
UNTERSUCHUNG ZUR MINIMIERUNG
DER THERMISCHEN UNSICHERHEIT
FÜR EINEN GITTERBASierten
FREQUENZSTANDARD MIT ^{24}Mg

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Hochschulgrades

Bachelor of Science

am Institut der Quantenoptik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Daniel Holzwart
geboren am 19.01.1995 in Nienburg

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde eine Untersuchung zur Minimierung der thermischen Unsicherheit eines gitterbasierten Frequenzstandard mit ^{24}Mg gemacht. Dafür wurden Temperatursensoren gewählt, welche eine hohe Genauigkeit und niedrigen Drift aufgrund von Alterungsprozessen aufweisen, an die Vakuumkammer angebracht und von der Umgebung thermisch isoliert. Zum Auslesen des temperaturabhängigen Widerstandes wurde eine Platine entwickelt und charakterisiert. Die Unsicherheit der Temperatursensoren kombiniert mit der Platine ermöglichen eine Temperaturmessung mit einer Genauigkeit von (xx) K.

Ein in dieser Arbeit ebenfalls generiertes LabView Programm liest das Signal der Platine aus und berechnet aus diesem Signal den Widerstand der Temperatursensoren und des Weiteren die gemessene Temperatur. Anschließend wird die Temperatur, versehen mit einem Zeitstempel, gespeichert. Die wird in Zukunft dazu dienen, eine Echtzeit Temperaturmessung zur Verfügung zu stellen.

Anschließend wurde das Simulationsprogramm Autodesk CFD zur thermischen Modellierung der Kammer verwendet und auf dessen Eignung untersucht. Hierfür wurde die Wärmeentwicklung in der Kammer modelliert, um den Temperatur am Ort der Atome zu ermitteln. Zur Abschätzung der Genauigkeit der Simulation wurde der modellierte Temperaturverlauf der Kammer mit den gemessenen Temperaturen der Kammer verglichen.

Die Simulation der Temperatur am Ort der Atome ergibt eine Temperatur von $29,72^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$. Damit würde sich eine Frequenzverschiebung von $-2,34\text{ Hz}$ ergeben. Eine Abschätzung der Unsicherheit konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr erfolgen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der optischen Uhr	3
3	Die Schwarzkörper Verschiebung	6
4	Messvorbereitung	10
4.1	Platine	10
4.1.1	Kalibrierung der Platine	12
4.2	Temperatursensor	12
4.2.1	Heißleiter	12
4.2.2	Kaltleiter	13
5	Temperaturbestimmung	16
5.1	Temperaturmessung	17
6	Wärmeanalyse mit CFD	20
6.1	Materialzuweisung	21
6.2	Randbedingungen	21
6.3	Fehlerabschätzung der Simulation	22
7	Resultate	24
7.1	Ergebnisse der Simulation	24
7.2	Betrag der Wärmestrahlung der Simulation	26
7.3	Schwarzkörper-Verschiebung	26
8	Ausblick	28
A	Tabellen und Graphen	30

EINLEITUNG

Seit 1967 ist die Definition der Sekunde das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung. Allerdings haben auf Cäsium basierenden Uhren eine Unsicherheiten in der Größenordnung von 10^{-13} [1]. Seitdem gab es in diesem Gebiet immer neue Fortschritte, wodurch die Unsicherheit alle zehn Jahre um ungefähr eine Größenordnung verringert werden konnte. Insbesondere durch die Verwendung optischer Frequenzen, die im THz Bereich liegen, und dem fangen der Atome im optischen Gitter, konnte die erzielte Genauigkeit gesteigert werden. Damit haben optische Uhren bereits den 10^{-18} Bereich erreicht und so die Mikrowellen Uhren übertroffen [2].

Uhren spielen in unserem Leben eine wichtige, alltägliche Rolle. Für die meisten Anwendungen im Alltag reicht die Genauigkeit der Cäsiumuhr aus. In der Wissenschaft gibt es jedoch Anwendungen, für die diese Genauigkeit nicht Ausreicht oder zu langen Mittelungszeiten führen würde. Beim GNSS (*Globales Navigationssystem*) bestimmt die Genauigkeit der Uhr die Genauigkeit der Ortsauflösung. Die Satelliten in der Umlaufbahn vergleichen dabei ständig ihre aktuelle Position und Uhrzeit und schicken ein Signal an den Empfänger auf der Erde, der aus den Laufzeiten des Signal seine Position bestimmt. Wären die Atomuhren in den Satelliten nicht hochpräzise, würde das empfangene Signal asynchron ankommen und die Ortsmessung wäre ungenau. Mit dem momentan auf Satelliten verwendeten Mikrowellen Uhren ist auf der Erde eine Ortsauflösung im cm Bereich möglich und reicht für die Navigation auf der Erde aus. Möchte man dieses Signal jedoch für Weltraumnavigation verwenden, so führt die bisher erreichte Genauigkeit zu größeren Abweichungen.

In der Geologie kann mit hoch präzisen Uhren eine Art Gravitationskarte erstellt werden, indem ausgenutzt wird, dass Uhren je nach Höhenlage unterschiedlich schnell laufen, auch Gravitationsverschiebung genannt. Dadurch können Potentialunterschiede, hervorgerufen durch zum Beispiel Ölvorkommen, ausfindig gemacht

werden.

Die Genauigkeit einer Atomuhr wird durch Effekte limitiert, welche eine Frequenzverschiebung hervorrufen, die entweder nicht eliminiert werden können oder nicht ausreichend genug charakterisiert werden können. Ein Effekt ist zum Beispiel der Starkeffekt, der durch elektromagnetische Strahlung verursacht wird und die Übergangsfrequenz der Uhr beeinflussen kann. Bei extern hervorgerufenen Frequenzänderungen muss der Einfluss dieser bekannt sein, da eine ungenaue Bestimmung der Verschiebung zu einer Ungenauigkeit der Uhr führt. Ein Beispiel, das aus dem Stark Effekt hervorgeht, ist die Schwarzkörper Verschiebung (*engl. Black Body Radiation*, BBR). Hier führt die Wärmestrahlung zu einer Frequenzverschiebung. Durch die Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur gehört sie bei Raumtemperatur zu einer limitierenden Unsicherheit in optischen Uhren [3]. Je genauer aber die Energieverschiebung bestimmt werden kann, desto kleiner ist die Unsicherheit der Frequenzverschiebung aufgrund der Schwarzkörperstrahlung. In dieser Arbeit wird eine Untersuchung zur Minimierung der Frequenzverschiebung durch den BBR des Frequenzstandards basierend auf Magnesiumatomen gemacht.

Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Platine zur Messung der Temperatur mit Temperatursensoren entwickelt. Mithilfe der Sensoren wird die Temperatur der Vakuumkammer der optischen Uhr an verschiedenen Stellen gemessen. Die gemessene Temperatur wird dann in das Simulationsprogramm Autodesk Simulation CFD implementiert, um damit die Temperatur im Inneren der Vakuumkammer zu bestimmen und mit einem theoretisch simulierten Modell zu vergleichen. Die Kammer selbst wurde hierbei in Autodesk Inventor modelliert. Bei einer Bestimmung der Temperatur und einer Abschätzung der Temperaturunsicherheit ist eine Berechnung der Frequenzverschiebung und deren Unsicherheit möglich.

In Kapitel Zwei werden einige Grundlagen zum Aufbau und der Funktionsweise optischer Uhren dargelegt.

Kapitel Drei erklärt den theoretischen Sachverhalt der Schwarzkörper Verschiebung.

In Kapitel Vier und Fünf wird der Vorgang der Temperaturmessung an der Vakuumkammer vom Aufbau der Platine bis zu dem Anbringen der Temperatursensoren erklärt und die gemessenen Temperaturen an verschiedenen Stellen der Vakuumkammer tabelliert.

In Kapitel Sechs wird ein Modell der Vakuumkammer in ein Simulationsprogramm implementiert und anschließend wird in Kapitel Sieben über die Simulation auf die Temperatur im Inneren der Vakuumkammer geschlossen.

GRUNDLAGEN DER OPTISCHEN UHR

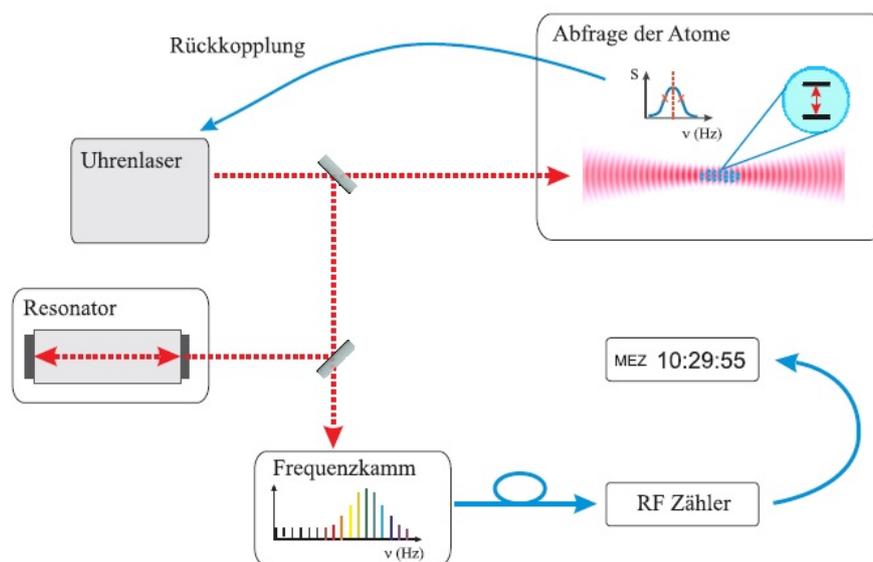


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau einer optischen Uhr, bestehend aus dem Uhrenlaser, Absorbermedium, Regelungselektronik und dem Frequenzkamm [4].

Das Herz der optischen Uhr ist der durchstimmbare Uhrenlaser, denn er entspricht im klassischen Sinne dem Pendel der Uhr. Im Gegensatz zum Beispiel der ^{133}Cs Uhr hat dieser Laser nicht Übergänge im Mikrowellenbereich, sondern im optischen Bereich. Die höheren Frequenzen ermöglichen eine feinere Zeitunterteilung und damit eine bessere Genauigkeit der Uhr.

Weiterhin gehört zum Aufbau ein Absorbermedium, das in optischen Uhren optisch oder elektronisch gefangenen Atomen entspricht, dargestellt durch die blauen

Punkte in Abbildung 2.1. Das Absorbermedium besteht des öfteren aus Erdalkali-Metallen wie Magnesium oder Strontium, weil die zwei Außenelektronen dieser Elemente ein Singulett und Triplett System bilden. Da Interkombinationsübergänge von den Auswahlregeln her verboten sind, ist der Übergang zwischen den Systemen nur mit geringer Wahrscheinlichkeit möglich, was wiederum zu einer schmalen Linienbreite führt. Strahlt man nun den Laser auf das Absorbermedium ein, so versucht man die Laserfrequenz möglichst auf die Resonanzfrequenz des Uhrenübergangs zu stimmen. Dieser Vorgang geschieht durch eine Regelungselektronik, die aus dem Absorptionssignal ein Fehlersignal bildet und dadurch ermittelt, wie genau der Laser auf der Resonanzfrequenz des Mediums ist. Diese Information wird dann an den Laser zurückgeschickt um ihn auf Resonanz zu halten. Mithilfe eines Frequenzkamms, dem 'Uhrwerk' der Uhr, werden die optischen Frequenzen in elektronisch Zählbare Frequenzen übertragen.

Um mit dem atomaren Ensemble zu spektroskopieren, werden die Atome zuerst durch Laser gekühlt, um sie dann in einer MOT zu fangen. Ein hierbei auftretendes Problem ist jedoch, dass das Magnetfeld der MOT zur Zeemanverschiebung der atomaren Niveaus führt. Deshalb muss zum Zeitpunkt der Spektroskopie die MOT ausgeschaltet werden. Dadurch dehnt sich aber wiederum die Atomwolke aus und wird durch die Gravitation nach unten gezogen. Dies führt zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Atome und einen daraus resultierenden Dopplereffekt. Eine Möglichkeit das Problem zu umgehen, ist das sogenannte optische Gitter, erstmals eingeführt durch Hidetoshi Katori und Masao Takamoto in [5].

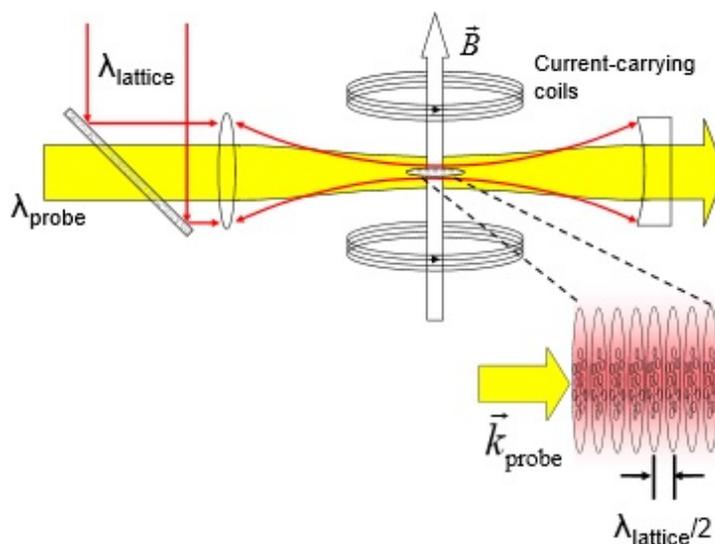


Abbildung 2.2: Prinzip des optischen Gitters. Der Laser erzeugt durch konstruktive Interferenz ein Stehfeld. Dadurch entstehen Potentialmini- und Maxima, in denen die Atome bei ausreichender Potentialtiefe im Lamb-Dicke Bereich gefangen werden können [6].

