde. Da der 100:1-Maßstabsfaktor des K65 leicht höher ist als der von dem Referenzteiler A, wurde zur besseren Darstellung eine zweite Ordinate verwendet (yaxis 2, rot).

Bei der zweiten Stabilitätsmessung des HCL 35-35000 wird dessen Spannung im Verhältnis 2000:1 geteilt und mit den Multimetern vermessen. Beide Spannungsverläufe ähneln sich stark, trotz verschiedener Absolutwerte (aufgrund unterschiedlicher Maßstabsfaktoren der beiden KATRIN-Spannungsteiler). Die möglichen Effekte der Multimeter auf die Stabilität sind offenbar zu gering. Das Einlaufverhalten ist erst gegen Ende der Messung abgeklungen (mit einem Wendepunkt nach etwa 10 Stun-

den) und die Stabilität liegt in dieser Zeit bei etwa 200 ppm ($2 \cdot 10^{-4}$). Im Vergleich zur gesamten Zeit ist die Abweichung nach den ersten 10 Stunden noch etwas höher.

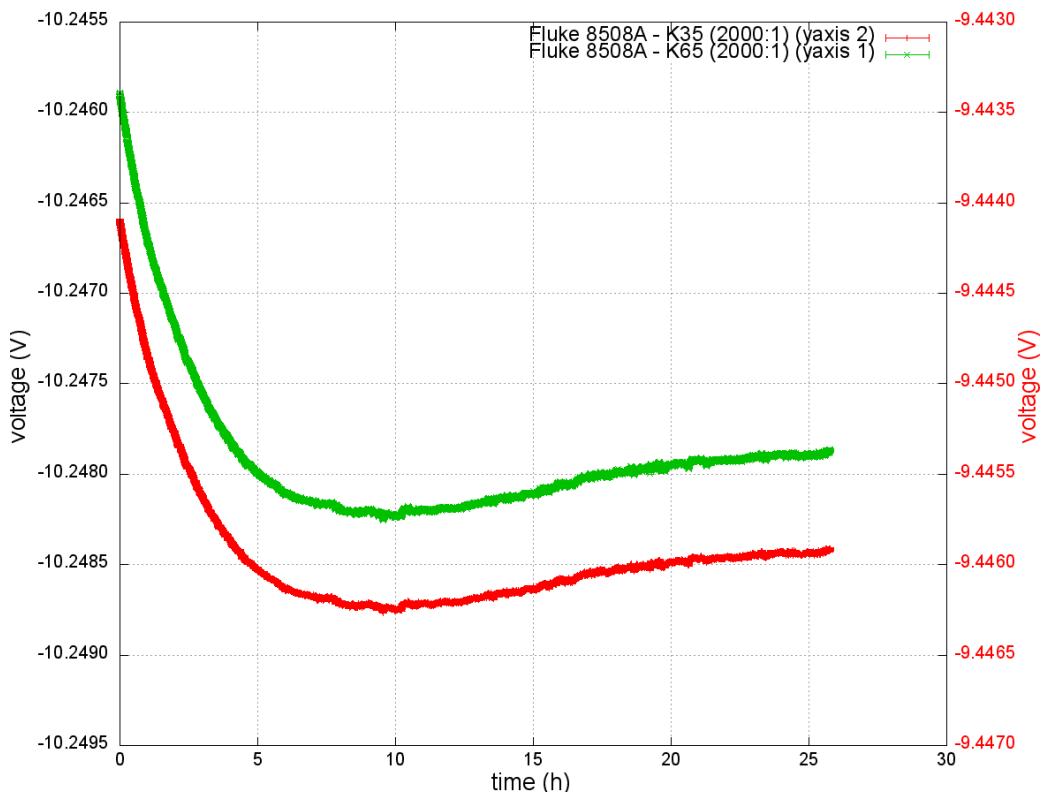


Abbildung 34: **Stabilitätsmessung des HCL 35-35000 (Messung vom 14.07.15).** Aufgetragen sind die von den Multimetern ausgelesenen Spannungen über den Verlauf etwa eines Tages. Die Unsicherheiten entsprechen der des Fluke 8508A Multimeters von 0,45 ppm. Die Legende zeigt, dass beide Teiler mit jeweils einem Fluke Multimeter vermessen wurden. Da der 2000:1-Maßstabsfaktor des K35 leicht höher ist als der des K65, wurde zur besseren Darstellung eine zweite Ordinate verwendet (*yaxis 2*, rot).

