

# **Elektrische Ansteuerung einer Oberflächenfalle**

Diplomarbeit eingereicht an der  
FAKULTÄT FÜR  
MATHEMATIK, INFORMATIK UND PHYSIK  
DER LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK

zur teilweisen Erfüllung  
der Anforderungen zur Erlangung des Grades

MAGISTER DER NATURWISSENSCHAFTEN  
(MAGISTER RERUM NATURALIUM)

durchgeführt am Institut für Experimentalphysik  
unter der Leitung von Professor Rainer Blatt

vorgelegt von  
MARTIN MERANER

DEZEMBER 2016



## Kurzfassung

Die Ionenfalle „Ziegelstadl“ ist ein  $4 \times 4$  Feld von Oberflächenfallen, welche für zweidimensionale Quantensimulationen verwendet werden soll. Diese Arbeit beschreibt die vorgenommenen Änderungen dieser Falle, um diese vollständig kontaktieren und betreiben zu können. Dafür wurden die Architektur und die Bauweise der Falle verändert. Für die elektrische Kontaktierung der Falle wurde die elektronische Vakuumdurchführung weiterentwickelt. Dadurch konnte ein Druck von  $10^{-9}$  mbar erreicht werden.

Verschiedene Möglichkeiten zur Ansteuerung der Radiofrequenzsignale der Falle, welche zum Speichern von Ionen benötigt wird, werden aufgezeigt. Diese Schaltungen liefern hohe Spannungen ( $\sim 100$  V) bei konstanter Phase, was für die Ansteuerung mehrerer Ionen notwendig ist.

Der schulische Teil dieser Arbeit beschreibt eine Vorgehensweise, wie die Elektronik in der Schule aufbereitet werden kann. Dabei wird besonders auf Messfehler und Bauteileigenschaften eingegangen, welche auch im wissenschaftlichen Teil dieser Arbeit einen bedeutenden Anteil haben. Dazu zählen nicht-ideale Innenwiderstände der Messgeräte und Ausgangswiderstände der Quellen. Dies führt zur Notwendigkeit einer Impedanzanpassung.

## Abstract

The ion-trap array “Ziegelstadl” is a  $4 \times 4$  array of surface traps, which is intended for use as a two-dimensional quantum simulator. This thesis describes changes to the original trap design which allow full electrical contacting and operation. In particular, the trap architecture and material composition were changed. For the electrical contact to the trap, the electronic feedthrough had to be optimized. With these changes a pressure of  $10^{-10}$  mbar was reached.

Controlling interactions between ions at different sites in the array requires the use of multiple radio-frequency drives, which have independently variable voltage amplitudes, while maintaining a constant relative phase with each other. Such drive circuits were devised and demonstrated to produce a high voltage ( $\sim 100$  V) while remaining phase locked under normal trap operation.

The school part of this thesis describes a plan for how to introduce electronics at schools. Special emphasis is made on the errors in measurements and components, which is also a big topic in the science part of this thesis. Sources of error include non-ideal internal resistance of the electrical measurement and supply devices and explains the need of impedance matching.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Wissenschaftlicher Teil</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Einführung in Paul-Fallen</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen der Paul-Falle . . . . .	4
2.2	Zweidimensionale Paul-Fallen . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Ionenfalle: Ziegelstadl</b>	<b>9</b>
3.1	Ausgangspunkt . . . . .	10
3.2	Ziegelstadl: Neuentwurf . . . . .	11
3.3	Masseplatine . . . . .	15
3.4	Zusammenfassung . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Elektrische Vakuumdurchführung</b>	<b>18</b>
4.1	Anforderungen an das Vakuumsystem . . . . .	18
4.1.1	Vakuumanforderungen . . . . .	18
4.1.2	Elektrische Anforderungen . . . . .	19
4.2	Ausgangspunkt: Vakuumapparatur . . . . .	21
4.3	Neues Setup . . . . .	23
4.4	Ausheizprozess . . . . .	27
4.5	Ergebnisse . . . . .	30
4.6	Zusammenfassung . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Elektrische Ansteuerung der Falle</b>	<b>33</b>
5.1	Elektrischer Schwingkreis . . . . .	33
5.2	Anpassungsnetzwerk . . . . .	34
5.3	Phasenstabilisierter Schwingkreis . . . . .	37
5.4	Stromgesteuerter Schwingkreis . . . . .	37
5.5	Platinenspule . . . . .	40
5.5.1	Berechnungen . . . . .	42
5.5.2	Simulation und Design . . . . .	47
5.6	Zusammenfassung . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>49</b>

---

<b>II Schulischer Teil</b>	<b>51</b>
<b>7 Einleitung</b>	<b>52</b>
<b>8 Ohmsches Gesetz</b>	<b>54</b>
<b>9 Widerstandsnetzwerk</b>	<b>57</b>
9.1 Maschenregel . . . . .	57
9.2 Knotenregel . . . . .	58
9.3 Serienschaltung . . . . .	59
9.4 Parallelschaltung . . . . .	60
<b>10 Messfehler</b>	<b>64</b>
10.1 Innenwiderstand . . . . .	64
10.2 Leistungsanpassung . . . . .	67
<b>11 Komplexe Widerstände</b>	<b>72</b>
11.1 Kondensator . . . . .	72
11.2 Spule . . . . .	75
<b>A Spezialflansch</b>	<b>76</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>78</b>



**Teil I**  
**Wissenschaftlicher Teil**

# Kapitel 1

## Einleitung

Sowohl in der Wissenschaft, als auch im täglichen Leben, wurde die Informationsverarbeitung während der letzten Jahrzehnte immer wichtiger. Mittlerweile werden viele verschiedene Arten von Informationen, wie Bilder, Musik sowie Simulationen bestehender Systeme als Zahlen kodiert, um in einem Computer verwendet und weiterverarbeitet werden zu können. Diese Computer, angefangen bei den ersten Rechnern von Zuse (Z3 und Z4), Eckert und Mauchly (ENIAC) bis hin zu den heutigen Modellen, basieren auf einer Turingmaschine [1–3].

Die Wissenschaft nützt diese Technologie unter anderem zum Simulieren von physikalischen Vorgängen. Einerseits erlaubt eine Simulation eine Voraussage über Eigenschaften von Systemen, ohne diese zu bauen. Dies erspart Kosten in der Entwicklung. Andererseits können dadurch physikalische Modelle mit der Realität verglichen werden, um deren Vorhersagekraft zu überprüfen. Jedoch gibt es quantenphysikalische Vorgänge, die nicht effektiv mit einem klassischen Computer simuliert werden können [4]. Zur Lösung dieses Problems schlug Feynman 1981 ein gut kontrollierbares Quantensystem vor, welches andere Quantensysteme simulieren kann. Dies nennt man einen Quantensimulator. Das Entwerfen solcher Verbindungen zwischen interessanten quantenphysikalischen Effekten und Quantensimulatoren ist derzeit ein sehr aktives Forschungsthema [5]. Für die Realisierung eines gut kontrollierten Quantensystems stehen verschiedene Plattformen, wie gespeicherte Ionen [6], neutrale Atome in Form von ultrakalten Quantengasen [7], Photonen [8], Kernspinresonanzen [8] oder Supraleitende Netzwerke [9] zur Verfügung.

Auch im Bereich der Informationsverarbeitung existieren Algorithmen, die mit klassischen Computern nicht effizient durchführbar sind. Im Zusammenhang mit Computertechnik wird die Effizienz durch die Menge der benötigten Ressourcen beschrieben. Wächst diese polynomial mit der Größe der Eingabe, so heißt ein Vorgang „effizient“. Wachsen die benötigten Ressourcen stattdessen exponentiell, so wird der Algorithmus als „ineffizient“ bezeichnet. Es gibt einige Probleme, wie das Zerlegen von Zahlen in Primfaktoren oder die Simulation von manchen Quantensystemen, welche nicht effizient mit einem klassischen Computer gelöst werden können, wofür sich jedoch ein Quantencomputer als effizient erweist. Das Bauen eines solchen kontrollierbaren Quantensystems ist jedoch eine schwere Aufgabe. Man benötigt zum Bau eines Quantencomputers [10]:

1. Ein skalierbares physikalisches System, mit gut charakterisierten Qubits
2. Die Fähigkeit, den Zustand zu initialisieren



3. Lange relevante Kohärenzzeiten (viel länger als die Gatter Operationszeit)
4. Einen “universellen“ Satz von Quantengattern
5. Die Möglichkeit, zu einer Qubit-spezifischen Messung

Quantencomputer oder Quantensimulatoren auf der Basis von gespeicherten Ionen zeichnen sich durch die hohe Güte der Manipulation von Qubits, lange Kohärenzzeiten und durch die gute Effizienz des Auslesens von Qubits aus [11]. Jedoch stellt die Skalierbarkeit, gleich wie bei den anderen Techniken, ein Problem dar [12]. In einer linearen Paul-Falle kann nur eine begrenzte Anzahl von Qubits gespeichert werden [13, 14, 11]. Des Weiteren basieren einige interessante Quantenphänomene auf zweidimensionalen Gitterstrukturen [15, 16, 11], welche sich zwar in linearen Ketten simulieren lassen, jedoch bei ansteigender Zahl von Qubits umständlich werden. Bei Verwendung einer zweidimensionalen Geometrie kann dies vereinfacht werden. Eine zweidimensionale Anordnung miniaturisierter sphärischer Ionenfallen mit jeweils einem gespeicherten Ion bietet einerseits die Skalierbarkeit, da jedes Ion in einem eigenen Potential gespeichert wird, andererseits lässt sich dadurch die zu simulierende, zweidimensionale Struktur direkt nachbauen [17, 18].

Diese Arbeit betrachtet die Optimierung und Ansteuerung der Ionenfalle „Ziegelstadl“ [26, 37], welche eine  $4 \times 4$  Matrixanordnung von 16 sphärischen Ionenfallen ist. Kapitel 2 beschreibt die Funktionsweise von Paul-Fallen, insbesondere der sphärischen Oberflächenfalle. Kapitel 3 befasst sich mit der schon vorhandenen Ionenfalle Ziegelstadl und den durchgeführten Änderungen zum Vorgängermodell. Eine spezielle elektronische Vakuumdurchführung ermöglicht eine optimale Ansteuerung der Falle. Kapitel 4 beschreibt die Voraussetzungen und die Umsetzung dieser elektronischen Durchführung. In Kapitel 5 werden die möglichen Schaltungen, welche zur Ansteuerung der Falle dienen, aufgezeigt. Ein Ausblick über zukünftige Messungen und Änderungen am System wird in Kapitel 6 gegeben.

# Kapitel 2

## Einführung in Paul-Fallen

Der erste Schritt, Quantensimulationen und Quantenrechnungen mithilfe von Ionen durchzuführen, ist einzelne Ionen zu fangen. Dies kann mithilfe verschiedener Techniken erfolgen. Je nach Anwendungsgebiet kann zwischen Penning-Fallen [19, 20], Paul-Fallen [21–23], Kingdon-Fallen [24] oder kombinierten Architekturen [25] gewählt werden. In Innsbruck verwendet man Paul-Fallen für das Speichern von Ionen. Diese Technik benützt eine Kombination aus statischen und nicht-statischen elektrischen Feldern.

Diese Arbeit wird nur kurz auf die Grundlagen der Paul-Fallen im Kapitel 2.1 und auf Oberflächen Paul-Fallen im Kapitel 2.2 eingehen, da diese Themengebiete schon ausführlich in früheren Arbeiten bearbeitet wurden (siehe [26, 27]).

### 2.1 Grundlagen der Paul-Falle

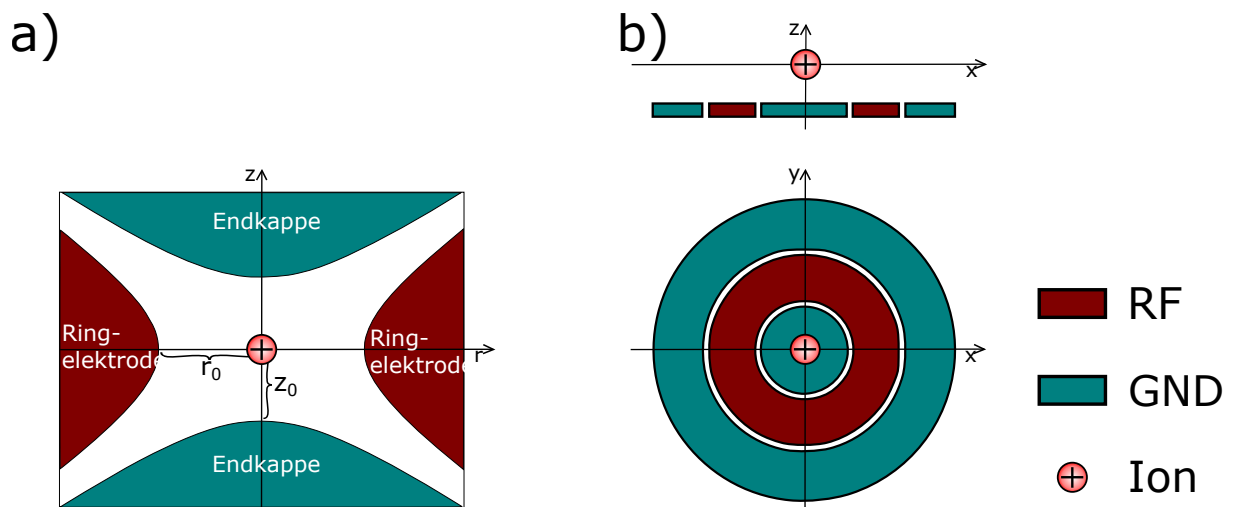
Der Gauß'sche Satz besagt unter anderem, dass es kein statisches elektrisches (oder magnetisches) Feld geben kann, das einen stabilen Gleichgewichtspunkt besitzt. Dieser Zusammenhang ist auch unter dem Begriff Earnshaw-Theorem bekannt [28]. Ist das Potential in eine Richtung fangend, ist es in eine andere Richtung instabil. Die Penning-Falle verwendet deshalb sowohl ein elektrisches, als auch ein magnetisches Feld [19, 20]. Im Gegensatz dazu verwendet die Paul-Falle ein nicht-statisches elektrisches Feld, ein sogenanntes Radio-Frequenz (RF) Feld [21]. Für diese Technologien erhielten 1989 sowohl Wolfgang Paul (Paul-Falle), wie auch Hans Georg Dehmelt (Penning-Falle) einen Nobelpreis in Physik.

Diese Arbeit wird sich auf sphärische Paul-Fallen beziehen. Wie in Abbildung 2.1a gegeben, verwendet diese Architektur im Idealfall eine Ringelektrode mit hyperbolischer Form mit einem Innendurchmesser von  $2r_0$ . Die Endkappen-Elektroden, im Idealfall auch hyperbolisch geformt, sind im Abstand  $z_0 = r_0/\sqrt{2}$  von der Fallenmitte angebracht. Zwischen der Ringelektrode und den Endkappen wird eine Spannung der Form  $\Phi_0 = U_0 + V_0 \cos(\Omega t)$  angelegt. Dadurch ergibt sich das elektrische Potential

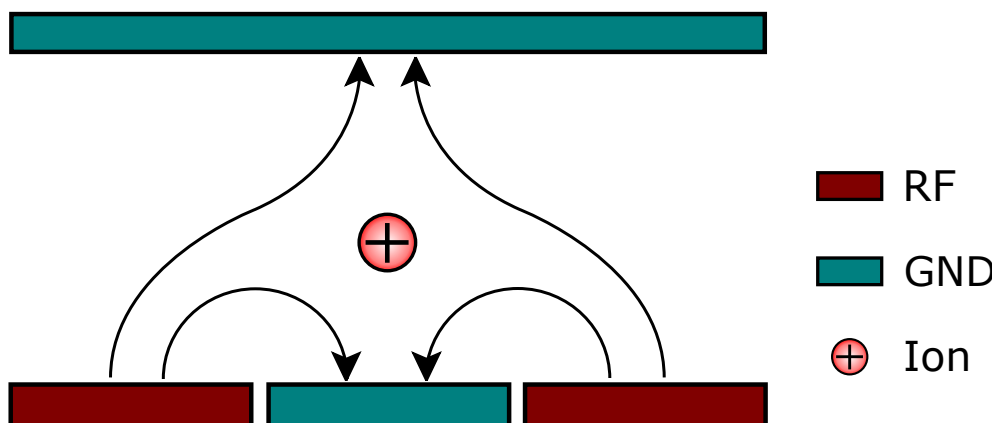
$$\Phi = \frac{\Phi_0(r^2 - 2z^2)}{r_0^2 - 2z_0^2} \quad (2.1)$$

Zum Lösen der Bewegungsgleichung für einfach geladene Teilchen mit Masse  $m$  und Abstand zur Elektrode  $d$

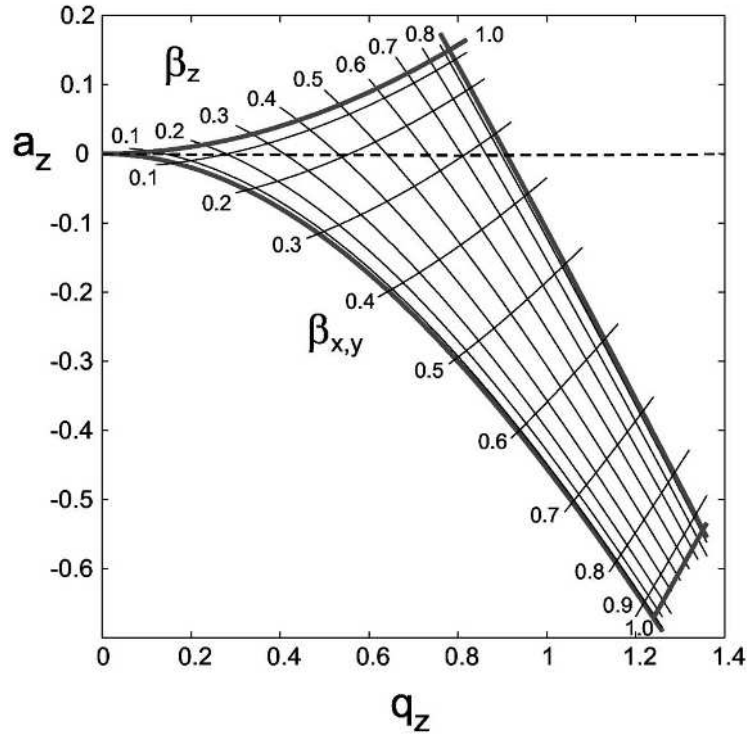
$$\frac{d^2u}{dt^2} = \frac{e}{md^2}(U_0 + V_0 \cos(\Omega t))u, \quad u \in \{x, y, z\} \quad (2.2)$$



**Abbildung 2.1:** a) Schematisches Bild des Querschnitts einer Ionenfalle. Der entstehende Rotationskörper bei Drehung um die z-Achse beschreibt eine sphärische Ionenfalle. Im Idealfall sind die Elektroden hyperbolisch geformt. b) Falle „aufgeklappt“ zu einer sphärischen Oberflächenfalle. Diese kann auf einen Mikrochip realisiert werden. Das Ion ist in beiden Beispielen im Koordinatenursprung gefangen.