Hierbei erzeugt der Laser durch konstruktive Interferenz ein Stehfeld, durch das sich Potentialmini- und Maxima bilden. Die wirkende Dipolkräfte fangen die Atome in den Potentialmini- oder Maxima

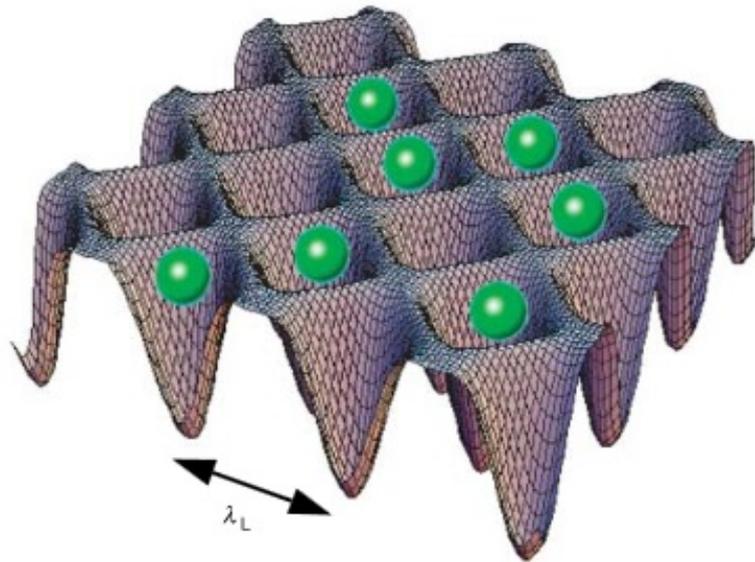


Abbildung 2.3: Darstellung des Potential eines optischen 2D Gitters und in den Potentialminimas gefangenen Atomen. λ_L ist die optische Wellenlänge des Lasers [7].

Dadurch ist zwar die Zeemanverschiebung eliminiert, jedoch führt das elektrische Feld des Lasers zu einem Stark-Effekt. Allerdings gibt es eine 'Magische Wellenlänge', bei der sich die durch den Stark-Effekt verursachte Frequenzverschiebung der beiden 1S_0 und 3P_0 Zustände des Uhrenübergangs um den gleichen Betrag ändern und somit dieser Effekt kontrolliert werden kann.

DIE SCHWARZKÖRPER VERSCHIEBUNG

Jeder Körper emittiert und absorbiert thermische Strahlung in Form von elektromagnetische Wellen. Die Energiedichteverteilung eines schwarzen Körpers ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz

$$\rho_\nu(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} d\nu \quad (3.1)$$

gegeben. Ein schwarzer Körper absorbiert alle aufkommende Strahlung vollständig und emittiert nur Wärmestrahlung. Er ist eine ideale thermische Strahlungsquelle mit einem Emissionsgrad von $\epsilon = 1$. Der schwarze Körper kann durch einen sogenannten Hohlraumstrahler realisiert werden, indem man ihn sich als einen Hohlraum mit einer, gegenüber dem Volumen, kleinen Öffnung vorstellt. Tritt nun Strahlung in den Hohlraum ein, kann sie aufgrund der kleinen Öffnung den Hohlraum nicht verlassen und wird so lange im Inneren reflektiert, bis sie vollständig absorbiert wurde. Im Hohlraum stellt sich dabei ein Strahlungsgleichgewicht ein. Die emittierte Strahlung hängt dabei nur von der Temperatur des Hohlraumstrahlers ab. Bei Raumtemperatur liegt das Maximum der Energiedichteverteilung im Infraroten Bereich und verschiebt sich nach dem Wienschem Verschiebungsgesetz bei höheren Temperatur zu niedrigeren Wellenlängen.

Eine limitierende Verschiebung bei optischen Atomuhren ist die Schwarzkörper Verschiebung. Atome, die spektroskopiert werden, befinden sich innerhalb einer Vakuumkammer und sind derer abgestrahlten Schwarzkörperstrahlung ausgesetzt. Um die Schwarzkörperverschiebung charakterisieren zu können, müssen zwei Größen bekannt sein. Zum einen die Temperatur und die daraus resultierende Schwarz-

körperstrahlung am Ort der Atome und auch die atomare Antwort auf diese Strahlung muss hinreichend bekannt sein. Dieses Kapitel behandelt die Temperaturstrahlung, die sich innerhalb eines Körpers einer bestimmten Temperatur ausbreitet und letztendlich auf die zu spektroskopierenden Atome auswirkt.

Die quadratisch gemittelte elektrische Feldstärke eines schwarzen Strahlers ergibt sich durch die Integration des Planckschen Strahlungsgesetz über den gesamten Raum zu [4, 8]:

$$\langle \mathcal{E}^2 \rangle = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_0^\infty \rho_\nu(\nu) d\nu = \frac{8\pi^5 k_B^4}{15c^3 \varepsilon_0 h^3} T^4 = c_1 T^4 \quad (3.2)$$

mit $c_1 = 8,545 \cdot 10^{-5} \frac{\text{V}^2}{\text{m}^2 \text{K}^4}$. Die Energieänderung eines Zustandes $|i\rangle$ durch die Frequenzverschiebung der BBR ergibt sich durch einen statischen und einen dynamischen Anteil gemäß

$$\delta E_i = \delta E_i^{stat} + \delta E_i^{dyn}. \quad (3.3)$$

Der statische Anteil entspricht dem ersten Term der Energieverschiebung eines Zustandes, der durch den Stark-Effekt um $\delta E_i = -\frac{1}{2}\alpha_i \langle \mathcal{E}^2 \rangle - \frac{1}{24}\gamma_i \langle \mathcal{E}^4 \rangle - (\mathcal{O}^6)$ verschoben wird. Damit ergibt sich mit (3.3) für den statischen Anteil der BBR Verschiebung

$$\delta E_i^{stat} = -\frac{1}{2}\alpha_i \langle \mathcal{E}^2 \rangle = -\frac{\alpha_i}{2} c_1 T^4 \quad (3.4)$$

wobei α_i die Polarisierbarkeit ist.

Der dynamische Anteil ergibt sich zu

$$\delta E_i^{dyn} = \frac{1}{2\varepsilon_0 \pi^2 c^3} \left(\frac{k_B T}{\hbar} \right)^3 \sum_k d_{ik}^2 G\left(\frac{\hbar \omega_{ik}}{k_B T} \right). \quad (3.5)$$

Hierbei ist $G(y) = \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} \left(\frac{2y}{y^2 - x^2} - \frac{2}{y} \right) dx \approx \frac{16\pi^6}{63} y^{-3} + \frac{16\pi^8}{15} y^{-5} \dots$ für $y \gg 1$, $x = \frac{\hbar \omega}{k_B T}$, $y = \frac{\hbar \omega_{ik}}{k_B T}$, d_{ik}^2 das Übergangsdipolmoment und ω_{ik} die Übergangsfrequenz. Damit lässt sich die durch den BBR verursachte Frequenzverschiebung $\Delta \nu_{BBR}$ angeben, wobei e und g jeweils für den angeregten sowie Grundzustand des Uhrenübergangs stehen. Ebenso wie für die Energieänderung, lässt sich die Frequenzverschiebung $\Delta \nu_{BBR}$ als Superposition eines statischen und dynamischen Anteils darstellen. Mit $\Delta \alpha_{stat} = \alpha_e - \alpha_g$ ergibt sich für den statischen und dynamischen Anteil der Frequenzverschiebung

$$\Delta\nu_{stat} = -\frac{\Delta\alpha_{stat}}{2h}c_1 T^4 \quad \text{bzw.} \quad (3.6a)$$

$$\Delta\nu_{dyn} = \frac{\delta E_e^{dyn} - \delta E_g^{dyn}}{h}. \quad (3.6b)$$

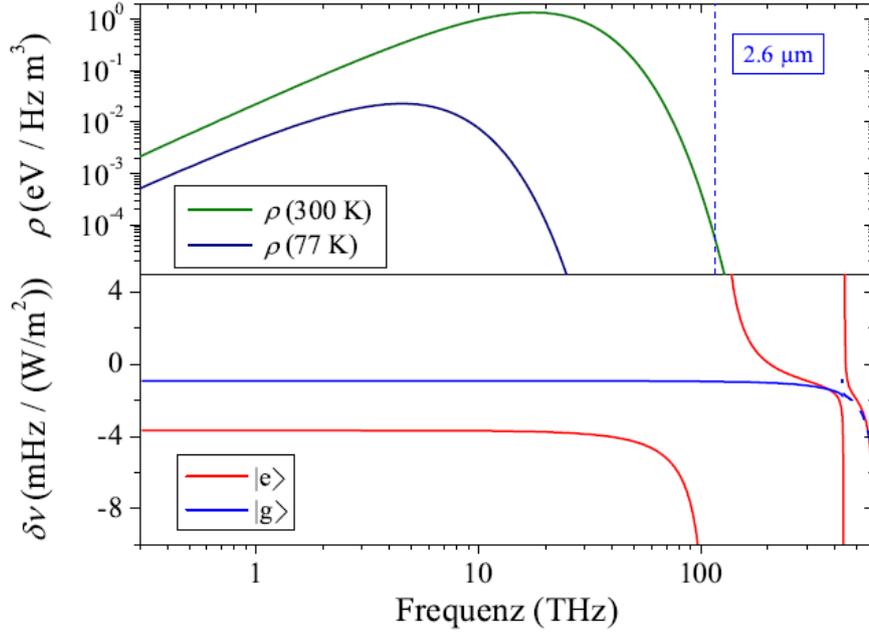


Abbildung 3.1: Oben ist die spektrale Energiedichte der Schwarzkörperstrahlung bei 77 K und 300 K zu sehen. Unten ist die Frequenzverschiebung durch den BBR für den 1S_0 Grundzustand und den 3P_0 angeregten Zustand dargestellt. [4].

Ein Vorteil von Magnesium ist, dass es keine Übergänge im infraroten Bereich hat, die an den Uhrenübergang koppeln können. In diesem Bereich ist, wie bereits erwähnt, die Intensitätsverteilung der Schwarzkörperstrahlung am größten und somit auch der BBR für Übergänge im Mikrowellenbereich am stärksten. Deswegen beobachtet man in Magnesium eine kleinere BBR-Verschiebung als in anderen Elementen, nochmal zu sehen in Tabelle 3.1.

Atom	$\delta\nu_{\text{BBR}}$ (Hz)	ν_0 (Hz)	$\delta\nu_{\text{BBR}}/\nu_0$	Uncertainty
Mg	-0.258(7)	6.55×10^{14}	-3.9×10^{-16}	1×10^{-17}
Ca	-1.171(17)	4.54×10^{14}	-2.6×10^{-15}	4×10^{-17}
Sr	-2.354(32)	4.29×10^{14}	-5.5×10^{-15}	7×10^{-17}
Yb	-1.34(13)	5.18×10^{14}	-2.6×10^{-15}	3×10^{-16}

Tabelle 3.1: Durch die BBR verursachte Frequenzverschiebung des Uhrenübergangs vom $^1\text{S}_0$ zum $^3\text{P}_0$ Niveau verschiedener Elemente bei 300 K und die dazugehörigen Unsicherheiten [8].

Die Verschiebung aufgrund von BBR entsteht damit aus der Energieänderung durch die Wärmestrahlung und eine daraus resultierende statische und dynamische Frequenzverschiebung. Wenn man nun die Umgebungstemperatur der Magnesium-Atome in der Vakuumkammer bestimmt, so kann mithilfe der Polarisierbarkeiten und den Dipolmatrixelementen die Frequenzverschiebung des Uhrenübergangs bestimmt werden.

MESSVORBEREITUNG

4.1 Platine

Im Zuge diese Arbeit wurde eine Platine entworfen, mit der über acht Temperatursensoren die Temperaturverteilung der Vakuumkammer bestimmt werden soll. Der Schaltplan wurde mit dem Programm 'gschem' des gEDA-Projekts erstellt und das Layout mit PCB (siehe Anhang). Es ist noch anzumerken, dass einige Widerstände in der Brückenschaltung im Nachhinein angepasst wurden, um sich dem Widerstandsbereich eines PT100 zur jeweiligen Temperatur anzupassen (näheres in Kapitel 4.2).

Das Grundprinzip der Schaltung beruht auf der Widerstandsänderung in Abhängigkeit der Temperatur. Die Eingänge der Platine bestehen aus zwei geschirmten Lan-Kabel Steckverbindungen¹, an die jeweils vier Temperatursensoren angeschlossen werden. Mithilfe der Sensoren werden über zwei Spannungsteiler die Spannungen an einem Instrumentenverstärker verglichen und anschließend verstärkt. Der erste Spannungsteiler besteht aus dem Temperatursensor und einem 10 kΩ Referenzwiderstand, dessen Besonderheit seine sehr hohe Stabilität ist. Der zweite wird aus einem 10 kΩ Widerstand und einer Brückenschaltung, mit der es möglich ist, den Widerstand auf $100\ \Omega + 20\ \Omega + 10\ \Omega + 4,7\ \Omega + 4,7\ \Omega$ einzustellen, gebildet. Der Zusammenhang zwischen der Spannung und den Widerständen in der Spannungsbrücke setzt sich wie folgt zusammen [9]

$$U_1 = \frac{U_{ref}}{R_S + 10\ \text{k}\Omega} R_S, \quad (4.1a)$$

$$U_2 = \frac{U_{ref}}{R_B + 10\ \text{k}\Omega} R_B. \quad (4.1b)$$

¹RJ45 Ninigi

Hier ist R_B der Brückenwiderstand, den man mit dem Dipswitch einstellt und V_{ref} die Referenzspannung mit 5 V. Der Instrumentenverstärker verstärkt das verglichene Signal um den Faktor² $1 + \frac{4,9\text{k}\Omega}{R_G}$ mit dem Verstärkungswiderstand $R_G = 10\text{k}\Omega$. Anschließend wird das Signal über einen invertierenden Operationsverstärker um den Faktor zehn verstärkt. Der Grund für die Verwendung eines Instrumentenverstärkers ist, dass diese Verstärkung sehr stabil ist und weniger driftet als der gewöhnliche Operationsverstärker. Das Ausgangssignal wird anschließend über zwei 8-Pin Steckerleisten an die Eingänge einer LabView Karte³ angeschlossen.

Im Programmiersystem LabView wurde ein Programm entworfen (siehe Anhang), um mit der Karte, die über eine USB Verbindung an den PC angeschlossen wird, zu interagieren und mithilfe einer Rückrechnung auf den Widerstand des Temperatursensors zu schließen (siehe Abschnitt 3.2). Über den Widerstand lässt sich dann auf die Temperatur schließen.