Bei der dritten Stabilitätsmessung des HCP 35M-70000 wird die Eingangsspannung ebenfalls herunter geteilt. Die maximale Abweichung liefert die erste Messung (da das Gerät dort eingeschaltet wurde), bei dem auch ein Einlaufverhalten zu erkennen ist, welches nach etwa einer Stunde abgeklungen ist, da danach die Spannungswerte annähernd linear driften. In dieser Zeit ergibt sich eine Stabilität von etwa 10 ppm (10^{-5}). Insgesamt beträgt die maximale Drift für alle drei Einzelmessungen über den Zeitraum von etwas über 7 Stunden etwa 15 ppm ($1,5 \cdot 10^{-5}$), wobei die annähernd lineare Drift eine Steigung von etwa einem ppm pro Stunde hat.

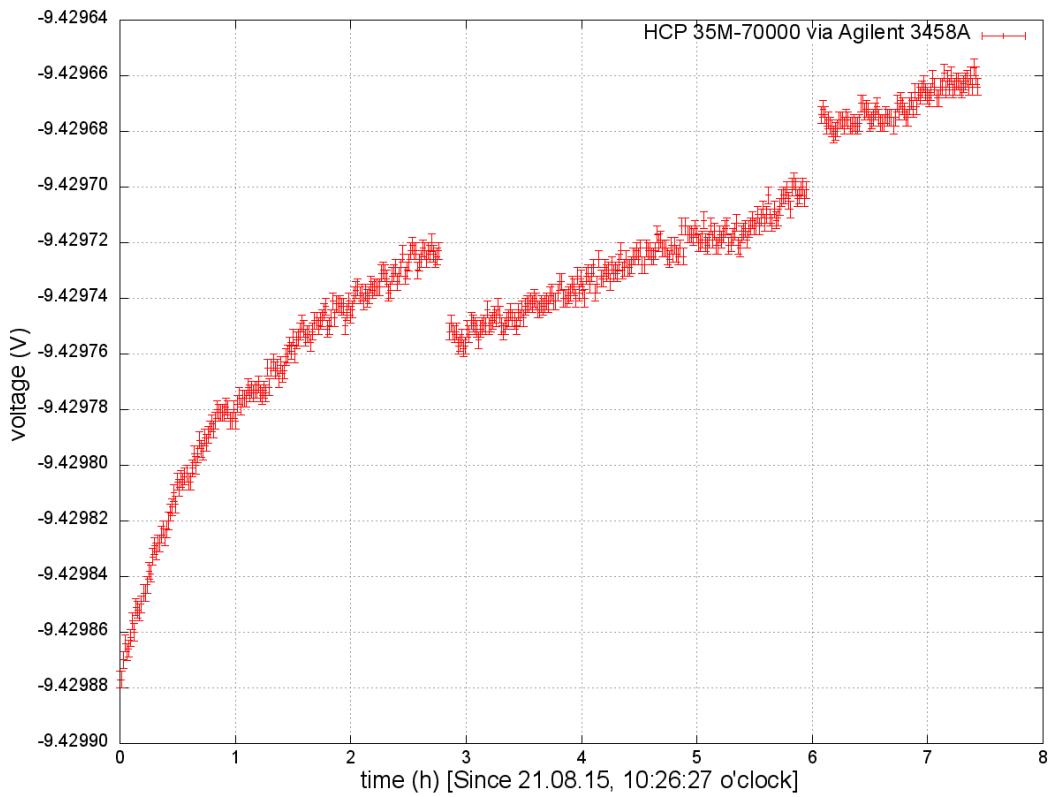


Abbildung 35: **Stabilitätsmessung des HCP 35M-70000 (Messungen vom 21.08.15).** Aufgetragen sind die von dem Multimeter ausgelesene Spannung über den Verlauf weniger Stunden. Die Unsicherheit entspricht der des Agilent 3458A Multimeters von 0,32 ppm. Unter Berücksichtigung der Zeit zwischen den drei Einzelmessungen, wurden diese chronologisch geplottet. Das Hochspannungsnetzgerät war während der gesamten Messzeit in Betrieb.

Kapitel 5

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

5 Zusammenfassung und Ausblick

An dieser Stelle sollen die gewonnenen Ergebnisse noch einmal zusammengefasst werden. Neben einer Diskussion über mögliche Verbesserungen oder Erweiterungen der Messungen, werden die erhaltenen Resultate zudem mit Herstellerangaben verglichen. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere Aufgaben und des Nutzens dieser Arbeit in Form einer neu entwickelten absoluten Kalibrierungsmethode [Res18] gegeben.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die Charakterisierung von Komponenten und Geräten für die Präzisionshochspannungsmessung beim KATRIN-Experiment und beim CRYRING-Speicherring. Anhand diverser Messungen mit verschiedenen Geräte wie Präzisionsmultimetern, Kalibratoren, Hochspannungsnetzgeräten oder Spannungsteilern und Referenzteilern wurden Charakteristika wie die Stabilität oder ein mögliches Einlaufverhalten näher untersucht.

