

**Fakultät für Physik und Astronomie  
Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg**

Bachelorarbeit im Fachbereich Physik  
vorgelegt von

**Marius Müller**

aus Heilbronn (Deutschland)

**2018**



**Entwicklung von Kryoelektronik für den Nachweis  
einzelner Ionen im PENTATRAP  
Penningfallen-Massenspektrometer**

Diese Bachelorarbeit wurde von Marius Müller am  
Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg  
unter der Betreuung von  
Prof. Dr. Klaus Blaum,  
Dr. Sergey Eliseev  
und Dr. Alexander Rischka  
durchgeführt.





## Zusammenfassung

Das PENTATRAP-Experiment am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg beschäftigt sich mit der hochpräzisen Messung von Massenverhältnissen hochgeladener, stabiler und langlebiger Ionen. Zu diesem Zweck wird ein Aufbau mit fünf einzelnen Penningfallen verwendet, welcher es erlaubt simultane Messungen in mehreren Fallen durchzuführen. Für die nicht-destruktive Bestimmung der axialen Frequenz gefangener Ionen wird die Fourier-Transformations-Ionenzyklotronresonanz Methode verwendet. Dabei wird der in den Fallenelektroden induzierte Spiegelstrom über den Spannungsabfall an einem parallelen RLC-Schwingkreis gemessen. Der Entwurf, die Herstellung und der Test elektronischer Schaltungen zur Einstellung der dazugehörigen Schwingkreisgüte wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführt. Mehrere Konzepte zur diskreten und kontinuierlichen Einstellbarkeit wurden dafür erstellt. Für eine realistische Simulation der Bedingungen im Experiment wurden diese Konzepte bei ca. 4 K in einem Kaltkopf getestet. Bei den Tests erwies sich ein Konzept mit einem Feldeffekttransistor als variabler Widerstand, unter anderem aufgrund der kontinuierlichen Einstellbarkeit der Güte, als besonders geeignet. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Verluste in den gefertigten Platinen sich stark limitierend auf die erzielbare Schwingkreisgüte auswirken. Durch geeignete Maßnahmen konnten diese Verluste reduziert werden.

## Abstract

The PENTATRAP experiment located at the Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg deals with the high-precision mass ratio measurement of highly-charged, stable and long-lived ions. For that purpose a setup with five separate Penning traps is used, which allows simultaneous measurements in multiple traps. The Fourier-transform ion cyclotron resonance method is used for the non-destructive determination of the axial frequency of the trapped ions. This method uses the voltage drop over a parallel resonant circuit caused by the image current induced in the trap electrodes. The design, the manufacturing and the test of electronic circuits for the adjustment of the tank circuit's quality factor was carried out in the context of this bachelor thesis. Several concepts for the discrete and continuous adjustment were created for that. For a realistic simulation of the conditions inside the experiment, these concepts were tested at about 4 K inside a cold head. In the course of those tests a concept with a field effect transistor as variable resistor appeared most suitable, due to the continuous adjustability. Furthermore it showed that the losses in the manufactured boards were strongly limiting the achievable quality factor. With suitable modifications these losses were reduced.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>ii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>iii</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Penningfallen-Massenspektrometrie</b>	<b>3</b>
2.1. Die ideale Penningfalle . . . . .	3
2.2. Massenbestimmung in einer Penningfalle . . . . .	6
2.3. PENTATRAP . . . . .	6
2.4. Detektionsprinzip . . . . .	7
2.4.1. Aufbau . . . . .	8
2.4.2. Dip-Methode . . . . .	9
2.5. Gütefaktor . . . . .	10
<b>3. Realisierung der Einstellelektronik</b>	<b>14</b>
3.1. Anforderungen . . . . .	14
3.2. Güteschalter . . . . .	14
3.3. Weitere Konzepte . . . . .	18
<b>4. Messungen und Ergebnisse</b>	<b>19</b>
4.1. Messaufbau . . . . .	19
4.2. Charakterisierung der Resonatorspulen . . . . .	20
4.3. Test des Güteschalters . . . . .	21
4.4. Limitierende Einflüsse . . . . .	23
4.5. Test der weiteren Einstellschaltungen . . . . .	24
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>30</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>35</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1. Trajektorie eines Ions innerhalb einer idealen Penningfalle . . . . .	4
2.2. Penningfalle aus zylindrischen Elektroden . . . . .	4
2.3. Experimenteller Aufbau des PENTATRAP-Experiments . . . . .	7
2.4. Schematische Darstellung des Detektionssystems . . . . .	8
2.5. Ersatzschaltbild des Detektionssystems mit kaltem Ion . . . . .	9
2.6. Resonanzkurven für verschiedene Gütewerte . . . . .	11
3.1. Schaltbild des Güteschalters . . . . .	15
3.2. Simulationsmodell des Güteschalters in LTspice . . . . .	16
3.3. Simulation der Resonanzkurven mit LTspice . . . . .	17
3.4. Fotografie des Güteschalters . . . . .	17
4.1. Schnitt durch das CAD-Modell des Resonatorengehäuses . . . . .	19
4.2. Messdaten des Güteschalters . . . . .	22
4.3. Messdaten der Einstellschaltung mit FET . . . . .	25
4.4. Messdaten der Einstellschaltung mit FET und Schalter . . . . .	26
4.5. Messdaten der Hysterese bei der Einstellschaltung mit Heizwiderstand	27
4.6. Messdaten der Einstellschaltung mit Heizwiderstand 1 . . . . .	28
4.7. Messdaten der Einstellschaltung mit Heizwiderstand 2 . . . . .	29
A.1. Schaltbild des Doppelschalters in EAGLE . . . . .	35
A.2. Schaltbild der Einstellschaltung mit FET in EAGLE . . . . .	35
A.3. Schaltbild der Einstellschaltung mit FET und Schalter in EAGLE .	36
A.4. Fotografie des Güteschalters mit dem Platinenmaterial Taconic TLC30	36
A.5. Fotografie des Doppelschalters . . . . .	36
A.6. Fotografie der Einstellschaltung mit FET . . . . .	37
A.7. Fotografie der Einstellschaltung mit FET und Schalter . . . . .	37
A.8. Fotografie der Einstellschaltung mit Heizwiderstand . . . . .	37
A.9. Fotografie des geöffneten Resonatorengehäuses . . . . .	38
A.10. Fotografie des Resonatorengehäuses mit Schaltungen . . . . .	38
A.11. Fotografie des Kaltkopfes mit eingebautem Resonatorengehäuse . . .	39

## Tabellenverzeichnis

2.1. Parameter für die Abschätzung der Güte . . . . .	13
2.2. Abschätzung des notwendigen Einstellbereichs der Güte . . . . .	13
4.1. Charakterisierung der Resonatorspulen . . . . .	21
4.2. Güteverlust durch die Einstellschaltungen . . . . .	22
4.3. Messdaten des Doppelschalters . . . . .	24
5.1. Vergleich der Konzepte . . . . .	30



# 1. Einleitung

Die 1905 von Albert Einstein formulierte Äquivalenz von Energie und Masse,  $E = mc^2$ , macht es möglich, Massenmessungen in Energiemessungen umzuwandeln [1]. Dies ist ein Grund, warum Massenmessungen heute in vielen Teilgebieten der Physik eine wichtige Rolle spielen. In der Atom- und Kernphysik können sie zur Bestimmung von Bindungsenergien in der Elektronenhülle und dem Atomkern verwendet werden und in der Astrophysik nutzt man Massenmessungen, um die stellare Nukleosynthese besser zu verstehen. Des Weiteren können fundamentale Theorien, wie die Quantenelektrodynamik (QED) oder das CPT-Theorem<sup>1</sup>, welches die Äquivalenz von Materie und Antimaterie vorhersagt, mit hinreichend genauen Massenmessungen geprüft werden [2]. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Einsatzgebiet sind relative Genauigkeiten von  $\delta m/m = 10^{-5}$  bis unter  $10^{-11}$  notwendig, um zu aktuellen Forschungsfragen beizutragen [2][3]. Die gegenwärtig genaueste Methode zur Bestimmung der Masse geladener Teilchen ist die Messung der Zyklotronfrequenz in Penningfallen.

Die erste Penningfalle wurde von Hans Georg Dehmelt entwickelt, der für seine Erfindung 1989 den Physik-Nobelpreis erhielt. Dehmelt benannte seine Falle nach Frans Michel Penning, der seine Arbeit inspirierte [4]. Es gibt mehrere Gründe für die besondere Eignung von Penningfallen für Massenmessungen. Durch das Einfangen geladener Teilchen können Messungen in Penningfallen über einen langen Zeitraum durchgeführt werden, wodurch statistische Fehler minimiert werden. Außerdem lassen sich Frequenzen, wie die Zyklotronfrequenz, mit besonders hoher Präzision bestimmen.

Das Penningfallen-Massenspektrometer PENTATRAP am Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg strebt Massenverhältnismessungen schwerer, hochgeladener Ionen mit einer relativen Präzision von  $\delta m/m \leq 10^{-11}$  an [5][6]. Für die Detektion verwendet PENTATRAP dabei die Fourier-Transformations-Ionenzyklotronresonanz Methode (FT-ICR). Mit der angestrebten Präzision möchte man beispielsweise die Gültigkeit der QED in starken Feldern und die spezielle Relativitätstheorie testen sowie zur Massenbestimmung der Neutrinos beitragen [6].

Um den aktuellen Versuchsaufbau von PENTATRAP zu verbessern, soll die Güte der Detektionsschwingkreise einstellbar gemacht werden. Das Thema dieser Bachelorarbeit ist daher die Entwicklung elektronischer Schaltungen zur Abstimmung des Gütefaktors.

---

<sup>1</sup>Charge, Parity, Time

In den folgenden Kapiteln wird die ideale Penningfalle erklärt und weitere Informationen über PENTATRAP werden gegeben. Die Nachweismethode sowie die Rolle des Gütefaktors werden diskutiert. Daraufhin werden Konzepte für die Einstellschaltungen dargestellt und die dazugehörigen Testergebnisse präsentiert. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick über mögliche Verbesserungsmaßnahmen wird gegeben.



## 2. Penningfallen-Massenspektrometrie

Penningfallen machen es möglich, Ionenmassen durch die Messung der Zyklotronfrequenz zu bestimmen. Diese indirekte Form der Messung ermöglicht besonders hohe Messgenauigkeiten. Im Folgenden wird beschrieben, wie diese Methode der Massenbestimmung funktioniert.

### 2.1. Die ideale Penningfalle

Ein geladenes Teilchen innerhalb eines elektromagnetischen Feldes erfährt die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

mit der elektrischen Ladung des Teilchens  $q$ , der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$ , der Teilchengeschwindigkeit  $\vec{v}$  und der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ . In einem reinen, homogenen Magnetfeld mit der Anfangsbedingung  $\vec{v} \perp \vec{B}$  zwingt die Lorentzkraft das Teilchen auf eine kreisförmige Trajektorie. Diese Bewegung besitzt eine charakteristische Frequenz, die Zyklotronfrequenz:

$$\omega_c = \frac{q}{m} \cdot B, \quad (2)$$

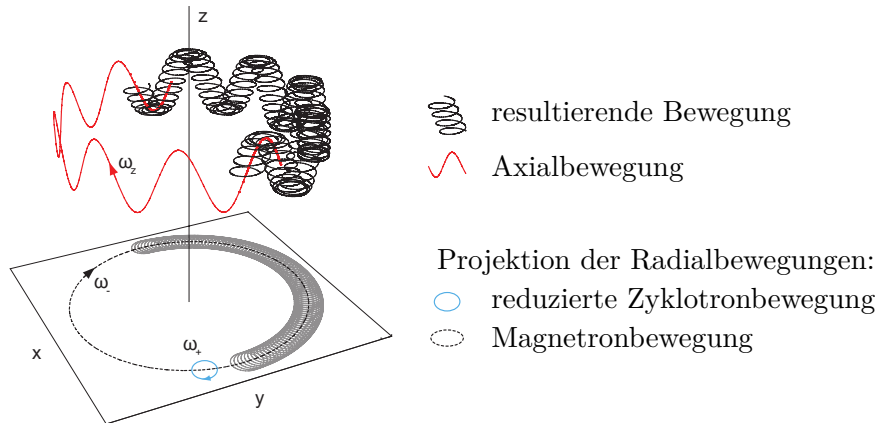
wobei  $m$  die Masse des geladenen Teilchens darstellt.

Laut dem Earnshaw-Theorem ist es nicht möglich, geladene Teilchen mit einem reinen, statischen B- oder E-Feld in einem stabilen Gleichgewicht zu halten [7]. Das Prinzip einer Penningfalle basiert deshalb auf der Superposition eines homogenen Magnetfeldes und eines elektrischen Quadrupolfeldes. Das Magnetfeld schränkt die Teilchenbewegung radial zu den Magnetfeldlinien ein und das elektrische Feld beschränkt sie in axialer Richtung, sodass das Teilchen vollständig gefangen ist. Die Notwendigkeit eines elektrischen Quadrupolfeldes im Falle einer Penningfalle ergibt sich dabei aus dem Gaußschen Gesetz. Die resultierende Bewegung des Teilchens innerhalb einer Penningfalle ist eine Überlagerung von drei Eigenbewegungen. Diese sind die reduzierte Zyklotronbewegung, die Magnetronbewegung und die Axialbewegung. Die gesamte Bewegung ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Jede der Eigenbewegungen besitzt eine charakteristische Frequenz. Die Axialbewegung, die eine harmonische Oszillation in der axialen  $z$ -Richtung darstellt, hat die dazugehörige axiale Frequenz [8]

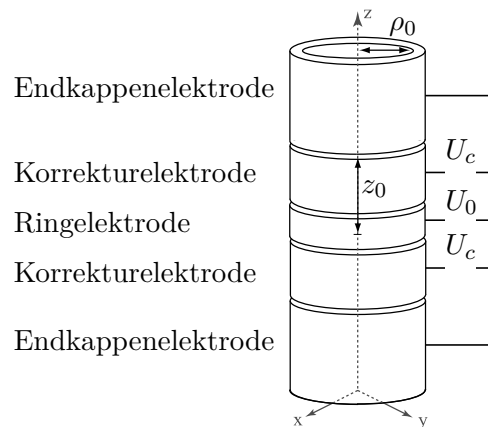
$$\omega_z = \sqrt{\frac{q \cdot U_0}{m \cdot d_0^2}} \quad (3)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{1}{2}(z_0^2 + \frac{\rho_0^2}{2})}. \quad (4)$$

Hierbei ist  $U_0$  die Spannung an den Fallenelektroden und  $d_0$  eine charakteristische, geometrische Größe der Falle. Ein typischer Aufbau einer Penningfalle ist in Abbildung 2.2 zu sehen.