Die Rückrechnung ergab sich über folgende Beziehungen. Die verglichene Spannung wird insgesamt um den Faktor $((1 + \frac{4,9\text{k}\Omega}{R_G}) \cdot 10)$ verstärkt, was für die Ausgangsspannung

$$U_{Out} = ((1 + \frac{4,9\text{k}\Omega}{R_G}) \cdot 10) (U_1 - U_2), \quad (4.2)$$

beziehungsweise

$$\frac{U_{Out}}{(1 + \frac{4,9\text{k}\Omega}{R_G}) \cdot 10} + U_2 = U_1 = \frac{U_{ref}}{R_S + 10\text{k}\Omega} R_S \quad (4.3)$$

bedeutet. Da die Spannung gemessen wird, ist die linke Seite der ersten Gleichung vollständig bestimmt. Definieren wir diese als u , so ergibt sich nach einiger Umrechnung für den Widerstand des Temperatursensors R_S

$$R_S = \frac{10\text{k}\Omega \cdot u}{u - U_{ref}}. \quad (4.4)$$

Nachdem aus dem Widerstand die Temperatur ermittelt wurde, wird sie in LabView angezeigt und in eine Textdatei, mit dem aktuellen Datum und der Uhrzeit, geschrieben. Damit kann die Temperatur der Vakuumkammer an verschiedenen Stellen in Echtzeit gemessen und gespeichert werden.

²<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1167fc.pdf>

³RedLab 1608FS von Meilhaus Electronic

4.1.1 Kalibrierung der Platine

Um die Unsicherheit der Leiterplatte zu charakterisieren, wurde für jeden der acht Temperatursensoren die Ausgangsspannung gemessen. Die Überprüfung ergab folgende Spannungswerte pro Schaltung

Schaltung	Spannung			Abweichung	Mittelwert	Offset
1	-41	-39	-44	± 5	-41,33	-41,33
2	-53	-52	-56	± 4	-53,67	-53,67
3	-49	-47	-53	± 6	-49,67	-49,67
4	-56	-54	-58	± 4	-56	-56
5	-39	-37	-40	± 3	-38,67	-38,67
6	-41	-39	-41	± 2	-40,33	-40,33
7	-45	-43	-47	± 4	-45	-45
8	-60	-60	-62	± 2	-60,67	-60,67

Tabelle 4.1: Spannungsmessung der Schaltung in mV mit Referenzwiderstand 100 Ω .

Zur Überprüfung der Spannungen wurde jede Schaltung drei mal gemessen, der Mittelwert gebildet und anschließend der Offset berechnet. Anstelle von R_{Sensor} wurde ein 100 Ω , 110 Ω und ein 120 Ω Referenzwiderstand genommen. Bei Tabelle 4.1 handelt es sich um die Spannungsmessung mit dem 100 Ω Referenzwiderstand. Die Messwerte zu den anderen Widerständen befinden sich im Anhang. Es hat sich bei allen Messungen ein Offset zum theoretisch erwarteten Wert ergeben. Dieser resultiert zum Beispiel aus Asymmetrien in der Schaltung, sodass die Operationsverstärker unterschiedliche Ströme abgreifen, aber auch durch verschieden ausgelegte Bauelemente in der Platine. Mithilfe dieser Messungen und den damit erstellten Graphen (siehe Anhang), ist es nun möglich, den Offset für jede Schaltung bei beliebiger Temperatur, und damit beliebigem Widerstand, zu ermitteln.

4.2 Temperatursensor

Ein wichtiger Aspekt ist die Wahl der Temperatursensoren. Es wird zwischen den zwei Arten Heiß -und Kaltleiter unterschieden, die beide verschieden Vor -und Nachteile aufweisen.

4.2.1 Heißleiter

Heißleiter sind Halbleiter, die die Eigenschaften besitzen, bei höheren Temperaturen den Strom besser zu leiten. Der Grund dafür ist, dass sich an dem PN-Übergang bei höheren Temperaturen der Widerstand des Halbleiters verringert.

Somit besitzen sie einen negativen Temperaturkoeffizienten (*NTC*) [10]. Vorteil des NTC ist, dass sie eine hohe Genauigkeit im mK Bereich haben. Jedoch beruht ein wesentlicher Nachteil der NTC auf einer chemisch bedingten Alterung, die zu einer Änderung des Widerstandes führt. Dies äußert sich in einem Drift, die eine Temperaturmessung, welche in einen langen Zeitraum wiederholt wird, negativ beeinflusst.

4.2.2 Kaltleiter

Kaltleiter besitzen genau die umgekehrte Eigenschaft wie Heißleiter, sie leiten den Strom bei höheren Temperaturen besser und haben deshalb einen positiven Temperaturkoeffizienten (*PTC*). Diese Temperatursensoren haben zwar eine geringere Genauigkeit als Heißleiter, jedoch sind die Vorteile der Kaltleiter, dass sie einen wesentlich geringeren Drift als Heißleiter haben und der Temperatur-Widerstand Zusammenhang linear ist [11]. Vor allem aufgrund des geringen Driftes durch Alterung und die dadurch ermöglichte stabile Temperaturmessung über längere Zeiträume wurde in dieser Arbeit der Kaltleiter PT100 verwendet.⁴

Der Name des PT100 steht für das verwendete Material Platin und rührt von der Eigenschaft her, bei einer Temperatur von 0 °C einen Widerstandswert von 100 Ω zu haben. Im Temperaturbereich von 0 °C bis 850 °C definiert sich sein Widerstandswert durch [12]

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (4.5)$$

mit den Koeffizienten

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1} \quad \text{und} \quad (4.6a)$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}. \quad (4.6b)$$

R_0 ist der Nennwiderstand des PT100 bei 0 °C. Formt man Gleichung (3.5) nach der Temperatur um, so ergibt sich

$$T = \frac{-AR_0 + \sqrt{(AR_0)^2 - 4BR_0(R_0 - R)}}{2BR_0}. \quad (4.7)$$

⁴PT106051 von www.tme.eu

Da einige Widerstände in der Platine für den Widerstandsbereich des Platinwiderstands zu hoch waren, musste sie durch niedrigere Widerstände ausgetauscht werden. Das betrifft vor allem die Widerstände in der Brückenschaltung. Der Referenzwiderstand R2 und R1 wurden jedoch bei 10 k Ω belassen, wodurch sich zwar kleinere Spannungen ergeben, aber dafür die Eigenerwärmung des Platinwiderstands möglichst gering gehalten wird.

Widerstandsmessung der Temperatursensoren

Um die Kalibrierung der Temperatursensoren zu messen, wurde ein Dewargefäß mit Wasser befüllt. Das Dewargefäß sorgt für eine konstante Temperatur über einen längeren Zeitraum als andere Gefäße, was eine präzisere Widerstandsmessung ermöglicht. Nachdem sich eine Wassertemperatur von 25 °C eingestellt hat, wurde der Widerstand der PTs gemessen. Für die Messung der Wassertemperatur wurde ein Temperatur-Messgerät⁵ mit einer Grund-Genauigkeit von 0,1 °C verwendet. Die Messung ergab folgende Werte

Temperatursensor	Widerstand in Ω
1	110.7
2	110.9
3	111.0
4	110.7
5	110.8
6	110.8
7	110.8
8	110.8
9	110.8
10	110.8

Tabelle 4.2: Widerstandsmessung der Temperatursensoren

Der theoretisch ermittelte Wert nach 4.7 liegt bei $R(T) = 109,74$. Von zehn vorhandenen Platinwiderständen wurden Nummer 2 und 3 nicht für die Messung ausgewählt, da für die Messung nur Acht Sensoren benötigt wurden und diese im Vergleich zu allen anderen eine andere Widerstandsabweichung haben.

Ungenauigkeit der PTs

Die Ungenauigkeit von Temperaturfühlern werden in Klassen angegeben. Die verwendeten Platinwiderstände befindet sich in der Klasse B und besitzen somit eine Temperaturungenauigkeit von [13]

⁵Temperatur-Messgerät Greisinger GTH 175/PT

$$dT = \pm (0,30^\circ\text{C} + 0,005 T). \quad (4.8)$$

Da sich die Temperaturmessung der Vakuumkammer vermutlich auf den Temperaturbereich von 20°C bis 50°C beläuft, würde das einer Temperaturgenauigkeit von $0,4^\circ\text{C}$ bis $0,55^\circ\text{C}$ entsprechen. Da dies im Subkelvin Bereich liegt, eignen sich die Platinwiderstände für die Temperaturmessung.

TEMPERATURBESTIMMUNG

Zur Temperaturbestimmung verschiedener Stellen der Vakuumkammer wurden die Sensoren an die Kammer angebracht. Hierbei wurde an die Messfläche der PTs Wärmeleitpaste angebracht und diese mithilfe eines 2-Komponenten Klebers¹ an die Kammer geklebt. Um die Sensoren von der Umgebungstemperatur abzusichern, wurden sie von außen mit Schaumstoff isoliert. Die Wahl des Materials Schaumstoff ist mit seiner geringen Wärmeleitfähigkeit zu begründen [14]. Die Platinwiderstände wurden an folgende Stellen angebracht (siehe dazu auch Abbildung 5.1):

- i. Ofen
- ii. Oberen Spule
- iii. Untere Spule
- iv. Vakuumpumpe
- v. Zwischen den optischen Zugängen
- vi. Zwischen den optischen Zugängen
- vii. Geringe Entfernung vom Ofen

Aufgrund der Symmetrie der Kammer wurden die Temperatursensoren nur an einer Seite angebracht und es wurde für die Simulation angenommen, dass die Sensoren auf der gegenüberliegenden Seite die gleiche Temperatur messen.

¹UHU plus sofortfest 2-K-Epoxidharzkleber

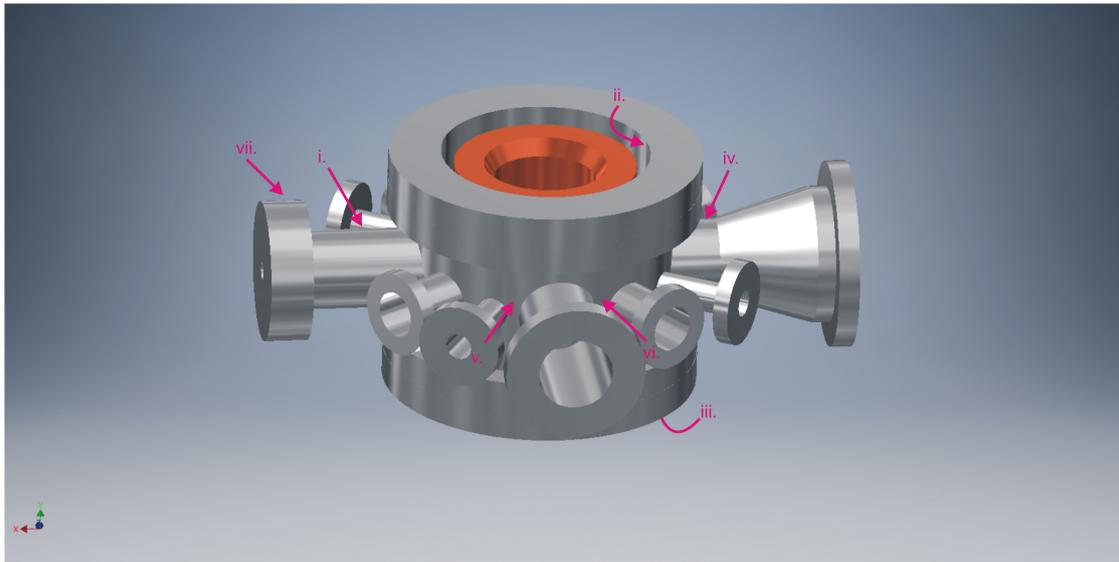


Abbildung 5.1: Positionierung der Temperatursensoren an der Vakuumkammer. Mit diesem Modell wurde auch die Simulation durchgeführt. Referenz: Dominika, private Kommunikation.

Es wurden von den acht PTs jedoch nur sieben an die Kammer angebracht. Ein Kanal der Schaltung konnte aufgrund fehlerhafter Werte nicht verwendet werden. Dies ist vermutlich auf elektronische Probleme zurückzuführen.

5.1 Temperaturmessung

Der Ofen und die Spulen wurden für einige Stunden in Betrieb genommen und die gemessene Temperatur gegenüber der Zeit aufgetragen, zu sehen in Abbildung 5.1.

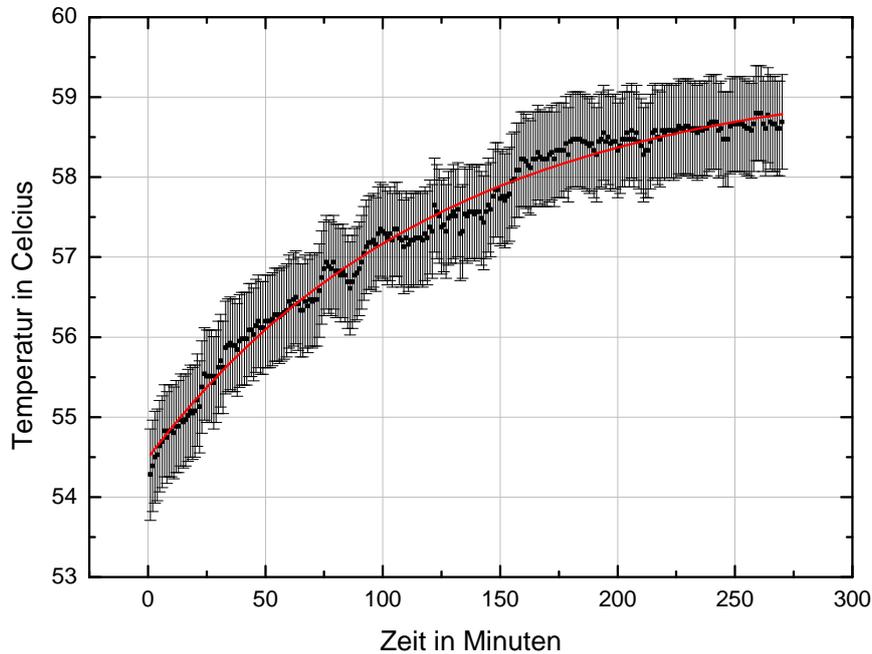


Abbildung 5.2: Messung der Temperatur am Ofen über ungefähr vier Stunden. Die Fehlerbalken ergeben sich aus Kapitel 4.2.2. Die anderen sieben Graphen befinden sich im Anhang.

Die Messwerte wurden anschließend graphisch ausgewertet und die Endtemperatur ergab sich über die Fitfunktion für die Zeit $t \rightarrow \infty$, zu sehen in Tabelle 5.1.

i.	ii.	iii.	iv.	v.	vi.	vii.
59,34	34,04	33,18	37,31	34,85	31,03	48,19

Tabelle 5.1: Temperaturmessung der Platinwiderstände in Grad Celcius.