Zunächst wurden die verwendeten Präzisionsmultimeter von der Firma Fluke und Agilent mit Hilfe einer 10 V-Referenzquelle hinsichtlich ihrer Stabilität vermessen. Es zeigte sich, dass das Gerät der Firma Agilent deutlich instabiler ist als die von der Firma Fluke. Auffällig war, dass die beiden Eingänge des einen Fluke Multimeters einen nahezu identischen Verlauf zeigten und somit auch auf das Stabilitätsverhalten der 10 V-Referenzquelle geschlossen werden konnte. Eine mögliche Verbesserung dieser Messung hätte darin bestanden, neben der positiven auch die negative Polarität der Spannungen zu vermessen. Aufgrund des Ausfalls eines der beiden Fluke Multimeter wurde die Messreihe letztlich unterbrochen.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit waren die Charakterisierungen der Kalibratoren. Der Fluke 335A Kalibrator wurde zuerst hinsichtlich seiner Stabilität und seines Einlaufverhaltens untersucht. Es ergab sich jedoch entgegen der Erwartungen eine Stabilität in einer Größenordnung von 10^{-5} , die der geforderten Präzision auf ppm-Niveau im Rahmen von [Res18] nicht genügt. Daher wurde anschließend das Oszillationsverhalten näher betrachtet, wobei letztlich ebenso eine Stabilität in einer Größenordnung von 10^{-5} festgestellt werden konnte. Gewählt wurde in diesem Fall der Mittelwert des Wechselspannungsanteils des Kalibrators, der aufgrund der Integrationszeit der Multimeter in 10 Einzelmessungen zu je 10 Sekunden vermessen wurde. Bei näherer Betrachtung des vergrößerten Ausschnitts der Oszilloskopmessung konnte zwar keine Substruktur erkannt werden. Abgeschätzt wurde lediglich die Netzfrequenz von etwa 50 Hz. Eine Erweiterung dieser Messung wäre eine genaue Fourieranalyse des aufgenommenen Spektrums bzw. eine Untersuchung des Frequenzspektrums, um eventuelle Ursachen für das instabile Verhalten des Kalibrators zu finden.

Die zentralen Messungen dieser Arbeit stellen die zur Stabilität der Referenzteiler dar. Nach insgesamt 6 Einzelmessungen über den Zeitraum fast einer Woche wurden drei Teiler hinsichtlich ihres Stabilitätsverhaltens untersucht. Interessant sind dabei zum einen die verschiedenen äußeren Einflüsse, die die eigentliche Stabilität der Teiler verbergen. So können Temperaturschwankungen im Labor (wie auch Änderungen

der Luftfeuchtigkeit) z.T. signifikante Auswirkungen auf die Messergebnisse haben. Als Erweiterung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Stabilitätsmessungen bieten sich daher Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Multimeter an. Besonders das Agilent Multimeter zeigte gegenüber den anderen Komponenten (wie dem Fluke Multimeter) während der Auswertungen häufiger Indizien für eine erhöhte Temperaturabhängigkeit. So konnte im Laufe der Messungen eine starke Drift des Referenzteilers A ausgeschlossen werden, da zunächst noch unklar war, welche Komponente genau für die Instabilität verantwortlich ist. Als Fazit kann festgehalten werden, dass unter Einbeziehung aller Messergebnisse die drei untersuchten Referenzteiler Stabilitäten im Rahmen der Herstellerangaben von maximal 0,5 ppm in 8 Stunden (1,5 ppm pro Tag) aufweisen. Bei der längsten Messung zeigten sich sogar noch höhere Stabilitäten, in der auch ein Einlaufverhalten aufgrund des Kalibrators ausgemacht werden konnte. Dieser Einfluss konnte durch Zurückrechnen auf die jeweiligen Maßstabsfaktoren der Referenzteiler weitestgehend raus gerechnet werden. Grund dafür ist der sehr stabile Maßstabsfaktor des K65 sowie dessen geringe Temperaturabhängigkeit. Der Spannungsverlauf des K65 konnte als Referenz zu denen der Referenzteiler gesehen werden. Ein erwähnenswerter Punkt stellt die Vermessung von Offset und Verstärkung der Multimeter dar. Wie im zusammenfassenden Diagramm erkennbar, wurden diese nicht vor jeder Messung gesondert gemessen. Um die Präzision der Messergebnisse weiter zu erhöhen, könnten diese Werte noch regelmäßiger bestimmt werden. Ebenso wie bei den Stabilitätsmessungen der Multimeter, wäre eine Messung bei negativer Polarität eine Erweiterung. Daran anschließend wäre eine detaillierte Analyse der Methode der Selbstkalibrierung der Referenzteiler. Zwar konnten diese vor jeder Messung mit einer relativen Unsicherheit von unter 0,5 ppm (Herstellerangaben) kalibriert werden, dennoch zeigte sich eine erhöhte Schwierigkeit aufgrund erhöhter Werte. Da diese jedoch statistisch verteilt vom Multimeter angezeigt werden, konnte die Kalibrierung als erfolgreich angesehen werden, falls nicht mehr als ein Drittel der Werte außerhalb der geforderten Unsicherheit lagen.