**Abbildung 2.1:** Trajektorie eines Ions innerhalb einer idealen Penningfalle. Die resultierende Bewegung setzt sich aus drei Eigenbewegungen zusammen: die reduzierte Zyklotronbewegung, die Magnetronbewegung und die Axialbewegung. (modifiziert aus [9])



**Abbildung 2.2:** Penningfalle aus zylindrischen Elektroden. Üblicherweise bestehen Penningfallen aus fünf zylindrischen Ringelektroden. Die Endkappenelektroden erzeugen zusammen mit der zentralen Ringelektrode das Quadrupolfeld. Über Korrektorelektroden können Anharmonizitäten korrigiert werden. (modifiziert aus [6])

Die anderen beiden Frequenzen hängen von der Zyklotronfrequenz und der axialen Frequenz wie folgt ab:

$$\omega_- = \frac{\omega_c}{2} - \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}} \quad (5)$$

$$\omega_+ = \frac{\omega_c}{2} + \sqrt{\frac{\omega_c^2}{4} - \frac{\omega_z^2}{2}}. \quad (6)$$

Dabei ist  $\omega_-$  die Magnetronfrequenz und  $\omega_+$  die modifizierte Zyklotronfrequenz. Durch die Verbindung beider Gleichungen kann die Zyklotronfrequenz in einer idealen Penningfalle berechnet werden:

$$\omega_c = \omega_+ + \omega_- . \quad (7)$$

Da die Magnetronfrequenz und die modifizierte Zyklotronfrequenz reell sein müssen, folgt aus den Gleichungen (5) und (6) das Stabilitätskriterium

$$U_0 < \frac{B^2 d_0^2 q}{2m} . \quad (8)$$

Um Ionen dauerhaft zu fangen, dürfen die Stärken der jeweiligen Felder somit nicht beliebig gewählt werden. Bei der Realisierung einer Penningfalle müssen darüber hinaus noch weitere Effekte berücksichtigt werden.

Reale Penningfallen besitzen im Vergleich zur idealen Penningfalle Unvollkommenheiten, die zu Abweichungen von den genannten Gleichungen führen. Zu diesen Unvollkommenheiten gehören unter anderem Inhomogenitäten des B-Feldes, Abweichungen vom idealen elektrischen Quadrupolfeld, Ausrichtungsfehler beider Felder zueinander und Schwankungen der Elektrodenspannung. Aber auch Umwelteinflüsse wie Temperatur- und Druckschwankungen, Störfelder und mechanische Erschütterungen müssen für eine hochpräzise Bestimmung von Ionenmassen kontrolliert werden. Im Folgenden kann nicht detailliert auf diese Effekte eingegangen werden. Weiterführende Informationen sind beispielsweise in [10] zu finden.

Zur möglichst exakten Bestimmung der Zyklotronfrequenz in einer realen Penningfalle werden alle drei Eigenfrequenzen gemessen. Mit diesen Frequenzen kann die Zyklotronfrequenz durch das Brown-Gabrielse-Invarianztheorem berechnet werden [10]:

$$\omega_c^2 = \omega_z^2 + \omega_+^2 + \omega_-^2 . \quad (9)$$

Die Verwendung dieser Gleichung reduziert, im Vergleich zu anderen Berechnungsmöglichkeiten wie unter anderem Gleichung (7), den Effekt von Ausrichtungsfehlern zwischen dem E- und B-Feld auf die gemessene Zyklotronfrequenz [10].

## 2.2. Massenbestimmung in einer Penningfalle

Die Grundidee der Penningfallen-Massenspektrometrie ist die Messung der Zyklotronfrequenz eines Ions innerhalb einer Penningfalle. Theoretisch kann dann die Masse bei Kenntnis der magnetischen Flußdichte und des Ladungszustands des Ions mit Gleichung (2) berechnet werden. Da Magnetfeldschwankungen die Messgenauigkeit der Zyklotronfrequenz beschränken, werden Massenverhältnismessungen durchgeführt. Die Zyklotronfrequenzen von zwei verschiedenen Ionen werden im Wechsel in derselben Falle ermittelt. Aus dem Verlauf der gemessenen Zyklotronfrequenzen des Referenzions kann durch Interpolation die magnetische Flussdichte zum Messzeitpunkt des Ions von Interesse ermittelt werden. Für das Massenverhältnis gilt dann:

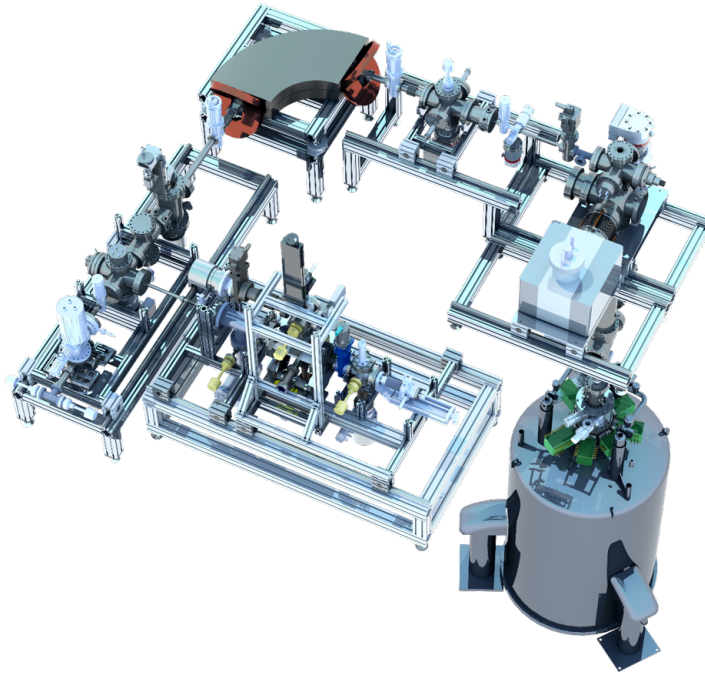
$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{q_1}{q_2} \cdot \frac{B(t_1)}{B(t_2)} \cdot \frac{\omega_{c,2}(t_2)}{\omega_{c,1}(t_1)}. \quad (10)$$

Wenn eine der gemessenen Ionenmassen bekannt ist, kann aus dem Massenverhältnis auch direkt die Masse des zweiten Ions bestimmt werden. Idealerweise verwendet man für diesen Zweck das Kohlenstoffisotop  $^{12}\text{C}$ , da aus Definitionsgründen dessen Masse exakt bekannt ist und als Fehler lediglich die Unsicherheit in den Bindungsenergien der fehlenden Elektronen berücksichtigt werden muss.

Prinzipiell wären auch zeitgleiche Messungen zweier Ionen in derselben Falle möglich. Dadurch würde sich der Einfluss der magnetischen Flussdichte vollständig kürzen. Allerdings führt diese Methode aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung der Ionen zu deutlich höheren systematischen Messabweichungen [6].

## 2.3. PENTATRAP

Der experimentelle Aufbau des PENTATRAP-Experiments ist in Abbildung 2.3 zu sehen. Das Kernstück des Aufbaus ist der aus fünf einzelnen Penningfallen bestehende Fallenturm [11]. Durch die fünf Fallen soll es möglich werden, Messsequenzen ablaufen zu lassen, die eine besonders hohe Messgenauigkeit erzielen. Die einzelnen Penningfallen sind aus zylindrischen Ringelektroden aufgebaut. Diese sind deutlich präziser herstellbar als hyperboloide Elektrodengeometrien und ermöglichen ein einfacheres Laden der Fallen. Der Fallenturm befindet sich zusammen mit der Detektionselektronik innerhalb des supraleitenden 7-Tesla-Magneten, der das homogene Magnetfeld für die Penningfallen erzeugt. Der Magnet muss zur Erhaltung der Supraleitung dauerhaft gekühlt werden. Dies geschieht mit flüssigem Helium, welches eine Temperatur von 4,2 K besitzt. Um den Bedarf an Helium zu reduzieren, wird zusätzlich mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Die zu untersuchenden Ionen werden



**Abbildung 2.3:** Experimenteller Aufbau des PENTATRAP-Experiments. Der aus fünf Penningfallen bestehende Fallenturm befindet sich innerhalb des supraleitenden 7-Tesla-Magneten (rechts unten). Über ein vertikal verlaufendes Strahlrohr können Ionen aus einer EBIT zu den Fallen transportiert werden.

ein Stockwerk oberhalb des Magneten in einer EBIT<sup>2</sup> erzeugt [12]. Das gewünschte Ladungs-zu-Masse-Verhältnis kann mit einem Dipolmagneten als Massenseparator ausgewählt werden. Der Transport der Ionen zu den Fallen erfolgt durch ein Strahlrohr.

## 2.4. Detektionsprinzip

Da sich geladene Teilchen innerhalb einer Penningfalle bewegen, induzieren sie Spiegelströme in den Fallenelektroden. Diese Spiegelströme können zur nicht-destruktiven Detektion der Ionen und ihrer Bewegungsfrequenzen genutzt werden. Nicht-destruktiv bedeutet dabei, dass durch den Messvorgang das gefangene Ion nicht verloren geht. Neben der nicht-destruktiven FT-ICR-Methode gibt es beispielsweise auch die destruktive ToF-ICR-Methode<sup>3</sup> [13]. Im Folgenden wird das auf FT-ICR basierende Nachweissystem von PENTATRAP für die axiale Frequenz erläutert.

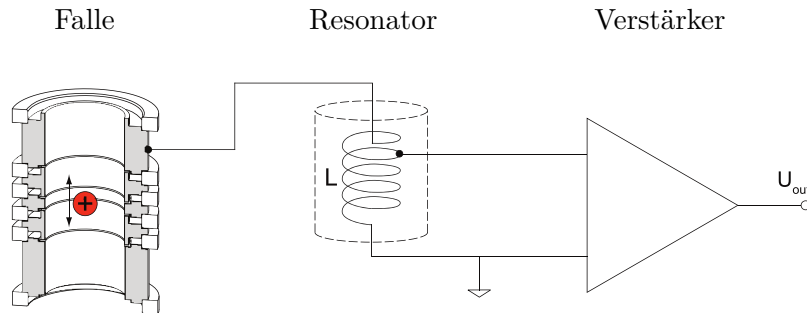
---

<sup>2</sup>Electron Beam Ion Trap

<sup>3</sup>Time of Flight Ion Cyclotron Resonance; Flugzeit-Nachweismethode

### 2.4.1. Aufbau

Das Nachweissystem besteht aus drei Hauptkomponenten, die in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt sind. Diese Komponenten sind die Fallenelektroden (links), eine supraleitende Resonatorspule (mittig) und mehrere Verstärker (rechts).



**Abbildung 2.4:** Schematische Darstellung des Detektionssystems.

Das Nachweissystem besteht aus drei Komponenten: die Fallenelektroden (links), eine supraleitende Resonatorspule (mittig) und mehrere Verstärker (rechts). (modifiziert aus [9])

Die Induktivität des Resonators bildet zusammen mit der Kapazität der Fallenelektroden und diversen parasitären Kapazitäten einen parallelen RLC-Schwingkreis. Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises ist durch die Thomsonsche Schwingungsgleichung gegeben:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (11)$$

Dabei ist  $L$  die Induktivität und  $C$  die Kapazität.

Zur Spiegelstromdetektion wird der Spannungsabfall über der Impedanz dieses Schwingkreises gemessen. Da das entstehende Signal des Spiegelstroms trotz hoher Impedanz äußerst schwach ist, müssen zusätzliche Verstärker verwendet werden. Einer dieser Verstärker befindet sich bei PENTATRAP im kryogenen Bereich des Experiments, um das Verstärkerrauschen zu minimieren. Zusätzlich existieren aber auch Raumtemperaturverstärker, die das vorverstärkte Signal weiterverstärken.

Für die Resonatorspulen des axialen Nachweissystems wird der Supraleiter Niob-Titan (NbTi) verwendet. Dieser besitzt eine Sprungtemperatur von ca. 10 K. Des Weiteren wurde eine toroidale Geometrie gewählt, die die Entstehung magnetischer Streufelder verringert, wodurch Verluste im Resonatorengehäuse reduziert werden. Ein Ende der Spule wird an die Falle angeschlossen. Dieses Ende wird auch als heißes Ende bezeichnet. Das geerdete Ende der Spule heißt im Gegensatz dazu kaltes Ende. Das Messsignal wird in der Regel nicht direkt zwischen heißem und kaltem Ende

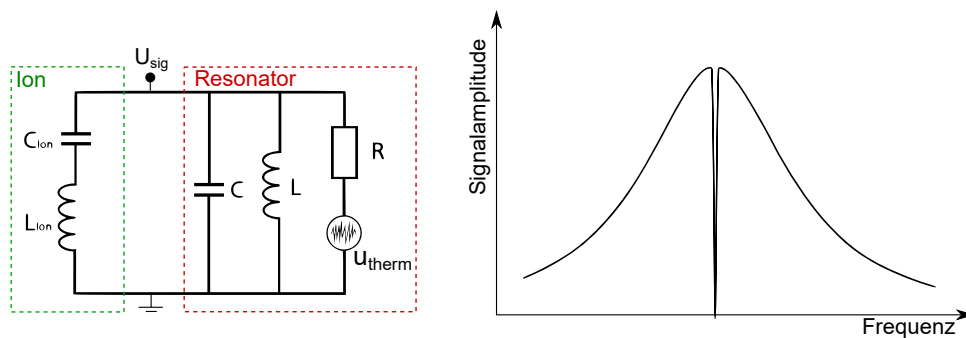
abgegriffen. Stattdessen wird ein dritter Abgriff, der sogenannte Tap, mit der Spule verbunden. Dadurch wirkt die Spule als Spartransformator mit Windungsverhältnis  $\frac{n_2}{n_1}$ , der Impedanzen transformiert. Dabei ist  $n_1$  die Gesamtanzahl an Windungen und  $n_2$  die Anzahl an Windungen zwischen Tap und kaltem Ende. Durch eine geeignete Wahl des Windungsverhältnisses kann dadurch das Rauschen minimiert werden [14]. Eine detailliertere Beschreibung des bei PENTATRAP verwendeten Nachweissystems ist in [15] zu finden.