**Abbildung 2.2:** Querschnitt durch eine sphärische Oberflächenfalle. Der obere Masse-Balken entspricht einer Fernfeld-Masse oberhalb der Fallenelektroden. Gezeigt ist der Verlauf der Feldlinien für eine bestimmte Phasenlage der RF-Spannung, zu der die RF-Elektroden positiv gepolt sind. Im Zentrum kann man den Sattelpunkt des elektrischen Feldes erkennen. An dieser Stelle ergibt sich in der Pseudopotentialnäherung das Minimum des harmonischen Potentialtopfs, wo  $\text{Ca}^+$  Ionen gefangen werden können.



**Abbildung 2.3:** Ausschnitt aus dem Stabilitätsdiagramm für sphärische Ionenfallen. Aus [29]

kann die Funktion mithilfe der dimensionslosen Parameter

$$a_x = a_y = -2a_z = -\frac{4eU_0}{mz_0^2\Omega^2}, \quad q_x = q_y = 2q_z = \frac{2eV_0}{mz_0^2\Omega^2}, \quad \tau = \frac{\Omega t}{2} \quad (2.3)$$

in ein System von drei Differentialgleichungen der Form einer homogenen Mathieu-Gleichung umgeschrieben werden:

$$\frac{d^2u}{d\tau^2} + (a_i - 2q_i \cos(2\tau))u = 0, \quad u \in \{x, y, z\}. \quad (2.4)$$

Das Stabilitätsdiagramm in Abbildung 2.3 zeigt in Abhängigkeit von  $a_z$  und  $q_z$ , ob ein stabiles Fangen möglich ist. In unserer Gruppe werden üblicherweise die Werte  $a_z \approx 0$  und  $q_z \approx 0,3$  gewählt, da diese sich als praktisch herausgestellt haben. Die Bewegung eines stabil gefangenen Teilchens lässt sich für  $a_z, q_z \ll 1$  als eine Schwingung der Frequenz  $\omega_i = \beta_i\Omega/2$  mit  $i \in \{r, z\}$ , der sogenannten säkularen Bewegung, und der Überlagerung einer höheren Frequenz  $\Omega$ , der Mikrobewegung, beschreiben. Die adiabatische Annäherung dieser Frequenzen bei einer Gleichspannung von  $U_0 = 0 \Rightarrow a = 0$  ergibt

$$\omega_z = \frac{eV_0^2}{\sqrt{2}mz_0^2\Omega}; \quad \omega_r = \frac{eV_0^2}{\sqrt{2}mr^2\Omega}. \quad (2.5)$$

Damit sich die Ionenfalle im Stabilitätsdiagramm im fangenden Bereich befindet, kann daher die Faustformel

$$\frac{\Omega}{\omega_r} = \frac{\sqrt{2}m\Omega^2 r^2}{eV_0} \approx 7 - 10 \quad (2.6)$$

verwendet werden.

Die Falltiefe  $D$  beschreibt die Differenz zwischen dem Minimum des Pseudopotentials und der Höhe der niedrigsten Potenzialbarriere, durch welches das Ion fliehen kann. Diese beträgt dadurch zeitlich gemittelt

$$\bar{D}_z = \frac{eV_0^2}{4mz_0^2\Omega^2} ; \quad \bar{D}_r = \frac{eV_0^2}{4mr_0^2\Omega^2}. \quad [23] \quad (2.7)$$

und ist somit für  $z_0 = r_0/\sqrt{2}$  in axialer Richtung doppelt so groß als in radialer. [21, 23].

## 2.2 Zweidimensionale Paul-Fallen

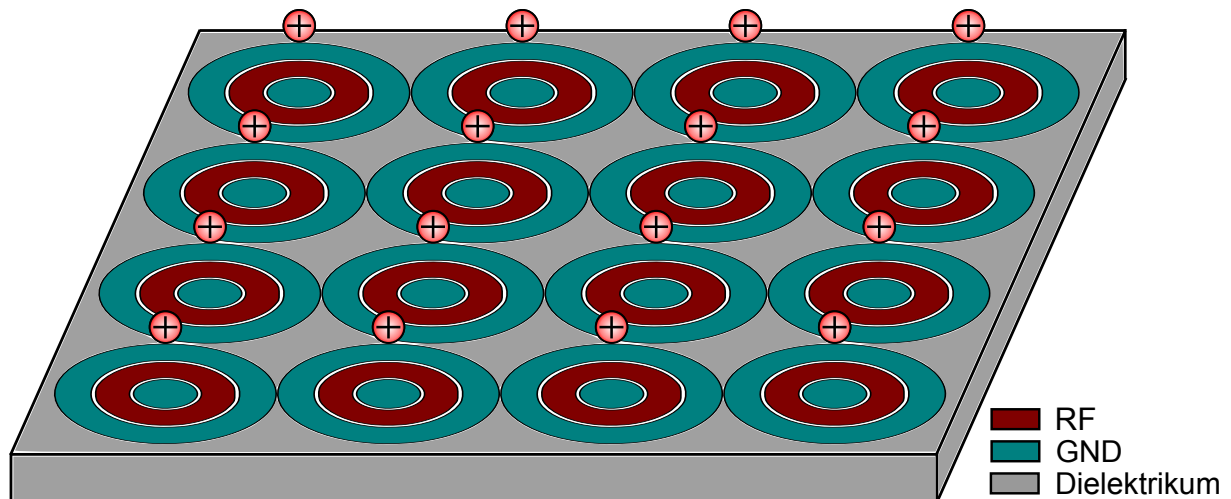
Bei einer idealen Paul-Falle sind die Elektroden unendlich groß und von hyperbolischer Form. In der Realität können die Elektroden jedoch nur von endlicher Größe sein. Auch sind nicht-hyperbolische Elektroden manchmal vorteilhaft, da sie z.B. besseren Laserzugang oder leichtere Herstellung ermöglichen. Nahe dem Fallenzentrum kann bei Oberflächen-fallen ein Quadrupolfeld angenommen werden. Bei abgeänderter Elektrodenform ändert sich (meist vermindert) die Falltiefe auf  $\bar{D} = \kappa_D \cdot \bar{D}_{Ideal}$ .

Werden alle Elektroden auf eine planare Oberfläche gebracht, nennt man dies eine Oberflächenfalle. Diese können durch die umfangreiche Erfahrung der Mikrotechnologie [30, 31] einfach und in großer Stückzahl hergestellt werden. Eine sphärische Oberflächenfalle, wie in Abb. 2.1b) gezeigt, besteht aus einem RF-Ring, der in der Mitte ein Massefeld hat. Rund um den RF-Ring ist ein weiterer Masse-Ring (zukünftig nur noch GND-Ring genannt) angebracht [32, 33]. Bei einem seitlichen Schnitt durch die Falle (siehe Abb. 2.2) erkennt man den fangenden Bereich im Quadrupolfeld oberhalb (im Abstand  $d$ ) der Fallenmitte.

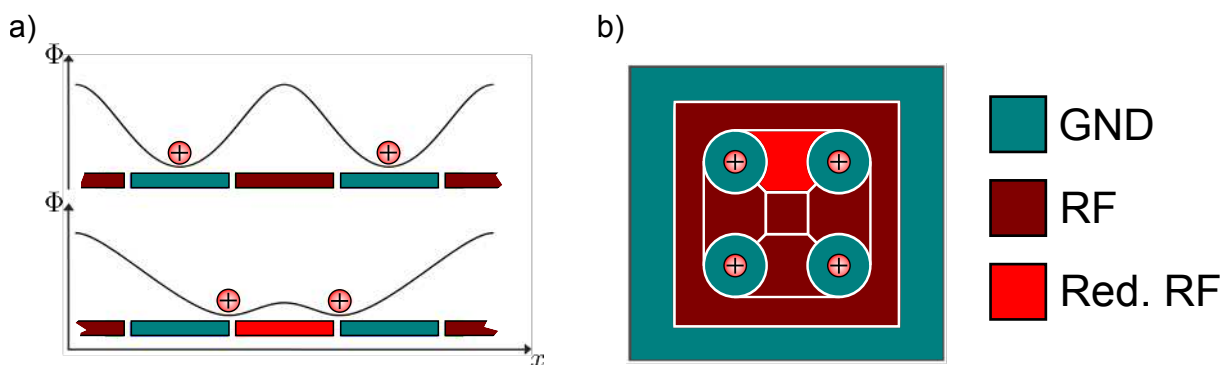
Der Vorteil einer solchen Fallen-Architektur liegt einerseits in der relativ einfachen Fertigung mittels Mikrotechnik, andererseits können viele solcher Fallen, wie in Abb. 2.4 dargestellt, in einer gewünschten Struktur zueinander gebracht werden. Ionen in eigenen Potentialtöpfen interagieren miteinander durch die Coulomb-Kraft. Die Kopplungsstärke durch die Coulomb-Wechselwirkung bei Resonanz ist gegeben durch

$$\Omega_C = \frac{e^2}{2\pi\epsilon_0 m} \cdot \frac{1}{\omega_x r^3} \quad (2.8)$$

und ist somit stark vom Abstand der Ionen  $r$  und deren Schwingungsfrequenz  $\omega_x$  abhängig [34–36]. Eine größere Kopplung kann durch Verringerung der Ion-Ion Distanz  $r$  oder durch ein kleinere Schwingungsfrequenz  $\omega_x$  erreicht werden. Falls die Kopplung unerwünscht ist, sollten die Ionen weiter getrennt werden. Dies ist durch eine Segmentierung der Elektroden, wie in Abbildung 2.5 demonstriert, möglich. Dadurch kann die Spannung der Elektrode zwischen den Ionen einzeln gesteuert werden. Ist an dieser Elektrode die gleiche RF-Spannung wie bei den anderen angelegt, befindet sich eine Potenzialbarriere zwischen den Ionen und diese sind nur sehr schwach gekoppelt. Wird das RF-Signal wie in Abbildung 2.5 an dieser Elektrode verringert, nimmt sowohl der Abstand der Ionen, als auch deren Bewegungsfrequenz zu. Dadurch erhöht sich die Kopplungsrate stark. Somit kann die Kopplungsstärke anhand einer Spannungsamplitude gesteuert werden. Diese kontrollierbaren Kopplungen in zweidimensionalen Systemen können für Quantensimulationen, speziell auch für zweidimensionale Probleme, verwendet werden.



**Abbildung 2.4:** Skizze eines 2D-Feldes von Ionenfallen. Da die Fallen nur aus Ringelektroden bestehen, können mehrere eigenständige Ionen-Fallen in einer Struktur nebeneinander angeordnet werden.



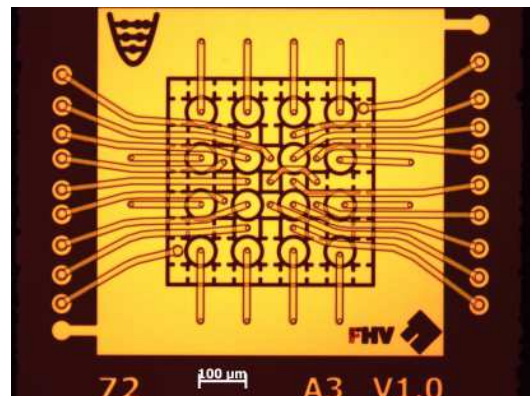
**Abbildung 2.5:** Segmentierung einer sphärischen Oberflächenfalle. a) Änderung des Pseudopotentials zwischen den Ionen bei Reduzierung des RF-Signals. Die Ionen kommen näher zusammen. Die Krümmung des Potentials nimmt auch ab, damit nimmt auch die Bewegungsfrequenz der Ionen ab. Beide Effekte erhöhen die Kopplungsrate zwischen den Ionen. b) Schematischer Aufbau einer segmentierten  $2 \times 2$  Fallen Struktur. Die RF-Signale zwischen den Ionen können separat angesteuert werden. Nach [33].

# Kapitel 3

## Ionenfalle: Ziegelstadl

Ionenfallen werden in unserer und auch einigen anderen Arbeitsgruppen traditionell nach Gefängnissen benannt. Unsere Ionenfalle mit segmentierten RF-Elektroden heißt „Ziegelstadl“. Ziegelstadl ist der Umgangname der Justizanstalt Innsbruck und wurde passend für diese in Innsbruck entwickelte Ionenfalle gewählt. Ziegelstadl beinhaltet ein Feld von  $4 \times 4$  Fallen, wobei die inneren 2 Ionen vollständig gesteuert werden können (siehe Abb. 3.1). Diese Falle wird von der FH-Vorarlberg in Dornbirn aus einem Pyrex-Wafer gefertigt. Der Ionen-Elektroden Abstand beträgt  $50 \mu\text{m}$  und die Elektroden selbst sind  $100 \mu\text{m}$  voneinander entfernt. Insgesamt sind von außen 20 Kanäle zugänglich, wobei jeweils 2 mit Masse und mit den Haupt-RF verbunden sind. Für die inneren 4 Elektroden ist eine separate DC-Spannung zum Steuern vorgesehen. An allen vier Seiten der inneren 4 Elektroden sind segmentierte RF-Felder zum Steuern der Kopplung angebracht, was insgesamt 12 justierbaren RF-Segmenten entspricht.

In diesem Kapitel wird zunächst in Abschnitt 3.1 das alte Design Ziegelstadl V1.0 erklärt, welches vor Beginn dieser Diplomarbeit benutzt wurde. Hier werden auch die bereits bekannten Problematiken mit dieser Konstruktion erläutert. Abschnitt 3.2 beschreibt die Ergebnisse neuer Tests von Ziegelstadl V1.0. Anhand dieser gewonnenen Kenntnisse wurde eine neue Version dieser Falle, Ziegelstadl V1.1, konstruiert. Dieses neue Design der Falle und die Änderungen zur vorhergehenden Version werden ebenfalls in diesem Abschnitt erläutert. Eine Möglichkeit, die Fallentiefe zu erhöhen, ist eine Fernfeldmasse. Für diese wurde eine Masseplatte entwickelt, welche in Abschnitt 3.3 beschrieben wird.



**Abbildung 3.1:** Foto der Oberflächenfalle Ziegelstadl V1.0 unter dem Mikroskop. Die in der Mitte liegenden vier Elektroden sind vollständig eigenständig ansteuerbar, wohingegen die Rand-Elektroden ein gemeinsames RF-Feld besitzen. Die Elektroden sind mit sogenannten Vias zu den Leitungen in einem tieferen Layer verbunden, welche die Elektroden mit den Bondflächen verbinden. Diese Leitungen können auf diesem Foto gesehen werden, da man aufgrund der geringen Dicke ( $1 \mu\text{m}$ ) durch die obere Schicht sieht.

### 3.1 Ausgangspunkt

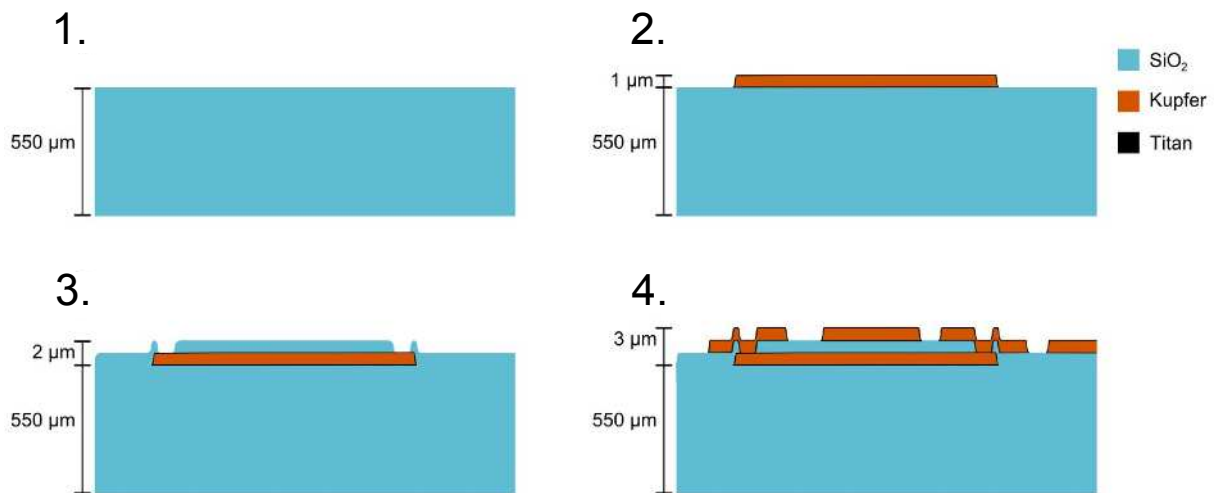
Die Ionenfalle Folsom ist ein  $4 \times 4$  Feld von Ionenfallen dieser beschriebenen Geometrie mit Ion-Ion Abstand von  $1,5 \text{ mm}$ . Mit dieser wurden auch bereits Ionenwolken gefangen und bewegt. Durch diesen großen Abstand zwischen den Ionen ist nur eine schwache Kopplung vorhanden. Die Ionenfalle Ziegelstadl V1.0 (siehe Abb. 3.1) ist die um das 15-fache verkleinerte Version der Folsom-Falle mit einem Ion-Ion Abstand von  $100 \mu\text{m}$ . Laut Theorie [33, 37] wäre bei dieser Distanz die Kopplung stark genug, um kohärente Quanteninteraktionen und Quantensimulationen zu betreiben.