Das sich anschließende Unterkapitel beschäftigte sich noch einmal näher mit dem für die Messungen der Referenzteiler verwendeten Kalibrator. Wiederum unter der Annahme, dass der K65 sehr stabil ist, konnten Rückschlüsse auf Charakteristika des Kalibrators gezogen werden. Am Beispiel der längsten Stabilitätsmessung der Referenzteiler konnte ein Einlaufverhalten beobachtet werden und der Kalibrator hinsichtlich seiner Stabilität ausgewertet werden.

Auch das letzte Unterkapitel beschäftigte sich mit weiteren Stabilitätsmessungen von drei Hochspannungsnetzgeräten, die für die in [Res18] neu entwickelte Absolutkalibrierung Verwendung finden. Es konnte anhand ausgewählter Messungen mit parallel geschalteten Spannungsteilern sowohl ein Einlaufverhalten, als auch das Stabilitätsverhalten in Ansätzen untersucht werden. Auch hier würden sich weitere, teils längere Messungen inklusive der Untersuchung der Temperaturabhängigkeiten anbieten.

ANHANG

A Anhang

A.1 Selbstgeschriebenes gnuplot-Skript

```

1 # allgemeines Beispiel
2 reset
3 # Terminal für Ausgabe auf dem Bildschirm
4 set term x11
5 # Paket für Umlaute
6 set encoding iso_8859_1
7 # Schriftgröße der Legende
8 # font " , "(Schriftstil und Größe)
9 set key font "Arial,18"
10 # Reichweite der Achsen
11 set xrange [0:10]
12 set yrange [0:10]
13 set y2range [0:10]
14 # Gitter einfügen
15 set grid
16 # Haupt- und Zwischenintervallmarken (hier x-Achse)
17 set xtics 1
18 set mxtics 2
19 # zweite y-Achse rot färben
20 set y2tics textcolor rgb "red"
21 # Überschrift und Achsenbeschriftungen
22 set title "Stability Measurement" font "Arial,18"
23 set xlabel "Time(h)"
24 set ylabel "Voltage_Multimeter_1(V)"
25 set y2label "Voltage_Multimeter_2(V)" textcolor rgb "red"
26 # Nachkommastellen vorgeben (hier y-Achsen)
27 set format y "%.6f"
28 set format y2 "%.6f"
29 # Pfeile bzw. Linien zeichnen
30 # front (Vordergrund); ls,lw (Farbe und Dicke)
31 set arrow from 1,2 to 3,4
32 set arrow from 1,2 to 3,4 nohead front ls 3 lw 4
33 # Befehl zum Plotten der Messdaten
34 # using xwerte:ywerte:yfehler with yerror axes xy title "Legende"
35 plot "Measurement.txt" using 1:2:(0.01*$2) with yerror axes x1y1
    title "Voltmeter_1"
36 plot "Measurement.txt" using 1:3:(0.01*$3) with yerror axes x1y2
    title "Voltmeter_2"
37 # Ausgabe in Datei (hier eps und png)
38 set terminal postscript enhanced colour
39 set out "Filename.eps"
40 replot
41 set terminal png size 1200,900
42 set out "Filename.png"
43 replot