### 2.4.2. Dip-Methode

Aufgrund der thermischen Bewegung von Ladungsträgern in den elektronischen Komponenten der Detektionsschaltung, liegt eine unvermeidbare, statistische Rauschspannung vor. Der Effektivwert dieser Spannung kann mit der Nyquist-Formel abgeschätzt werden [16]:

$$U_{R,eff} = \sqrt{4k_B T R \Delta f}. \quad (12)$$

In dieser Formel beschreibt  $k_B$  die Boltzmann-Konstante,  $T$  die Temperatur,  $R$  den ohmschen Widerstand und  $\Delta f$  die beobachtbare Bandbreite. Diese Rauschspannung sorgt für eine breitbandige Anregung des Schwingkreises. Daraus folgt, dass auch ohne zusätzliche Anregungsquellen eine Resonanzkurve am Ausgang der Messschaltung beobachtbar ist. Die Breite der Resonanzkurve wird durch die Güte beeinflusst. Darauf wird im folgenden Kapitel detaillierter eingegangen.



**Abbildung 2.5:** Links: Ersatzschaltbild des Detektionssystems mit kaltem Ion. Rechts: Schematische Darstellung des dazugehörigen Dips. Ein heißes Ion ist in der Fourier-Transformation des Messsignals als Peak zu sehen. Durch den Thermalisierungsprozess wird aus dem Peak ein Dip. Das in der Falle gefangene Ion verhält sich dann wie ein LC-Serienschwingkreis. (entnommen aus [17])

Das Signal eines nicht-thermalisierten Ions zeigt sich in der Fourier-Transformation

des Messsignals als ein Peak. Durch den induzierten Spiegelstrom interagiert das heiße Ion mit dem Schwingkreis, wodurch es zur Energiedissipation kommt. Das Ion gibt durch diese Wechselwirkung so lange Energie an das Detektionssystem ab, bis es sich im thermischen Gleichgewicht mit dem Schwingkreis befindet. Dieser Prozess besitzt eine Zeitskala, die durch die Khlzeitkonstante

$$\tau_z = \frac{m}{\operatorname{Re}(Z(\omega))} \frac{D_z^2}{q^2} \quad (13)$$

beschrieben wird [9]. Der Parameter  $D_z$  ist dabei der effektive Elektrodenabstand in z-Richtung. Nach dem Thermalisierungsprozess ist das Ion im Messsignal als Dip sichtbar. Das in der Falle gefangene, kalte Ion lässt sich im Ersatzschaltbild des Nachweissystems (siehe Abbildung 2.5) durch einen Serienschwingkreis darstellen [9]. Bei der Resonanzfrequenz des Ions, die der axialen Frequenz entspricht, kommt es zu einem Kurzschluss des Detektionsschwingkreises, da die Impedanz des Serienschwingkreises verschwindet. Dadurch fällt die Signalamplitude auf 0 ab.

## 2.5. Gütefaktor

Der Gütefaktor ist ein Maß für den Energieverlust eines schwingfähigen Systems und ist wie folgt definiert:

$$Q = 2\pi \frac{E_0}{\Delta E} . \quad (14)$$

Dabei ist  $E_0$  die zu Beginn einer Schwingungsperiode gespeicherte Energie des betrachteten Systems und  $\Delta E$  die Energiemenge, die innerhalb einer Schwingungsperiode in thermische Energie umgewandelt wird. Die Verluste, die den Gütefaktor des Schwingkreises senken, setzen sich aus Leitungsverlusten, Verlusten im Resonatorengehäuse und dielektrischen Verlusten zusammen [15]. Durch den Vergleich der Energie, die im elektrischen und magnetischen Feld des RLC-Schwingkreises gespeichert ist, mit der Verlustleistung am effektiven Parallelwiderstand, kann die Güte des Detektionsschwingkreises ermittelt werden. Für den Gütewert folgt [9]:

$$Q = \frac{R_p}{\omega_0 \cdot L} = \omega_0 \cdot R_p \cdot C \propto R_p . \quad (15)$$

Der Gütefaktor ist somit proportional zu dem effektiven Parallelwiderstand  $R_p$  der Detektionselektronik.

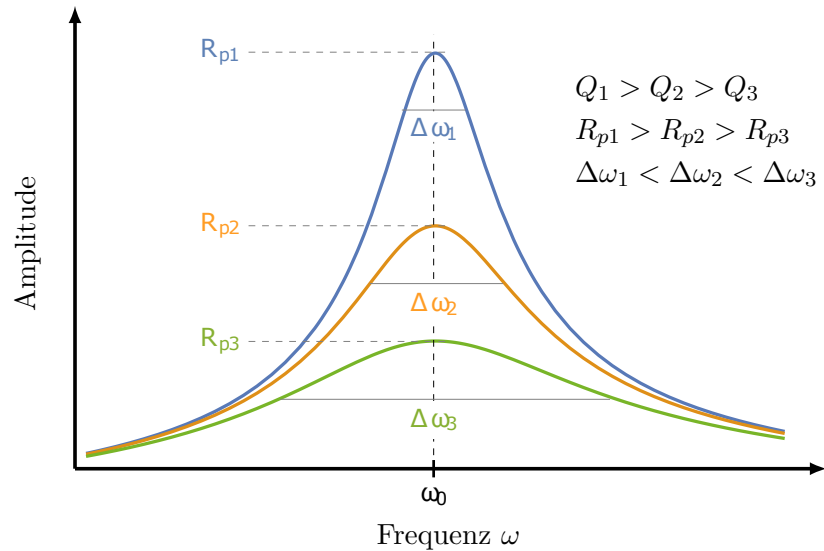
Zur experimentellen Bestimmung der Güte eines Schwingkreises wird der Frequenzgang ermittelt. Dafür kann ein Netzwerkanalysator verwendet werden. Durch die Messung des Frequenzgangs und somit auch der Messung der Resonanzkurve, kann



die Güte durch folgende Gleichung berechnet werden [9]:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{-3dB}} \quad (16)$$

Dabei ist  $\Delta\omega_{-3dB}$  die Breite des Frequenzintervalls bei dem die Amplitude um 3dB vom Maximalwert abgefallen ist. Abbildung 2.6 zeigt mehrere Resonanzkurven für verschiedene Gütewerte.



**Abbildung 2.6:** Resonanzkurven für verschiedene Gütewerte.

Zur experimentellen Bestimmung der Schwingkreisgüte wird die -3dB-Breite  $\Delta\omega_{-3dB}$  gemessen. Diese ist antiproportional zum Gütewert. (modifiziert aus [15])

Der Gütefaktor hängt außerdem mit einer wichtigen Zeitskala des Experiments zusammen: Die Zeitskala der Energiedissipation, mit der ein nicht-thermalisiertes Ion in der Falle seine Energie abgibt. Sie hängt laut Gleichung (13) von der Gesamtimpedanz des Schwingkreises ab. Wenn die axiale Frequenz des Ions mit der Resonanzfrequenz des Schwingkreises übereinstimmt, vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\tau_z = \frac{m}{R_p} \frac{D_z^2}{q^2} \propto \frac{1}{Q}. \quad (17)$$

Die Schwingkreisgüte ist somit antiproportional zur Kühlzeitkonstante. Das bedeutet, dass kurze Kühlzeiten durch eine hohe Güte erreichbar sind.

Der Hauptgrund, warum im Rahmen dieser Arbeit der Gütefaktor einstellbar gemacht werden soll, ist der Zusammenhang zwischen der Güte und der Dipbreite

bei der axialen Frequenzmessung:

$$\Delta\omega_{Dip} = \frac{R_p}{m} \frac{q^2}{D_z^2} \propto Q. \quad (18)$$

Die Dipbreite ist proportional zur Schwingkreisgüte [9]. Da für eine präzise Frequenzbestimmung ein möglichst schmaler Dip benötigt wird, resultiert die Notwendigkeit eines kleinen Gütefaktors. Andererseits bedeutet eine größere Dipbreite, dass eine geringere Frequenzauflösung der Fourier-Transformation benötigt wird, um dieselbe Anzahl an Messpunkten in einem Dip zu haben. Eine hohe Güte wirkt sich dadurch positiv auf die Messzeit aus. Es existiert somit ein optimaler Gütewert, der nicht für jedes Ion gleich ist. Dies motiviert die Verwendung einer Einstellschaltung für die Schwingkreisgüte.

Wie bereits in Gleichung (15) zu sehen war, ist die Güte abhängig vom effektiven Parallelwiderstand sowie von der Induktivität und Kapazität des Schwingkreises. Da es nicht wünschenswert ist, die Resonanzfrequenz für die Einstellung der Güte deutlich zu ändern, soll die Güteänderung durch die Variation des effektiven Parallelwiderstandes erfolgen.

Unter der Annahme, dass Ionen mit einer Masse und einem Ladungszustand zwischen  $C^{2+}$  und  $Pb^{81+}$  gemessen werden sollen, kann der notwendige Einstellbereich der Güte abgeschätzt werden. Die angestrebte Dipbreite wird dafür auf 2 Hz festgelegt, da sich dieser Wert bei bereits durchgeführten Messungen als guter Kompromiss zwischen Messdauer und Messgenauigkeit zeigte [18]. Aus den Gleichungen (15) und (18) folgt:

$$Q = \frac{\Delta\omega_{Dip} \cdot m \cdot D_z^2}{\omega_0 \cdot L \cdot q^2}. \quad (19)$$

Tabelle 2.1 zeigt die Werte, die zur Berechnung des angestrebten Gütefaktors verwendet wurden. In Tabelle 2.2 sind die berechneten Gütewerte dargestellt. Aus diesen Werten lässt sich ein Einstellbereich von ca. 250 bis 25000 abschätzen.

Parameter	Wert
Dipbreite $\Delta\nu_{Dip}$	2,0 Hz
Effektiver Elektrodenabstand $D_z$	8,1 mm
Resonanzfrequenz $\nu_0$	1,5 MHz
Spuleninduktivität $L$	0,7 mH

**Tabelle 2.1:** Parameter für die Abschätzung der Güte.

Zur Berechnung der Gütefaktoren wurde der effektive Elektrodenabstand aus [9] entnommen. Die Werte für die Resonanzfrequenz und die Spuleninduktivität entstammen Testmessungen der verwendeten Resonatorspulen.

Ion	Gütefaktor
$^{207}\text{Pb}^{81+}$	255
$^{163}\text{Ho}^{30+}$ bzw. $^{163}\text{Dy}^{30+}$	1464
$^{187}\text{Re}^{30+}$ bzw. $^{187}\text{Os}^{30+}$	1680
$^{12}\text{C}^{6+}$	2694
$^{132}\text{Xe}^{17+}$	3692
$^{12}\text{C}^{3+}$	10778
$^{12}\text{C}^{2+}$	24250

**Tabelle 2.2:** Abschätzung des notwendigen Einstellbereichs der Güte.

Für einige der Ionen, welche in PENTATRAP gemessen werden sollen, wurde der angestrebte Gütefaktor berechnet. Als Referenz sind darüber hinaus einige Ladungszustände von Kohlenstoff aufgeführt. Aus den berechneten Gütewerten ergibt sich ein Einstellbereich von ca. 250 bis 25000.

## 3. Realisierung der Einstellelektronik

Basierend auf dem Güteschalter, der im Penningfallen-Experiment ALPHATRAP in Verwendung ist, wurden mehrere Konzepte ausgearbeitet, um die bei PENTATRAP vorliegenden Anforderungen zu erfüllen. In diesem Kapitel sollen zunächst die Anforderungen an die Einstellschaltungen dargestellt werden. Danach werden die Konzepte zur Güteeinstellung vorgestellt.

### 3.1. Anforderungen

Im PENTATRAP-Experiment soll die Güte der Detektionsschaltung einstellbar gemacht werden, um die Bestimmung der axialen Frequenz des Ions zu optimieren. Folgende Bedingungen sollten idealerweise von einer Einstellschaltung erfüllt werden:

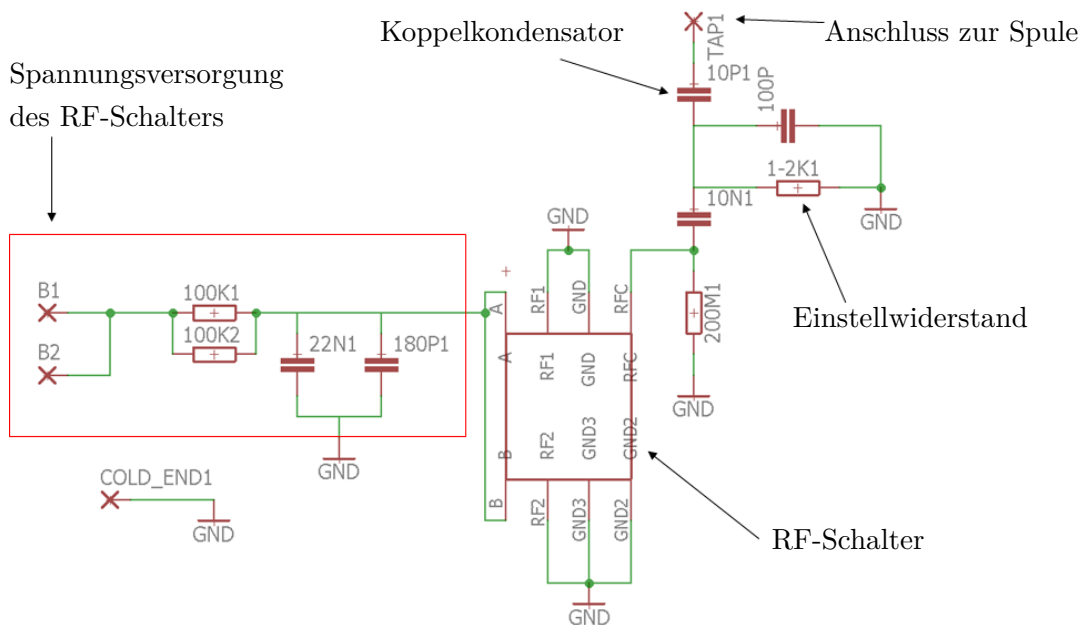
- Funktionstüchtigkeit und Zuverlässigkeit bei kryogenen Temperaturen
- Breiter Einstellbereich des Gütefaktors
- Stabilität des Gütewerts
- Wiederholgenauigkeit der Einstellung
- Niedriges Rauschen

Da die Elektronik im kryogenen Bereich (ca. 4,2 K) des Versuchsaufbaus platziert werden soll, muss die Funktionstüchtigkeit und die Zuverlässigkeit bei kryogenen Temperaturen sichergestellt werden. Der breite Einstellbereich der Güte wird gefordert, um Messungen an Ionen mit stark variierenden Ladungs-zu-Masse-Verhältnissen optimieren zu können. Idealerweise würde dieser Bereich das Intervall von 0 bis zur maximalen Güte der Resonatorspulen umfassen. Der eingestellte Gütewert soll über einen längeren Zeitraum stabil bleiben, um keine zusätzlichen systematischen Ungenauigkeiten zu erzeugen. Des Weiteren soll beim wiederholten Einstellen auch wieder der gleiche Gütewert erreicht werden können. Abschließend ist ein niedriges Eigenrauschen der Schaltung gewünscht, damit das Signal-Rausch-Verhältnis der gesamten Messung hoch bleibt und somit über wenige Einzelmessungen gemittelt werden muss.