Durch die kleine Struktur kann nicht wie bei Folsom eine Platine verwendet werden. Es wird auf die Mikrotechnik zurückgegriffen. Für die Verbindung der Elektroden mit den Bondflächen muss auf eine mehrschichtige Architektur umgestiegen werden. Die elektrischen Verbindungen der verschiedenen Schichten werden Vias genannt. Hierfür wurde von der FH Vorarlberg eine eigene Technik entwickelt (siehe Abb. 3.2):

1. Ausgangssubstrat ist ein Wafer aus Pyrex ( $\text{SiO}_2$ ).
2. Darauf wird eine mit Titan ummantelte Kupferschicht aufgedampft. Damit werden die Elektroden und die Bondflächen miteinander elektrisch verbunden.
3. Eine weitere Silizium-Dioxid Schicht als Dielektrikum und Isolierung der verschiedenen Lagen wird aufgebracht.
4. Noch eine mit Titan ummantelte Kupferschicht (Elektroden) wird aufgedampft.

Da auf Titan nicht gebondet werden kann, muss die Titanschicht weggeätzt werden. Mittels gepufferter Flußsäure (Mischung Ammoniumfluorid : Flußsäure =  $7 : 1$ ) wird die oberste Titanschicht weggeätzt, um auf dem Kupfer zu bonden. Die Schwierigkeit liegt darin, die Ätzdauer zu ermitteln. Wird zu kurz geätzt, wird nicht das gesamte Titan auf der Oberfläche weggeätzt.





**Abbildung 3.2:** Skizzierter Herstellungsprozess von Ziegelstadl V1.0. Es werden abwechselnd mit Titan ummantelte Kupferschichten und Siliziumdioxidschichten aufgetragen, um die Vielschicht-Struktur zu konstruieren. Aus [26].

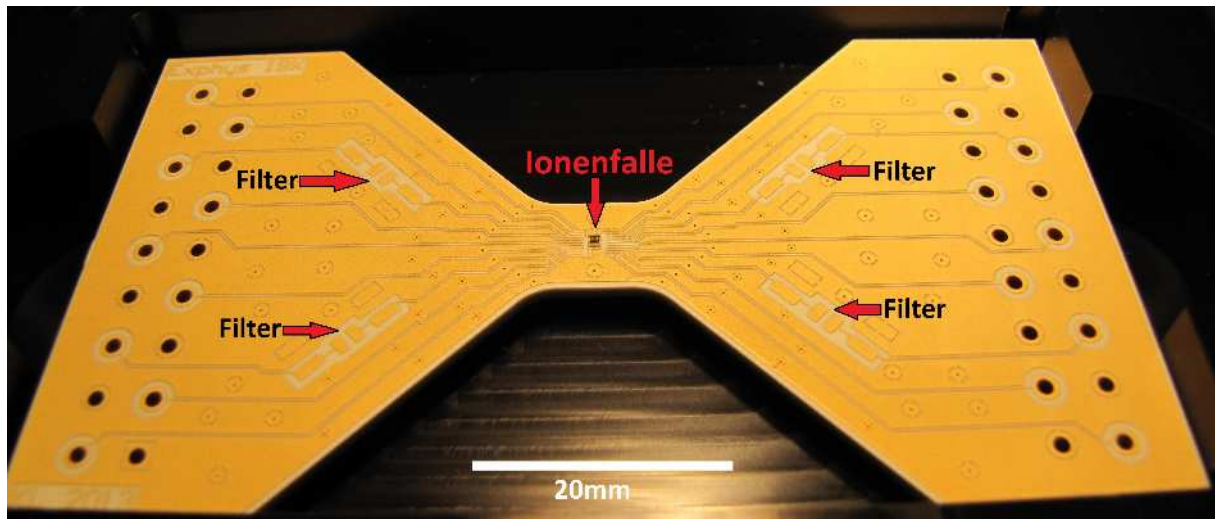
Je länger man ätzt, umso mehr wird das Silizium-Dioxid von der Säure angegriffen. Dies wirkt sich negativ auf die Durchbruchspannungen aus. Es stellte sich heraus, dass eine Ätzdauer von zwei Minuten akzeptabel funktioniert. Nach dem Reinigen der Falle wird sie chemisch mit Palladium beschichtet, da Kupfer sonst oxidieren würde. Dafür wird der Chip für drei Minuten in ein 50 °C warmes Palladium-Platierungstauchbad (Paladin<sup>TM</sup> Plating Bath RDX-1200 von RD Chemical) gelegt. Danach hat die Ionenfalle eine nominell 70 nm dicke Palladiumschicht auf dem Kupfer. Jedoch verändert dieser gesamte Prozess die Oberfläche der Falle, welches Fangen von Ionen unmöglich macht.

Die Bondflächen am Rand der Falle werden mithilfe Bonding [26] mit der Filterplatine verbunden (siehe Abb. 3.3). Damit mit Laserstrahlen das Ion knapp oberhalb der Falle ohne Abberationen getroffen wird, ist einerseits dieser Chip so klein wie möglich dimensioniert. Andererseits verjüngt sich die Breite der Filterplatine zur Chipposition hin. Dadurch ergibt sich diese besondere Geometrie der Filterplatine in Abbildung 3.3. Durch den möglichst kleingehaltenen Chip liegen die Bondflächen sehr nahe an der Falle. Auch die Vias sind direkt an diesen Bondflächen positioniert. Durch die kleine Geometrie sind des weiteren die Bondflächen sehr klein gehalten und nahe zusammen. Dadurch ergab sich jedoch das Problem, dass es nicht möglich ist, die gesamte Falle ohne Kurzschlüsse zu kontaktieren [26].

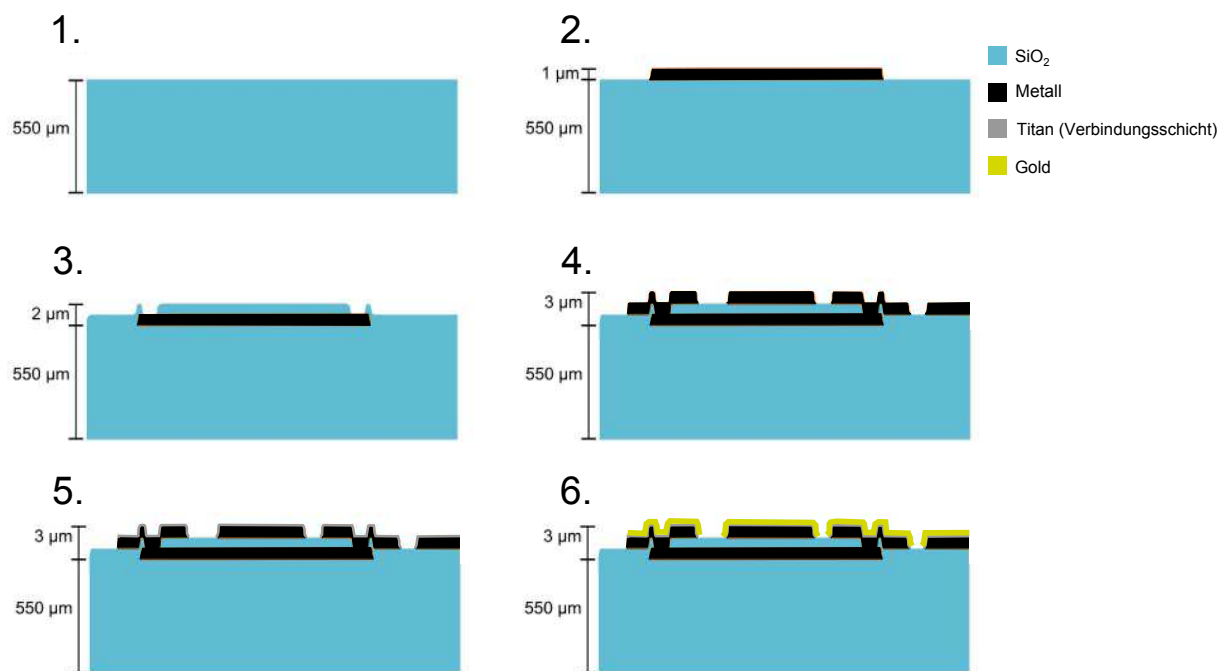
Wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, sind Falle und Chip jeweils als konzentrische Rechtecke ausgerichtet. Dadurch kann der Chip kleiner gestaltet werden. Für das Kühlen des Ions in beide Bewegungsrichtungen werden zwei Laserstrahlen benötigt. Da nur eine Richtung mit dem Laser frei zugänglich ist, kann mit dieser Ausrichtung nur eine Bewegungsachse gekühlt werden. Das Kühlen beider Achsen ist dadurch mit dieser Geometrie nur schwer möglich.

## 3.2 Ziegelstadl: Neuentwurf

Die im Kapitel 3.1 beschriebene Methode der Bearbeitung des Chips, damit diese gebondet werden kann, beschädigt das Dielektrikum des Chips. Eine weitere Möglichkeit, das Bonden



**Abbildung 3.3:** Filterplatine mit aufgeklebter Ionenfalle. Die Filterplatine befestigt und verbindet einerseits die Falle mit der Durchführung (siehe Kapitel 4), andererseits dient sie als Filternetzwerk für die DC-Elektroden. Diese Filter (Filterbauteile hier nicht eingelötet) sind so nahe wie möglich an der Falle selbst. Über das Design und die Dimensionierung der Filterplatine siehe [26].



**Abbildung 3.4:** Skizzierter Herstellungsprozess von Ziegelstadl V1.1. Im Vergleich zu Ziegelstadl V1.0 können statt mit Titan ummantelten Kupferschichten andere Metalle verwendet werden, da das Kupfer in dieser Version nicht mehr benötigt wird. Des Weiteren wird eine Verbindungsschicht aus Titan und eine Goldoberfläche zum Bonden hinzugefügt. Die restliche Herstellung der Struktur bleibt gleich.

der Falle zu erleichtern ist das Aufbringen einer Goldschicht auf die Elektrodenstruktur. Dies ermöglicht das Bonden und verhindert eine Oxidation. Dafür wird von der FH-Vorarlberg der Wafer noch mit der Photolackschicht geliefert. Auf diesem Wafer wird eine weitere 2 nm dicke Titanschicht aufgedampft. Diese Schicht dient als Haftschrift und hält das Gold auf dem Titan. Auf dieser Haftschrift wird 200 nm Gold aufgedampft. Diese Schicht oxidiert nicht und ist bondfähig. Nach dem Aufbringen der Goldschicht wird der Wafer zurück nach Dornbirn geschickt, die den sogenannten Lift-Off vornehmen. Dieser Schritt trägt den Photolack ab. Da das Kupfer bei dieser Methode nicht mehr zum Bonden benötigt wird, kann es durch alternative Metalle ersetzt werden. Die einzelnen Layer können nun aus beliebigen 1  $\mu\text{m}$  dicken Metallschichten bestehen (siehe Abb. 3.4). Die restliche Herstellungsprozedur bleibt gleich:

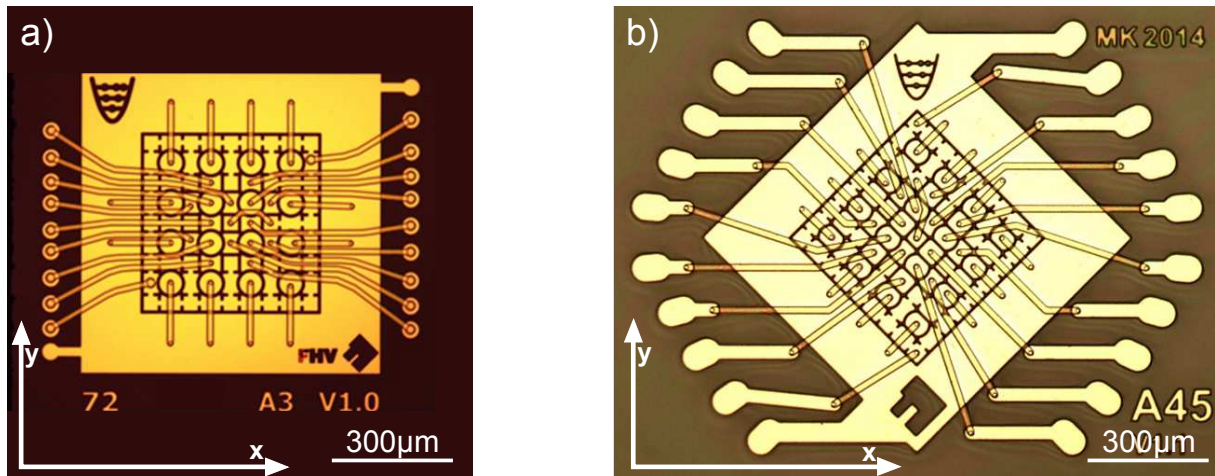
1. Ausgangssubstrat ist ein Wafer aus Pyrex ( $\text{SiO}_2$ ).
2. Darauf wird eine Metallschicht aufgedampft. Diese dienen zur Herstellung eines elektronischen Kontakts zwischen Bondfläche und Elektrode.
3. Eine weitere Silizium-Dioxid Schicht als Dielektrikum und Isolierung der verschiedenen Layer wird aufgebracht.
4. Eine Metallschicht (Elektroden) wird aufgedampft.
5. Eine weitere dünne (2nm) Titanschicht als Verbindungsschicht wird aufgetragen.
6. Die Falle wird mit 200 nm Gold beschichtet (siehe Abb. 3.5).

Wie schon in Abschnitt 3.1 erwähnt, ist durch die nahe nebeneinanderliegenden Bondflächen eine Vollkontaktierung der Falle unmöglich. Zusätzlich konnte nicht reproduzierbar auf der Goldschicht der Bondflächen gebondet werden. Durch Bondtests auf den Elektroden der Falle konnte der Ursprung dieses Problems gefunden werden. Da sich die Vias direkt an der Bondfläche befinden, ist hier die Oberfläche uneben, was das Haften der Goldschicht darauf verschlechtert. Die aufgetragene Goldschicht löst sich dadurch leicht beim Bonden vom Titan. Eine fehlerfreie Kontaktierung der Falle ist dadurch nicht möglich.

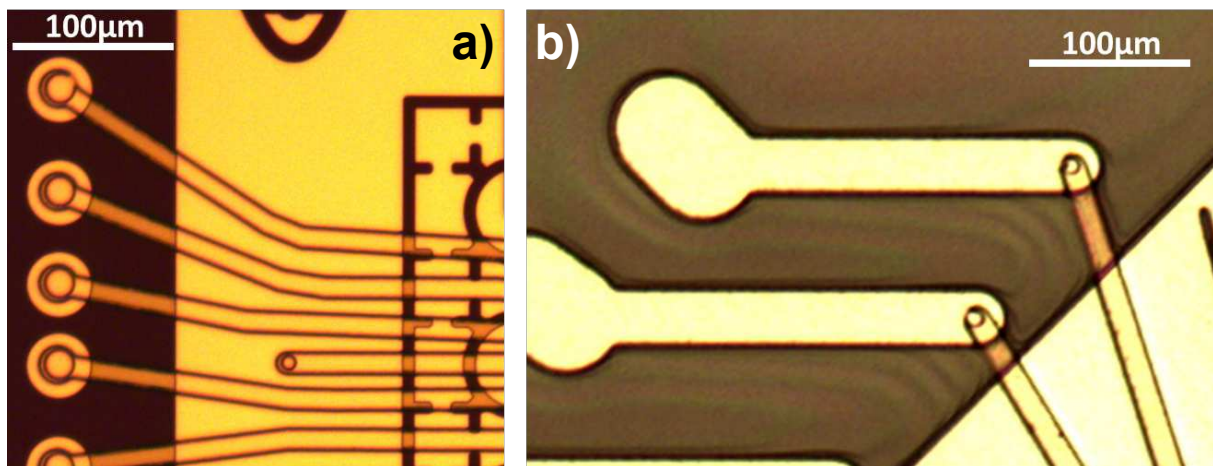
Eine neue Version dieser Falle, Ziegelstadl V1.1, mit abgeänderter Geometrie und veränderter Herstellungsprozedur wurde entwickelt, damit dieses Problem behoben wird. Wie in Abbildung 3.6 gezeigt, wurden einerseits die Bondflächen bei der neuen Version vergrößert und weiter voneinander entfernt. Andererseits befinden sich die Vias nicht mehr direkt an der Bondfläche, sondern führen auf der Oberfläche mit einem Leiter zu diesem.

Diese Änderung erlaubt ein sicheres Kontaktieren der Falle. Bei den Änderungen wurde darauf geachtet, den Chip in x-Richtung (normal zur Laserrichtung, siehe Abb. 3.5) nicht zu vergrößern. Dieses hätte eine Vergrößerung der Aberrationen des Lasers zur Folge.