```

A.2 Zusätzliche bzw. ergänzende Diagramme zu Kapitel 4

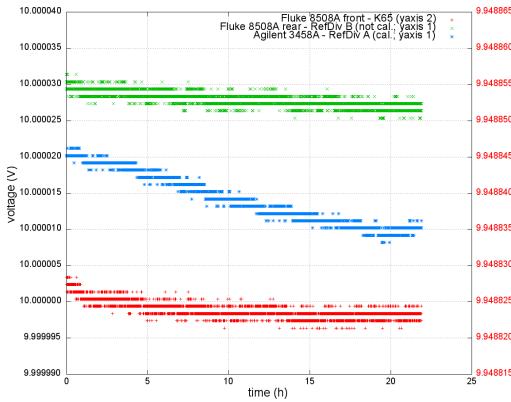


Abbildung 36: Zweite Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 19

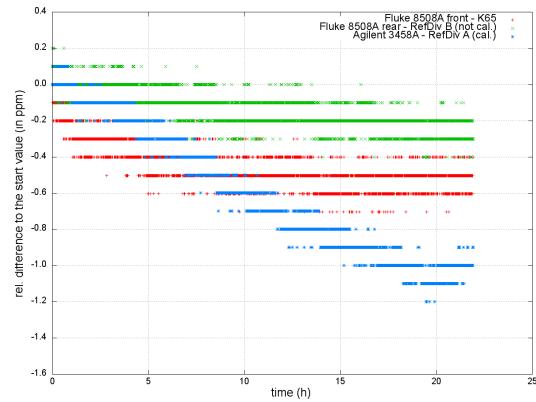


Abbildung 37: Zweite Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 20

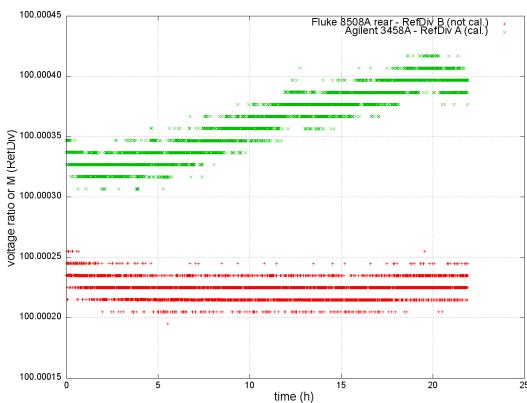


Abbildung 38: Zweite Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 21

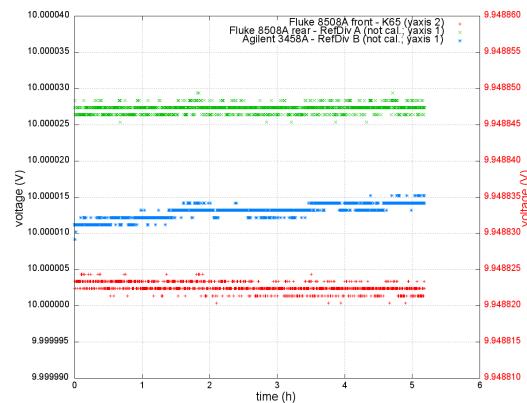


Abbildung 39: Dritte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 19

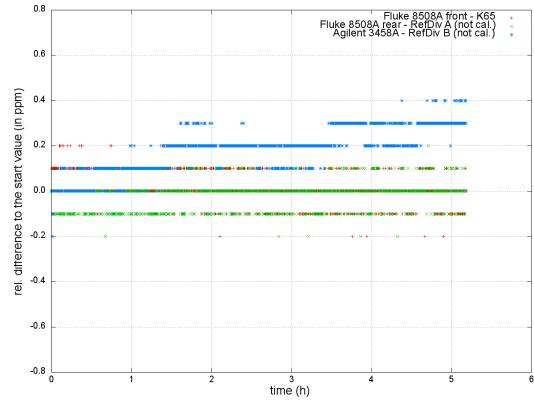


Abbildung 40: Dritte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 20

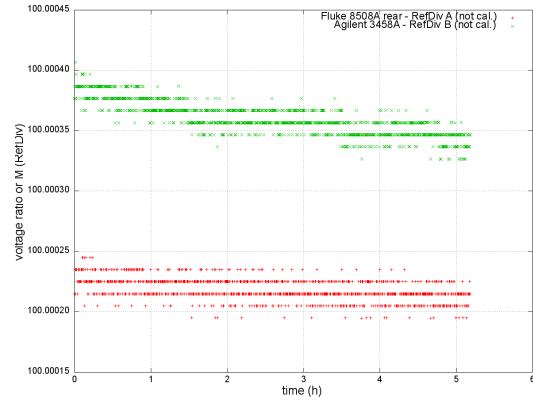


Abbildung 41: Dritte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 21

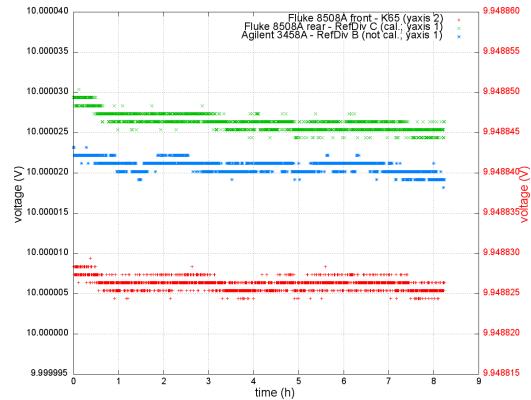


Abbildung 42: Vierte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 19

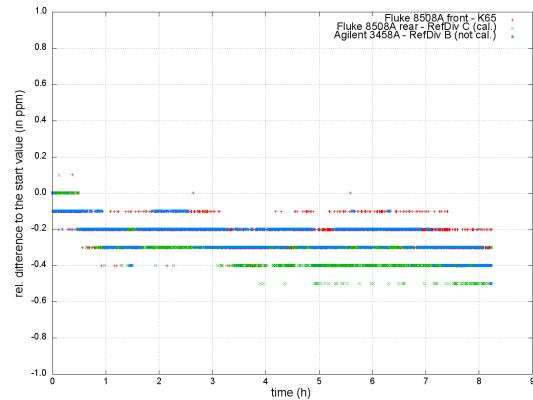


Abbildung 43: Vierte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 20

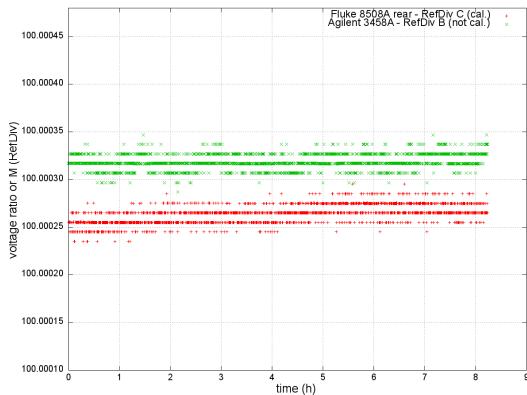


Abbildung 44: Vierte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 21

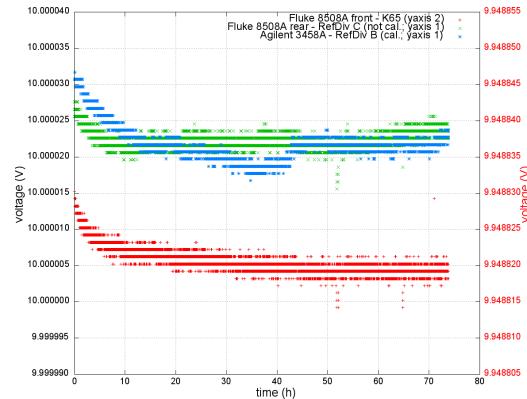


Abbildung 45: Fünfte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 19

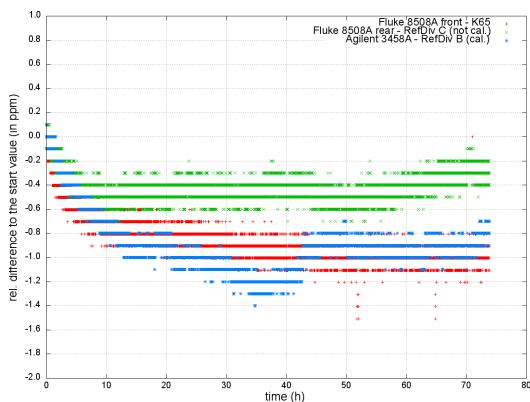


Abbildung 46: Fünfte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 20