### 3.2. Güteschalter

Als Grundlage für die Schaltungskonzepte wurde ein Güteschalter verwendet, der bereits im Penningfallen-Experiment ALPHATRAP eingesetzt wird. Der im CAD-

Programm<sup>4</sup> EAGLE [19] erstellte Schaltplan ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das Prinzip des Güteschalters basiert auf dem Hinzuschalten eines parallelen Widerstandes am Tap der Resonatorspule. Da der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung von Widerständen stets kleiner ist als der niedrigste Einzelwiderstand, wird durch diese Maßnahme der effektive Parallelwiderstand reduziert und die Güte sinkt. Durch einen RF-Schalter<sup>5</sup> kann zwischen zwei Schaltzuständen gewechselt werden. Im niederohmigen Zustand des RF-Schalters (wenige  $\Omega$ ) erhält man einen hohen Gütewert und im hochohmigen Zustand (mehrere  $M\Omega$ ) erhält man einen niedrigen Gütewert. Der hohe Gütewert wird dabei maßgeblich von dem Widerstand des RF-Schalters im niederohmigen Zustand beeinflusst. Idealerweise wäre dieser Widerstand  $0\ \Omega$  und würde somit die Schwingkreisgüte gar nicht ändern. Der niedrige Gütewert kann über einen ausgewählten Widerstand (rechts oben) eingestellt werden.



**Abbildung 3.1:** Schaltbild des Güteschalters (erstellt mit EAGLE).

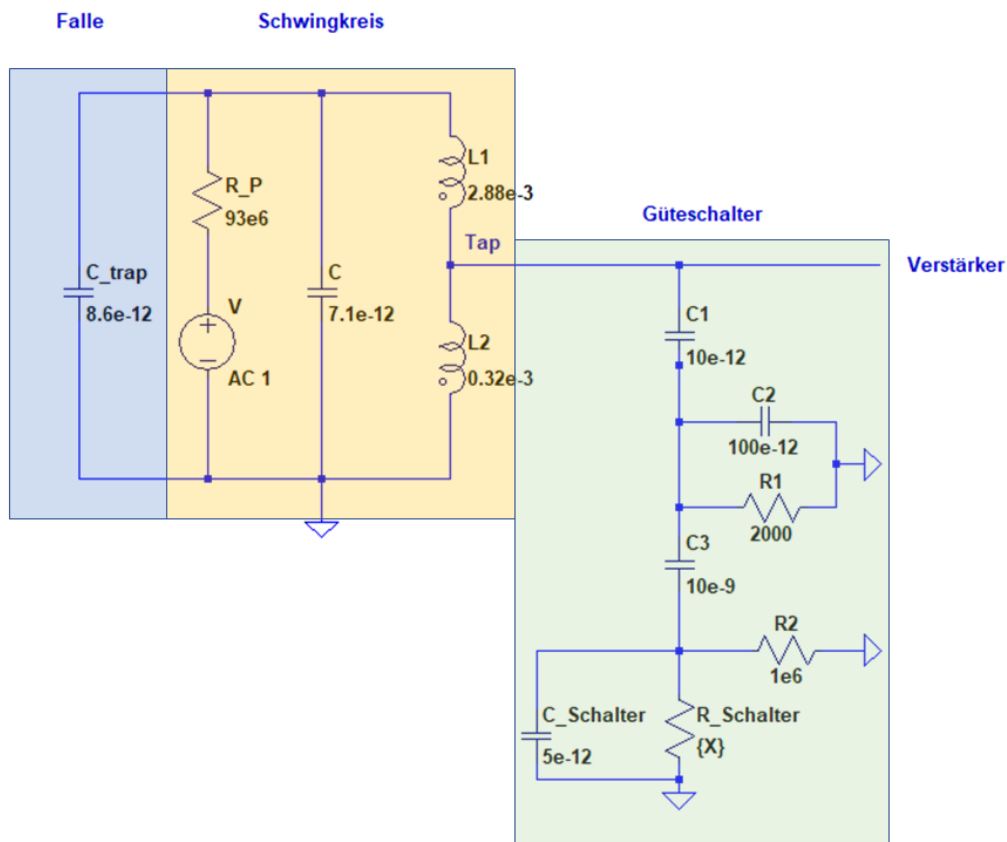
Mit dem Güteschalter wird ein zusätzlicher Parallelwiderstand eingeführt. Je nach Schaltzustand des RF-Schalters kann zwischen ca.  $2\ \Omega$  (abhängig vom verwendeten RF-Schalter) und einem gewählten Widerstandswert gewechselt werden.

Aufgrund der Komplexität des Güteschalters lässt sich die Gesamtimpedanz nicht ohne stark vereinfachende Annahmen in einem kompakten Ausdruck darstellen. Für

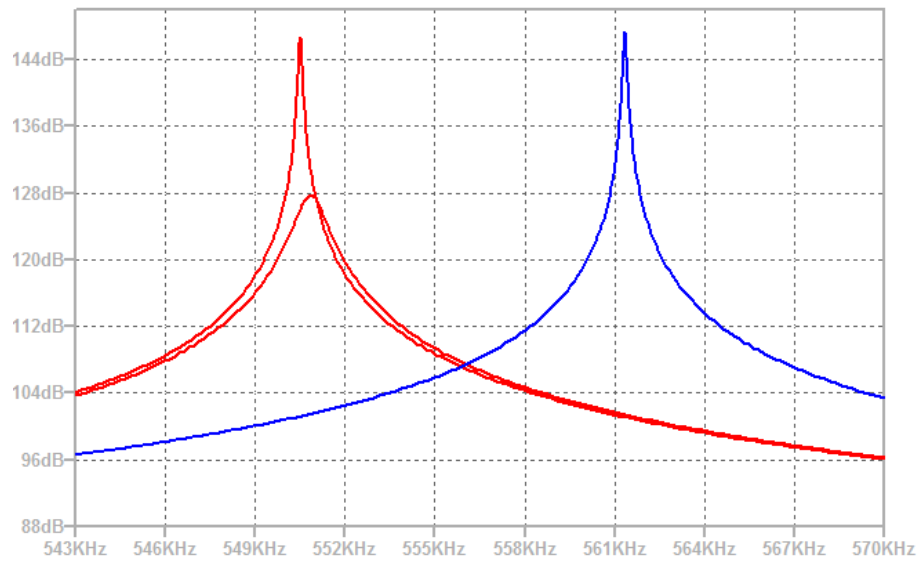
<sup>4</sup>Computer-Aided Design

<sup>5</sup>Radio-Frequency-Schalter

eine vorläufige Abschätzung wurde deshalb eine Simulation der Schaltung mit dem Programm LTspice [20] durchgeführt (Abbildungen 3.2 und 3.3). Man erkennt in der Simulation die deutliche Güteänderung durch das Schalten des Güteschalters. Darüber hinaus ist eine Verschiebung der Resonanzfrequenz zu erkennen, die durch die Kapazität der Koppelkondensatoren erzeugt wird. Da sich durch die Verwendung des Güteschalters die Gesamtinduktivität des Nachweissystems kaum ändert, spielt für die Resonanzfrequenz ausschließlich die Kapazität eine Rolle. Die beiden Resonanzkurven mit Güteschalter, die in rot dargestellt sind, besitzen dabei eine ähnliche Resonanzfrequenz, da die Koppelkapazität  $C_1$  die Gesamtkapazität des Güteschalters dominiert und durch das Schalten unverändert bleibt.

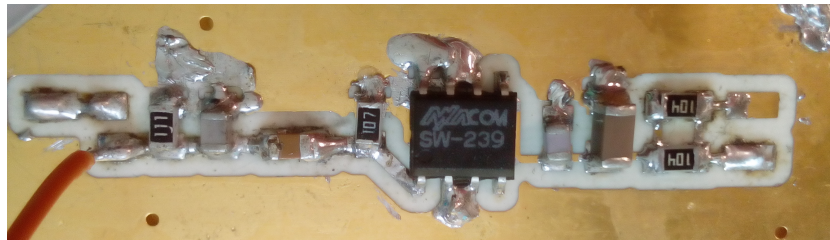


**Abbildung 3.2:** Simulationsmodell des Güteschalters in LTspice. Die Parameter des Schwingkreises entstammen [9]. Die Parameter des Güteschalters wurden für die Simulation von ALPHATRAP übernommen.



**Abbildung 3.3:** Simulation der Resonanzkurven mit LTspice.  
 Rot: Resonanzkurven der beiden Zustände des Güteschalters  
 Blau: Resonanzkurve ohne Güteschalter

Der Güteschalter wurde in SMD-Bauweise<sup>6</sup> realisiert. Dies ermöglicht eine geringere Baugröße und es werden keine Durchsteckbohrungen benötigt. Darüber hinaus sind die Hochfrequenzeigenschaften von SMD-Schaltungen in der Regel besser, da die Leiterbahnen kürzer gehalten werden können.



**Abbildung 3.4:** Fotografie des Güteschalters.  
 Der Güteschalter wurde in SMD-Bauweise ausgeführt. Die Platine besteht aus dem verlustarmen Rogers 4350B mit vergoldeter Oberfläche.

Für die Auswahl des Platinenmaterials spielten die dielektrischen Verluste eine maßgebliche Rolle. Deshalb wurde das verlustarme Rogers 4350B gewählt. Dabei handelt es sich um einen keramischen Verbundwerkstoff, der ähnliche elektrische

<sup>6</sup>Surface-Mounted Device

Eigenschaften wie PTFE<sup>7</sup> aufweist. Als Korrosionsschutz wurde die Platine chemisch vergoldet. Die bestückte Platine des Güteschalters ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

Als RF-Schalter wurde der SW-239 von MACOM [21] verwendet. Dieser Schalter basiert auf dem Halbleiter Galliumarsenid (GaAs) und wurde bereits auf seine Tauglichkeit im Tieftemperaturbereich getestet [22].

### 3.3. Weitere Konzepte

Der beschriebene Güteschalter wurde bereits getestet und wird aktuell auch aktiv im ALPHATRAP-Experiment verwendet [22]. Die einzige Problematik des Schalters ist die geringe Flexibilität, da nur zwei diskrete Gütewerte einstellbar sind.

Eine Möglichkeit zur Erweiterung des Einstellbereichs ist die Verwendung mehrerer Güteschalter. Die Anzahl der auswählbaren Gütewerte ist dabei  $N = 2^S$ , wobei S die Anzahl der verwendeten Schalter ist. Für einen aus zwei Güteschaltern bestehenden Doppelschalter können vier verschiedene Gütewerte eingestellt werden. Bei einer geeigneten Auswahl der Widerstände kann dadurch bereits ein breiter Gütebereich abgedeckt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung eines Feldeffekttransistors (FET) als steuerbaren Widerstand. Über die Gate-Source-Spannung lässt sich dabei der Widerstand der Drain-Source-Strecke variieren. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Einstellbarkeit der Güte. Die Umsetzung dieses Konzepts kann mit und ohne zusätzlichen Schalter zum Wegschalten des Transistors erfolgen. Aufgrund der Verfügbarkeit und Tieftemperaturtauglichkeit wurde für dieses Konzept der MESFET-Transistor<sup>8</sup> NEC NE25139 verwendet.

Zuletzt kann auch ein Heizwiderstand zur kontinuierlichen Einstellung verwendet werden [23]. Dieser wird thermisch an das kalte Ende der Resonatorspule gekoppelt. Durch den Wärmeeintrag gehen Teile der Spule von der supraleitenden Phase in die normalleitende Phase über. Dadurch entstehen Verluste, die die Güte senken. Über eine geeignete Wahl der Heizleistung kann somit der Gütefaktor eingestellt werden.

Die genannten Konzepte wurden zum Test des einstellbaren Gütebereichs ausgearbeitet. Die dazugehörigen Schaltpläne und Bilder der Platinen sind im Anhang enthalten (siehe Abbildungen A.1 - A.8). Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Messungen und die daraus resultierenden Ergebnisse näher erläutert.

---

<sup>7</sup>Polytetrafluorethylen; Teflon

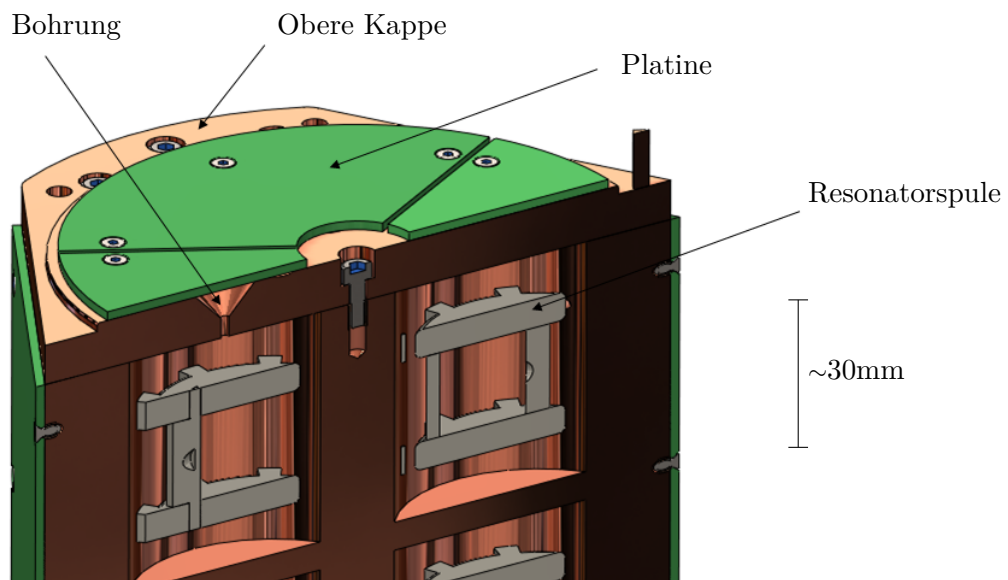
<sup>8</sup>Metal Semiconductor Field Effect Transistor



## 4. Messungen und Ergebnisse

Zum Test der verschiedenen Konzepte wurden die gefertigten Platinen jeweils mit einer Resonatorspule verbunden. Bei einer Temperatur von ca. 4 K wurde dann die Güte der jeweiligen Schwingkreise zusammen mit den Einstellschaltungen gemessen. Im Folgenden wird der Messaufbau näher erläutert und die Charakterisierung der verwendeten Resonatoren erklärt. Daraufhin werden die Messdaten und die limitierenden Faktoren der einzelnen Schaltungen dargestellt.