Das gefangene Ion kann nur in beide Bewegungsrichtungen gekühlt werden, wenn jeweils ein Laserstrahl entlang dieser Richtungen verläuft. Eine Möglichkeit beide Bewegungsachsen gleichzeitig mit nur einem Laserstrahl zu kühlen besteht darin, den Laserstrahl entlang einer Überlagerung beider Bewegungsrichtungen zu führen. Da durch die Rotationssymmetrie einer sphärischen Falle keine Bewegungsachsen elektronisch definiert werden, richten sich diese Bewegungsrichtungen parallel und normal zur Richtung des Kühllasers aus. Dies verhindert ein gleichzeitiges Kühlen beider Bewegungsachsen mit nur einem Laserstrahl. Durch das Brechen

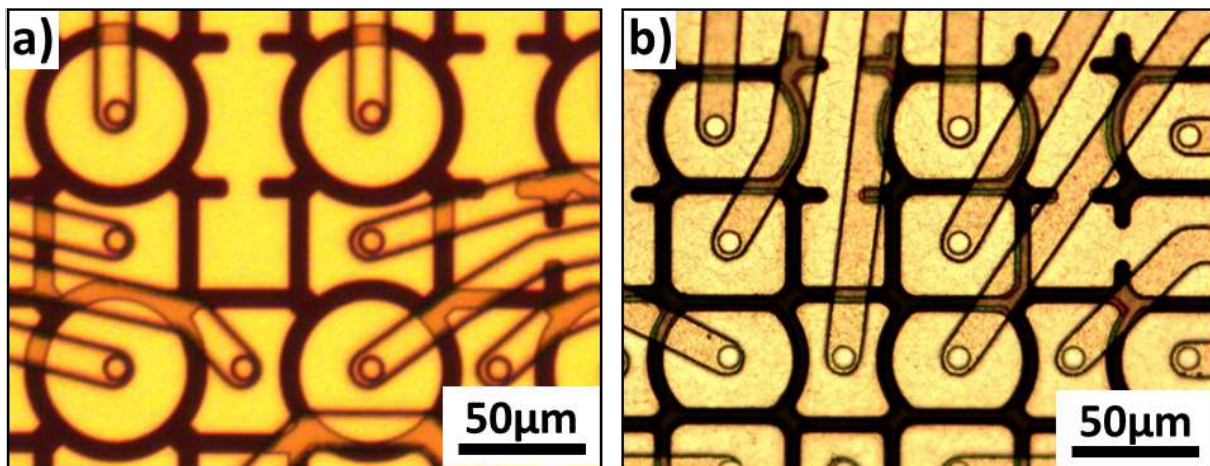


**Abbildung 3.5:** Vergleich der Ausrichtung zwischen Ziegelstadl V1.0 und Ziegelstadl V1.1 (gleicher Maßstab). Bei beiden Fällen ist der Laserzugang entlang der y-Achse (vertikal). a) Ziegelstadl V1.0: Durch die Rotationssymmetrie werden die Bewegungsachsen vom Laserstrahl definiert. Da nur entlang einer Richtung ein freier Laserzugang möglich ist, kann nur in eine Dimension gekühlt werden. b) Ziegelstadl V1.1: Da durch die Elektrodenform die Rotationssymmetrie bricht, werden die Bewegungsachsen elektrisch definiert. Diese verlaufen jeweils im Winkel von  $45^\circ$  zum Laserstrahl. Dadurch können durch einen Laserstrahl beide Achsen gleichzeitig gekühlt werden.



**Abbildung 3.6:** Vergleich der Bondingpads zwischen Ziegelstadl V1.0 und Ziegelstadl V1.1 (gleicher Maßstab). a) Ziegelstadl V1.0: die Vias kommen direkt am Bondingpad heraus und machen dadurch die Oberfläche uneben. Die Flächen selber sind zu klein im Vergleich zum Bondingdraht und haben auch einen zu kleinen Abstand zueinander. Dadurch kann diese Falle nicht vollständig, ohne Kurzschlüsse, kontaktiert werden. b) Ziegelstadl V1.1: Bondflächen befinden sich nicht direkt oberhalb der Vias. Dadurch ist die Bondebene flach. Im Vergleich zur alten Version sind die Bondflächen größer und haben größere Abstände zueinander, welcher vor Kurzschlüssen beim Bonden schützt.



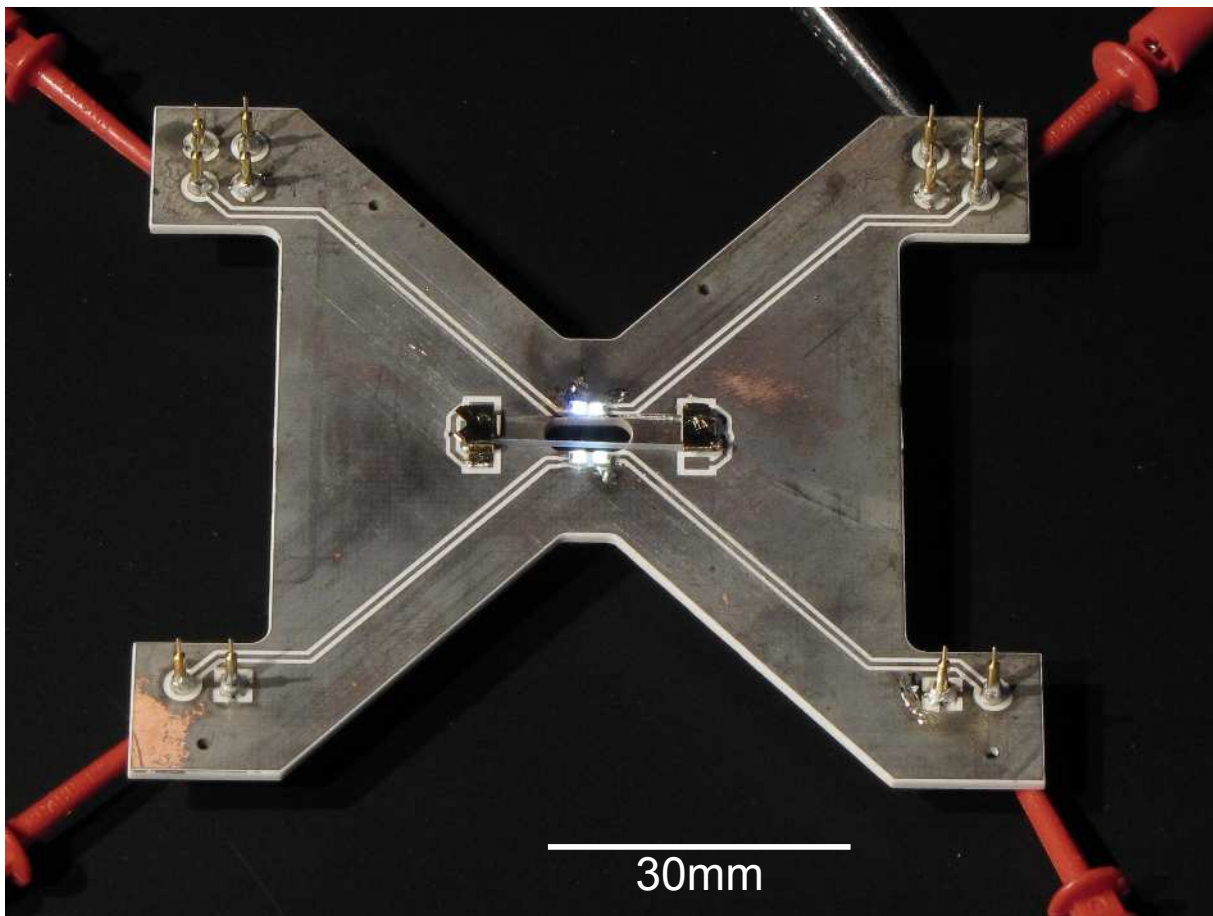


**Abbildung 3.7:** Vergleich der Masse-Elektroden zwischen Ziegelstadl V1.0 und Ziegelstadl V1.1 (gleicher Maßstab). a) Ziegelstadl V1.0: Elektroden sind kreisrund. Keine Unterscheidbarkeit beider planaren Achsen. b) Ziegelstadl V1.1: Kreisrunde Elektroden, die (in dieser Lage) oben und unten abgeflacht sind. Dadurch sind die Bewegungsachsen definiert und das Ion kann durch eine Laserbestrahlung in beiden Bewegungsachsen gleichzeitig gekühlt werden.

der Rotationssymmetrie, wie in [Abbildung 3.7](#) gezeigt, werden die Bewegungsachsen elektronisch definiert. Da die Falle zusätzlich um  $45^\circ$  gedreht wurde, liegen die Bewegungsachsen der neuen Falle in [Abbildung 3.5](#) in den Richtungen  $x + y$  und  $x - y$ . Ein Laserstrahl zum Kühlen des Ions entlang der  $y$ -Richtung verläuft somit in einer überlagerten Richtung ( $2y = (x + y) - (x - y)$ ) der beiden Bewegungsachsen und kann dadurch auch beide gleichzeitig kühlen. Da der Chip für Ziegelstadl V1.0 ausreichend groß gewählt wurde, konnte die Größe entlang der  $y$ -Achse (entlang des Laserstrahls) des Chips bei Ziegelstadl V1.1 trotz Rotation beibehalten werden. Nur entlang der  $x$ -Achse wurde der Chip vergrößert. In dieser Achse verläuft jedoch kein Laser, somit ist hier eine Vergrößerung unproblematisch. Insgesamt vergrößerte sich die Falle von  $1,1 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$  auf  $1,7 \text{ mm} \times 1,1 \text{ mm}$ .

### 3.3 Masseplatine

Eine weitere RF-Masseelektrode oberhalb der planaren Falle wie in [Abbildung 2.2](#) kann die Potentialtiefe und die Fangeffizienz erhöhen. Diese dient auch der Abschirmung von externen Streufeldern. Würde man eine einfache Leiterplatte oberhalb des Chips montieren, so wäre zwar eine Masseelektrode definiert, jedoch beeinträchtigt man den optischen Zugang. Diese optische Achse wird zum Nachweis der Ionen mithilfe einer Kamera verwendet. Durch Verwendung einer mit Indiumzinnoxid (indium tin oxide: ITO) beschichteten Quarzplatte (06450B-CF SPI Supplies Brand ITO-Coated Quartz Slides,  $25 \times 25 \text{ mm}$ ,  $70\text{-}100 \Omega$ ), welche im sichtbaren Licht ein weitgehend durchsichtiger Halbleiter ist, kann dieser optische Zugang erhalten bleiben. Diese ITO-Platte hat einen höheren Leitungswiderstand als eine Kupferleitung. Damit der Gesamtwiderstand dieser RF-Masse gering gehalten wird, wird nur, wie in [Abbildung 3.8](#) gezeigt, ein kleiner Teil der gesamten Masseplatine mit diesem Halbleiter ersetzt. Die übrige Masseplatine besteht aus einer Kupferbeschichteten Platine (Material RO4350B: Vakuum taugliches



**Abbildung 3.8:** Masseplatine mit eingeschalteten Laserdioden. In der Mitte der Falle ist die ITO-Platte zu sehen, durch die mit einer Kamera die Falle betrachtet werden kann. Die Masseplatine wird mit dieser sichtbaren Seite in Richtung Falle montiert, damit die Laserdioden die Falle bestrahlen können. Die Stecker am Rand der Platine werden, gleich wie das Filterboard (siehe Abb.3.3), an die freien Gegenstecker an der elektronischen Vakuumdurchführung (Kapitel 4) angeschlossen. Insgesamt werden 12 Verbindungsstecker benötigt.

Leiterplattenmaterial, Halogenarm). Die RF-Masse kann zusätzlich mit einer kontrollierbaren DC-Spannung versehen werden, um diesen Fallenparameter zusätzlich steuern zu können und langsam veränderlichen DC-Feldern entgegenzuwirken.

Es ist sehr hilfreich, einige elektrische Komponenten sehr nahe der Falle zu haben. Eine davon ist eine integrierte Lichtquelle, welche lokal Licht liefert, anstatt die Falle mit Quellen außerhalb der Vakuumkammer zu beleuchten. Letztendlich wäre es ideal, Laser im Vakuum zu haben. Jedoch sind LED's als erster Schritt für einige Anwendungen ausreichend. Dazu zählen Laden/Entladen und Reinigen der Oberfläche unter Benützung von UV-Licht. Des Weiteren können sie zur Photoionisation von Kalzium als Teil der Ladeprozedur der Falle dienen [38]. Zu diesem Zweck werden rund um den Ausschnitt für die Quarzplatte UV-LEDs (4x Philips Lumileds - LHUV-0385-0250: Hochleistungs LEDs, 385 nm-390 nm) positioniert. 12 elektrische Steckverbindungen (Mill-Max 3116-2-00-34-00-00-08-0) zur elektrischen Vakuumdurchführung (siehe Kapitel 4) erlauben das Steuern all dieser Parameter. 2 Stecker werden für

die Steuerung der DC-Spannung an der ITO-Platte verwendet. 4 Verbindungen werden zur individuellen Ansteuerung der vier Laserdioden benötigt. Die restlichen 6 Steckplätze sind geerdet und mit dem Massefeld verbunden, um für eine gute Abschirmung zu sorgen.

### 3.4 Zusammenfassung

Durch die Weiterentwicklungen des alten Designs zur Ionenfalle Ziegelstadl V1.1 lässt sich die Falle einfacher verbinden, ohne dass dabei die Oberfläche beschädigt oder beeinträchtigt wird. Das Aufdampfen einer Goldschicht vermeidet den Ätzworgang. Durch die Vergrößerung der Bondflächen und Vergrößerung des Abstandes zwischen diesen lässt sich auf der neuen Version ohne Kurzschlüsse die gesamte Falle kontaktieren. Da die Vias nicht mehr direkt an der Bondfläche liegen, haftet die Goldbeschichtung besser und ein reproduzierbares Bonden ist möglich. Das Abflachen der runden Elektroden in einer Achse definiert die Bewegungsrichtungen und ermöglicht zusammen mit Rotation der Struktur um  $45^\circ$  ein Laserkühlen beider Bewegungsachsen mit nur einem Laserstrahl. Mithilfe der Masseplatine lässt sich ohne Einschränkungen im optischen Zugang die Potentialtiefe der Falle verbessern. Außerdem bietet diese Masseplatine genügend Freiraum für weitere elektronische Komponenten wie LEDs. Der Ziegelstadl V1.1 Chip wird auf die Filterplatine geklebt und mit Bonds elektrisch kontaktiert. In Verbindung mit der neu entwickelten Masseplatine ergeben sie zusammen eine Ionenfalle, die in einem  $4 \times 4$  Feld Ionen fangen und miteinander interagieren lassen kann.

# Kapitel 4

## Elektrische Vakuumdurchführung

Die Ionenfalle Ziegelstadl besitzt 20 elektrische Kontaktierungen (siehe Kapitel 3). Für die Masseplatte werden weitere 12 Kontakte verwendet (siehe Abschnitt 3.3). Daher werden mindestens 32 Kanäle von der Luftseite in eine Vakuumkammer benötigt, um die gesamte Falle optimal ansteuern zu können. Damit der Aufbau skalierbar bleibt, wird eine elektrische Durchführung benötigt, welche genügend Kanäle sowohl für Gleich- als auch für Wechselspannung besitzt. Auch muss diese Vakuumdurchführung sowohl Ultrahochvakuum-Kompatibilität, als auch besondere elektrische Voraussetzungen erfüllen, wie z.B. eine niedrige Eigenkapazität. Da es solche Bauteile nicht im Handel gibt, wurde eine eigene Durchführung entwickelt, welche in diesem Kapitel beschrieben wird. Für die Ansteuerung des Kalziumofens und der Getterpumpen können handelsübliche Vakuumdurchführungen verwendet werden.

Im Abschnitt 4.1 wird erörtert, warum ein Ultrahochvakuum (UHV) benötigt wird und welche elektrischen Voraussetzungen erfüllt werden müssen. Das bereits existierende UHV-System wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt und die Probleme dieses Setups diskutiert. Abschnitt 4.3 beschreibt die neue Version der Durchführung und die Änderungen zum Vorgängermodell werden aufgezeigt. Für diese Durchführung ist ein spezieller Ausheizprozess nötig, welcher in Abschnitt 4.4 beschrieben wird. Die Charakterisierung der Durchführung in Bezug auf elektrisches Verhalten und UHV-Kompatibilität wird in Abschnitt 4.5 beschrieben.

### 4.1 Anforderungen an das Vakuumsystem

Damit in einem Vakuumsystem mit unserer Ionenfalle Ziegelstadl Ionen gespeichert werden können, muss dieses System sowohl Vakuum-spezifische, als auch elektrische Spezifikationen erfüllen. Darum werden hier die wichtigsten Bauteile des Systems anhand dieser beiden Anforderungen untersucht.

#### 4.1.1 Vakuumanforderungen

Ein gespeichertes Teilchen darf nicht mit Restgaspartikeln stoßen oder interagieren. Dafür muss die Hintergrundteilchendichte  $n$  gesenkt werden. Dies wird durch einen niederen Druck in der Kammer erreicht. Unsere Vakuumkammer arbeitet bei Raumtemperatur ( $T \approx 300$  K). Für eine entsprechend niedrige Kollisionsrate beziehungsweise Verlustrate des gespeicherten Ions hat



sich ein Druck von  $p = 10^{-9}$  mbar (entspricht  $10^{-7}$  Pa) oder weniger als notwendig erwiesen. Durch diese Bedingungen erhält man einen Stoß pro mehreren Minuten [14, 39]. Ein niedriger Druck kann diese Stoßrate weiter senken. Dies kann z.B. durch geringere Temperaturen erreicht werden (Cryostat).

Für das Erreichen eines Ultrahochvakuums (UHV) werden Vakuumpumpen benötigt. Abbildung 4.1 gibt einen groben Überblick über die verschiedenen Pumpvarianten und deren Einsatzbereich. Wie daraus zu erkennen ist, kann nicht mit einer einzigen Technologie vom Umgebungsdruck ( $10^3$  mbar) zum gewünschten Vakuum gepumpt werden. Deshalb wird eine kombinierte Anwendung mehrerer Technologien benötigt.

### Ausheizprozess

Sind Vakuumbauteile in normaler Atmosphäre, lagert sich Wasser auf deren Oberfläche ab. Dies würde sich unter Vakuum nur langsam ablösen. Dadurch wird der erreichbare minimale Druck limitiert. Ein Erhitzen des Vakuumsystems während des Pumpvorganges kann diesen Prozess beschleunigen. Diesen Vorgang nennt man Ausheizprozess. Je höher die Ausheiztemperatur gewählt wird, desto schneller wird ein gutes Vakuum erreicht. Bei höheren Ausheiztemperaturen wird das Vakuum auch besser. Diese werden durch Eigenschaften der Bauteile nach oben beschränkt. Bei den handelsüblichen Bauteilen (Hauptkammer, Flansche usw.) wird diese Temperatur bereits angegeben. Platinen und Sichtfenster halten nur niedrigen Temperaturen ( $< 200$  °C) stand. Da sowohl in der Kammer, als auch zum Versiegeln der elektrischen Durchführungen Lötzinn verwendet wird (siehe Kapitel 3 und Abschnitt 4.3), muss auch die Schmelztemperatur des Lötzinns ( $\sim 220$  °C) berücksichtigt werden, um weder ein Vakuumleck zu erhalten, noch den Fallenaufbau zu zerstören.