Mithilfe der theoretischen Grundlagen aus Kapitel Vier wurden einige Größen aus den Temperaturen von Tabelle 5.1 berechnet, um so auf den Offset zu schließen. Die Werte sind in Tabelle 5.2 zu finden.

	Offset in mV	Offset in Celcius
i.	84,1	7,4
ii.	60,59	5,33
iii.	81,32	7,16
iv.	62,01	5,46
v.	73,49	6,47
vi.	72,2	6,35
vii.	64,39	5,66

Tabelle 5.2: Errechnerer Temperatur -und Spannungsoffset der Messung.

Damit ergaben sich abzüglich des Offsets folgende Temperaturen an der Vakuumkammer:

	Temperatur in Celcius	Unsicherheit in Celcius
i.	51,94	$\pm 0,59$
ii.	28,71	$\pm 0,47$
iii.	26,02	$\pm 0,47$
iv.	31,85	$\pm 0,48$
v.	28,38	$\pm 0,47$
vi.	24,68	$\pm 0,46$
vii.	42,53	$\pm 0,54$

Tabelle 5.3: Temperatur verschiedener Orte an der Vakuumkammer.

Man sieht deutlich die, im Vergleich zu den anderen Messpunkten, hohe Temperatur des Ofens und auch in der Nähe des Ofen. Auch der Temperatursensor v. scheint noch die Wärme vom Ofen zu spüren. Die beiden Sensoren ii. und iii., welche auf Höhe der Spulen angebracht sind, zeigen nur einen geringen Anstieg der Temperatur. Somit ist der Einfluss der Spulen auf die Vakuumkammer selbst gering. Unerklärlich ist jedoch die gemessene Temperatur am Sensor iv., da es in seiner Nähe keine Wärmequellen gibt, die die Temperatur so hoch treiben könnte. Hier müssen jedoch weitere Untersuchungen gemacht werden, um den Einfluss der Spulen auf die optischen Zugänge zu charakterisieren.

WÄRMEANALYSE MIT CFD

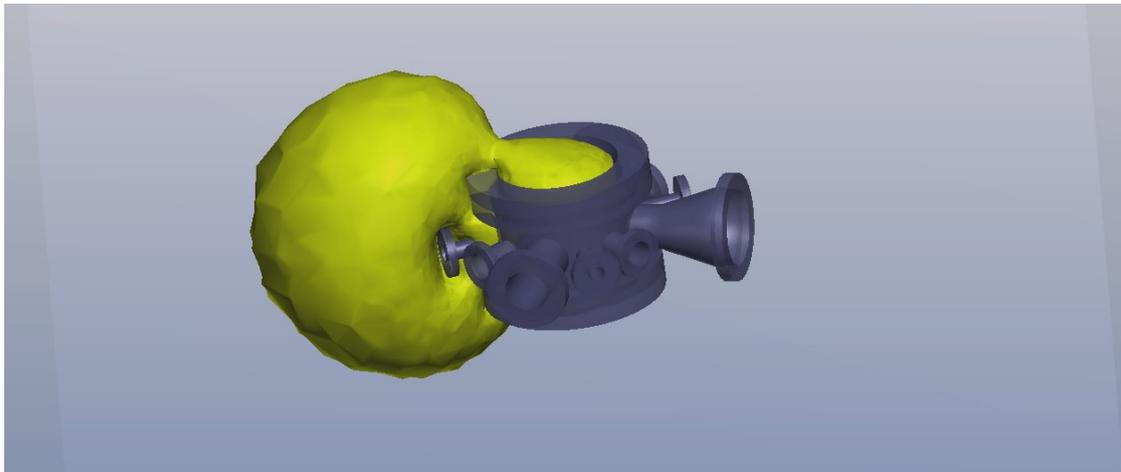


Abbildung 6.1: Isofläche um die Vakuumpumpe. Die 'Wolke' zeigt an, wo im Raum eine entsprechende Temperatur herrscht. Hier: $45,83^{\circ}\text{C}$.

Zur Bestimmung der Temperatur am Ort Atome, wurde sich das Simulationsprogramm Autodesk CFD (*engl. computational fluid dynamics*) zur Hilfe genommen, denn unter allen in Betracht gezogenen Simulationsprogrammen bietet CFD als einziges die Möglichkeit, Wärmeleitung sowie Wärmestrahlung zu simulieren. Insbesondere die Wärmestrahlung ist aufgrund des Vakuums im Inneren der Kammer für die Simulation von großer Bedeutung.

Die Strömungsanalyse beruht auf den Navier-Stokes Gleichungen, welche die Bewegung viskoser und wärmeleitender Flüssigkeit beschreiben [15]. Je nach Problematik der Analyse vereinfachen sich die Gleichungen. Zudem gibt es eine Vielzahl dimensionsloser Größen, die das Problem kennzeichnen, wie zum Beispiel

die Mach-Zahl, die Reynolds-Zahl oder die Prandtl-Zahl. Dies sind dimensionslose Kennzahlen, die in der Strömungslehre den Zusammenhang verschiedener Größen darstellen. Beispielsweise gibt die Prandtl-Zahl das Verhältnis von Viskosität zu der Temperaturleitfähigkeit eines Stoffes an [16].

Die Vakuumkammer der optischen Uhr wurde mit dem Modellierungsprogramm Autodesk Inventor entworfen, welches dann in CFD implementiert werden kann. Bevor mit der Strömungsanalyse begonnen werden kann, müssen dem Modell Materialien und Randbedingungen zugewiesen werden.

6.1 Materialzuweisung

Der Ofen besteht aus Stahl, die Spulen aus Kupfer und die Blende hinter dem Ofen aus Kapton. Der restliche Teil der Kammer besteht aus dem Edelstahl 304. Viele Materialien sind schon in der Bibliothek von CFD enthalten, sodass nur noch der Stoff Kapton und das Vakuum definiert werden mussten. Leider ist es in CFD nicht möglich, sehr gute Vakua zu definieren, da ab einem bestimmten Druck die Navier-Stokes Gleichungen nicht mehr gelten [17]. Deshalb ist das selbst erstellte Material 'Vakuum' nur eine Näherung mit einer thermischen Leitfähigkeit von $3,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ (näheres in Kapitel 6.3) und geringst-möglich einstellbaren Druck von $10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{cc}}$. Die Eigenschaften von Kapton wurden aus dem Datenblatt [18] entnommen. Anschließend wurde ein externes Volumen, das Vakuum, kreiert, indem sich die Atome und die Vakuumkammer aufhalten.

6.2 Randbedingungen

Um Szenarien in CFD zu simulieren, müssen den Materialien verschiedene Randbedingungen zugewiesen werden. Materialien ohne zugewiesene Randbedingungen werden für die Simulation als isoliert angenommen [19]. In der folgenden Tabelle werden die Bauteile der Vakuumkammer mit den zugehörigen Randbedingungen sowie den zugehörigen Materialien aufgelistet.

Bauteil	Materialien	Randbedingungen
Ofen	Stahl	Gesamtwärmeerzeugnis
Spule	Kupfer	Temperatur
Externe Volumen	Vakuum	Temperatur
Blende	Kapton	Wärmeübergangskoeffizient
Restliche Anordnung	Edelstahl 304	Wärmeübergangskoeffizient

Tabelle 6.1: Zugewiesene Materialien und Randbedingungen verschiedener Bauteile der Vakuumkammer.

Dem Ofen wurde die Randbedingung Gesamtwärmeerzeugnis zugewiesen, da er mit einer Leistung von 200 Watt heizt [20]. Flächen mit einer konstanten Temperatur weist man die Randbedingung Temperatur zu, wenn eine Wärmeübertragung ausgeführt werden soll. Die Temperatur der Spulen wurde auf 60 °C gesetzt (Referenz: Dominika, private Kommunikation), das externe Volumen auf Raumtemperatur. Wärmeübergangskoeffizienten weist man Flächen zu, die keine spezifische Temperatur haben oder Wärme erzeugen. Durch sie wird eine Umgebung definiert, die die Komponente umgibt. Auch der Umgebung wurde als Referenztemperatur die Raumtemperatur zugewiesen. [21]

Nachdem die Materialzuweisung und das Zuweisen der Randbedingungen erfolgt ist, wird ein Netz erzeugt. Das Netz ist ein Menge von Knotenpunkten, die über das Modell gespannt werden, und an denen die Berechnung durchgeführt wird [22].

6.3 Fehlerabschätzung der Simulation

Wie bereits erwähnt, ist es mit CFD nicht möglich, den Druck in der Hauptkammer zu simulieren, da dann nicht mehr die Navier-Stokes Gleichungen gelten. Deshalb wurde die Wärmeleitfähigkeit bei einem Druck von 10^{-9} bar ermittelt, um damit das Vakuum möglichst gut simulieren zu können.

Bei normalem Druck ist die Wärmeleitfähigkeit [23, 24]

$$\lambda = \frac{\nu_{mittel}}{2} \frac{C_{m,v}}{k_b N_A T} l_{m,fW} \cdot p \quad (6.1)$$

druckunabhängig. Hier ist $C_{m,v}$ die molare, isochore Wärmekapazität, k_b die Boltzmann Konstante, N_A die Avogadro Konstante. Für die mittlere Geschwindigkeit gilt:

$$\nu_{mittel} = \sqrt{\frac{8k_b T}{\pi m}}. \quad (6.2)$$

Die mittlere freie Weglänge $l_{m,fW}$ entspricht der Weglänge, die ein Teilchen im Mittel zurücklegt, bevor es mit einem anderem kollidiert:

$$l_{m,fW} = \frac{k_b T}{\sqrt{2} \cdot 4\pi d^2 p}. \quad (6.3)$$

Sie ist direkt antiproportional zum Druck. Ein geringerer Druck hat eine größere freie Weglänge zur Folge, wodurch die Wärmekapazität konstant und somit druckunabhängig ist. Wird der Druck weiter verringert, so vergrößert sich die mittlere freie Weglänge, bis sie den begrenzenden Wänden entspricht. In diesem Fall sind diese Wände die Vakuumkammer. Ab diesem Druck bleibt die mittlere freie Weglänge konstant, wodurch sie die Wärmeleitfähigkeit ab diesem Druck proportional zum

Druck verhält. Reduziert man den Druck auf den in der Vakuumkammer herrschenden Druck von 10^{-9} bar, so ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit von $3,5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$. Dieser Wert kann nun für die Simulation des Vakuums verwendet werden. Ergänzend zu den obigen Gleichung ist bei der folgenden Tabelle die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Druck für Sauerstoff und Stickstoff abgebildet.

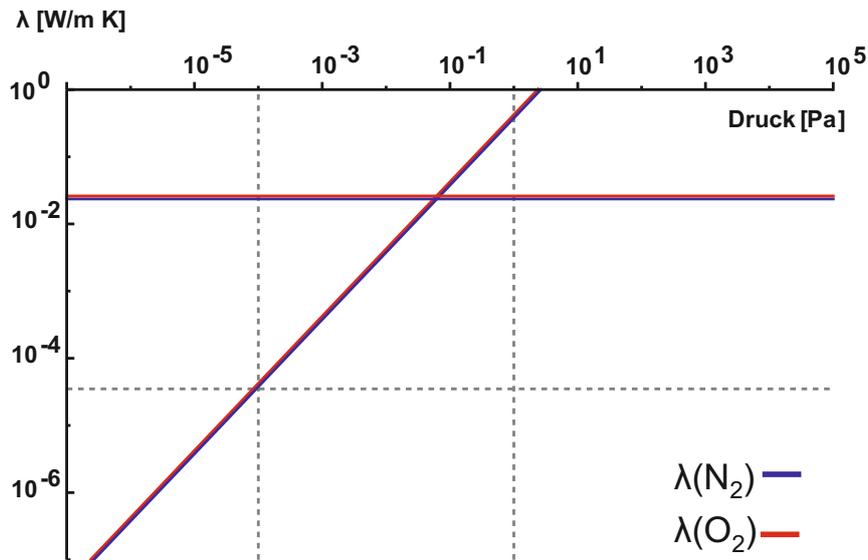


Abbildung 6.2: Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Druck für Sauerstoff und Stickstoff. Die horizontale Linie ist der Druck-Wärmeleitfähigkeit Zusammenhang bei normalen Drücken und die andere Linie mit positiver Steigung ist der Zusammenhang bei kleinen Drücken. Bei normalem Druck ist die Wärmeleitfähigkeit druckunabhängig. Das gestrichelte Kreuz links markiert den Punkt bei dem Druck in der Vakuumkammer. Rechts wird der Punkt markiert, an dem der Übergang von normalen zu höheren Drücken stattfindet. Referenz: Dominika, private Kommunikation.

RESULTATE

Sobald den verschiedenen Komponenten Materialien und Randbedingungen zugewiesen wurden, kann die Ergebnisanalyse gestartet werden. Um das Vakuum möglichst gut zu simulieren, wird die Konvektion deaktiviert, da damit der Wärmeübertrag durch den Austausch von Teilchen nicht stattfindet. Nach einiger Zeit konvergiert die Temperatur und die Simulation ist abgeschlossen.

Anschließend wurde ein Messpunkt im Inneren der Vakuumkammer gesetzt, um sich den Temperaturverlauf der Simulation anzeigen zu lassen.

7.1 Ergebnisse der Simulation

Theoretische Simulation

Zuerst wurde eine Simulation gemacht, ohne die gemessenen Temperaturen in CFD zu implementieren. Den Materialien wurden gemäß Kapitel 5.2 Randbedingungen zugewiesen, es ergab sich folgender Temperaturverlauf.

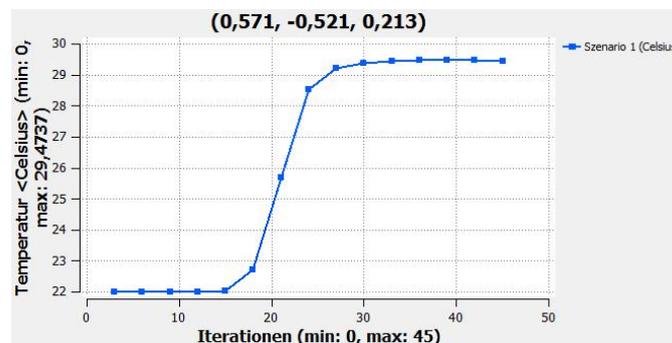


Abbildung 7.1: Temperaturverlauf nach der Simulation im Inneren der Vakuumkammer. Der Vektor oben gibt die Koordinaten des gesetzten Messpunktes am Ort der Atome an. Nach 45 Iterationsschritten konvergierte die Temperatur auf 29,47°C.