### 4.1. Messaufbau



**Abbildung 4.1:** Schnitt durch das CAD-Modell des Resonatorengehäuses. Das Resonatorengehäuse beinhaltet die Resonatorspulen (grau). Über Bohrungen in den Gehäusekappen können die Enden der Spulen mit den Platinen (grün) auf den Außenseiten der Gehäusekappen verbunden werden.

Der Messaufbau besteht aus dem Resonatorengehäuse, den Resonatorspulen, den zu testenden Einstellschaltungen und einem Pulsröhrenkühler (Kaltkopf). Ein Schnitt durch das CAD-Modell des Resonatorengehäuses ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Das Resonatorengehäuse besteht vollständig aus Kupfer und hat Platz für bis zu sechs Resonatoren. Die Resonatorspulen werden in separaten Kammern positioniert, wo sie über Teflonschrauben fixiert sind. Über Bohrungen in den Kappen des Gehäuses können die Anschlussdrähte der Spulen herausgeführt werden. Auf den Außenseiten

der Kappen befinden sich die zu testenden Platinen.

Da die verwendeten Resonatoren aus NbTi bestehen und supraleitend sein müssen, ist es notwendig, die Elektronik auf mindestens 10 K herunterzukühlen. Für eine realistische Simulation der Bedingungen im Experiment sind sogar Temperaturen von ca. 4 K notwendig. Zum Abkühlen der Elektronik wurde der Pulsröhrenkühler SRP-062B von Sumitomo Heavy Industries [24] verwendet. Dabei handelt es sich um eine Kältemaschine, die auf dem Stirling-Kreisprozess basiert und eine Temperatur von 4 K erzeugt. Die Güte wurde dann wie zuvor in Kapitel 2.5 beschrieben über die -3 dB-Methode mit dem Netzwerkanalysator 4195A von Hewlett Packard [25] ermittelt. Die Anschlusskabel des Netzwerkanalysators wurden für diesen Zweck mit den Enden der Resonatorspulen kapazitiv gekoppelt, indem die jeweiligen Drähte über Kreuz mit Teflonband verknotet wurden. Fotografien des Messaufbaus befinden sich im Anhang (siehe Abbildungen A.9 - A.11).

## 4.2. Charakterisierung der Resonatorspulen

Für den Test der Schaltungen wurden mehrere verschiedene Resonatoren verwendet. Diese mussten zunächst charakterisiert werden, indem die freie Güte, die Induktivität und die Kapazität der Toroidspulen gemessen wurden. Mit freier Güte ist hierbei die Güte der Spule ohne zusätzliche Elektronik gemeint. Zur Bestimmung der Induktivität und Kapazität wurde zunächst die Resonanzfrequenz gemessen. Daraufhin wurde ein Kondensator mit bekannter Kapazität parallel zur Spule geschaltet und die Frequenzmessung wurde erneut durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Verkabelung zwischen den zwei Messungen möglichst wenig geändert wurde. Aus den beiden Resonanzfrequenzen konnten die weiteren Spulenparameter wie folgt berechnet werden:

$$C = \frac{\omega_0'^2}{\omega_0^2 - \omega_0'^2} C_{Test} \quad (20)$$

$$L = \frac{\omega_0^2 - \omega_0'^2}{\omega_0^2 \omega_0'^2 C_{Test}}. \quad (21)$$

Dabei ist  $\omega_0'$  die Resonanzfrequenz mit zusätzlichem Testkondensator und  $C_{Test}$  die Kapazität des Testkondensators. Die Charakterisierung der Resonatorspulen wurde mit einem  $(4,7 \pm 0,1)$  pF Kondensator durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Die Fehler der ermittelten Induktivitäts- und Kapazitätswerte wurden über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet. Dabei dominierte die Toleranz der Testkapazität.

Resonator	Mittlere Freie Güte	Induktivität (mH)	Kapazität (pF)
E	$30000 \pm 8000$	0,71(2)	13,8(3)
F	$29400 \pm 1700$	1,36(3)	10,7(2)
H	$9000 \pm 6000$	0,76(2)	11,8(3)
M	$19000 \pm 9000$	-	-

**Tabelle 4.1:** Charakterisierung der Resonatorspulen.

Zur Charakterisierung der Resonatorspulen wurde die freie Güte mehrfach bei kryogenen Temperaturen gemessen. Die Ermittlung der Kapazität und Induktivität erfolgte über Messungen der Resonanzfrequenz mit und ohne einer zusätzlichen Testkapazität.

Die freie Güte der Resonatoren wurde über den Verlauf der Untersuchung wiederholt gemessen. Auffällig waren dabei die zum Teil starken Schwankungen der freien Güte zwischen zwei Abkühlzyklen. Aus diesem Grund wurde aus den gemessenen Gütewerten die mittlere freie Güte berechnet. Der Fehler wurde dafür über den Standardfehler des Mittelwerts abgeschätzt.

### 4.3. Test des Güteschalters

Zunächst wurde der einfache Güteschalter getestet. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

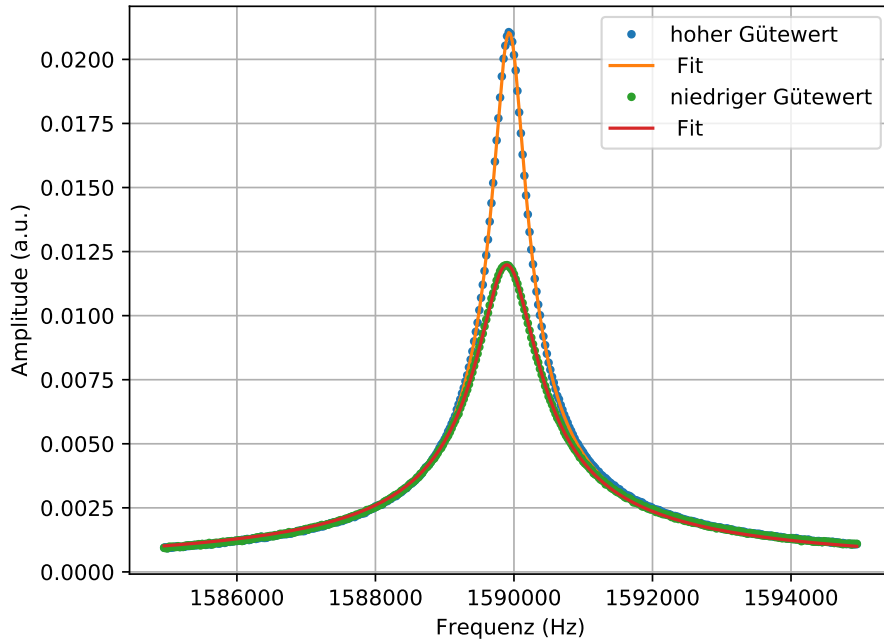
1. Messung der freien Güte
2. Einbau der zu testenden Schaltung
3. Messung der Güte in den beiden Schaltzuständen (jeweils 3 Einzelmessungen)
4. Ausbau der Schaltung
5. Messung der freien Güte

Vor jeder Messphase muss der Testaufbau mit dem Kaltkopf auf 4 K abgekühlt werden. Zum Ein- und Ausbau der Schaltung wurde wieder auf Raumtemperatur aufgewärmt. Die ermittelten Daten einer Messreihe sind beispielhaft in Abbildung 4.2 zu sehen. Jede Resonanzkurve wurde dabei mit folgender Funktion gefittet [15]:

$$f_{Fit}(\nu) = \sqrt{\frac{4\pi^2\nu_0^2 L_{Fit}^2}{\frac{1}{Q^2} + \left(\frac{\nu}{\nu_0} - \frac{\nu_0}{\nu}\right)^2}}, \quad (22)$$

wobei  $L_{Fit}$  ein Maß für den Maximalwert der Kurve ist.

Wie erwartet ließ sich die Güte zwischen zwei Werten schalten. Die Wiederholgenauigkeit und die Stabilität der Güte während einzelner Messzyklen waren hoch.



**Abbildung 4.2:** Messdaten des Güteschalters.

Der Graph zeigt die Resonanzkurven des Güteschalters in beiden Schaltzuständen. Die Messdaten wurden jeweils mit einer Lorentzkurve gefittet. In dem Beispiel ist der hohe Gütewert 3300 und der niedrige Gütewert 1900.

Resonator	Konzept	Freie Güte vor der Messung	Maximale Güte mit Einstellschaltung
E	Güteschalter	~51000	~2000
F	Doppelschalter	~26000	~1600
E	Heizwiderstand	~43000	~3000
E	FET	~51000	~1300

**Tabelle 4.2:** Güteverlust durch die Einstellschaltungen.

Das Verbinden der Einstellschaltungen mit den Resonatorspulen erzeugte einen signifikanten und reproduzierbaren Güteverlust. Dabei verringerte sich der Gütefaktor um ca. eine Größenordnung.

Die relative Änderung der gemessenen Güte durch wiederholtes Schalten betrug weniger als ein Prozent. Allerdings zeigte sich, dass einige limitierende Faktoren Einfluss auf die Messungen haben. Zum einen waren Schwankungen der freien Güte zwischen den Abkühlphasen zu beobachten und zum anderen erzeugten die Einstellschaltungen zunächst einen unerwartet hohen Güteverlust im Vergleich zur

freien Güte. In Tabelle 4.2 sind beispielhaft einige Messwerte aufgeführt, die den deutlichen Güteverlust zeigen.

#### 4.4. Limitierende Einflüsse

Die verwendeten Resonatorspulen zeigten ein instabiles Verhalten zwischen den Abkühlzyklen. Dabei schwankte die freie Güte um bis zu zwei Größenordnungen. Mögliche Gründe hierfür sind die nicht optimale thermische Ankopplung der Spulen an das Gehäuse und die Instabilität der Lötstellen zwischen NbTi und Kupfer. Zur Verbesserung der Verbindungsstellen zwischen NbTi und Kupfer soll zukünftig ein Verbunddraht verwendet werden, der mittels Punktschweißen mit dem NbTi-Draht der Spule verbunden werden soll. Darüber hinaus soll der thermische Kontakt über eine andere Fixierungsmethode der Spulen im Gehäuse optimiert werden.

Abgesehen von den Güteschwankungen der Spulen war ein signifikanter Güteverlust durch die Verwendung der Einstellschaltungen beobachtbar. Als eine mögliche Ursache hierfür wurden zunächst Thermalisierungsprobleme der Resonatorspulen angenommen. Für den Fall, dass diese nicht ausreichend kalt werden, kann die Supraleitung nicht gewährleistet werden und man erhält zusätzliche Verluste in den normalleitenden Spulenbereichen. Da die Verlängerung der Abkühlzeiten im Kaltkopf und die direkte Verschraubung des kalten Endes an das Kupfergehäuse keine Erhöhung der Güte bewirkten, konnte die Temperatur als Haupteinflussfaktor ausgeschlossen werden.

Als eine weitere Möglichkeit wurden die Verluste im verwendeten Platinenmaterial in Erwägung gezogen. Zum Vergleich wurde eine Testplatine aus dem Werkstoff Taconic TLC30 hergestellt und getestet (siehe Anhang Abbildung A.4). Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen auf PTFE basierenden glasfaserverstärkten Verbundwerkstoff, der ebenfalls einen geringen Verlustwinkel aufweist. Im direkten Vergleich konnten allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den Materialien erkannt werden. Da keine besseren Materialien zum Test zur Verfügung standen, wurde mit anderen Mitteln versucht den Güteverlust zu reduzieren.

Es zeigte sich, dass der Hauptgrund für den Güteverlust das Windungsverhältnis der verwendeten Spulen ist, welches ca.  $1/3$  betrug. Durch das hohe Verhältnis wirken sich Verluste am Güteschalter, wie beispielsweise die Verluste durch das Platinenmaterial, verstärkt auf die Schwingkreisgüte aus. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurden die Koppelkondensatoren zwischen Spule und Platine freihängend ausgeführt, um sie räumlich stärker von der Platine zu trennen. Des Weiteren wurde die Kapazität der Koppelkondensatoren von  $10 \text{ pF}$  auf  $1 \text{ pF}$  reduziert. Durch diese Maßnahmen konnte der Güteverlust auf ein akzeptables

Maß reduziert werden, sodass die maximal erreichbare Güte das obere Limit des Einstellbereichs von 25000 überstieg.

#### 4.5. Test der weiteren Einstellschaltungen

Das Doppelschalter-Konzept wurde mit einem 75  $\Omega$  und einem 130  $\Omega$  Widerstand an den jeweiligen Güteschaltern getestet. Da der Doppelschalter auf derselben Schaltung wie der Güteschalter basiert, waren die Stabilitätseigenschaften des eingestellten Gütefaktors vergleichbar. Bei anfänglichen Testmessungen ließen sich auch wie erwartet vier unterschiedliche Gütewerte einstellen (siehe Tabelle 4.3).