Wird das gesamte System zu schnell erhitzt (nicht adiabatisch), können thermische Gradienten innerhalb des Systems entstehen. Dadurch haben verschiedene Komponenten unterschiedliche Temperaturen. Die dadurch entstehenden unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen der Bauteile können zu mechanischen Belastungen des Systems führen. Werden diese Belastungen zu groß, so werden die Bauteile dadurch beschädigt. Ein langsames Erhitzen des gesamten Systems vermeidet diese Beschädigungen. Ein Temperaturgradient von  $< 20$  °C/h hat sich für andere Systeme als praktikabel erwiesen.

### 4.1.2 Elektrische Anforderungen

Innerhalb der Vakuumkammer werden einige elektrische Bauteile betrieben, wie die Falle selbst (siehe Kapitel 3), ein Kalziumofen, eine Ionenpumpe, eine SAES Getterpumpe und eine TiSub Pumpe. Da eine Ansteuerung dieser Bauteile von außen erfolgt, werden elektrische Durchführungen dafür benötigt. Alle Bauteile müssen UHV-kompatibel sein. Die Durchführungen müssen zusätzlich so dicht sein, um mit den vorhandenen Pumpen ein UHV im Bereich von mindestens  $10^{-9}$  mbar (idealerweise  $10^{-11}$  mbar) halten zu können. Die Pumpen sind schon direkt an einem Flansch montiert, welcher an der Luftseite die elektrische Kontaktierung hat. Für den Kalziumofen wird eine elektrische Durchführung für hohe Ströme (bis 10 A) benötigt.

Für das vollständige Kontaktieren der Ionenfalle und der Masseplatine werden insgesamt 32 weitere elektrische Durchführungen benötigt. Davon sind 8 Masseleitungen, 10 DC Leitungen und 14 RF Leitungen. Ein elektrisches Übersprechen kann durch kurzgehaltene Leitungen zur

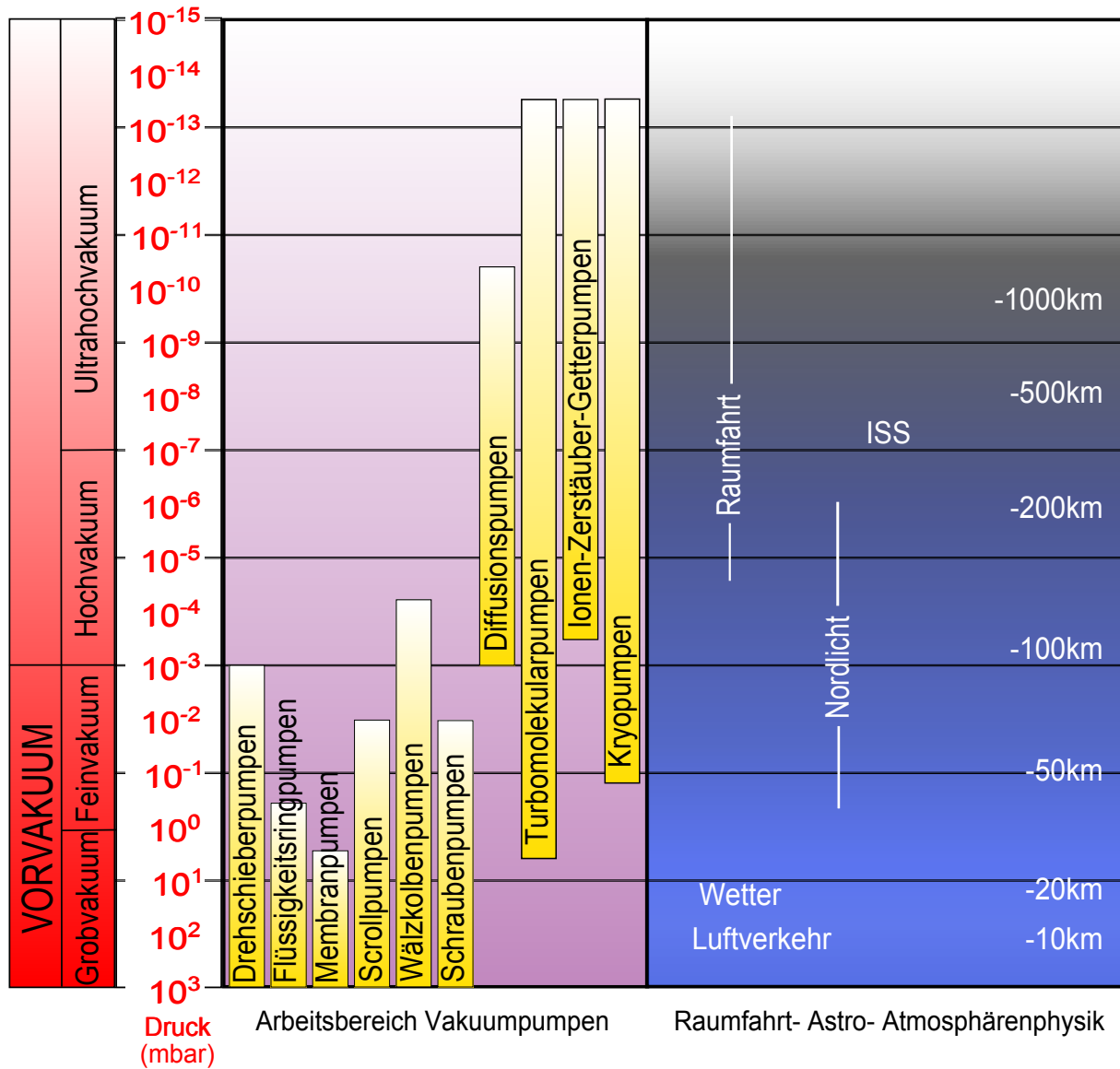
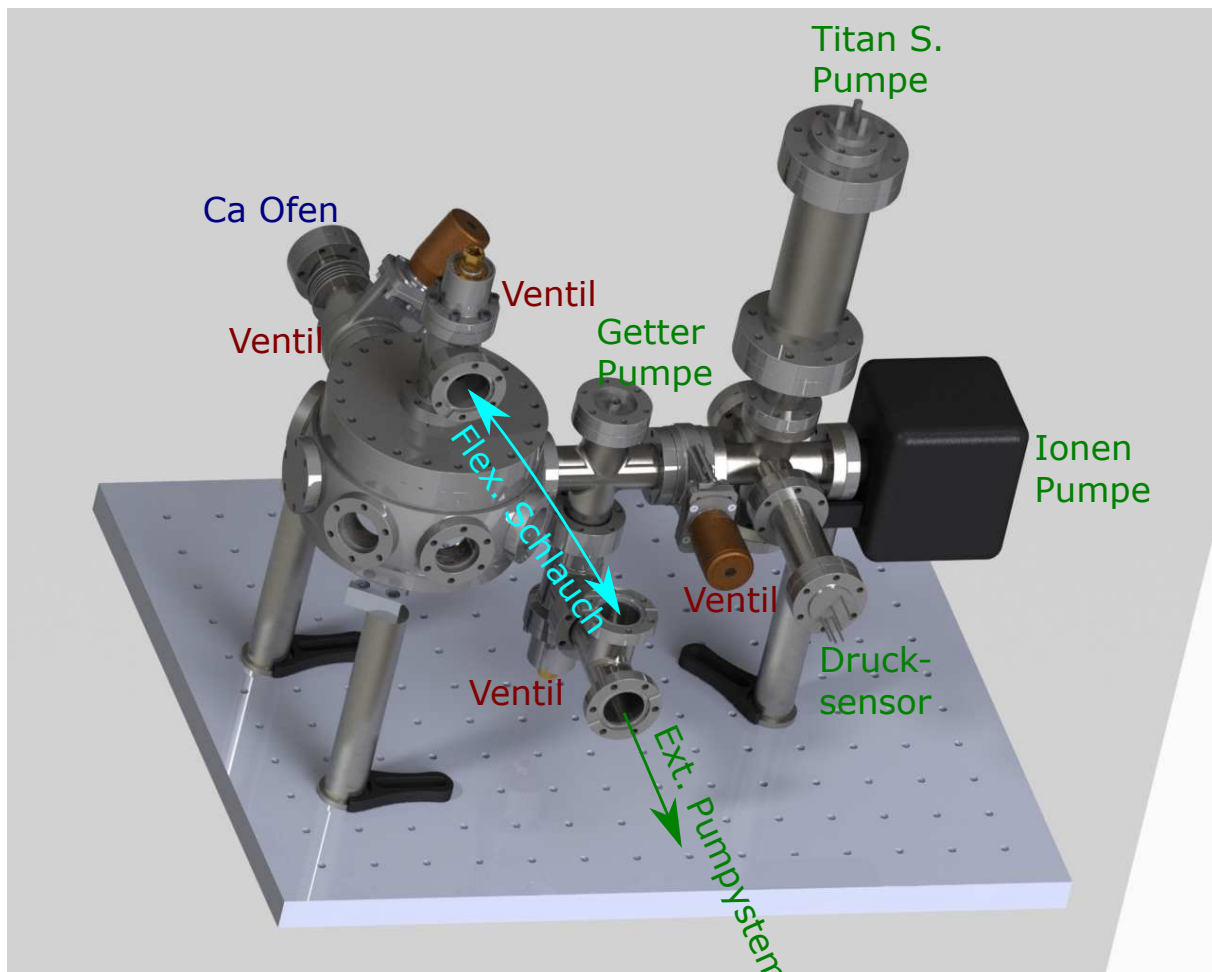


Abbildung 4.1: Übersicht der Vakuumtechnologien und Vakuumbereiche verglichen mit dem Druck der Atmosphäre. Adaptiert aus [40].

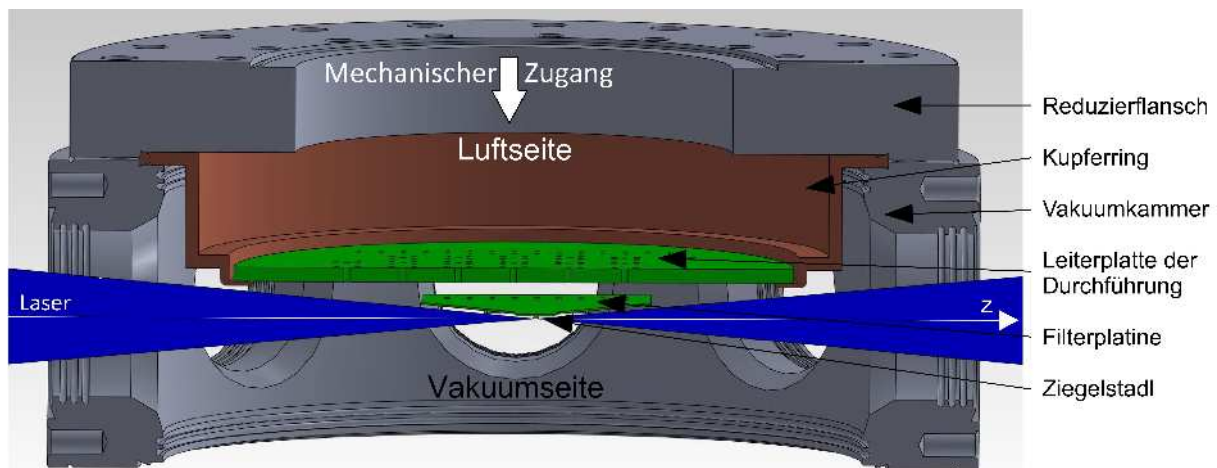
Falle unterdrückt werden. Besonders das Übersprechen zwischen den RF Signalen soll vermieden werden. Außerdem darf die Kapazität der gesamten Leitung von der Quelle bis zur Falle maximal im Bereiche der Kapazität der Falle (3 pF) liegen, damit bei den RF Leitungen eine maximale Spannungsamplitude an der Falle anliegt (siehe Kapitel 5) [37].

## 4.2 Ausgangspunkt: Vakuumapparatur



**Abbildung 4.2:** Systemaufbau für den Ausheizprozess. Für das Ausheizen werden der Reduzierflansch und das Ventil an die Luftseite der Durchführung geschraubt. Dieses wird mit einem T-Stück und einem flexiblen Schlauch zu einem Ventil der Hauptkammer verbunden. Das Ventil wird nach dem Ausheizen geschlossen, um es von der Luftseite zu trennen. Die dritte Verbindung des T-Stücks wird mit einem externen Pumpsystem verbunden. Im Bild rechts ist der gesamte interne Pumpapparat abgebildet, was mit einem Ventil von der Kammer abgeschlossen werden kann. Dadurch kann die Kammer geflutet werden ohne das Pumpsystem der Atmosphäre aussetzen zu müssen.

Der grundlegende Vakuumaufbau existiert bereits (siehe Abb. 4.2) aufgrund des vorhergehenden Versuchs mit der Ionenfalle Folsom [37] und den vorhergehenden Experimenten mit Ziegelstadl V1.0 [26]. Die Hauptkammer besitzt 8 seitliche Zugänge und wird deshalb Oktagon



**Abbildung 4.3:** Übersicht der Vakuumkammer und der elektrischen Durchführung. Die zylinderförmige Hauptkammer hat, zusätzlich zu Deckel und Boden, 8 weitere Zugänge an der Seite. Deshalb wird diese Hauptkammer auch Oktagon genannt. Die elektrische Durchführung für die Falle besteht aus einer Leiterplatte, die auf einen Kupferring gelötet wird. Dieser dient gleichzeitig als Dichtring zwischen Oktagon und einem Flansch, der zur Befestigung des Ringes dient. Für die Befestigung des Kupfering wurde bei der früheren Version ein Reduzierflansch verwendet. Aus [26].

genannt. Dieses Oktagon beinhaltet das Filterboard mit aufgeklebter Ionenfalle. Für das Ankleben der Falle wurde Vacseal (Structure Probe, Inc) benutzt. Dieser Kleber benötigt bei 120 °C 2 Tage zum Aushärten. Dieses Erhitzen der Falle unter Atmosphäre verschlechtert jedoch die Qualität der Oberfläche durch die entstehende Oxidation.

Abbildung 4.3 zeigt die Fenster seitlich und an der Unterseite der Kammer, um die Falle optisch zu erreichen. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, befindet sich auf einer Seite ein Kalziumofen an einem CF-Flansch befestigt, der gleichzeitig die elektrische Durchführung für diesen beinhaltet. Dieser Ofen ist auf eine Ausrichtungsanlage montiert, um mit dem Kalzium aus dem Ofen zur Falle zielen zu können. Zusätzlich kann mit einem Vakuumventil der Ofen zur Hauptkammer abgedichtet werden, um bei einer Flutung des Systems nicht den Ofen verunreinigen zu müssen. An einer weiteren Seite des Oktagons, welche nicht für den optischen Zugang benötigt wird, hängt das Pumpsystem. Dieses System beinhaltet eine Ionenpumpe, eine Getter Pumpe und eine Titan Sublimations Pumpe (TiSub Pumpe). Des Weiteren ist ein Sensor zur Messung des Drucks angeschlossen. Mithilfe eines Ventils kann die Vakuumkammer an externe Pumpen angeschlossen werden. Auch die Ionenpumpe, die TiSub Pumpe und der Sensor werden mit einem Vakuumventil von der Hauptkammer getrennt, um beim Fluten diese Pumpvorrichtungen nicht der Atmosphäre aussetzen zu müssen. Da dieser Aufbau bereits hinreichend gut bei Folsom funktionierte [37], wird dieser unverändert weiter verwendet.

Auch eine erste Version einer elektrischen Durchführung für die Kontaktierung der Falle existiert, die 60 elektrische Kanäle (30 Signalkanäle + 30 Masseleitungen) von der Luftseite in die Vakuumseite leitet. Die Anforderungen an die elektrische Durchführung zur Betreibung einer Ionenfalle sind:

- Erreichbarkeit eines Druckes unter  $p = 10^{-9}$  mbar
- 24 elektrische Signal Kanäle plus extra Masseleitungen in die Vakuumseite

- Kapazität der Durchführung im Bereich der Falle (3 pF)

Diese Durchführung besteht aus einer vergoldeten (Schutz vor Oxidation) Leiterplatte (Material: Rogers 4260, Dicke: 3,2 mm), in die Stecksockel (Mill-Max 1038-0-15-15-30-27-04-0) und Koaxialstecker (Sub-Miniature Typ B: SMB) eingelötet werden. In die Stecksockel, die auf der Vakuumseite stehen, wird die Filterplatine mit der Ionenfalle eingesteckt und kontaktiert. Von den Stecksockeln laufen Leiterbahnen zu den SMB-Steckern. Diese SMB-Stecker zeigen auf die Luftseite und können mit Koaxialkabel verbunden werden. Möglichst große Abstände zwischen den Sockeln halten die Kapazität zwischen den Leitungen so gering wie möglich. Da vor allem die Kapazität zwischen verschiedenen RF-Kanälen, welche für das Übersprechen verantwortlich ist, gering gehalten werden sollte, umgeben jeweils eine RF-Signalleitung nur Masseleitungen. Die Kapazität zwischen Signal- und Masseleitung beträgt 7 pF und ist somit nahe der Fallkapazität und daher akzeptabel.

Wie in Abbildung 4.4 zu sehen ist, wird diese Leiterplatte an einen versilberten Kupfering gelötet. Die Versilberung erleichtert das Anlöten der Leiterplatte. Dieser Kupfering dient gleichzeitig als Dichtring zwischen Oktagon und einem CF-Reduzierflansch, der von oben angeschraubt wird. Dieser Reduzierflansch ermöglicht einerseits eine Befestigung des Kupferings. Andererseits erlaubt dieser Flansch, wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist, einen mechanischen Zugang durch das Loch des Reduzierflansches für die Kontaktierung der SMB-Stecker. Da sowohl die Leiterplatte beim Erhitzen weicher wird, als auch die Lötunkte gelockert werden, würde das System einem normalen Heizvorgang unter Vakuum durch den Druck der Luftseite auf die Platine nicht standhalten. Damit das System trotzdem unter höheren Temperaturen ausgeheizt werden kann, wird die Luftseite der Platine während des Heizvorganges auch unter Vakuum gehalten. Dafür wird, wie in Abbildung 4.5 gezeigt, am Reduzierflansch ein Ventil angeschlossen, das mit dem externen Pumpsystem verbunden ist.