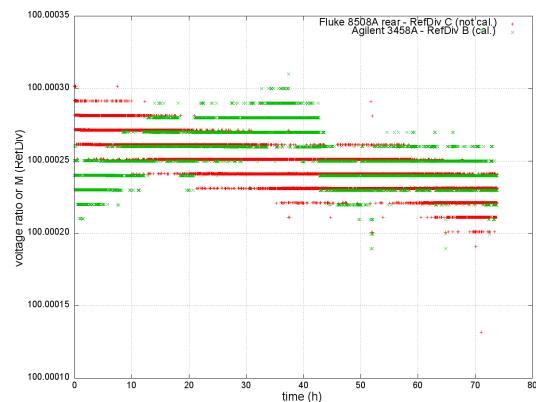


Abbildung 47: Fünfte Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 21

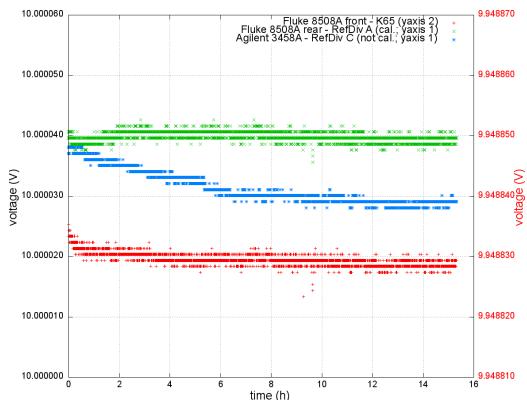


Abbildung 48: Sechste Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 19

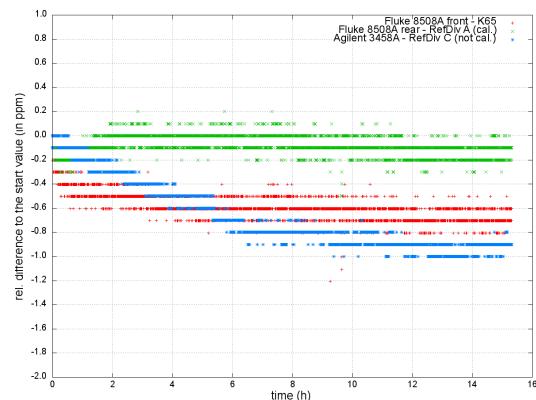


Abbildung 49: Sechste Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 20

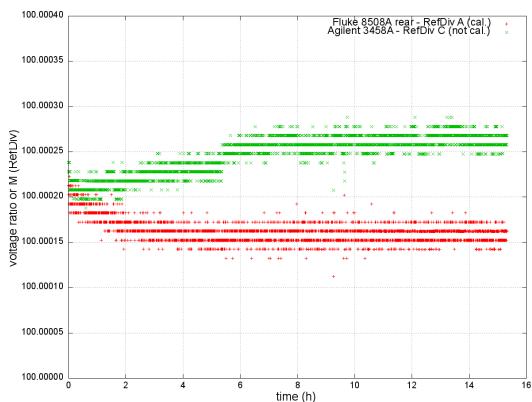


Abbildung 50: Sechste Stabilitätsmessung der Referenzteiler.
Beschreibung vgl. Abbildung 21

Tabelle 4: Übersicht über die einzelnen Einstellungen am Oszilloskop der Firma Tektronix MSO4054 (vgl. Kap. 4.3)

Label/Variable	Value
Waveform Type	Analog
Point Format	Y
Horizontal Units	s
Horizontal Scale	1
Horizontal Delay	0
Sample Interval	0.001
Record Length	10000 ms
Vertical Units	V
Vertical Offset	0
Vertical Scale	0.01
Vertical Position	0

LITERATURVERZEICHNIS

Literatur

- [Bau10] S. Bauer, Aufbau und Inbetriebnahme des zweiten Präzisions-Hochspannungsteilers bis 65kV für das KATRIN-Experiment, Diplomarbeit 2010
- [Bau13] S. Bauer, Energy calibration and stability monitoring of the KATRIN experiment, Dissertation 2013
- [Bun15] Bundesministerium für Bildung und Forschung,
http://www.weltmaschine.de/physik/standardmodell_der_teilchenphysik/#wrapper, abgerufen am 06.09.2015
- [Cry15] Übersicht CRYRING-Speicherring,
<https://www.gsi.de/start/aktuelles/detailseite/2013/03/26/erster-speicherring-fuer-fair.htm>, abgerufen am 08.09.2015