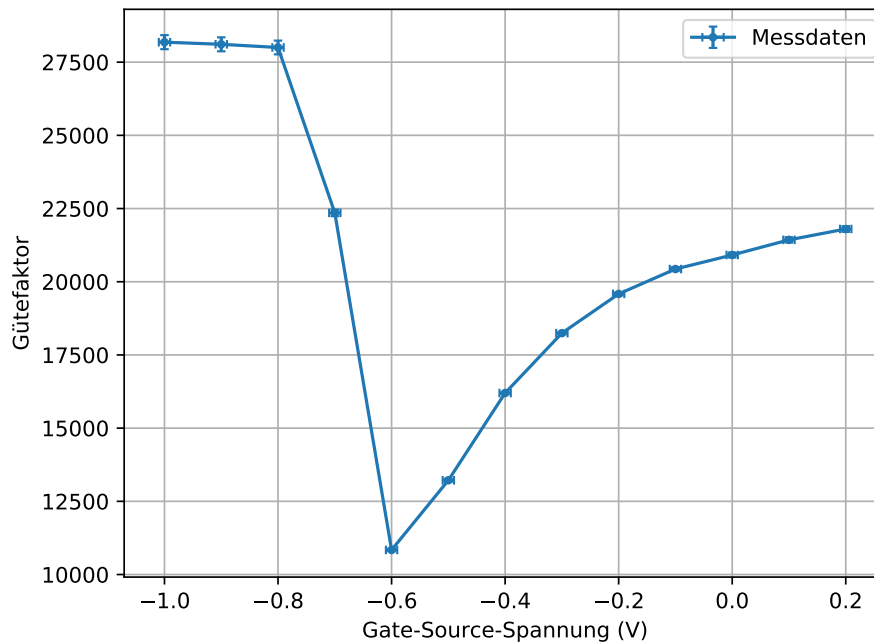
Schaltzustand	Güte vorher	Güte nachher
Beide Schalter niederohmig (hoher Gütewert)	$240,8 \pm 1,0$	$23630 \pm 120$
Beide Schalter hochohmig (niedriger Gütewert)	$219,6 \pm 1,0$	$20640 \pm 80$
Schalter am 75 $\Omega$ Widerstand hochohmig	$235,0 \pm 1,0$	$20620 \pm 80$
Schalter am 130 $\Omega$ Widerstand hochohmig	$225,5 \pm 1,0$	$23640 \pm 130$

**Tabelle 4.3:** Messdaten des Doppelschalters.

In der Tabelle werden die Gütewerte des Doppelschalters vor und nach den Maßnahmen zur Reduktion des Güteverlusts dargestellt. Für die Abschätzung der Fehler wurde die Ungenauigkeit des Lorentz-Fits verwendet. Der RF-Schalter am Schaltungszweig des 130  $\Omega$  Widerstands ließ sich nach mehreren Messungen nicht mehr schalten.

Nach den Maßnahmen zur Kompensation des Güteverlusts war einer der Schalter bei kryogenen Temperaturen jedoch nicht mehr schaltbar. Bei Raumtemperatur war dieses Verhalten nicht reproduzierbar, weshalb zunächst nicht von einem Defekt des RF-Schalters ausgegangen wurde. Eine geänderte Dimensionierung des Widerstands am nicht funktionierenden Schalter führte zu keiner Verbesserung. Somit kann ausgeschlossen werden, dass der RF-Schalter zwar schaltet, aber die Güteänderung aufgrund der Wahl des Widerstands nicht beobachtbar ist. Aufgrund der geringen Flexibilität und der Fehleranfälligkeit erscheint der Doppelschalter für den Einsatz im PENTATRAP-Experiment nicht geeignet.

Das nächste Schaltungskonzept ist die Einstellschaltung mit einem FET. Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf des Gütefaktors in Abhängigkeit von der Gate-Source-Spannung des FET. Die Fehler der Messpunkte setzen sich aus dem Fitfehler der Gütewerte und der Genauigkeit der Spannungsquelle zusammen. Bei der Einstellung der Spannung wurde eine Genauigkeit von 0,01 V erreicht. Der Fitfehler war für die meisten Messungen im Vergleich dazu vernachlässigbar klein. Da für den Güteverlauf keine theoretischen Vorhersagen existieren konnten die einzelnen Messpunkte nicht



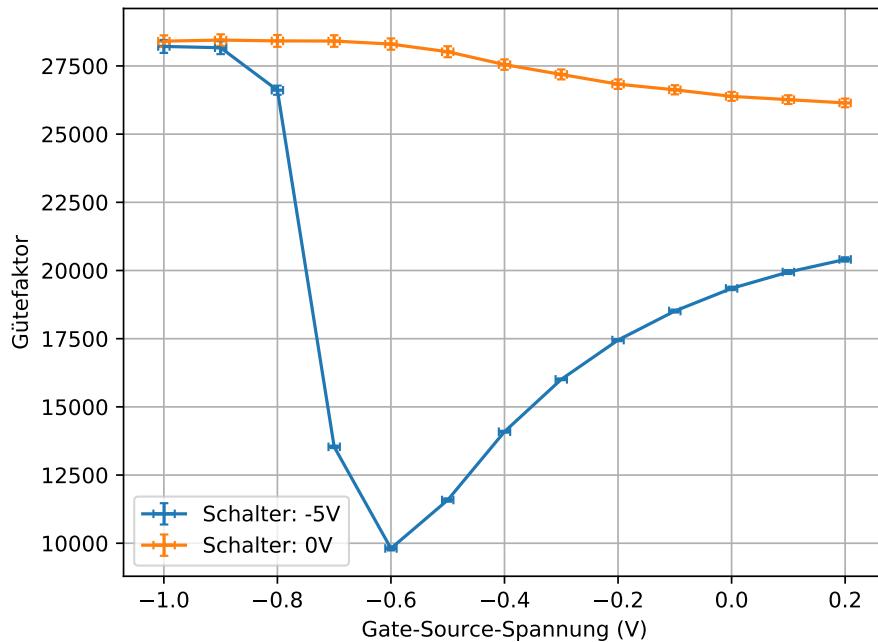
**Abbildung 4.3:** Messdaten der Einstellschaltung mit FET.

Der Güteverlauf zeigt ein Minimum bei ca. -0,6 V. Die Einstellbarkeit auf dem rechten Zweig der Kurve ist aufgrund der geringeren Steigung besser als auf dem linken Zweig.

gefittet werden. Dies ist jedoch unproblematisch, da aufgrund der Güteschwankungen der Resonatoren ohnehin kein fester funktionaler Zusammenhang zwischen den beiden aufgetragenen Größen besteht. Außerdem muss im Vorfeld auch kein funktionaler Zusammenhang bekannt sein, da die Güte im Experiment durch die direkte Messung der Dipbreite in situ eingestellt werden kann. Für die Beurteilung der Konzepte sind charakteristische Merkmale der Verläufe, wie Kanten, Sprünge und Steigungsänderungen deutlich wichtiger. Zur Visualisierung solcher Merkmale wurden die Messpunkte mit Geraden verbunden.

Man erkennt, dass durch die Senkung der Gate-Source-Spannung zunächst die Güte abfällt. In diesem Spannungsbereich kommt es zu einer Verbreiterung der Raumladungszone des MESFET, wodurch der leitfähige Kanal abgeschnürt wird und der Widerstand der Drain-Source-Strecke steigt. Die Steilheit der Kurve nimmt dabei mit abnehmender Spannung zu. Für ca. -0,6 V nimmt das System ein Güteminimum an. Bei einer weiteren Senkung der Gate-Source-Spannung kommt es zu einem rapiden Anstieg der Güte, da der Kanal komplett sperrt und der Widerstand gegen unendlich geht. Der dabei erreichte Gütewert überstieg den Wert

bei 0 V. Die Stabilität der Güte bei diesem Schaltungskonzept hängt maßgeblich von der Stabilität der verwendeten Spannungsquelle ab. Eine geeignete Wahl des Arbeitspunkts kann allerdings die Stabilität zusätzlich verbessern. Der rechte Zweig der Kurve zwischen -0,6 V und 0,2 V weist eine geringere Steigung auf als der linke Zweig, sodass Spannungsschwankungen sich weniger stark auf die Güte auswirken.

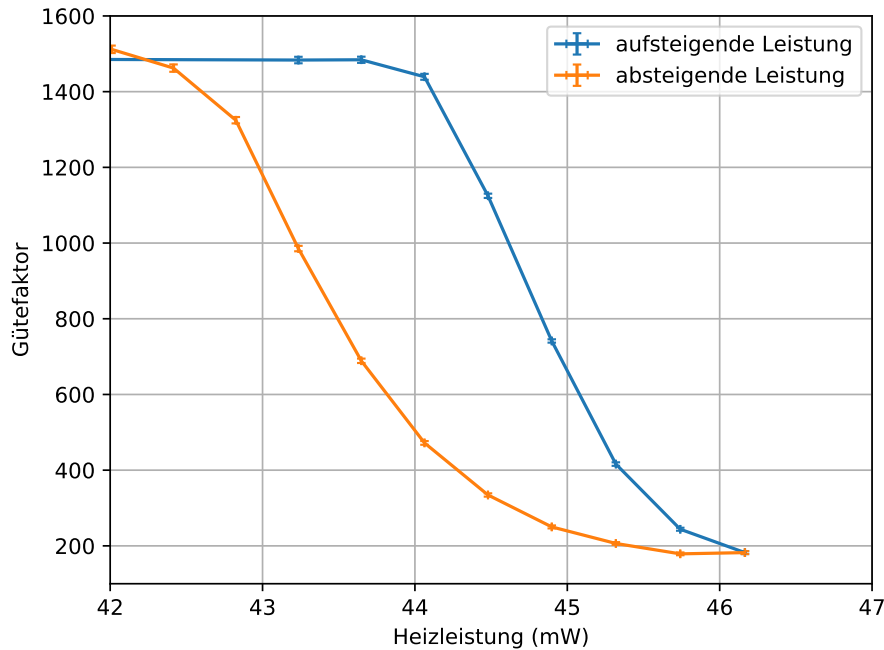


**Abbildung 4.4:** Messdaten der Einstellschaltung mit FET und Schalter. Der Schalter ermöglicht einen schnellen Wechsel zwischen zwei Gütewerten bei fest eingestellter Gate-Source-Spannung. Dies könnte nützlich für den Wechsel zwischen Kühl- und Messphasen im Experiment sein.

Der Güteverlauf der Einstellschaltung mit FET und Schalter ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Wenn -5 V am Schalter anliegen, ist dieser hochohmig und man erhält dasselbe Verhalten wie bei der Einstellschaltung ohne Schalter. Durch die Verwendung des zusätzlichen Schalters kann bei fest eingestellter Gate-Source-Spannung die Güte erhöht werden. Diese Eigenschaft kann beispielsweise für den Wechsel zwischen Kühl- und Messphasen im Experiment genutzt werden. Der hohe Gütewert (orange Kurve) ist dabei nur schwach von der Gate-Source-Spannung abhängig. Der Nutzen des Schalters ist allerdings begrenzt, da ähnlich hohe Gütewerte auch durch die bloße Änderung der Gate-Source-Spannung (ca. -1 V) erreichbar sind und der Schalter eine mögliche Fehlerquelle darstellt. Lässt sich



die Schalterspannung beispielsweise nicht mehr auf -5 V legen, wird die gesamte Funktion der Schaltung beeinträchtigt.

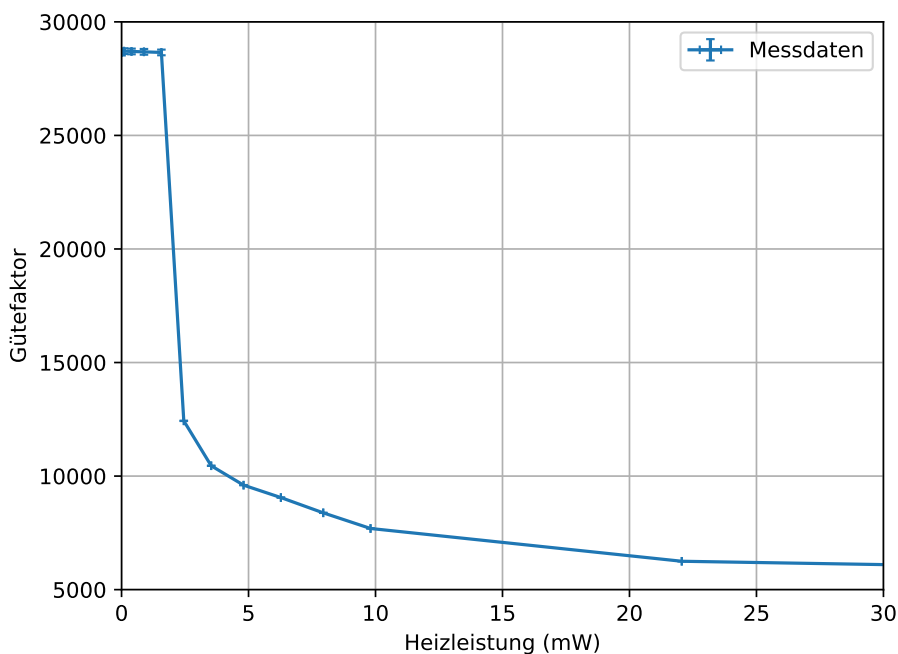


**Abbildung 4.5:** Messdaten der Hysterese bei der Einstellschaltung mit Heizwiderstand.

Das Heizwiderstand-Konzept auf der Platine zeigt eine ausgeprägte Hysterese, die wahrscheinlich auf die Dicke des Platinenmaterials zurückzuführen ist.