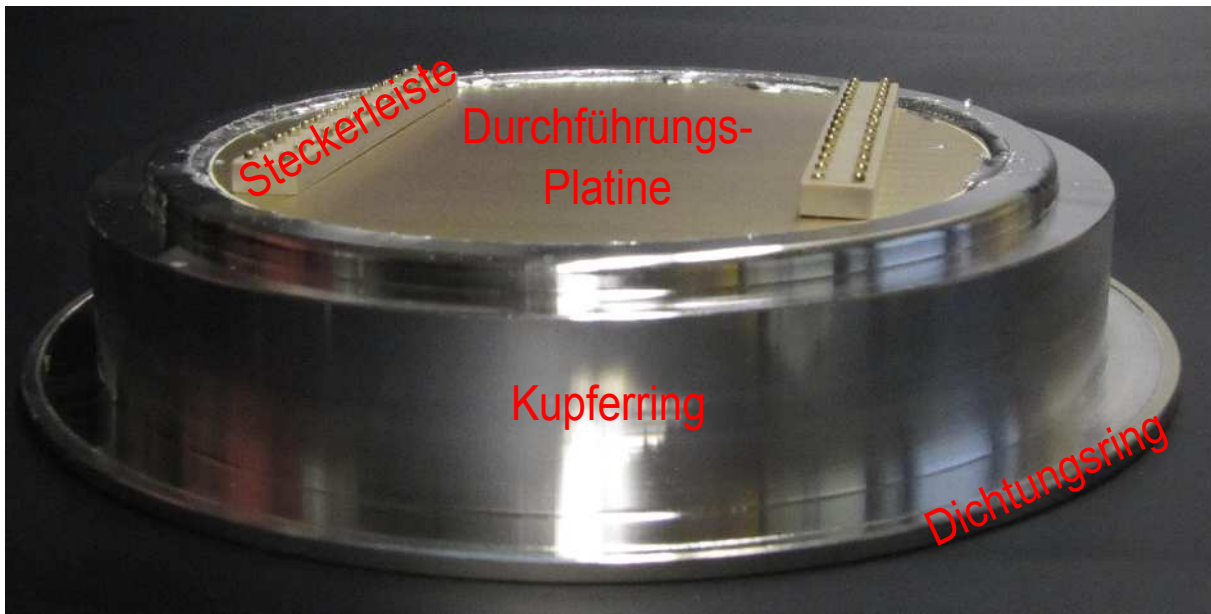
Dieses System erreichte einen Druck von  $10^{-7}$  mbar vor dem Ausheizen und bestand den Helium-Lecktest mit  $0,3 \cdot 10^{-10}$  mbar l/s. Den Ausheizvorgang überstand diese Durchführung jedoch nicht und wurde undicht. Die Ursachen dafür waren zu Beginn dieser Diplomarbeit noch unklar.

## 4.3 Neues Setup

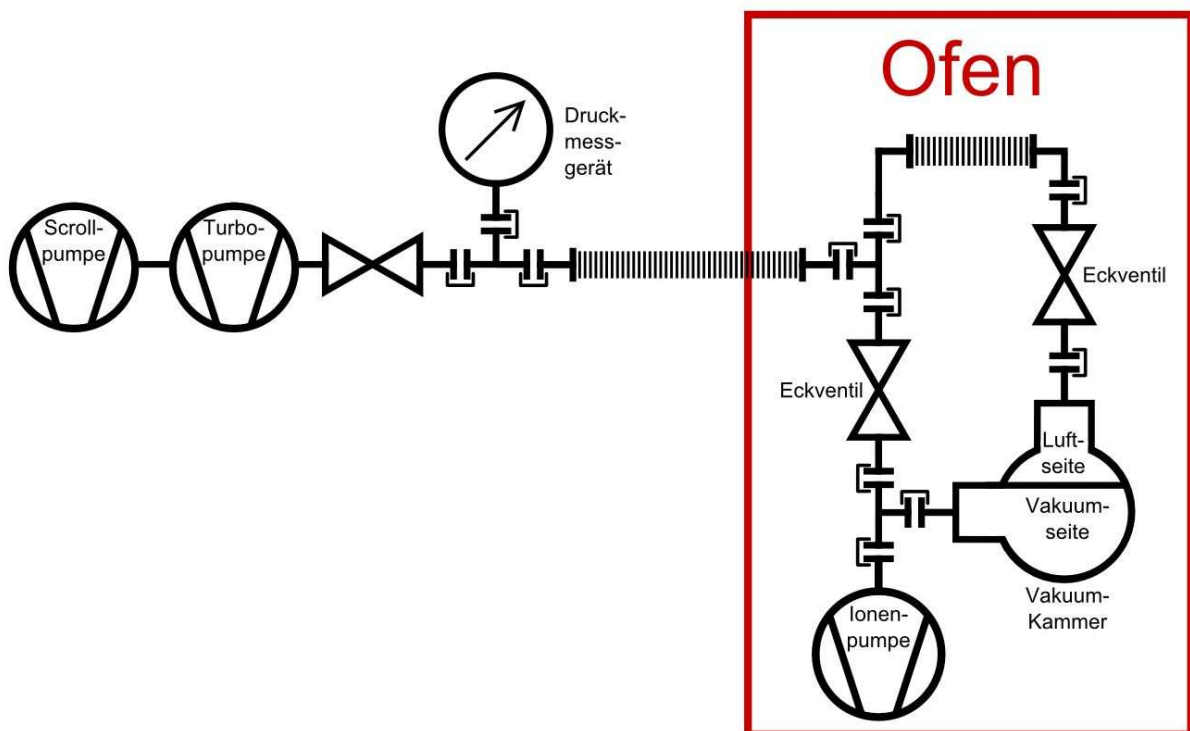
Ein Ausheizen der Falle unter Atmosphäre verschlechtert erheblich die Oberfläche der Falle [26]. Wird anstelle von Vacseal ein 2-Komponentenkleber (EPO-TEK H20EPFC) verwendet, der kein Ausheizen erfordert, kann dies vermieden werden. Dieser 2-Komponentenkleber benötigt unter Raumtemperatur 7 Tage zur Aushärtung. Mithilfe dieses Klebers wird die Falle auf das vorhandene Filterboard geklebt. Die elektrische Durchführung (siehe Abb. 4.4) ermöglicht die elektrische Kontaktierung der Vakuumbauteile an der Luftseite. An diese werden das Filterboard und die Masseplatine (siehe Abschnitt 3.3) wie in Abbildung 4.7 gesteckt, um eine elektrische Kontaktierung sowie eine mechanische Befestigung zu erhalten.

Die Schwachstellen der 1. Version der Durchführung (siehe Abschnitt 4.2), die sich beim Ausheizen herausstellten, wurden durch weitere Ausheizversuche erörtert. Durch mehrere Tests stellten sich die Masseanschlüsse der SMB-Stecker als Problemstelle dar. Waren sie einmal undicht, konnte der Masseanschluss nicht mehr abgedichtet werden. Da die Massepins einen quadratischen Querschnitt besitzen, das Loch jedoch rund ist, wird mit dem Einsetzen des Pins

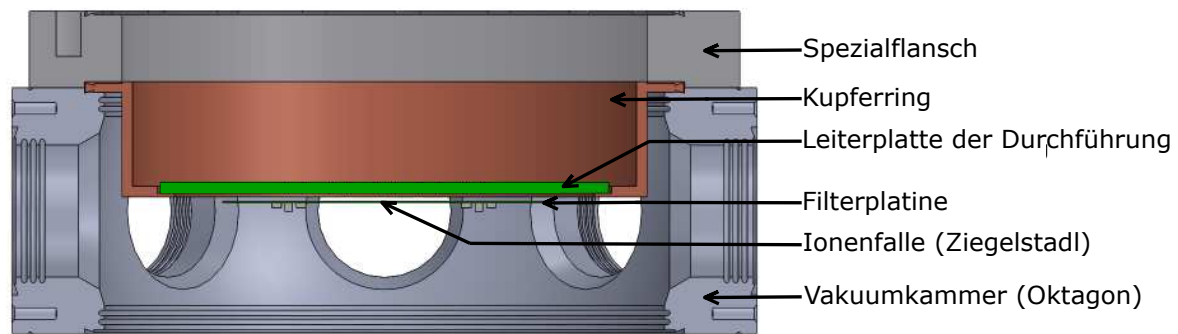




**Abbildung 4.4:** Vakuumseite von Version 2 der elektrischen Durchführung. Auf den Steckerleisten werden das Filterboard mit Falle und die Masseplatte (siehe Abschnitt 3.2) gesteckt. Die Steckerleiste ist auf einer goldbeschichteten Durchführungsplatine befestigt. Diese wird auf einen versilberten Kupfering, der gleichzeitig als Dichtring fungiert, gelötet.



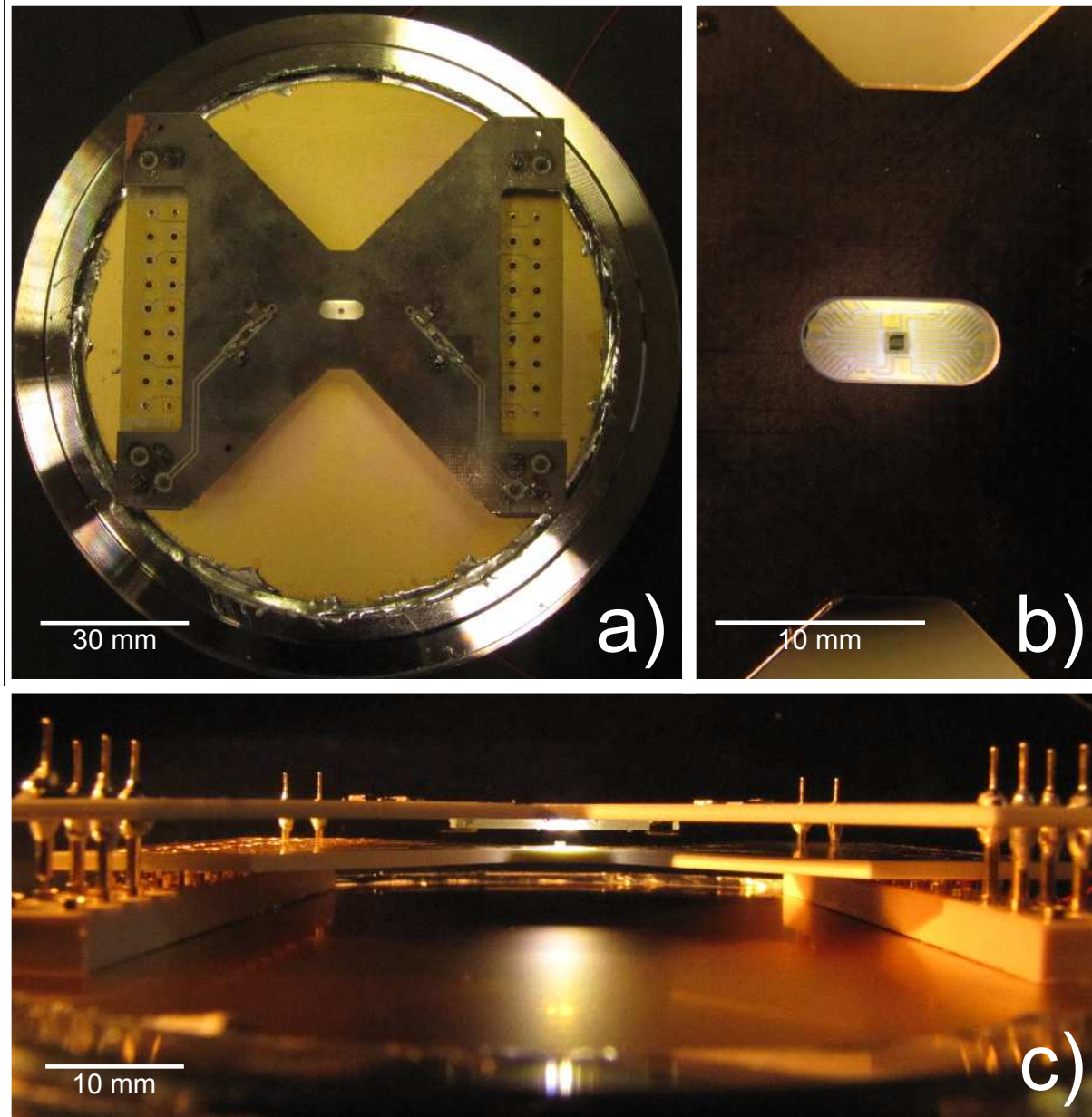
**Abbildung 4.5:** Aufbau für das Ausheizen des Vakuumsystems. Das Vakuumsystem wird von beiden Seiten während des Ausheizens mit externen Pumpen unter Vakuum gehalten. Dadurch wirkt kein Druck auf die, durch die erhöhte Temperatur aufgeweichte, Leiterplatte, die sich zwischen der Luft und der Vakuumseite befindet. Aus [26].



**Abbildung 4.6:** Übersicht der Vakuummkammer und der neuen elektrischen Durchführung. Die zylinderförmige Hauptkammer hat, zusätzlich zu Deckel und Boden, 8 weitere Zugänge an der Seite. Deshalb wird diese Hauptkammer auch Oktagon genannt. Die elektrische Durchführung für die Falle besteht aus einer Leiterplatte, die auf einen Kupfering gelötet wird. Dieser dient gleichzeitig als Dichtring zwischen Oktagon und einem Flansch, der zur Befestigung des Ringes dient. Für die Befestigung des Kupferinges wurde bei der früheren Version ein Reduzierflansch verwendet. Die neue Version verwendet dafür eine Spezialanfertigung, welche einen besseren mechanischen Zugang erlaubt.

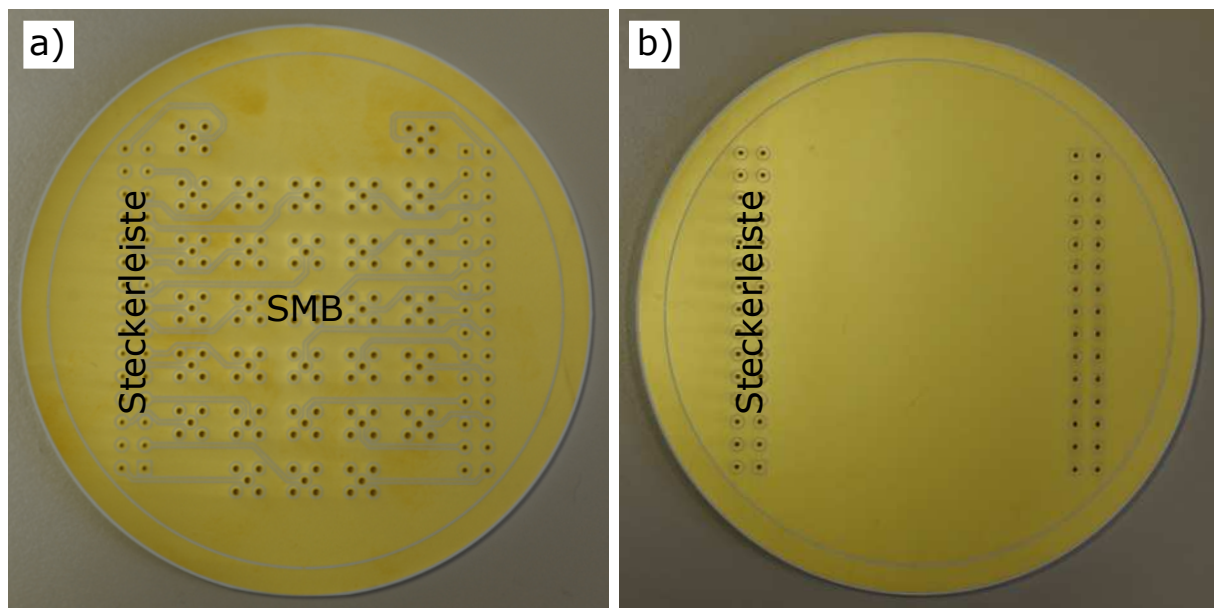
manchmal die Kontaktierung durch das Loch an den Ecken zerkratzt. Dies verhindert ein Einfließen und Abdichten des Lötzinns an dieser Stelle. Da jedes Loch in der Leiterplatte, das gelötet wird, eine prinzipielle Schwachstelle im Vakuumsystem ist, wurde die Kontaktierung der Luftseite überarbeitet. Anstelle einer elektrischen Verbindung mittels Koaxialkabel zu den SMB-Steckern der Durchführung, können auch die Stecksockel, auf denen die Falle montiert wird, zur Kontaktierung der Luftseite verwendet werden. Wie [Abbildung 4.8](#) zeigt, wurde dafür eine neue Leiterplatte erstellt. Die neue Version ist sehr ähnlich der Alten, jedoch ohne Steckplätze und Zuleitungen für die SMB-Stecker. Dadurch werden die Risikostellen für Vakuumslecks reduziert und die Leiterbahnen zur Falle werden verkürzt, was eine weitere Reduktion der Kapazität bewirkt. Auch direkte Steuerplatinen können auf diesen Stecker platziert werden und sind somit sehr nahe der Falle.