- [Eff01] Effektivwert Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Effektivwert>, abgerufen am 08.10.2015
- [Eff02] Effektivwert, <http://www.elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/effektivwert.php>, abgerufen am 08.10.2015
- [Ele15] Prinzip der Elektronenkühlung, <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektronenkuehlung/4100>, abgerufen am 08.09.2015
- [Fai15] FAIR Home, <http://www.fair-center.de/index.php?id=1&L=1>, abgerufen am 08.09.2015
- [Kal15] Kalibrierung, <http://www.atlascopco.com/toolsservicede/kalibrierung/faq-kalibrierung/definition-kalibrieren.aspx>, abgerufen am 07.09.2015
- [Kat01] KATRIN-Homepage, <https://www.katrin.kit.edu/>, abgerufen am 17.10.2015
- [Kat04] KATRIN Design-Report 2004,
<https://www.katrin.kit.edu/publikationen/DesignReport2004-12Jan2005.pdf>, abgerufen am 17.10.2015
- [Kat15] KATRIN-Experiment, https://www.katrin.kit.edu/img/spectrum_rdax_1200x678.jpg, abgerufen am 06.09.2015
- [Kit15] Aufbau des KATRIN-Experiments, <https://www.katrin.kit.edu/img/KATRIN-Aufbau.JPG>, abgerufen am 17.10.2015
- [Las15] Einblick in die Laserspektroskopie, <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/laserspektroskopie/8823>, abgerufen am 08.09.2015
- [Mac15] Prinzip eines MAC-E-Filters, <https://www.katrin.kit.edu/79.php>, abgerufen am 17.10.2015