Die Temperatur im Inneren beträgt somit $29,47^\circ\text{C}$. In Tabelle 7.1 ist nochmal die mit den Platinwiderständen gemessene Temperatur mit der von CFD an diesen Stellen ausgegebene Temperatur gegenübergestellt.

	Temperatur in Celcius	Temperatur in Celcius
i.	217,14	51,94
ii.	29,65	28,71
iii.	33,99	26,02
iv.	23,34	31,85
v.	31,76	28,38
vi.	26,33	24,68
vii.	210,73	42,53

Tabelle 7.1: Temperaturmessung verschiedener Orte an der simulierten Vakuumkammer und zum Vergleich die mit den Temperatursensoren real gemessene Temperatur aus Tabelle 5.3.

Im Vergleich sieht man deutliche Unterschiede zu den Temperaturen in der Nähe des Ofens. Diese Werte sind natürlich sehr unrealistisch, lassen sich jedoch damit erklären, dass bei der Simulation der ganze Raum als Vakuum angenommen wurden und die Konvektion ausgeschaltet wurde. Somit steht die Luft (bzw. das Vakuum) still und die Wärme sammelt sich dann an diesen Stellen. Um diesen Effekt zu minimieren, muss das Medium außerhalb der Kammer als Luft definiert werden. In der hier verwendeten Modellierung der Kammer fehlen die optischen Zugänge, was eine Unterteilung in ein inneres und äußeres Medium verhindert. Bei den beiden Spulen wurde versucht, die Messpunkte möglichst symmetrisch anzusetzen und obwohl das Modell der Vakuumkammer entlang der Spulen komplett symmetrisch ist, ergab sich ein Temperaturunterschied von ungefähr 4°C . Berücksichtigt man die Schwierigkeit, so ist der Temperaturunterschied von $0,94^\circ\text{C}$ der oberen Spule und der Unterschied von $1,65^\circ\text{C}$ an Position vi. im Rahmen der Simulationsunsicherheit. Auffallend ist noch der große Temperaturunterschied bei der Messungen an der unteren Spule. Hier ergibt sich eine Temperaturdifferenz von $6,97^\circ\text{C}$.

An der Position iv. sieht man eine wesentlich höhere Temperatur der real gemessenen Temperatur als erwartet. Deshalb wurde daraufhin der Widerstand des Temperaturfühler gemessen. Es ergab sich ein Widerstand von $108,6\ \Omega$, was einer Temperatur von ca. 22°C (Raumtemperatur) entspricht. Dies ist auch ein erwartbares Ergebnis, das mit der Simulation übereinstimmen würde. Hier liegt wahrscheinlich der Fehler an zusätzlich auftretenden Widerständen, bedingt durch die Leiterbahnen und Anschlüsse der Platine, was wiederum einer höheren Temperatur entspricht. Daher wird bei der Simulation unter Berücksichtigung der gemessenen Temperatur die Temperatur an dieser Stelle auf 22°C gesetzt.

Simulation unter Berücksichtigung der gemessenen Temperatur

Bei der Simulation mit den PTs sind die Materialienzuweisung sowie die Randbedingungen identisch mit der vorherigen Simulation. Der einzige Unterschied besteht nun darin, dass im Modell einigen Flächen die Temperatur zugewiesen wurden, die von den Platinwiderständen gemessen wurde. Hier ergab sich eine Temperatur von $29,72^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$.

Vergleicht man nun beide Fälle, so erkennt man, dass sich die Temperatur im Inneren der Kammer durch das Einbringen der von den PTs gemessenen Temperatur um $0,25^\circ\text{C} \pm 0,02^\circ\text{C}$ verändert hat. Dieser geringe Unterschied spricht dafür, dass die Temperaturmessung der Simulation mit der realen Messung übereinstimmt. Im nächsten Kapitel wird der BBR für beide Fälle berechnet und verglichen.

7.2 Betrag der Wärmestrahlung der Simulation

Um den Betrag der Wärmestrahlung in der Simulation abschätzen zu können, wurde wieder die Temperatur Inneren gemessen, jedoch diesmal die Wärmestrahlung deaktiviert. Mit der Wärmestrahlung ergab sich eine Temperatur von $29,72^\circ\text{C}$. Bei Deaktivierung wurde die Temperatur zu $24,64^\circ\text{C}$ berechnet. Da die Temperatur nicht tiefer als 22°C fallen kann (konstante Raumtemperatur), bringt die Wärmestrahlung den größten Betrag zur Temperatur mit ein, was ein Indiz dafür ist, dass mit der errechneten Wärmeleitfähigkeit, das Vakuum gut simuliert wurde.

7.3 Schwarzkörper-Verschiebung

Mit den ermittelten Temperaturen lässt sich nun die Schwarzkörperverschiebung ausrechnen. Hierzu nutzen wir die theoretischen Grundlagen aus Kapitel Zwei, die sich noch weiter abschätzen lassen [8] und man für die Frequenzverschiebung der BBR auf folgenden Ausdruck kommt [3]

$$\Delta\nu_{\text{BBR}} = -\frac{1}{2} (831.9 \text{ V/m})^2 \left(\frac{T(\text{K})}{300} \right)^4 \Delta\alpha_0 (1 + \eta). \quad (7.1)$$

$\Delta\alpha_0$ ist die Polarisierbarkeit zwischen den Zuständen im Uhrenübergang und η ist ein kleiner Korrekturterm, der sich durch den BBR ergibt. Im Falle von Magnesium ist die Konstante $\eta=0$ und $\Delta\alpha_0 = 6.49 \cdot 10^{-6} \frac{\text{C}\cdot\text{m}^2}{\text{V}}$. Damit ergaben zu den oberen Temperaturen Frequenzverschiebungen von

$$\Delta\nu_{\text{BBR}}^{\text{theo}} = -2.38 \text{ Hz} \quad \text{und} \quad (7.2a)$$

$$\Delta\nu_{\text{BBR}}^{\text{gemessen}} = -2,34 \text{ Hz}. \quad (7.2b)$$

Dies ist der Einfluss der Schwarzkörperstrahlung auf den Uhrenübergang des ^{24}Mg Frequenzstandards in Hannover. Die Unsicherheiten befinden sich in der dritten Stelle nach dem Komma. Daraus resultieren sich die relativen Frequenzverschiebungen mit der Uhrenübergangsfrequenz $\nu_0 = 429 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ zu

$$\Delta\nu_{\text{BBR}}^{\text{theo}}/\nu_0 = -5.4 \cdot 10^{-17} \text{ Hz} \quad \text{und} \quad (7.3a)$$

$$\Delta\nu_{\text{BBR}}^{\text{gemessen}}/\nu_0 = -5.42 \cdot 10^{-17} \text{ Hz}. \quad (7.3b)$$

AUSBLICK

Im Hinblick zur Minimierung der thermischen Unsicherheit gibt es noch einige Ansätze, um diese besser abschätzen zu können. Die Simulation der thermischen Verteilung der Vakuumkammer setzt an die Simulationssoftware einige Anforderungen. Zum einem muss die Software Wärmeleitung simulieren können. Zum anderem muss auch thermische Strahlung und deren Auswirkung modelliert werden können. Nur ein Programm konnte beide Parameter in die Simulation aufnehmen. Autodesk CFD ist ein Strömungsmodell, das auf den Navier-Stokes Gleichungen basiert. Die Grenzen dessen liegen daher beim Ultrahochvakuumbereich, wo die Gleichung ihre Gültigkeit verlieren. Aufgrund dessen wurde das Vakuum durch eine Anpassung der Wärmeleitfähigkeit bei kleinem Drücken angenähert.

Das für die Simulation verwendete Modell der Vakuumkammer beinhaltet bisher nur die Spulen und den Ofen, in denen eine Wärmeentwicklung stattfindet, sowie die Vakuumkammer an sich und zwei optischen Zugänge. Die erste Einschränkung in der Simulation führt aus der Tatsache, dass das Modell der Kammer nicht mit allen optischen Zugängen verschlossen ist. Dadurch wirkt sich eine Definition des Vakuum ebenfalls auf die umgebende Luft aus. Dies führt zu einer Größeren Wärmeentstehung am Ort der Hitzequellen.

Die Simulation der Optiken konnte in dieser Arbeit nicht mehr ausgeführt werden. Hierzu sind weitere Messungen nötig, welche zurzeit am Experiment nicht möglich sind. Da die optischen Zugänge für die am Experiment verwendeten Laser beschichtet sind, haben sie unterschiedliches Transmissionsverhalten bezüglich Strahlung bei verschiedenen Wellenlängen. Dies führt dazu, dass auch die Schwarzkörperstrahlung, welche vom Raum in die Kammer eintritt, nur Wellenlängenabhängig transmittiert wird. Im Rahmen von Umbauten an der Vakuumkammer werden demnächst neue optische Zugänge eingebaut. Diese können dann vorab auf ihre spektrale Transmission untersucht werden und dann in die Simulation implementiert werden.

Die Temperaturmessung außerhalb der Kammer wurde als Vorbereitung und Entwicklung einer Temperaturmessung innerhalb dieser durchgeführt. Der erste Schritt eine charakterisierende Technik zu besitzen, ist somit erfüllt. Als nächstes würden, ebenfalls im Rahmen der Umbauten an der Vakuumkammer, die Temperatursensoren innerhalb der Vakuumkammer platziert. Dies ermöglicht eine, durch die Umgebungsluft, weniger verfälschte Temperaturmessung. Des Weiteren können Temperatursensoren näher an die Atome befestigt werden und einen Einblick auf den Temperaturgradienten innerhalb der Kammer liefern.

Eine noch genauere Temperaturmessung würde die Verwendung einer Kupferabschirmung innerhalb der Vakuumkammer, welche die Atome gegen äußere Wärmestrahlung abschirmt [25]. Dies ermöglicht eine sehr präzise Temperaturmessung, da Kupfer eine sehr viel höhere Wärmeleitfähigkeit als Edelstahl besitzt. Dort würden die vorhandenen Temperatursensoren direkt an die Kupferabschirmung angebracht werden können.

ANHANG A

TABELLEN UND GRAPHEN

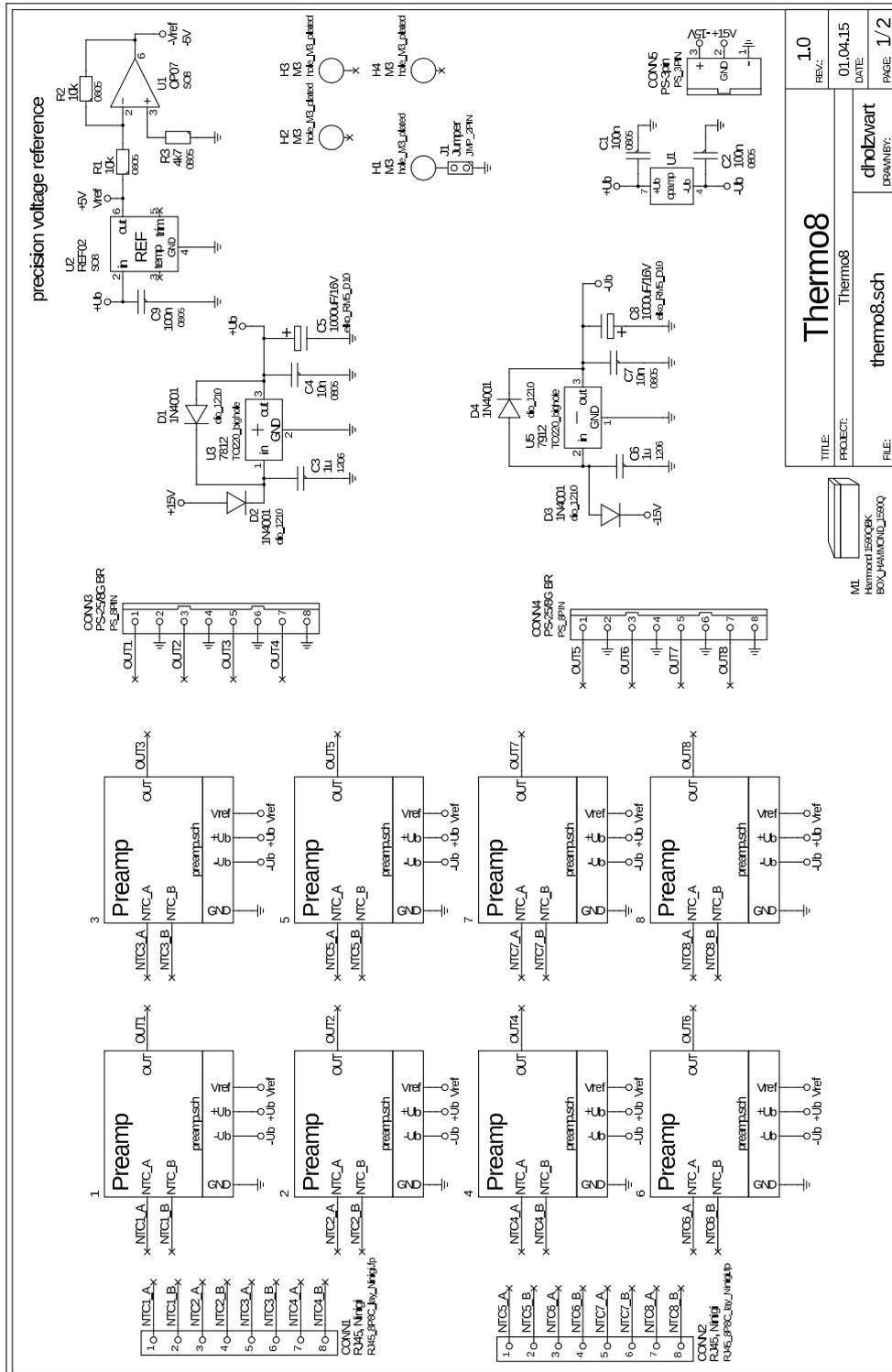
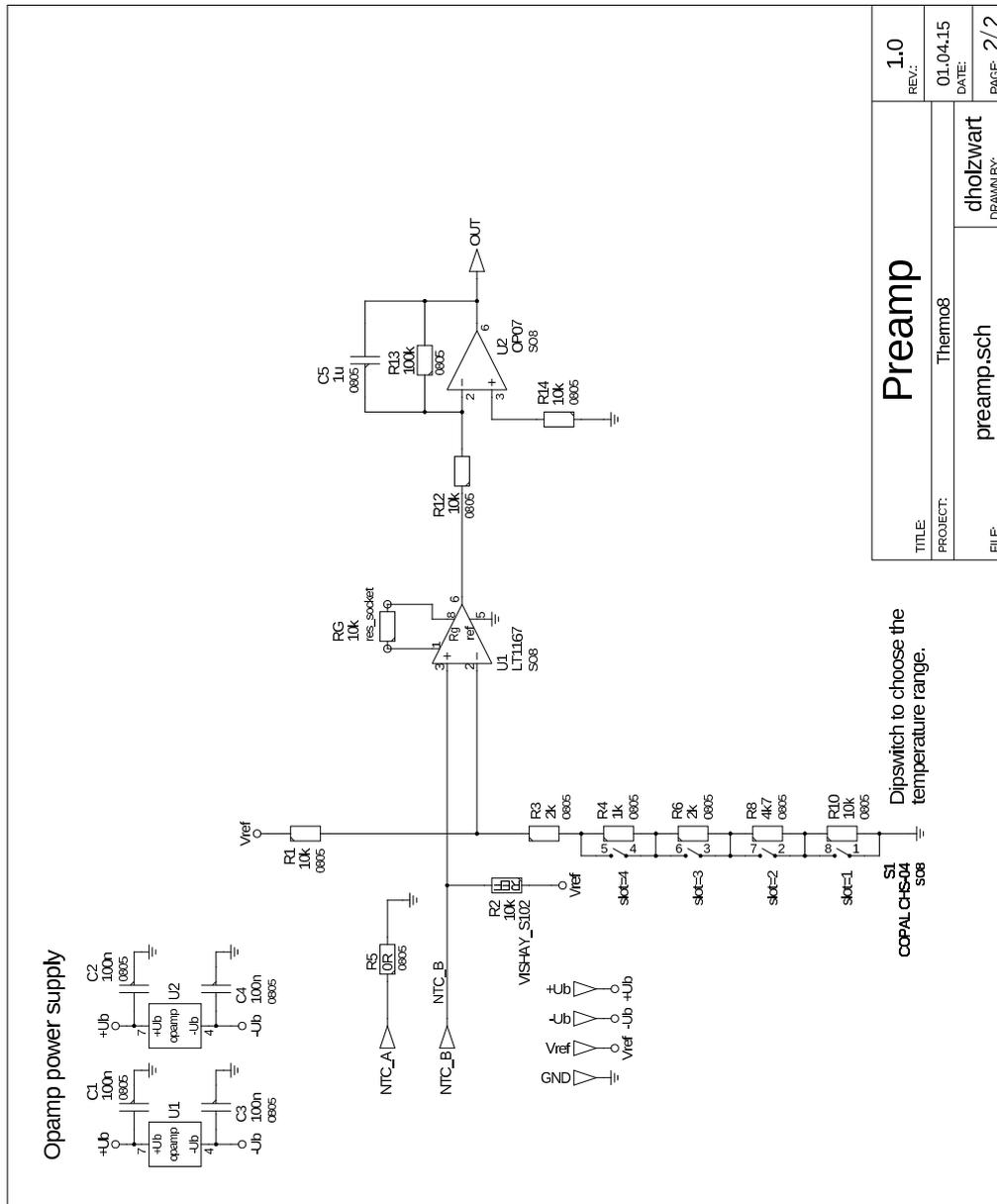