Da durch diese Änderung die Kontakte der Luftseite weiter am Rand des Flansches liegen, wird anstelle des CF-Reduzierflansches ein selbst entwickelter CF-Spezialflansch verwendet um einen leichteren mechanischen Zugang zu den Pins zu ermöglichen. Dieser Flansch soll den Kupfering der Durchführung an das Oktagon drücken und somit für Dichtheit sorgen (siehe [Abb. 4.6](#)). Damit die in [Abschnitt 4.2](#) beschriebene Ausheizprozedur wiederverwendet werden kann, muss auch an der Luftseite eine Möglichkeit für eine Verbindung von CF-Bauteilen vorhanden sein. Trotzdem soll ein guter Zugang von oben an die Stecker der Durchführungsplatine gewährleistet sein. Das Bauteil F160D150 von VACOM Vakuum Komponenten und Messtechnik GmbH ist ein Durchgangsflansch mit den geforderten Voraussetzungen. Dieser kann jedoch nicht auf dem Oktagon fixiert werden und gleichzeitig, ohne diese Verbindung zu lösen, zur Luftseite mit dem Pumpsystem verbunden werden. Daher wurde dieser Flansch modifiziert (siehe [Abb. 4.9](#) und [Anhang A](#)). Der Spezialflansch wird mit Inbusschrauben (M8) mit dem Oktagon verbunden. Damit die Köpfe dieser Schrauben nicht auf dem Flansch sitzen und somit eine Verbindung zu einem weiterem CF-Bauteil nach oben verhindern, werden Aussparungen für diese Köpfe in den Flansch gefräst (siehe [Abb. 4.9](#)). Diese erlauben ein Versenken der Schrauben in den Flansch. Da diese Aussparungen bei normalen Inbusschrauben (Kopf:



**Abbildung 4.7:** a) Elektrische Durchführung mit Filterplatine, Falle und Masseplatine von oben. b) Nahaufnahme auf die Quarzplatte der Masseplatine. Durch diese Platte ist die von den Laserdioden beleuchtete Ionenfalle Ziegelstadl zu erkennen. c) Seitenansicht des ganzen Aufbaus: Ganz unten ist die Durchführung (Kupferring und Durchführungsplatine). Darauf ist die Filterplatine mit der angeklebten Falle gesteckt. Über dieser steckt die Masseplatine mit den Laserdioden und der Quarzplatte.





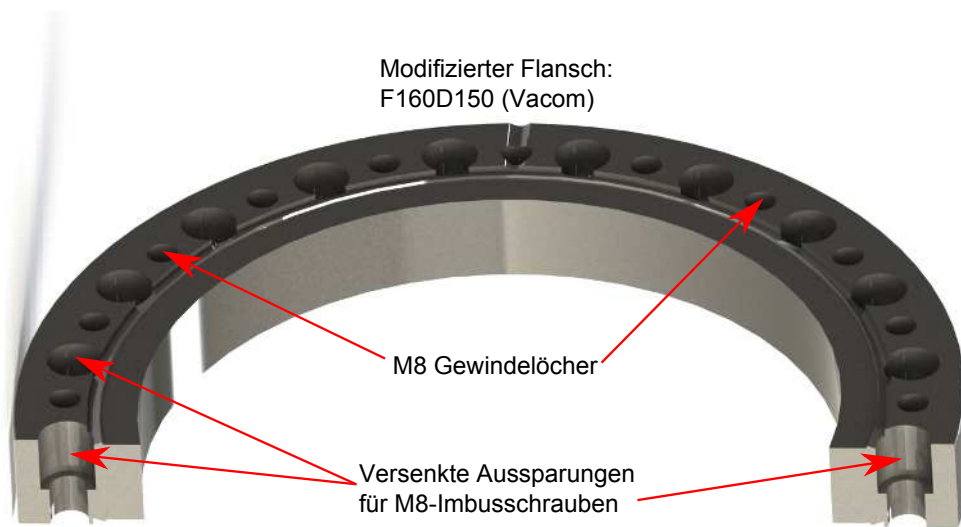
**Abbildung 4.8:** Vergleich zwischen alter und neuer Durchführungsplatine. a) Version 1 der Durchführung. Am Rand der Platine werden die Steckerleisten eingelötet. Mittels Leiterbahnen werden diese Kanäle mit die in der Mitte liegenden SMB-Stecker verbunden. b) Version 2 der Durchführung. Die Steckerleisten am Rand der Platine bleiben erhalten, die SMB-Stecker werden weggeleassen.

$\varnothing = 13$  mm) in die Klinge der oberen Seite ragen würden, werden zudem Spezialschrauben mit vermindertem Kopfdurchmesser verwendet (Kopf:  $\varnothing = 10$  mm). Zwischen diesen ausgefrästen Aussparungen werden M8 Gewindelöcher in den Flansch gebohrt (siehe Abb. 4.9). In diese können die Schrauben von oben angebrachten CF-Bauteilen geschraubt werden. Durch diese Änderungen des Flansches ist es möglich, ohne den Spezialflansch entfernen zu müssen (was das Vakuum brechen würde), CF-Bauteile an der Luftseite anzubringen bzw. abzuschrauben. Dies ist für das Ausheizen unter doppelseitigem Vakuum nötig (siehe Abb. 4.10). Für den Heizvorgang wird ein Reduzierflansch an den Spezialflansch geschraubt. Dieser wird mit einem Ventil zur externen Pumpstation verbunden.

## 4.4 Ausheizprozess

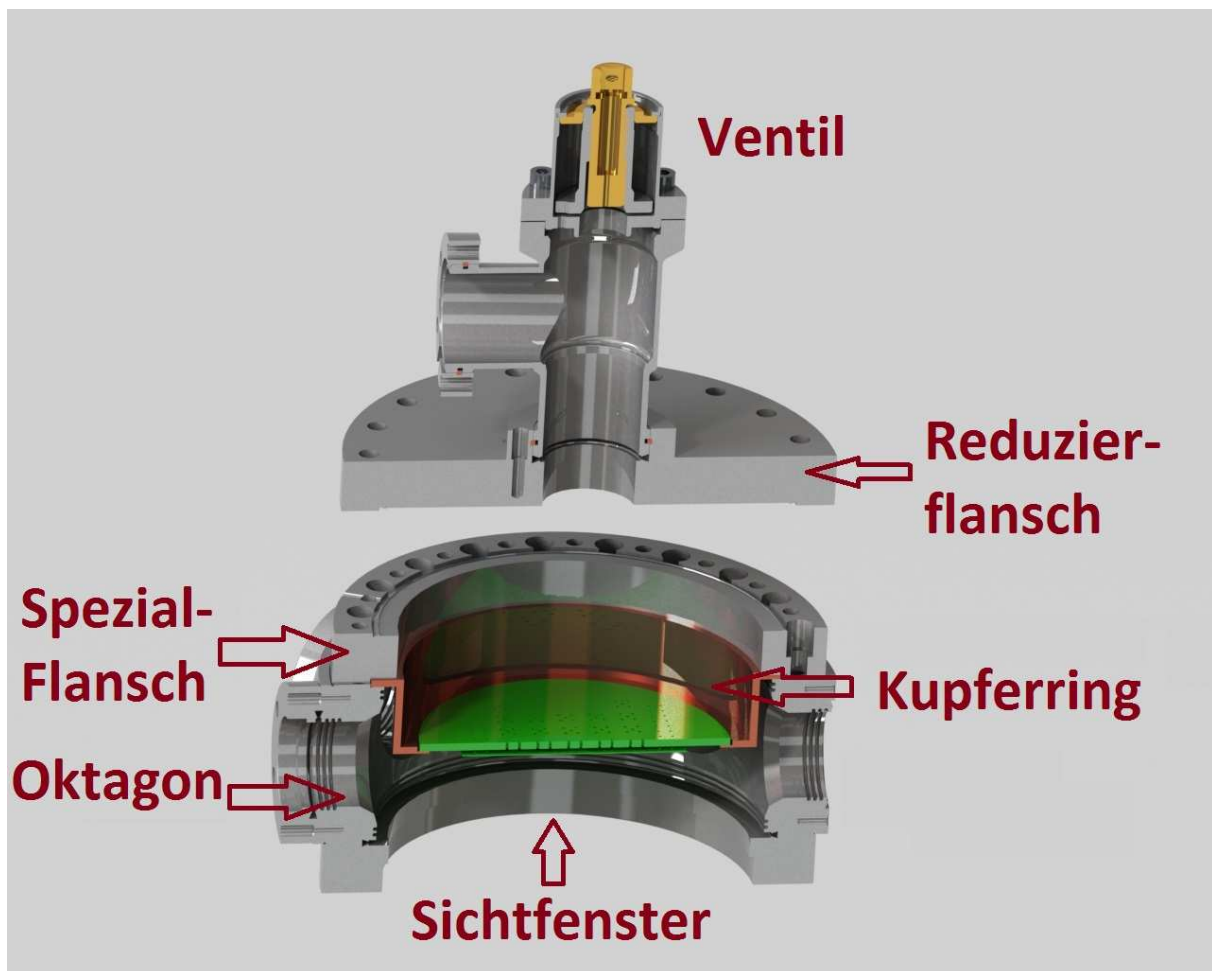
Der neue Aufbau erreicht ohne vorheriges Heizen einen Druck von  $10^{-7}$  mbar. Dieser ist einerseits durch die verwendete Pumpstation limitiert, als auch durch das Ablösen des Wassers, das sich durch die Atmosphäre in den Bauteilen abgelagert hat (siehe Abschnitt 4.1). Durch Ausheizen kann der Druck weiter verringert werden. Die Problemstellen des Ausheizprozesses wurden entfernt, deshalb wird die gleiche Prozedur angewendet, wie in Abbildung 4.5 dargestellt ist: Die elektrische Durchführung wird während des Ausheizprozesses beidseitig unter Vakuum gehalten. Dafür wird das Setup wie in Abbildung 4.2 im Ofen aufgebaut, und mit einer externen Pumpstation verbunden. Diese besteht aus einer Scrollpumpe und einer Turbopumpe (siehe Abb. 4.1).

Es wird eine maximale Temperatur von  $130$  °C (als Vorsichtsmaßnahme für die eingebauten LEDs) und eine Heizrate von  $10$  °C/h gewählt, damit das System nicht beschädigt wird. Zuerst

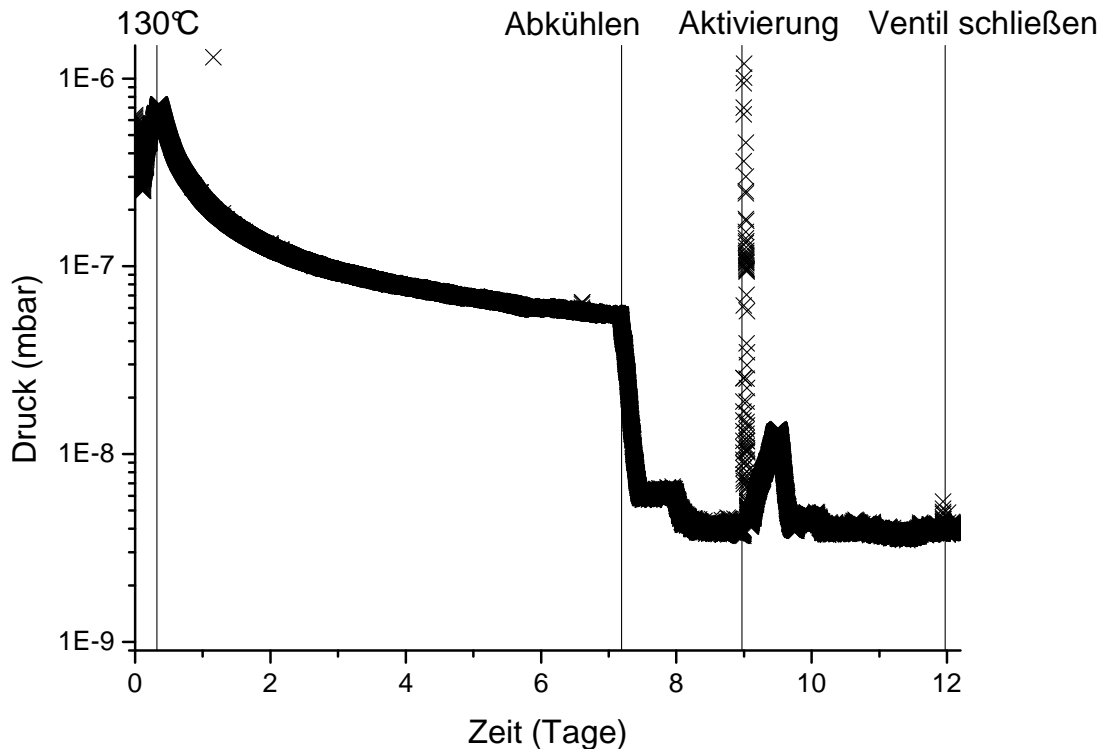


**Abbildung 4.9:** Durchschnitt durch den Spezialflansch. Ein Durchgangsflansch von VACOM wurde für versenkbare M8 Imbusschrauben erweitert, damit diese nicht über die Oberfläche stehen und weitere Bauteile dadurch installiert werden können. Damit die weiteren CF-Bauteile angeschraubt werden können, werden zwischen den vorhandenen Löchern M8-Gewindelöcher gebohrt.

wird mit den externen Pumpen ein Vakuum erzeugt. Bei einem Druck von  $6 \cdot 10^{-8}$  mbar wird der Ofen gestartet. Abbildung 4.11 zeigt einen typischen Ausheizverlauf, der während eines Durchlaufs entstanden ist. Diese Daten wurden mithilfe des Stroms der Ionenpumpe gemessen. Nach Erhitzen des Systems auf  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  wird das System solange auf Temperatur gehalten, bis der Druck (hier bei  $3 \cdot 10^{-9}$  mbar) nicht mehr sinkt. Dies geschieht üblicherweise bei dem vorhandenen System nach ca. 8 Tagen. Danach wird das System manuell um  $10 \text{ }^\circ\text{C/h}$  abgekühlt. Ist das System auf Raumtemperatur abgekühlt, werden alle Pumpen und Öfen aktiviert, was eine Erhöhung des Drucks bewirkt, da Material abgestrahlt wird. Nach dem Aktivieren der Systeme wird gewartet (hier 2 Tage), bis der Druck sich nicht mehr verringert. Danach wird das Ventil zu den externen Pumpen geschlossen, um die Vakuumkammer von den externen Pumpen zu trennen. Dafür wird auch das Ventil zur Durchführung geschlossen und es werden die externen Pumpen ausgeschaltet. Ist das externe System vollständig geflutet, wird das Ventil zur Durchführung langsam geöffnet, bis dieses nicht mehr unter Vakuum steht. Danach können sowohl der Reduzierflansch, als auch die flexiblen Schläuche vom System entfernt werden. Für das Vakuum in der Kammer sind nur mehr die internen Pumpen zuständig.



**Abbildung 4.10:** Schnitt durch das System für den Ausheizprozess. Zwischen Oktagon und dem Spezialflansch wird als Dichtungsring die elektrische Durchführung verwendet. Durch das große Loch in der Mitte des Spezialflansches ist ein mechanischer Zugang gewährleistet. Trotzdem kann von oben noch ein Reduzierflansch mit Ventil für den Ausheizprozess angeschraubt werden, ohne diesen Spezialflansch von der Kammer nehmen zu müssen. Das Ventil wird für die langsame Belüftung nach dem Ausheizprozess benötigt.

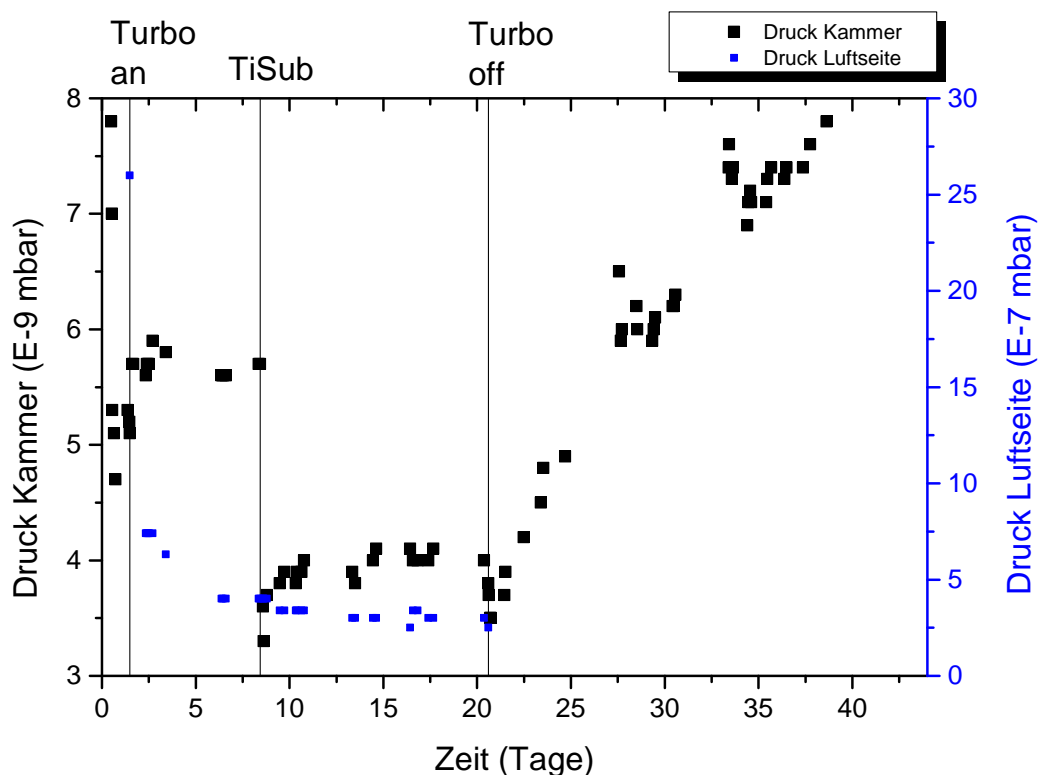


**Abbildung 4.11:** Druckverlauf während eines Ausheizprozesses. Der Ofen wird bis 130 °C aufgeheizt und ca. 7 Tage auf dieser Temperatur gehalten. Durch das Pumpen verringert sich der Druck stetig. Ändert sich der Druck nicht mehr, wird die Kammer auf Raumtemperatur gekühlt. Durch die verminderte Temperatur verringert sich der Druck weiter. Ist die Raumtemperatur erreicht, werden der Ofen und die Pumpen aktiviert. Dies verursacht einen kurzen Druckanstieg durch die ausgestoßenen Materialien. Ist der Ausheizvorgang beendet, wird das Ventil zu den externen Pumpen geschlossen und die Luftseite der Durchführung belüftet.

## 4.5 Ergebnisse

Nach dem Abschließen der Pumpstation und der Verwendung der TiSub Pumpe konnte mit 4 verschiedenen elektrischen Durchführungen ein Druck von  $1 \cdot 10^{-9}$  mbar erreicht werden. Dadurch sollte ein Speichern von Ionen möglich sein. Ein noch geringerer Druck hätte jedoch große Vorteile beim Speichern und Manipulieren der Ionen.