Das Einstellkonzept mit Heizwiderstand wurde zunächst auf einer Platine realisiert (siehe Anhang Abbildung A.8). Der dazugehörige Gütefaktor in Abhängigkeit von der Heizleistung ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Für den Fehler der Güte wurde wieder der Fitfehler angenommen. Darüber hinaus erzeugt die endliche Wartezeit zwischen der Einstellung der Heizleistung und der Messung der Güte einen zusätzlichen Fehler, der nur schwer abzuschätzen ist und deshalb nicht im Diagramm berücksichtigt wurde. Der Fehler der Heizleistung wurde über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet. Dieser setzt sich aus dem Fehler des verwendeten Widerstandes (10,2(1) k $\Omega$ ) und der Genauigkeit der Spannungsquelle (0,002 V) zusammen. Die gemessene Güte zeigte bei der Messung einen sigmoidalen Verlauf. Der Übergangsbereich zwischen hohem Güteniveau und niedrigem Güteniveau ist ca. 4 mW breit. Der steile Abfall der Güte erfordert eine hohe Stabilität der Spannungsquelle, um eine exakte Einstellung zu ermöglichen. Auffällig ist, dass verhältnismäßig hohe Leistungen

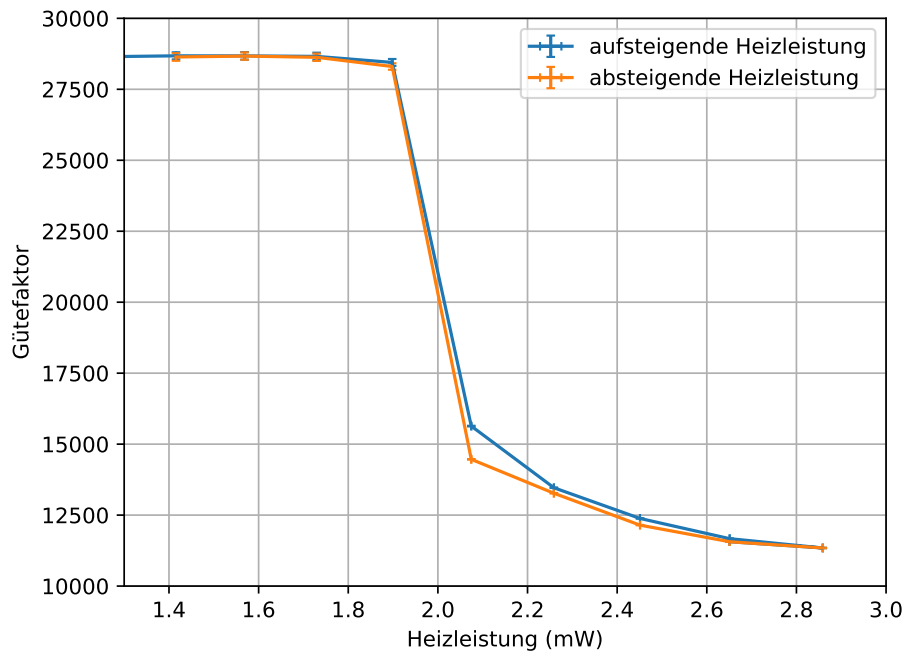
notwendig sind, um die Güte einzustellen. Im Experiment ist dies nachteilig, da zum einen der Wärmeeintrag zu einer Erhöhung des Heliumverbrauchs führt und zum anderen benachbarte Resonatoren ungewollt mitbeeinflusst werden können. Ein weiterer Nachteil des Konzepts waren die langen Zeiten zwischen Änderung der Heizleistung und der Stabilisierung des Gütewerts. Darüber hinaus zeigte der Güteverlauf eine ausgeprägte Hysterese. Bei aufsteigender Leistung waren höhere Heizleistungen notwendig, um die Güte zu senken als bei absteigender Leistung. Der Hauptgrund für dieses Verhalten ist die Dicke der verwendeten Platine, die durch ihre Wärmekapazität diesen Effekt verursacht.



**Abbildung 4.6:** Messdaten der Einstellschaltung mit Heizwiderstand 1. Eine grobe Messung des Güteverlaufs über einen breiten Leistungsbereich zeigt, dass durch die Änderung des Konzepts die benötigte Heizleistung stark reduziert werden kann.

Um diese negativen Eigenschaften zu kompensieren, wurde das Konzept ohne Platine getestet. Dafür wurde ein Schichtwiderstand in THT<sup>9</sup>-Bauweise zur elektrischen Isolierung mit einer dünnen Schicht PTFE-Band umwickelt. Darauf wurde mit wenigen Windungen NbTi-Draht befestigt, der die Verbindung zwischen der Erdung und dem kalten Spulenende herstellte. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit und die gute elektrische Leitfähigkeit im supraleitenden Zustand waren dabei die Gründe für die

<sup>9</sup>Through-Hole Technology



**Abbildung 4.7:** Messdaten der Einstellschaltung mit Heizwiderstand 2. Eine feinere Messung zeigt, dass durch das veränderte Heizwiderstand-Konzept die Hysterese vernachlässigbar klein wird.

Wahl von NbTi. Abbildung 4.6 zeigt den Güteverlauf über ein breites Leistungsintervall. Man sieht direkt, dass deutlich niedrigere Heizleistungen notwendig sind, um die Güte zu ändern. Der Sprung in der Kurve liegt durch den abgeänderten Aufbau bei ca. 2 mW statt den vorherigen 44 mW. Abbildung 4.7 zeigt eine feinere Messreihe des relevanten Bereichs des Güteverlaufs. Im Gegensatz zu dem Heizwiderstand-Konzept auf der Platine ist die Hystere kaum erkennbar. Der steile Güteabfall beeinträchtigt allerdings weiterhin die Stabilität.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Zusammenfassung der Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 die Vor- und Nachteile der getesteten Konzepte gegenübergestellt. Der Güteschalter aus dem ALPHATRAP-Experiment ist eine erprobte und zuverlässige Schaltung zur Güteänderung. Sie ist allerdings aufgrund ihrer geringen Flexibilität stark limitiert und deshalb für den Einsatz in PENTATRAP ungeeignet.

Die Verwendung mehrerer Güteschalter, wie in dem getesteten Doppelschalter, erhöht die maximal erreichbare Güte und die Anzahl einstellbarer Gütwerte. Jedoch steigt die Komplexität und die Fehleranfälligkeit durch die höhere Menge an einzelnen Bauteilen an. Außerdem ist das Maß der Flexibilisierung im Vergleich zu einer kontinuierlichen Einstellbarkeit gering.

Die Verwendung eines Heizwiderstands kann eine solche kontinuierliche Einstellung ermöglichen. Nachteilig ist dabei jedoch der zusätzliche Wärmeeintrag, der im Experiment unerwünscht ist. Darüber hinaus wird die Stabilität der Güte durch die steile Güteänderung beschränkt, was die Verwendung einer stabilen Spannungsquelle notwendig macht. Das Konzept zeigte außerdem eine Hysterese, die mit geeigneten Mitteln eliminiert werden konnte.

Die geeignetste Methode zur GüteEinstellung war das Konzept mit einem FET. Dieses ermöglicht ebenfalls die kontinuierliche Einstellbarkeit der Güte, weist im Vergleich zum Heizwiderstand aber keinen zusätzlichen Wärmeeintrag auf. Der Aufbau ist simpel und durch die geringe Anzahl an Bauteilen auch wenig fehleranfällig.

Konzept	Vorteile	Nachteile
Güteschalter (ALPHATRAP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• erprobt</li> <li>• Gütestabilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur zwei Gütwerte</li> </ul>
Doppelschalter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hohe Güte</li> <li>• Gütestabilität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur vier Gütwerte</li> <li>• komplexer/fehleranfälliger</li> </ul>
Heizwiderstand	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kont. Einstellbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zusätzlicher Wärmeeintrag</li> <li>• steile Güteänderung</li> <li>• (Hysterese)</li> </ul>
FET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kont. Einstellbarkeit</li> <li>• einfacher Aufbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nichtlinearität</li> </ul>

**Tabelle 5.1:** Vergleich der Konzepte.

Die beiden Schalterkonzepte sind aufgrund ihrer geringen Flexibilität für den Einsatz bei PENTATRAP ungeeignet. Die anderen beiden Konzepte weisen eine kontinuierliche Einstellbarkeit der Güte auf, wobei die Schaltung mit FET weniger Nachteile mit sich bringt als die Schaltung mit Heizwiderstand.

Man kann die Schaltung mit einem zusätzlichen Schalter zum Wegschalten des FET umsetzen, um ein schnelles Wechseln zwischen zwei Gütewerten für die Kühl- und Messphase im Experiment zu ermöglichen. Als einzigen Nachteil kann man die Nichtlinearität des Güteverlaufs nennen, die mit der Transistorcharakteristik zusammenhängt. Diese spielt für den Einsatz in PENTATRAP jedoch keine Rolle. Der in Kapitel 2.5 abgeschätzte Einstellbereich der Güte (250 bis 25000) konnte mit den getesteten Schaltungen noch nicht erzielt werden. Nichtsdestotrotz kann man nach den durchgeführten Messungen zuversichtlich sein, dass dies durch die Feineinstellung der Koppelkondensatoren und die Optimierung der Resonatorspulen erreichbar sein wird.

Da im begrenzten Rahmen der Bachelorarbeit nicht alle Tests und Optimierungen am axialen Detektionssystem durchgeführt werden konnten, sind weitere Schritte geplant. Die Einstellschaltungen sollen zusätzlich mit angeschlossenem Verstärker getestet werden. Dabei soll auch das Rauschverhalten untersucht werden. Zur Steigerung der Stabilität der Resonatorspulen sollen die Verbindungen zwischen NbTi und Kupfer optimiert werden. Des Weiteren soll der thermische Kontakt der Spulen zu dem Gehäuse durch eine andere Fixierungsmethode verbessert werden. Abschließend muss das optimierte Detektionssystem in den experimentellen Aufbau von PENTATRAP implementiert werden. Zusammen mit weiteren Änderungen des aktuellen Versuchsaufbaus soll es dadurch möglich werden mit PENTATRAP in den Bereich von  $\delta m/m \approx 10^{-12}$  bei Präzisionsmessungen an hochgeladenen, stabilen und langlebigen Ionen vorzustoßen.



## Literaturverzeichnis

- [1] A. Einstein. “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?” In: *Annalen der Physik. Band 323, Nr. 13* (1905).
- [2] K. Blaum et al. “High-accuracy mass spectrometry with stored ions”. In: *Physics Reports 425 1 78* (2006).
- [3] J. Dilling et al. “Penning-Trap Mass Measurements in Atomic and Nuclear Physics”. In: *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science 68:4574* (2018).
- [4] Nobelprize.org. Nobel Media AB. *Hans G. Dehmelt - Biographical*. 2014. URL: [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1989/dehmelt-bio.html](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/dehmelt-bio.html).
- [5] R. Schüssler et al. “Recent Developments at the High-Precision Mass Spectrometer PENTATRAP”. In: *JPS Conference Proceedings 18, 011020* (2017).
- [6] J. Repp et al. “PENTATRAP: a novel cryogenic multi-Penning-trap experiment for high-precision mass measurements on highly charged ions”. In: *Applied Physics B: Lasers and Optics 107:983996* (2012).
- [7] S. Earnshaw. “On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether”. In: *Transactions of the Cambridge Philosophical Society. Band 7* (1842).
- [8] K. Blaum; Yu. N. Novikov; G. Werth. “Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics”. In: *Contemporary Physics 51(2), 149* (2010).
- [9] Ch. Roux. “High-Resolution Mass Spectrometry: The Trap Design and Detection System of PENTATRAP and New Q-Values for Neutrino Studies”. Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2012.
- [10] L. S. Brown; G. Gabrielse. “Geonium theory: Physics of a single electron or ion in a Penning trap”. In: *Reviews of Modern Physics, Vol. 58, No.1* (1986).
- [11] Ch. Roux et al. “The trap design of PENTATRAP”. In: *Applied Physics B: Lasers and Optics 107:9971005* (2011).
- [12] P. Micke et al. “The Heidelberg compact electron beam ion traps”. In: *Review of Scientific Instruments 89, 063109* (2018).
- [13] G. Gräff; H. Kalinowsky; J. Traut. “A Direct Determination of the Proton Electron Mass Ratio”. In: *Z. Physik A Atoms and Nuclei 297, 35-39* (1980).
- [14] S. Jefferts et al. “Superconducting resonator and a cryogenic GaAs field effect transistor amplifier as a single-ion detection system”. In: *Review of Scientific Instruments 64* (1993).

- [15] R. Schüssler. “A new Detection System for the high-precision Penning-trap mass spectrometer PENTATRAP”. Masterarbeit. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2015.
- [16] H. Nyquist. “Thermal agitation of electric charge in conductors”. In: *Physical Review* 32, 1103 (1928).
- [17] A. Weigel. “Entwicklung des kryogenen Nachweissystems für ALPHATRAP und THe-Trap”. Masterarbeit. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2014.
- [18] A. Rischka. *Persönliche Kommunikation*. 2018.
- [19] CadSoft. *EAGLE (7.7.0)*. 2016.
- [20] Analog Devices. *LTspice XVII(x64)*. 2018.
- [21] MACOM Technology solutions. *SW-239 GaAs SPDT Switch DC - 2.5 GHz (Rev. V4)*.
- [22] A. Weigel. *Persönliche Kommunikation*. 2018.
- [23] H. Nagahama et al. “Highly sensitive superconducting circuits at 700 kHz with tunable quality factors for image-current detection of single trapped antiprotons”. In: *Review of Scientific Instruments* 87, 113305 (2016).
- [24] Sumitomo Heavy Industries - Cryogenics Group. *SRP-062B Pulse Tube 0.5W@4.2K*. 2008.
- [25] Hewlett Packard. *HP 4195A - Network/Spectrum Analyzer*. 1986.