Abbildung A.1: Schaltplan der Schaltung.

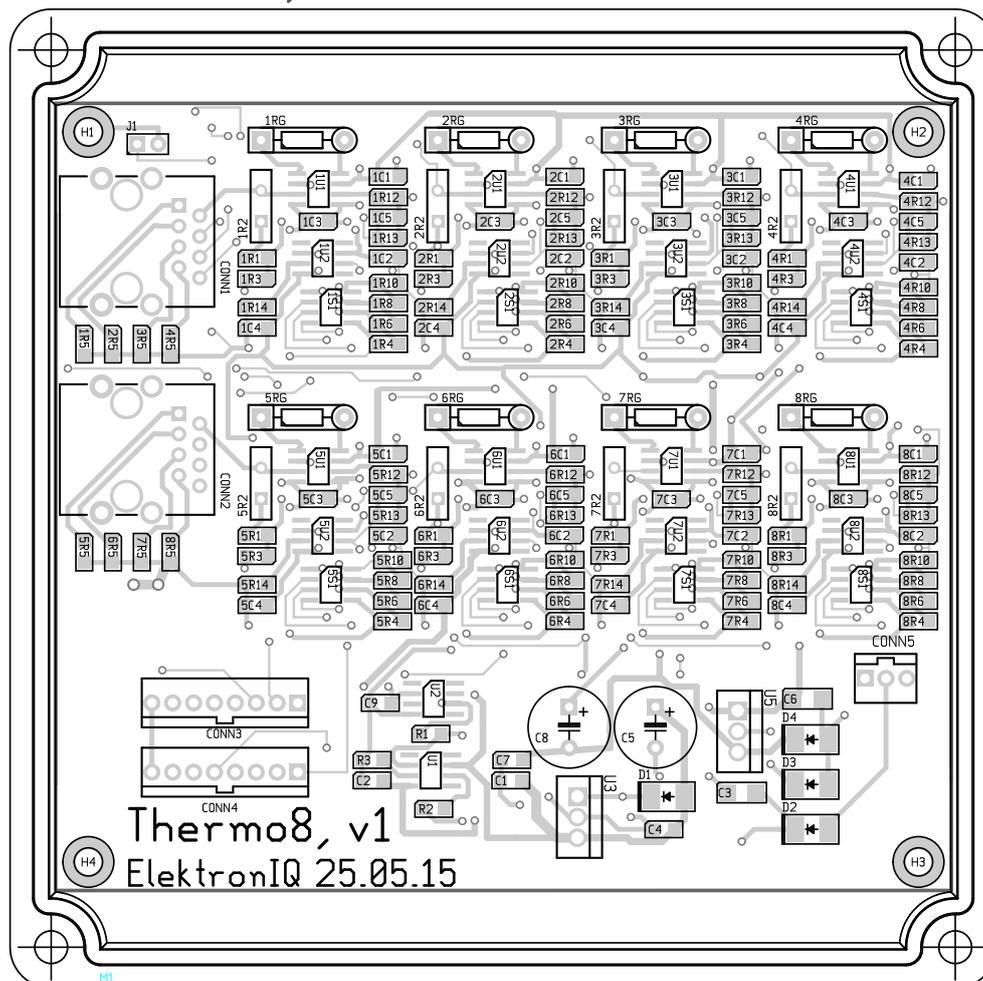


TITLE	Preamp	REV.:	1.0
PROJECT:	Themo8	DATE:	01.04.15
FILE	preamp.sch	DRAWN/BY:	dholzwait
		PAGE:	2 / 2

Dipswitch to choose the temperature range.

Abbildung A.2: Schaltplan der Schaltung.

Size: 109x96,5mm



Grid (1,1)

Abbildung A.3: Layout der Schaltung.

Schaltung	Spannung			Abweichung	Mittelwert	Offset
1	-353	-353	-353	± 0	-353	-62,14
2	-364	-366	-363	± 3	-364,33	-73,47
3	-361	-362	-362	± 1	-361,66	-70,8
4	-366	-366	-367	± 1	-366,33	-75,47
5	-353	-352	-355	± 3	-353,33	-62,47
6	-352	-355	-356	± 4	-354,33	-63,47
7	-357	-357	-357	± 0	-357	-66,14
8	-374	-368	-393	± 25	-378,33	-87,47

Tabelle A.1: Spannungsmessungen der Schaltung in mV mit Referenzwiderstand 110 Ω

Schaltung	Spannung			Abweichung	Mittelwert	Offset
1	-649	-646	-647	± 3	-647,33	-66,19
2	-663	-660	-661	± 3	-661,33	-80,16
3	-659	-654	-661	± 7	-658	-76,86
4	-659	-659	-661	± 2	-659,66	-78,52
5	-647	-647	-649	± 2	-647,66	-66,52
6	-648	-645	-645	± 3	-646	-64,86
7	-655	-651	-651	± 4	-652,33	-71,19
8	-666	-667	-667	± 1	-666,66	-85,52

Tabelle A.2: Spannungsmessungen der Schaltungen in mV mit Referenzwiderstand 120 Ω

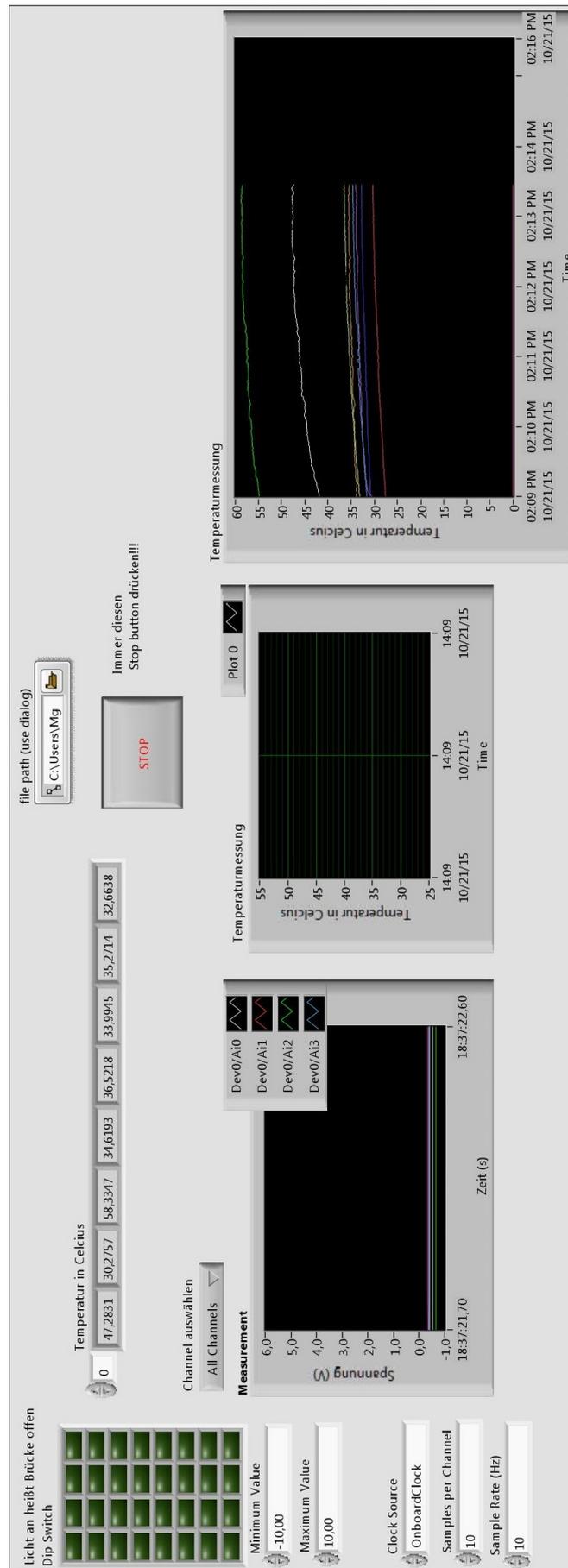


Abbildung A.5: Frontpanel des entworfenen LabView Programms.

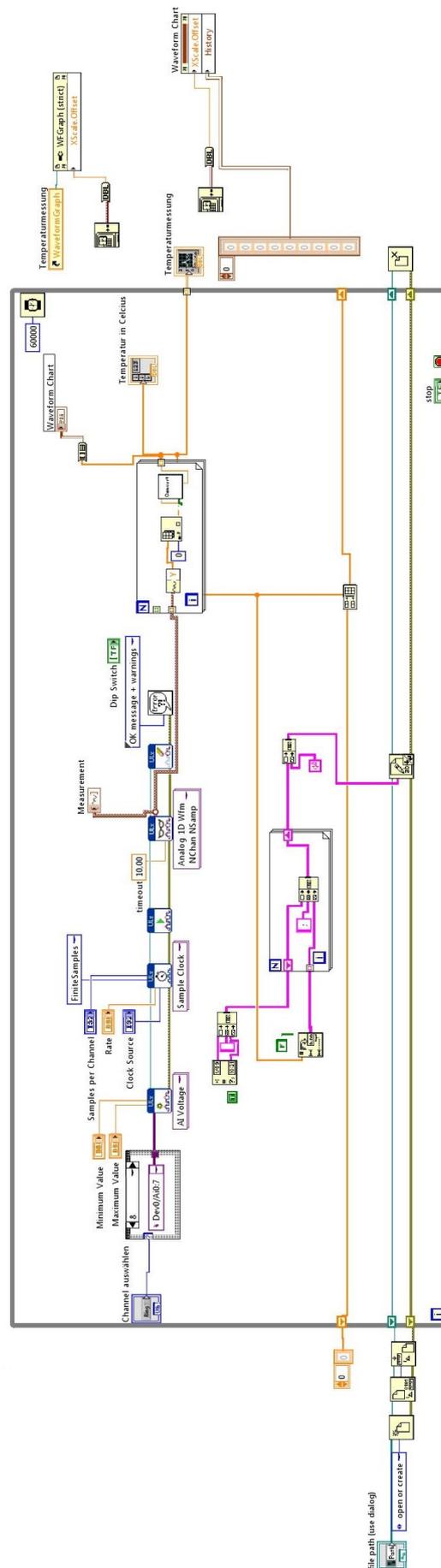


Abbildung A.6: Blockdiagramm des LabView Programms.

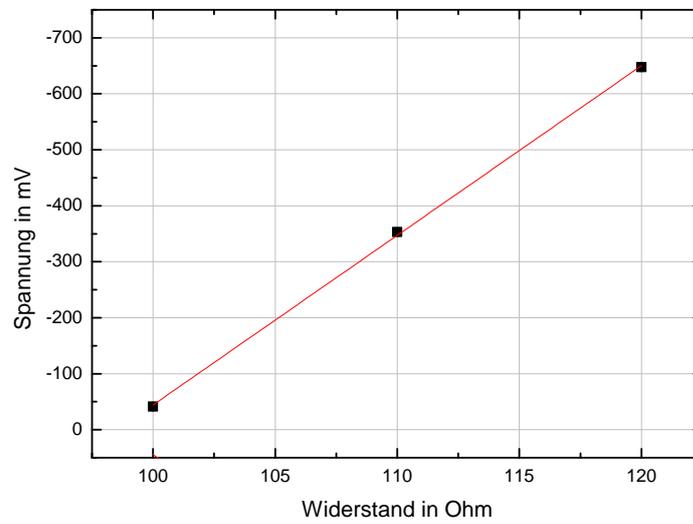


Abbildung A.7: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die erste Schaltung.