- [Man01] Geräteübersicht Fluke 752A, http://us.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-standards/752a-reference-divider-0?quicktabs_product_details=2, abgerufen am 07.10.2015
- [Man02] Geräteübersicht Fluke 8508A, http://us.flukecal.com/products/electrical-calibration/bench-multimeters/8508a-85-digit-reference-multimeter-0?quicktabs_product_details=1, abgerufen am 07.10.2015
- [Man03] Data Sheet Agilent 3458A, <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-4971E.pdf>, abgerufen am 07.10.2015
- [Mar01] R. Marx, New concept of PTBs standard divider for direct voltages of up to 100 kV, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 50 (2001), S. 426-430
- [Mue15] A. Müller, Astro-Lexikon, http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/lexdt_n.html, abgerufen am 06.09.2015
- [New27] Sir I. Newton (1643-1727), http://www.gutzitiert.de/zitat_autor_sir_isaac_newton_thema_wissen_zitat_22347.html, Zitat über Wissen
- [Nob15] Nobelpreis Physik 2015, <http://www.welt.de/wissenschaft/article147259687/Nobelpreis-fuer-Physik-geht-an-zwei-Teilchenforscher.html>, abgerufen am 17.10.2015
- [Pau30] Wolfgang Pauli, „Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen“ (datiert 4. Dez. 1930), wiedergegeben in: R. Kronig and V. Weisskopf (Eds.), Wolfgang Pauli, Collected Scientific Papers, Vol. 2, Interscience, New York (1964) 1316-1317
- [Ptb15] KATRIN-Spannungsteiler, <http://www.ptb.de/cms/de/presseaktuelles/zeitschriften-magazine/ptb-news/ptb-news-ausgaben/ptb-news/news10-1/katrin-unter-spannung.html>, abgerufen am 07.09.2015
- [Ref15] Kalibrierschein von der PTB (Braunschweig und Berlin) der Fluke 732A Referenzquelle (Referenz D) vom 24.03.2015
- [Res14] O. Rest, Inbetriebnahme der Präzisionshochspannung am Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments, Masterarbeit 2014
- [Res15] Private Korrespondenz mit O. Rest (Oktober 2015)
- [Res18] O. Rest, Dissertation (voraussichtlich 2018)
- [Son44] Sonnenneutrinos, <https://astro.uni-bonn.de/~deboer/nobel/physik02.html>, abgerufen am 17.10.2015
- [Spa15] KATRIN-Spannungsteiler, http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_news/news_101/103.jpg, abgerufen am 07.09.2015
- [Spe15] Hauptspektrometer des KATRIN-Experiments, https://c1.staticflickr.com/1/107/315158631_b2b50b537a_z.jpg%3Fzz%3D1, abgerufen am 07.09.2015

- [Sta15] Standardmodell der Elementarteilchen,
[https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/
File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg), abgerufen am
08.09.2015
- [Thu07] T. Thuemmler, Präzisionsüberwachung und Kalibration der Hochspannung für das KATRIN-Experiment, Dissertation 2007
- [Tra15] Transportsektion (KATRIN-Experiment),
https://www.katrin.kit.edu/img/STS_rdax_758x131.jpg, abgerufen am 07.09.2015
- [Wik15] Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektronenk%C3%B6hlung>, abgerufen am 14.09.2015
- [Win15] V. Hennen, W. Nörtershäuser, O. Rest, Ch. Weinheimer, D. Winzen, Precision high voltage divider for the electron cooler at CRYRING, Technical Design Report, bereitgestellt von D. Winzen am 19.10.2015

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich all den Personen ganz herzlich danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr. Christian Weinheimer für die freundliche Aufnahme in die Arbeitsgruppe und die Bereitstellung dieser Bachelorarbeit bedanken. Es ermöglichte mir spannende und sehr lehrreiche Einblicke in die Welt eines Physikers an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Dann danke ich der gesamten AG Weinheimer für die freundliche Zusammenarbeit und zahlreichen Hilfen bei Fragen und Problemen. Insbesondere möchte ich mich bei Dr. Volker Hennen, Oliver Rest und Daniel Winzen bedanken, die meine ersten Ansprechpartner während meines Aufenthalts im Institut für Kernphysik waren und mir stets weiterhelfen konnten. Bei der täglichen Arbeit im Labor konnten mir Oliver Rest und Daniel Winzen viele wichtige Dinge beibringen, die für eine erfolgreiche Ausbildung zum Physiker essentiell sind (und sei es nur, mal selbst an Kabeln basteln zu können). Ferner gaben sie mir gute Tipps für die Auswertung der aufgenommenen Messdaten und halfen mir beim Erstellen von Programmen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir immer zur Seite steht und mich in jeglicher Hinsicht während des Studiums unterstützt. Sei es das Drucken von wichtigen Unterlagen, die Bereitstellung von Collegeblöcken und anderer Utensilien, das Abholen von der Bushaltestelle oder einfach die Tatsache, dass sie immer für einen da sind, wenn man sie braucht. Denn zu wissen, dass man geliebt wird, hilft einem, auch durch die harten Zeiten des Lebens zu kommen.