## A. Anhang

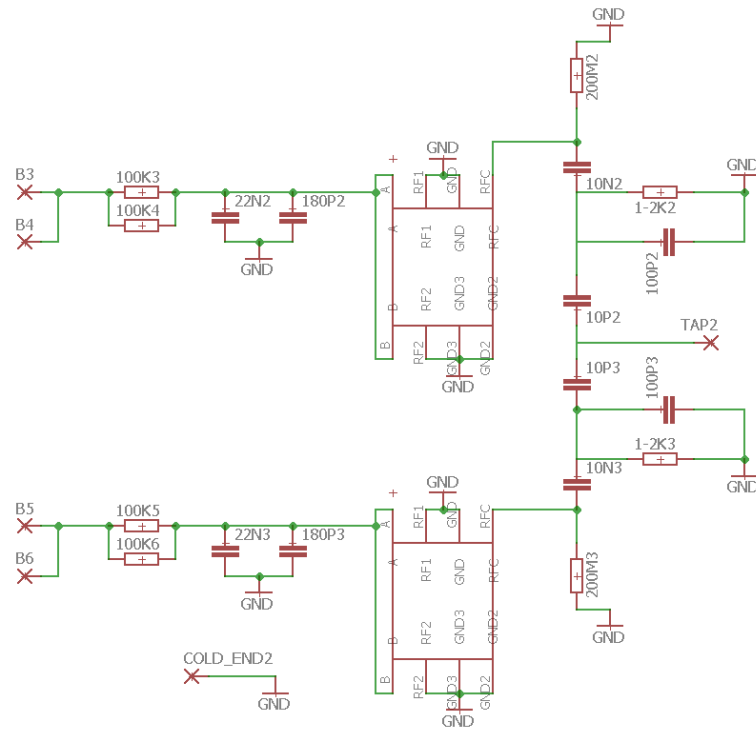


Abbildung A.1: Schaltbild des Doppelschalters in EAGLE

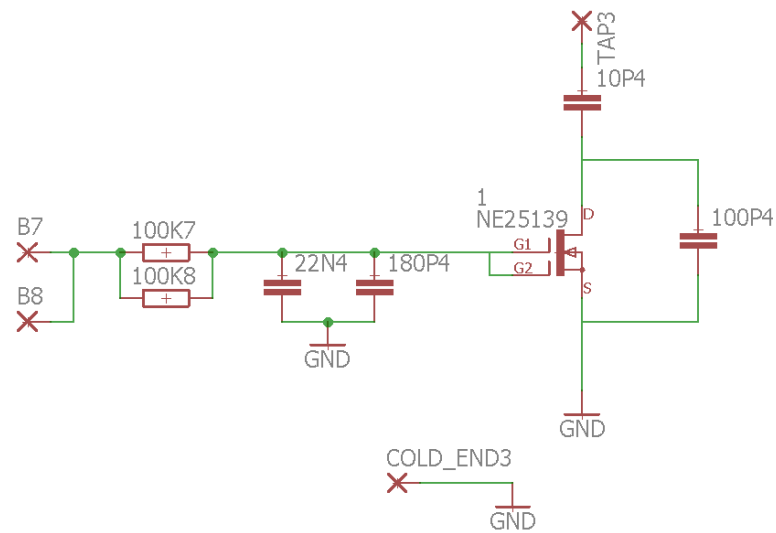


Abbildung A.2: Schaltbild der Einstellschaltung mit FET in EAGLE

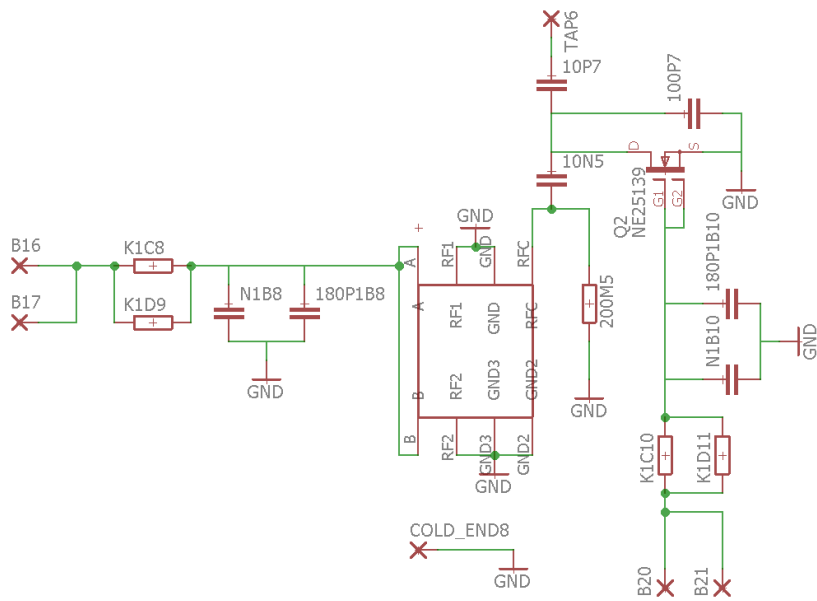


Abbildung A.3: Schaltbild der Einstellschaltung mit FET und Schalter in EAGLE



Abbildung A.4: Fotografie des Güteschalters mit dem Platinenmaterial Taconic TLC30

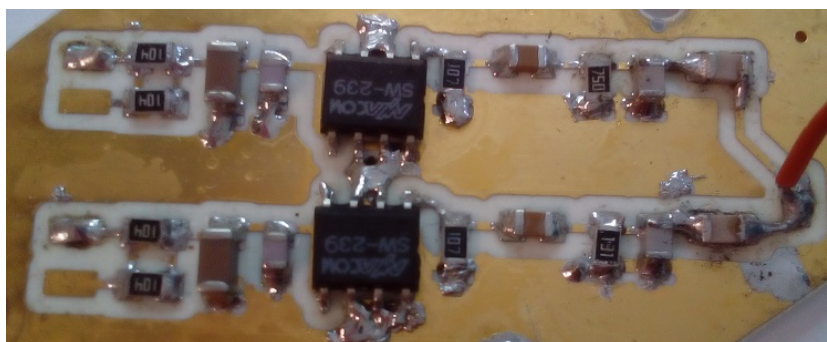


Abbildung A.5: Fotografie des Doppelschalters

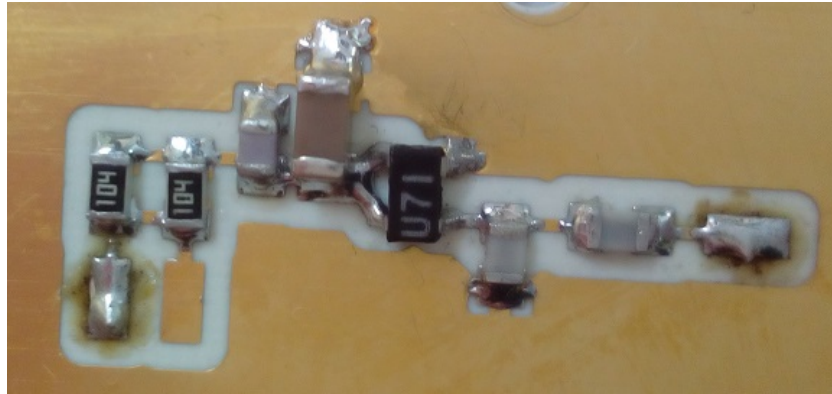


Abbildung A.6: Fotografie der Einstellschaltung mit FET

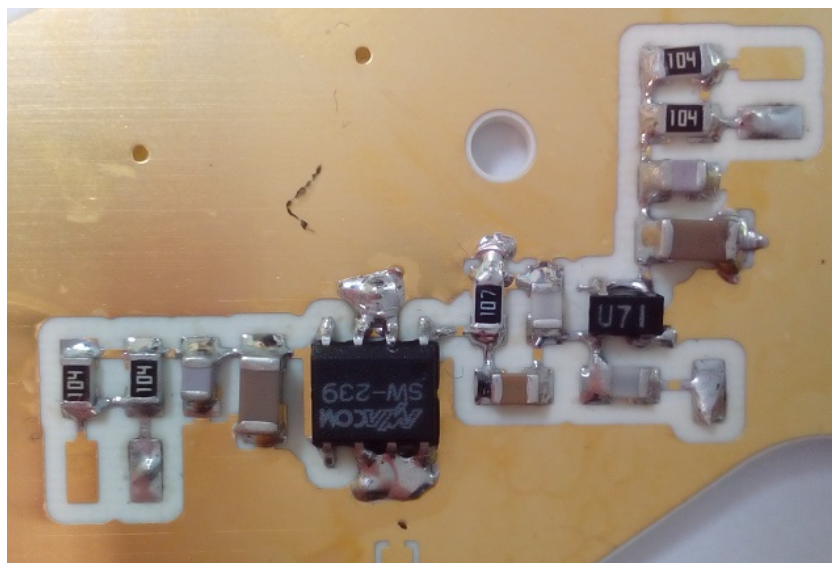


Abbildung A.7: Fotografie der Einstellschaltung mit FET und Schalter

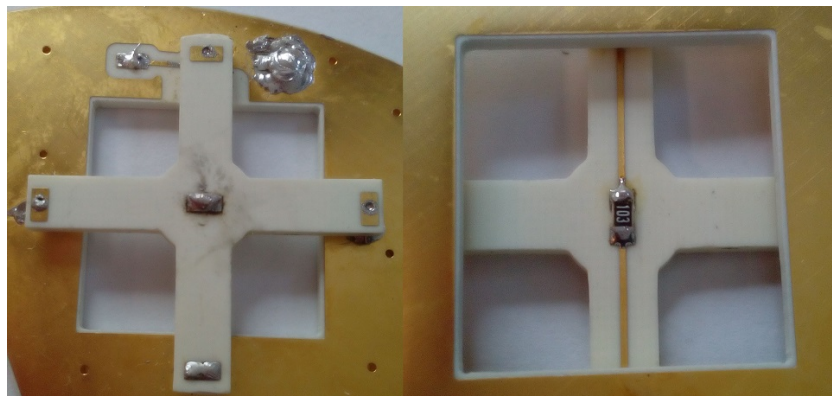


Abbildung A.8: Fotografie der Einstellschaltung mit Heizwiderstand

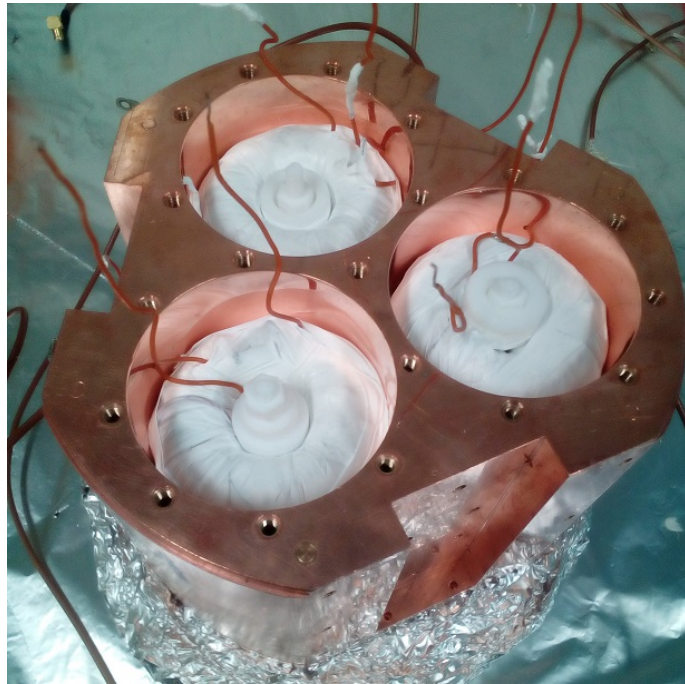


Abbildung A.9: Fotografie des geöffneten Resonatorengehäuses

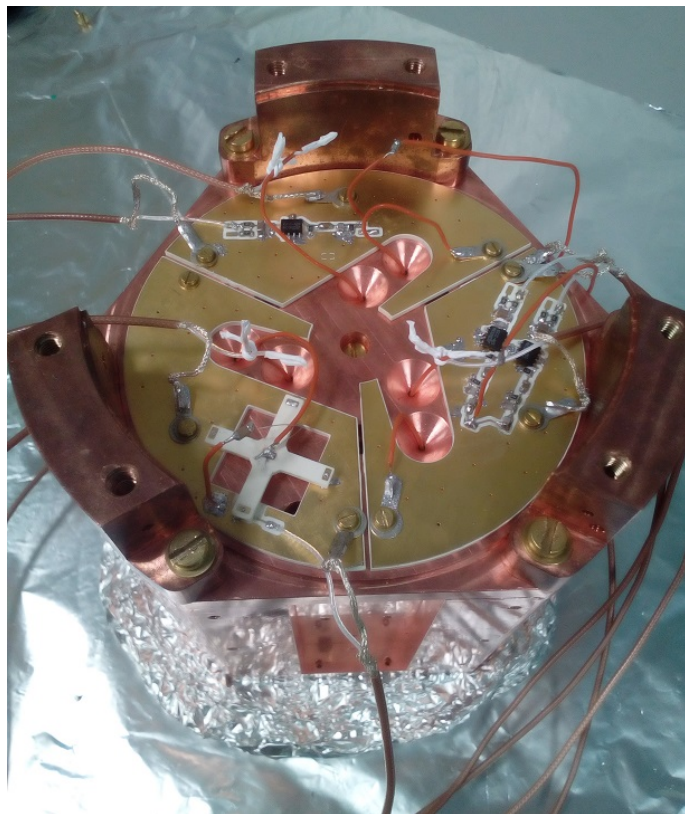


Abbildung A.10: Fotografie des Resonatorengehäuses mit Schaltungen



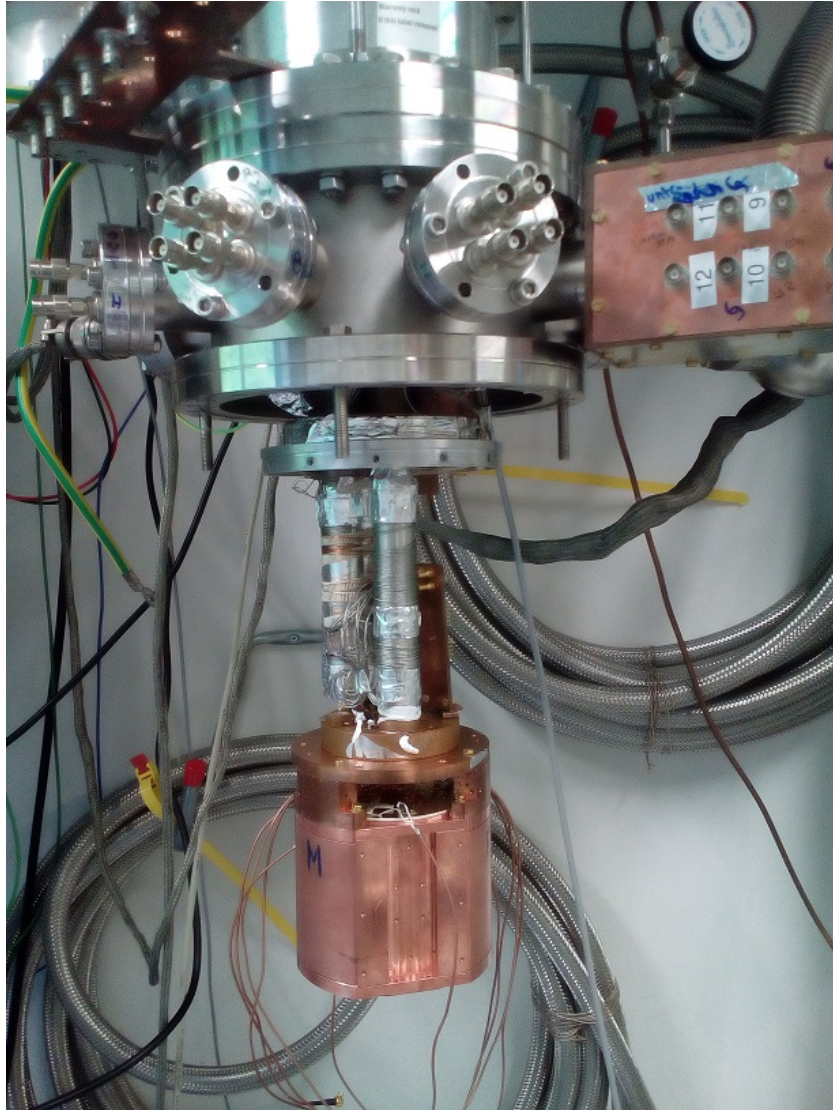


Abbildung A.11: Fotografie des Kaltkopfes mit eingebautem Resonatorengehäuse



## **Erklärung:**

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 29.06.2018,