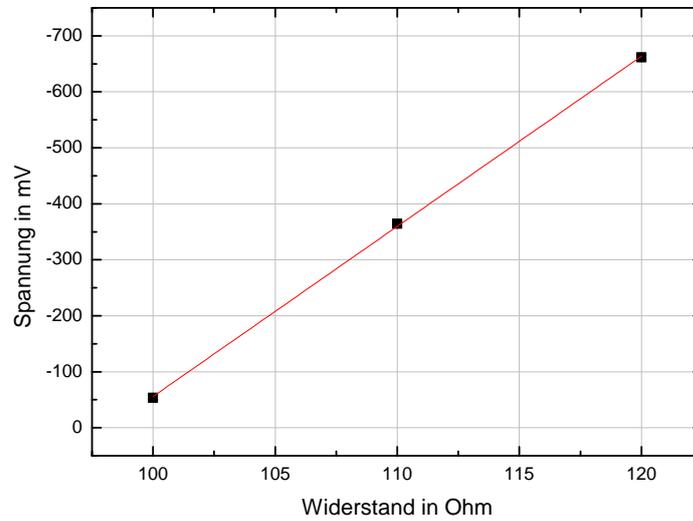


Abbildung A.8: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die zweite Schaltung.

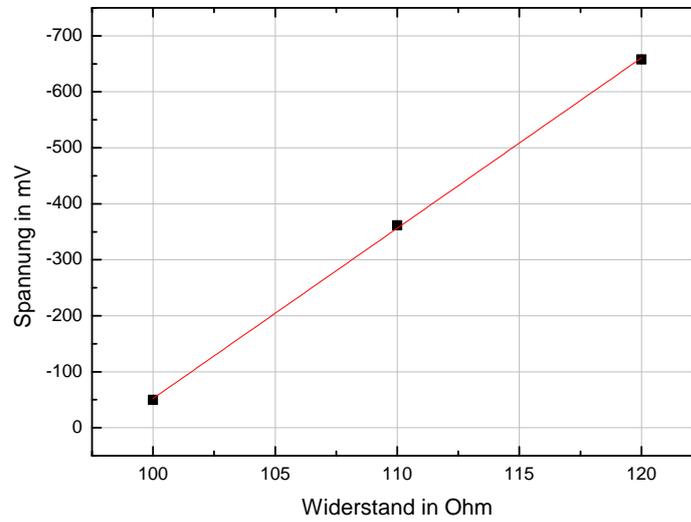


Abbildung A.9: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die dritte Schaltung.

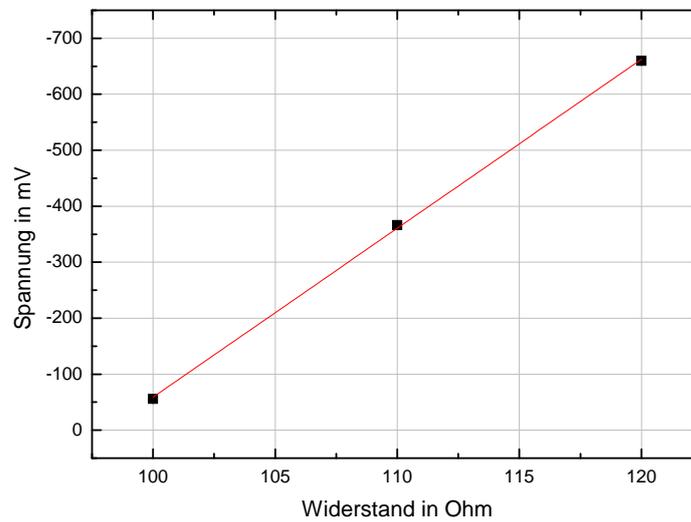


Abbildung A.10: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die vierte Schaltung.

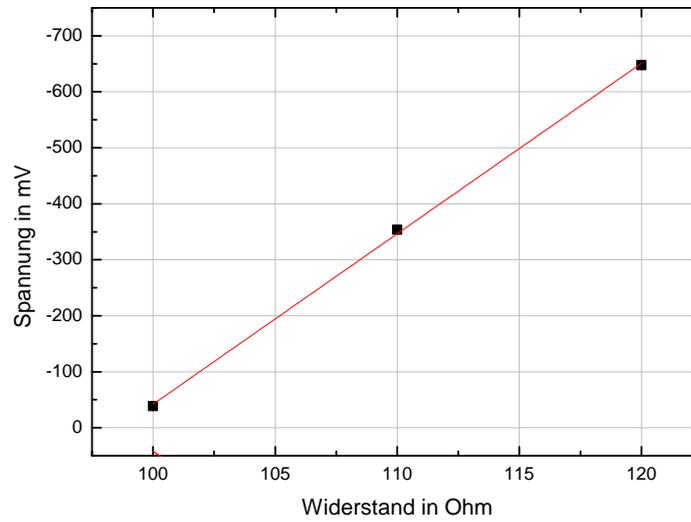


Abbildung A.11: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die fünfte Schaltung.

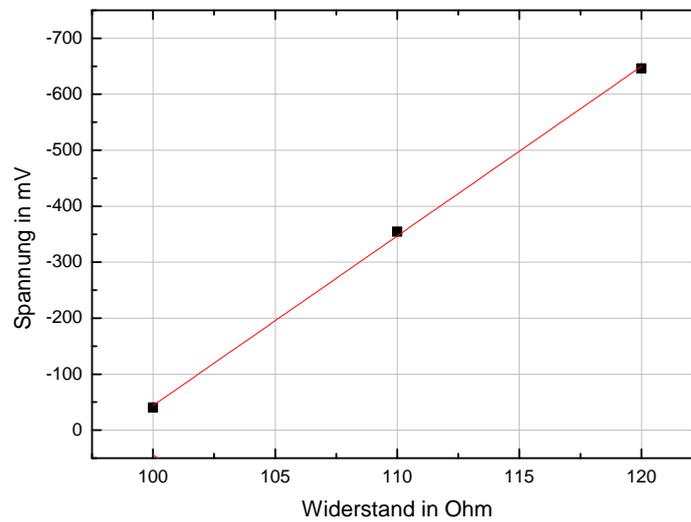


Abbildung A.12: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die sechste Schaltung.

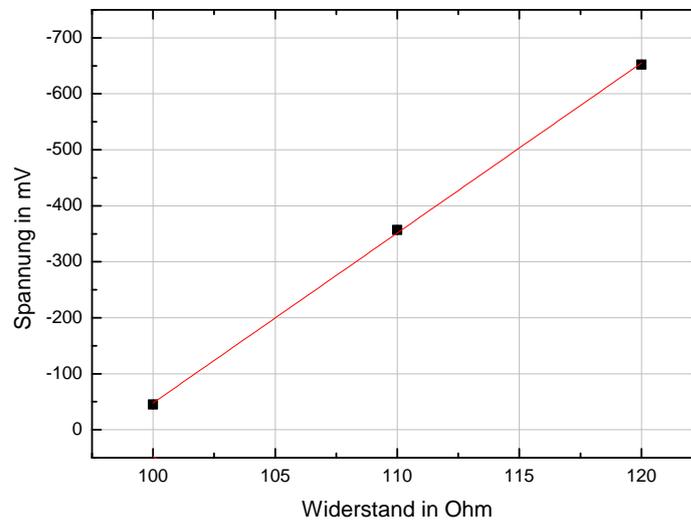


Abbildung A.13: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die siebte Schaltung.

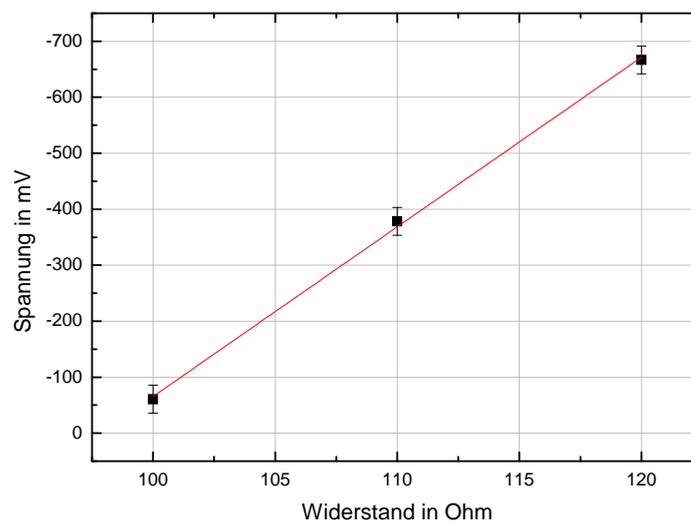


Abbildung A.14: Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die achte Schaltung.

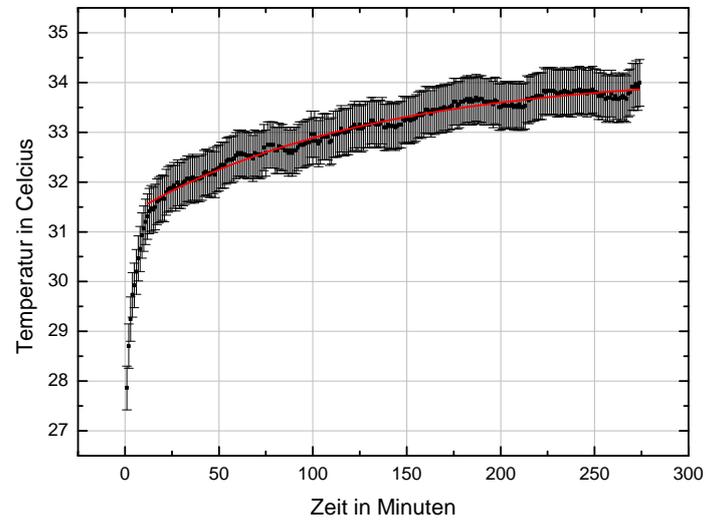


Abbildung A.15: Messung der Temperatur der oberen Spule über ungefähr vier Stunden.

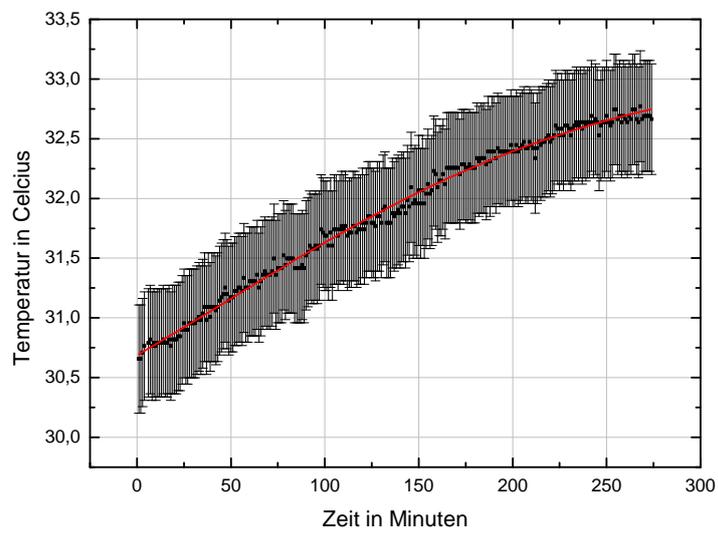


Abbildung A.16: Messung der Temperatur der unteren Spule über ungefähr vier Stunden.

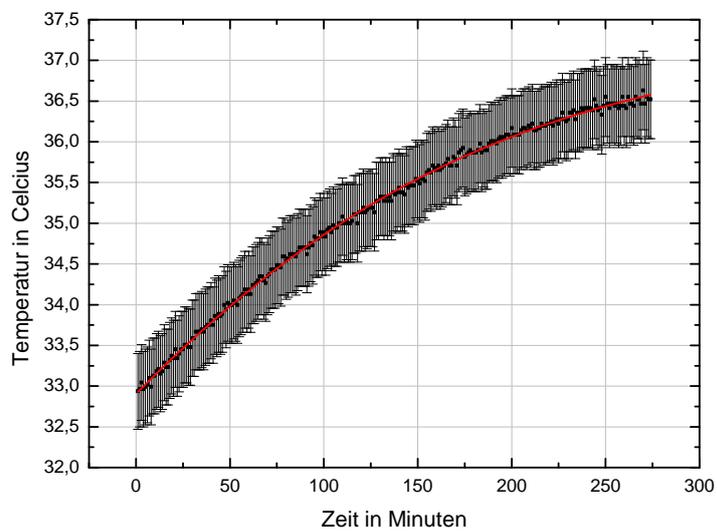


Abbildung A.17: Messung der Temperatur an der Vakuumpumpe über ungefähr vier Stunden.

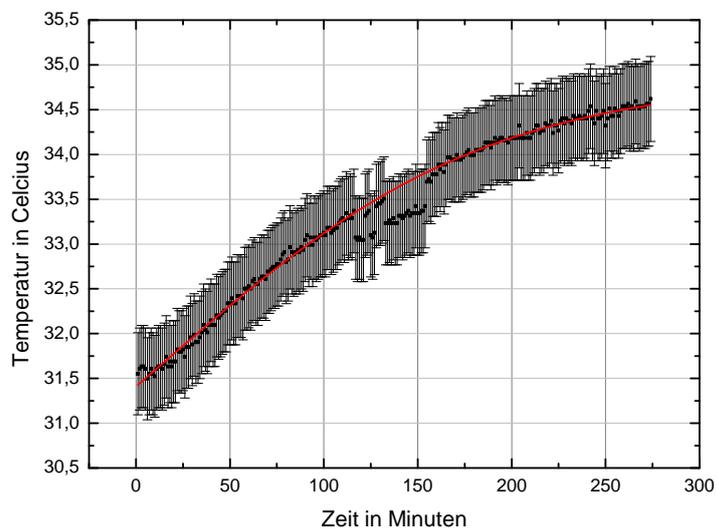


Abbildung A.18: Messung der Temperatur zwischen den optischen Zugängen über ungefähr vier Stunden.

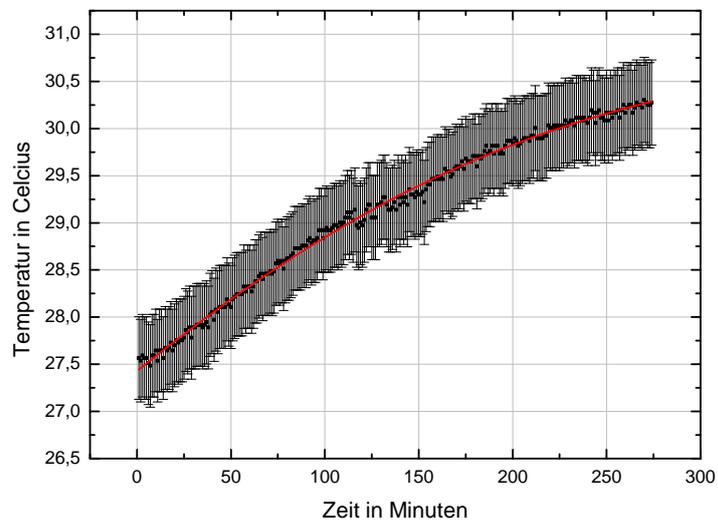


Abbildung A.19: Messung der Temperatur zwischen den optischen Zugängen über ungefähr vier Stunden.

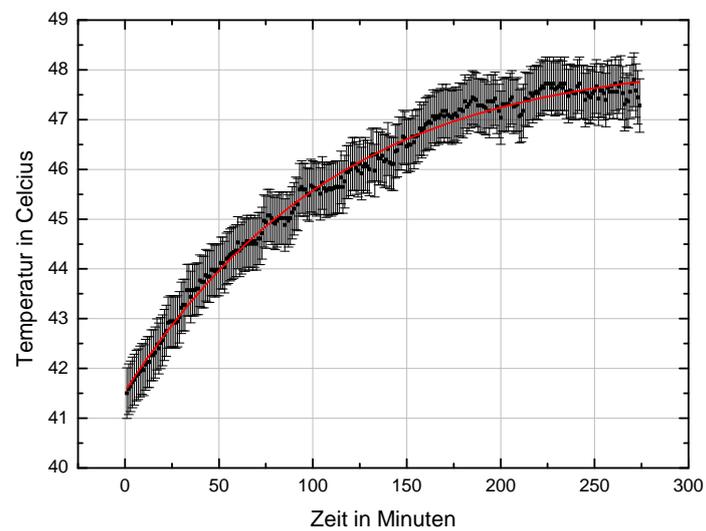


Abbildung A.20: Messung der Temperatur in geringer Entfernung vom Ofen über ungefähr vier Stunden.

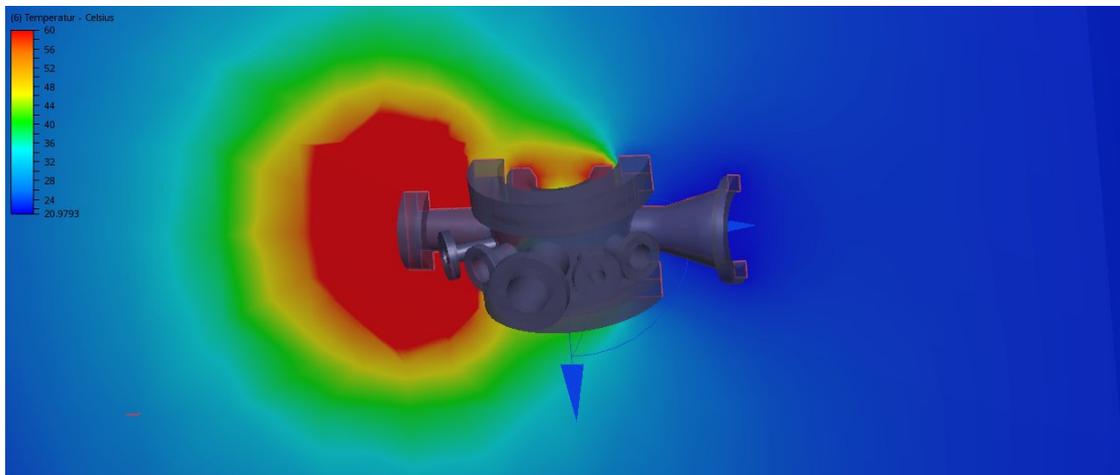


Abbildung A.21: Temperaturebene, die in die Vakuumkammer gelegt wurde. Man beachte die Skalierung.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] AG Mungall, H Daams, and JS Boulanger.
Design, construction, and performance of the nrc csvi primary cesium clocks.
Metrologia, 17(4):123, 1981.
- [2] Andrew D Ludlow, Martin M Boyd, Jun Ye, Ekkehard Peik, and Piet O Schmidt.
Optical atomic clocks.
arXiv preprint arXiv:1407.3493, 2014.
- [3] Marianna S Safronova, Mikhail G Kozlov, and Charles W Clark.
Blackbody radiation shifts in optical atomic clocks.
Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on, 59(3):439–447, 2012.
- [4] Thomas Middelmann.
Bestimmung des Einflusses thermischer Strahlung auf eine optische Strontium-Gitteruhr.
PhD thesis, Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek Hannover (TIB), 2013.
- [5] Hidetoshi Katori, Masao Takamoto, VG Pal’Chikov, and VD Ovsiannikov.
Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap.
Physical Review Letters, 91(17):173005, 2003.
- [6] Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryoichi Higashi, and Hidetoshi Katori.
An optical lattice clock.
Nature, 435(7040):321–324, 2005.
- [7] Zeb W Barber, Chad W Hoyt, Chris W Oates, Leo Hollberg, Aleksei V Tai-chenachev, and Valera I Yudin.
Direct excitation of the forbidden clock transition in neutral yb 174 atoms confined to an optical lattice.
Physical review letters, 96(8):083002, 2006.
- [8] Sergey G Porsev and Andrei Derevianko.

- Multipolar theory of blackbody radiation shift of atomic energy levels and its implications for optical lattice clocks.
Physical Review A, 74(2):020502, 2006.
- [9] <https://de.wikipedia.org/wiki/Spannungsteiler> , abgerufen am 12. November 2015.
- [10] <http://www.kfztech.de/kfztechnik/elo/sensoren/ntc.htm>, abgerufen am 22. Oktober 2015.
- [11] [http://bibo.iqo.uni-hannover.de/index.html/doku.php?id=bauteil:temperatursensoren&sl\[\]=ntc](http://bibo.iqo.uni-hannover.de/index.html/doku.php?id=bauteil:temperatursensoren&sl[]=ntc), abgerufen am 22. Oktober 2015.
- [12] DIN IEC.
751: Industrielle platin-widerstandsthermometer und platin-meßwiderstände.
Identisch mit IEC, 751, 1985.
- [13] <http://www.fuehlersysteme.de/wiki/genauigkeitsklasse>, abgerufen am 12. November 2015.
- [14] <http://www.waermedaemmstoffe.com/htm/pur.htm>, abgerufen am 12. November 2015.
- [15] http://www.cfd-online.com/Wiki/Fluid_dynamics, abgerufen am 4. November 2015.
- [16] Heinz Brauer and Dieter Mewes.
Stoffaustausch einschließlich chemischer Reaktionen.
Sauerländer Aarau und Frankfurt/Main, 1971.
- [17] <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/SimCFD-Learning/files/GUID-428D5B5C-1DBB-46C9-9C56-DB0C80E52C0B-htm.html>, abgerufen am 4. November 2015.
- [18] <http://www.dupont.com/content/dam/assets/products-and-services/membranes-films/assets/DEC-Kapton-HN-datasheet.pdf>, abgerufen am 4. November 2015.
- [19] <https://knowledge.autodesk.com/de/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/DEU/SimCFD-UsersGuide/files/GUID-D39DB8C7-05C5-481B-8604-6EB0EF6E69A9-htm.html>, abgerufen am 12. November 2015.
- [20] Tanja E Mehlstäubler.
Neuartige Kühlmethoden für einen optischen Magnesium-Frequenzstandard.
Rhombos-Verlag, 2006.
- [21] <http://knowledge.autodesk.com/de/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/DEU/SimCFD->

- UsersGuide/files/GUID-D39DB8C7-05C5-481B-8604-6EB0EF6E69A9-
htm.html?v=2016, abgerufen am 12. November 2015.
- [22] <http://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/SimCFD-Learning/files/GUID-EFEC3DCE-7B24-42A0-8AA4-C3B2A9D332B1-htm.html>, abgerufen am 22. Oktober 2015.
- [23] Gerlinde Bedö, Werner Kraus, and Rudolf Müller.
Comparison of different micromechanical vacuum sensors.
Sensors and Actuators A: Physical, 85(1):181–188, 2000.
- [24] Akademischer Verein Hütte eV, Horst Czichos, and Manfred Hennecke.
Hütte-Das Ingenieurwissen.
Springer-Verlag, 2007.
- [25] K Beloy, N Hinkley, NB Phillips, JA Sherman, M Schioppo, J Lehman, A Feldman, LM Hanssen, CW Oates, and AD Ludlow.
Atomic clock with 1×10^{-18} room-temperature blackbody stark uncertainty.
Physical review letters, 113(26):260801, 2014.
- [26] AG Mungall, H Daams, D Morris, and CC Costain.
Performance and operation of the nrc primary cesium clock, csv.
Metrologia, 12(3):129, 1976.
- [27] S Weyers, U Hübner, R Schröder, Chr Tamm, and A Bauch.
Uncertainty evaluation of the atomic caesium fountain csf1 of the ptb.
Metrologia, 38(4):343, 2001.
- [28] Fritz Riehle.
Frequency standards: basics and applications.
John Wiley & Sons, 2006.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

2.1	Prinzipieller Aufbau einer optischen Uhr, bestehend aus dem Uhrenlaser, Absorbermedium, Regelungselektronik und dem Frequenzkamm [4].	3
2.2	Prinzip des optischen Gitters. Der Laser erzeugt durch konstruktive Interferenz ein Stehfeld. Dadurch entstehen Potentialmini- und Maxima, in denen die Atome bei ausreichender Potentialtiefe im Lamb-Dicke Bereich gefangen werden können [6].	4
2.3	Darstellung des Potential eines optischen 2D Gitters und in den Potentialminimas gefangenen Atomen. λ_L ist die optische Wellenlänge des Lasers [7].	5
3.1	Oben ist die spektrale Energiedichte der Schwarzkörperstrahlung bei 77 K und 300 K zu sehen. Unten ist die Frequenzverschiebung durch den BBR für den 1S_0 Grundzustand und den 3P_0 angeregten Zustand dargestellt. [4].	8
5.1	Positionierung der Temperatursensoren an der Vakuumkammer. Mit diesem Modell wurde auch die Simulation durchgeführt. Referenz: Dominika, private Kommunikation.	17
5.2	Messung der Temperatur am Ofen über ungefähr vier Stunden. Die Fehlerbalken ergeben sich aus Kapitel 4.2.2. Die anderen sieben Graphen befinden sich im Anhang.	18
6.1	Isofläche um die Vakuumkammer. Die 'Wolke' zeigt an, wo im Raum eine entsprechende Temperatur herrscht. Hier: 45, 83 °C.	20

6.2	Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Druck für Sauerstoff und Stickstoff. Die horizontale Linie ist der Druck-Wärmeleitfähigkeit Zusammenhang bei normalen Drücken und die andere Linie mit negativer Steigung ist der Zusammenhang bei kleinen Drücken. Bei normalem Druck ist die Wärmeleitfähigkeit druckunabhängig. Das gestrichelte Kreuz links markiert den Punkt bei dem Druck in der Vakuumkammer. Rechts wird der Punkt markiert, an dem der Übergang von normalen zu höheren Drücken stattfindet. Referenz: Dominika, private Kommunikation.	23
7.1	Temperaturverlauf nach der Simulation im Inneren der Vakuumkammer. Der Vektor oben gibt die Koordinaten des gesetzten Messpunktes am Ort der Atome an. Nach 45 Iterationsschritten konvergierte die Temperatur auf 29,47 °C.	24
A.1	Schaltplan der Schaltung.	31
A.2	Schaltplan der Schaltung.	32
A.3	Layout der Schaltung.	33
A.4	Layout der Schaltung.	34
A.5	Frontpanel des entworfenen LabView Programms.	36
A.6	Blockdiagramm des LabView Programms.	37
A.7	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die erste Schaltung.	38
A.8	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die zweite Schaltung.	38
A.9	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die dritte Schaltung.	39
A.10	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die vierte Schaltung.	39
A.11	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die fünfte Schaltung.	40
A.12	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die sechste Schaltung.	40
A.13	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die siebte Schaltung.	41
A.14	Spannung in mV in Abhängigkeit vom Widerstand für die achte Schaltung.	41
A.15	Messung der Temperatur der oberen Spule über ungefähr vier Stunden.	42
A.16	Messung der Temperatur der unteren Spule über ungefähr vier Stunden.	42
A.17	Messung der Temperatur an der Vakuumpumpe über ungefähr vier Stunden.	43

A.18 Messung der Temperatur zwischen den optischen Zugängen über ungefähr vier Stunden.	43
A.19 Messung der Temperatur zwischen den optischen Zugängen über ungefähr vier Stunden.	44
A.20 Messung der Temperatur in geringer Entfernung vom Ofen über ungefähr vier Stunden.	44
A.21 Temperaturebene, die in die Vakuumkammer gelegt wurde. Man beachte die Skalierung.	45

TABELLENVERZEICHNIS

3.1	Durch die BBR verursachte Frequenzverschiebung des Uhrenübergangs vom 1S_0 zum 3P_0 Niveau verschiedener Elemente bei 300 K und die dazugehörigen Unsicherheiten [8].	9
4.1	Spannungsmessung der Schaltung in mV mit Referenzwiderstand 100Ω	12
4.2	Widerstandsmessung der Temperatursensoren	14
5.1	Temperaturmessung der Platinwiderstände in Grad Celcius.	18
5.2	Errechneter Temperatur -und Spannungsoffset der Messung.	19
5.3	Temperatur verschiedener Orte an der Vakuumkammer.	19
6.1	Zugewiesene Materialien und Randbedingungen verschiedener Bauteile der Vakuumkammer.	21
7.1	Temperaturmessung verschiedener Orte an der simulierten Vakuumkammer und zum Vergleich die mit den Temperatursensoren real gemessene Temperatur aus Tabelle 5.3.	25
A.1	Spannungsmessungen der Schaltung in mV mit Referenzwiderstand 110Ω	35
A.2	Spannungsmessungen der Schaltungen in mV mit Referenzwiderstand 120Ω	35

Selbständigkeitserklärung