Der erreichte Druck von  $10^{-9}$  mbar konnte 10 Tage lang, ohne Verwendung der TiSub Pumpe, gehalten werden. Nach zehn Tagen begann der Druck zu steigen, und nur durch regelmäßige Aktivierung der TiSub Pumpe konnte der Druck gehalten werden. Da beim Helium-Leck Test keine undichten Stellen gefunden wurden, wurde für einen weiteren Test nur die Luftseite der Durchführung mit einer externen Pumpstation verbunden und ein Vakuum erzeugt. Abbildung 4.12 zeigt die Abhängigkeit des Drucks in der Kammer und der Luftseite der elektrischen Durchführung in Abhängigkeit der Zeit. Durch das späte Eintreten dieser Reaktion (nach ca. 10 Tagen nach dem Ausheizprozess) wird auf eine Diffusion von Molekülen durch die Plati-



**Abbildung 4.12:** Vergleich von Druck in der Kammer und Druck an der Luftseite der elektrischen Durchführung, die Mithilfe einer Turbopumpe unter Vakuum steht. Ist ein Vakuum an der Luftseite, so kann der Druck in der Kammer gehalten werden. Wird die Turbopumpe ausgeschaltet und die Luftseite belüftet, so steigt der Druck in der Kammer langsam an. Mithilfe einer TiSub Pumpe kann der Druck auf  $3 \cdot 10^{-9}$  mbar gesenkt werden.

ne geschlossen. Die Durchführung kann bei einer nächsten Version weiter verbessert werden, wenn eine Mehrschichtplatte verwendet wird. Dabei werden die inneren Schichten aus durchgezogenen Metallflächen bestehen, die eine Diffusion abschwächen sollen.

Die mechanische Erreichbarkeit der Stecker ist durch den neu entwickelten Flansch gegeben. Trotzdem muss sehr vorsichtig mit diesen Verbindungen gearbeitet werden, da die Stecker durch ihre geringe Dicke leicht verbiegen oder abbrechen.

## 4.6 Zusammenfassung

Das vorhandene Vakuumsystem wurde so erweitert, dass ein Ausheizen des Systems möglich ist. Dafür wurden die SMB-Stecker, welche sich als Problemstellen erwiesen, entfernt. Für die Durchkontaktierung wurden nur mehr Mill-Max (1038-0-15-15-30-27-04-0) Stecker verwendet. Dies verringerte die Kapazität der Durchführung auf 3 pF, was eine Ansteuerung der Falle erleichtert und ein Übersprechen zwischen RF-Signalen verringert. Damit die Pins kontaktiert werden können, musste ein neuer Spezialflansch entwickelt werden, der sowohl mechanischen Zugang gewährt, als auch ein Ausheizen von beiden Seiten erlaubt. Es wurde ein Druck von  $3 \cdot 10^{-9}$  mbar erreicht; dieser Druck sollte ein Speichern von Ionen ermöglichen. Für komplexe-

re Experimente ist dieser Druck aber nicht niedrig genug. Es zeigt sich außerdem ein langsamer Anstieg des Drucks innerhalb der Kammer auf einer Zeitskala von mehreren Tagen, was vermutlich auf Diffusion von Gasteilchen in die Kammer zurückzuführen ist. Der Druckanstieg kann durch Abpumpen der Luftseite stabilisiert werden.

# Kapitel 5

## Elektrische Ansteuerung der Falle

Die Potentialtiefe der Ionenfalle wird, neben der Elektrodengeometrie, von der elektrischen Spannung und Frequenz des RF-Signals bestimmt (siehe Kapitel 2). Es wird eine Frequenz im Bereich von  $\Omega/2\pi = (50 - 100)$  MHz und eine Spannung von  $U \approx 100$  V benötigt, damit ein ausreichend tiefes Potential zum Speichern von Ionen in unserer Falle erzeugt wird. In unserer Gruppe werden für diese Aufgabe Schwingkreise verwendet. Diese werden in Abschnitt 5.1 beschrieben. Für das effiziente Betreiben eines Schwingkreises wird zusätzlich ein Anpassungsnetzwerk benötigt, welches in Abschnitt 5.2 erklärt wird. Das Stabilisieren der Phasen kann entweder mit einem phasenstabilisierten Schwingkreis (siehe Abschnitt 5.3), oder mit einer Transistorverstärkung (siehe Abschnitt 5.4) realisiert werden. Abschnitt 5.5 befasst sich mit Spulen für Schwingkreise, die sich direkt auf Platinen befinden.

### 5.1 Elektrischer Schwingkreis

Eine einfache Möglichkeit, hohe Spannungen bei hohen Frequenzen zu erzeugen ist ein elektrischer Schwingkreis. Dieser besteht aus einer Serienschaltung einer Spule mit einem Kondensator (siehe Abb. 5.1). Die Spannung  $U_C$  am Kondensator ist direkt proportional zur Ladung  $Q$

$$U_C = \frac{Q}{C}. \quad (5.1)$$

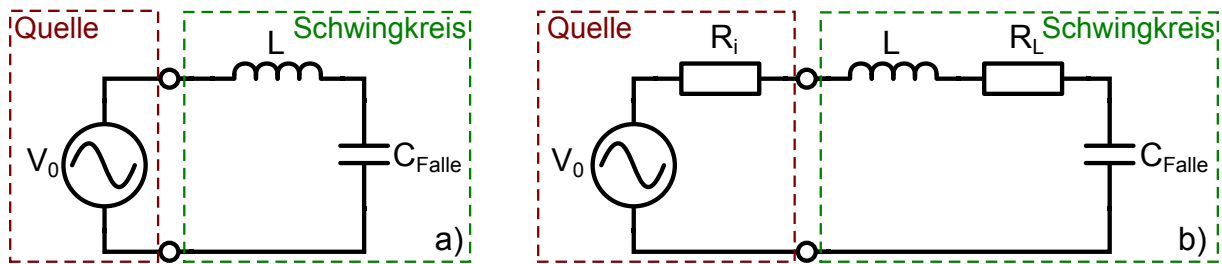
Als Kapazität  $C$  wird im Experiment die Eigenkapazität der Falle verwendet. Da die Spannung der Spule direkt proportional zur Änderung des Stromes  $i(t)$  ist

$$U_L = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{d^2Q}{dt^2}, \quad (5.2)$$

ergibt sich aus der Maschenregel eine Differentialgleichung 2. Ordnung, welche schwingende Systeme beschreiben kann. Für die statische Betrachtung der Amplituden und Phasen genügt die Verwendung der komplexen Wechselstromrechnung. Für eine Spule mit Impedanz  $Z_L$  und einem Kondensator mit Impedanz  $Z_C$  ergibt sich eine Gesamtimpedanz von

$$Z_{\text{ges}} = Z_L + Z_C. \quad (5.3)$$

Die Impedanz der Spule ergibt sich aus einem Imaginärteil der idealen Spule und einem reellen Teil des Verlustwiderstandes der Spule. Die Impedanz der Falle ist eine Kapazität und somit in



**Abbildung 5.1:** a) Idealer Schwingkreis: keine Verluste b) Realer Schwingkreis mit Innenwiderstand der Quelle und Verlustwiderstand der Spule. Die Kapazität ist in beiden Fällen durch die Falle plus Kapazität der Zuleitungen gegeben.

erster Näherung rein imaginär

$$Z_L = i\omega L + R_L, \quad (5.4)$$

$$Z_C = -\frac{i}{\omega C}. \quad (5.5)$$

Dadurch ergibt sich eine Gesamtimpedanz der Schaltung von

$$Z_{\text{ges}} = R_L + i\omega L - \frac{i}{\omega C} = R_L + i \cdot \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}. \quad (5.6)$$

Mithilfe der Spannungsteilerregel lässt sich die Übertragungsfunktion der Schaltung berechnen, welche das Verhältnis zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung der Schaltung angibt

$$G_V(\omega) = \left| \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \right| = \left| \frac{Z_C}{Z_{\text{ges}}} \right| = \left| \frac{-\frac{i}{\omega C}}{R + i \cdot \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C}} \right|. \quad (5.7)$$

Auch die Phasenverschiebung zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung lässt sich dadurch berechnen

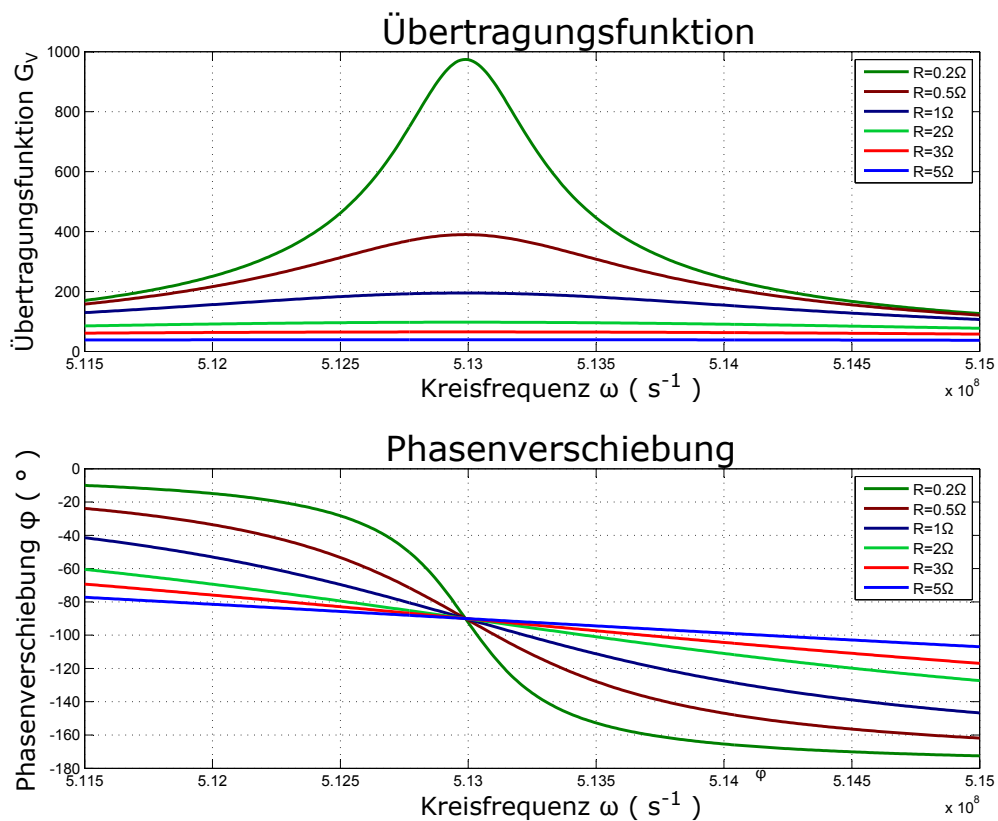
$$\varphi(\omega) = \arctan \left( \frac{\text{Im} \left( \frac{Z_C}{Z_{\text{ges}}} \right)}{\text{Re} \left( \frac{Z_C}{Z_{\text{ges}}} \right)} \right). \quad (5.8)$$

Abbildung 5.2 zeigt die berechnete Übertragungsfunktion und Phasenverschiebung mit verschiedenen Verlustwiderständen  $R_L$ . Mit kleineren Verlustwiderständen  $R_L$  werden größere Verstärkungen erreicht.

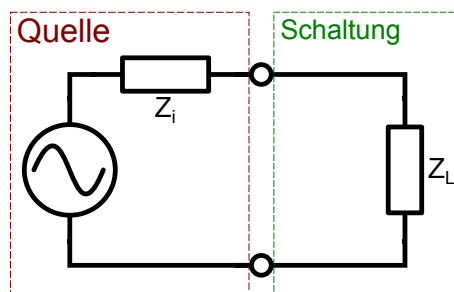
## 5.2 Anpassungsnetzwerk

Jede reale Quelle wird unter anderem durch ihre maximale Leistung und ihren Ausgangswiderstand ( $50 \Omega$ ) beschrieben. Damit die maximale Ausgangsspannung am Schwingkreis erreicht wird, muss die maximale Leistung der Quelle in den Schwingkreis eingekoppelt werden. Wie in Abbildung 5.3 zu sehen ist, kann das Ersatzschaltbild einer realen Quelle als ideale Quelle in Serie mit einem Innenwiderstand  $Z_i$  betrachtet werden. Die zu betreibende Schaltung wird mit einer Lastimpedanz  $Z_L$  modelliert. Somit kann die Spannung  $U_L$  an der Last  $Z_L$  berechnet werden:

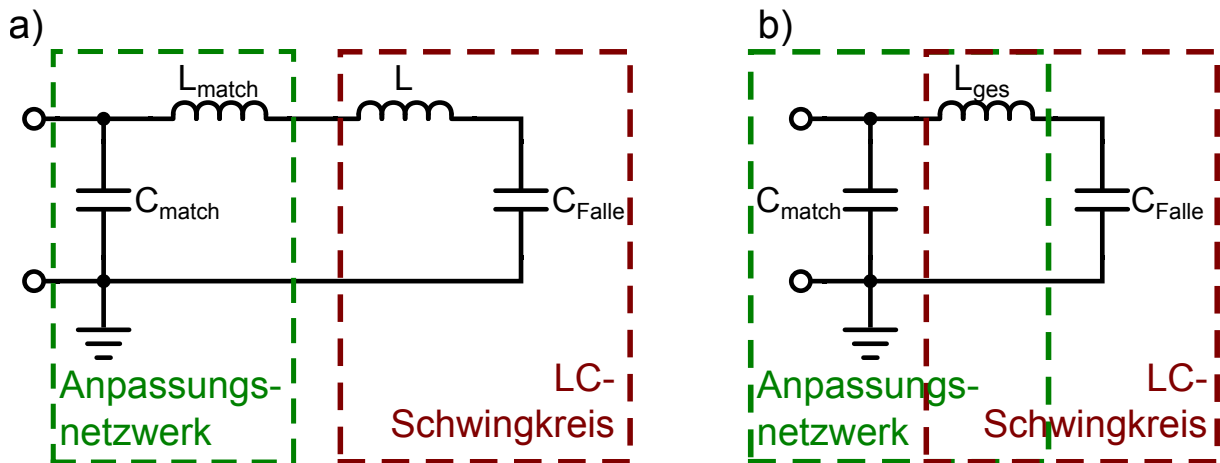




**Abbildung 5.2:** Beispiel der Übertragungsfunktion und der Phasenverschiebung eines Schwingkreises: Spule  $L = 380 \text{ nH}$  und Fallenkapazität  $C = 10 \text{ pF}$ . Oben: Übertragungsfunktion eines realen Schwingkreises in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega$ . Je kleiner der Verlustwiderstand, desto geringer die Dämpfung und desto höher die Verstärkung. Unten: Die Phasenverschiebung zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung. Diese befindet sich zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$ . Bei der Resonanzfrequenz (die Frequenz, mit der größten Verstärkung) ist der Phasenunterschied  $90^\circ$ .



**Abbildung 5.3:** Ersatzschaltplan für Quelle und Schaltung. Die reale Spannungsquelle wird als ideale Quelle mit einem Innenwiderstand in Serie modelliert, und die gesamte Schaltung als eine einzige Impedanz. Diese beiden Impedanzen müssen aneinander angepasst werden, um eine maximale Leistung für die Schaltung zu erhalten.



**Abbildung 5.4:** Anpassungsnetzwerk mit LC-Schwingkreis. a) Vor dem LC-Schwingkreis wird ein LC-Glied zur Impedanzanpassung geschaltet. b) Da die Spulen  $L_{\text{match}}$  und  $L$  in Serie sind, können diese zu einer Gesamtimpedanz  $L_{\text{ges}}$  zusammengefasst werden.

$$U_L = I \cdot Z_L = \frac{U_0}{Z_{\text{ges}}} Z_L = \frac{U_0}{Z_i + Z_L} Z_L \quad (5.9)$$

und es ergibt sich für die Leistung  $P_L$  an der Last  $Z_L$

$$P_L = U_L \cdot I = I^2 \cdot Z_L = \frac{U_0^2}{Z_{\text{ges}}^2} Z_L = \frac{U_0^2 Z_L}{(Z_i + Z_L)^2}. \quad (5.10)$$

Durch Differenzieren dieser Gleichung nach  $Z_L$  findet man

$$\frac{dP_L}{dZ_L} \stackrel{!}{=} 0 \Leftrightarrow \frac{(Z_i + Z_L) - 2Z_L(Z_i + Z_L)}{(Z_i + Z_L)^4} = 0 \Leftrightarrow Z_L = Z_i. \quad (5.11)$$

Entspricht der Lastwiderstand  $Z_L$  dem Innenwiderstand der Quelle  $Z_i$ , so ist die maximale Leistung an der Last erreicht. Der Schwingkreis liefert dadurch die höchste Ausgangsspannung. Das Gleichsetzen des Lastwiderstandes  $Z_L$  zum Innenwiderstand der Quelle  $Z_i$  nennt man Impedanzanpassung. Dies kann mit einem Anpassungsnetzwerk realisiert werden [41]. Im Idealfall sollen keine weiteren Verlustwiderstände den Schwingkreis belasten, damit eine höchstmögliche Ausgangsspannung erzielt wird. Dies kann am besten mit einem LC-Netzwerk [42] zur Impedanzanpassung realisiert werden. Diese Schaltung besteht nur aus einer Spule und einem Kondensator. Der Kondensator hat, verglichen zur Spule, einen vernachlässigbar kleinen Verlustwiderstand. Wie in Abbildung 5.4 gezeigt wird, ist die Spule des Anpassungsnetzwerkes in Serie mit der Induktivität des LC-Schwingkreises und kann somit zu einer einzigen Induktivität zusammengefasst werden. Dadurch bleibt nur der Verlustwiderstand einer Spule als Dämpfungsglied stehen. Das hier beschriebene Anpassungsnetzwerk verschiebt die Resonanzfrequenz des Schwingkreises. Für einzelne Ionenfallen ist die exakte Frequenz des Schwingkreises nicht wichtig. Jedoch für das parallele Treiben mehrerer Ionenfallen müssen alle Schwingkreise mit der gleichen Frequenz schwingen. Deshalb wird ein variabler Kondensator  $C_{\text{match}}$  eingebaut, um die Schaltung auf die gewünschte Frequenz zu bringen.

## 5.3 Phasenstabilisierter Schwingkreis

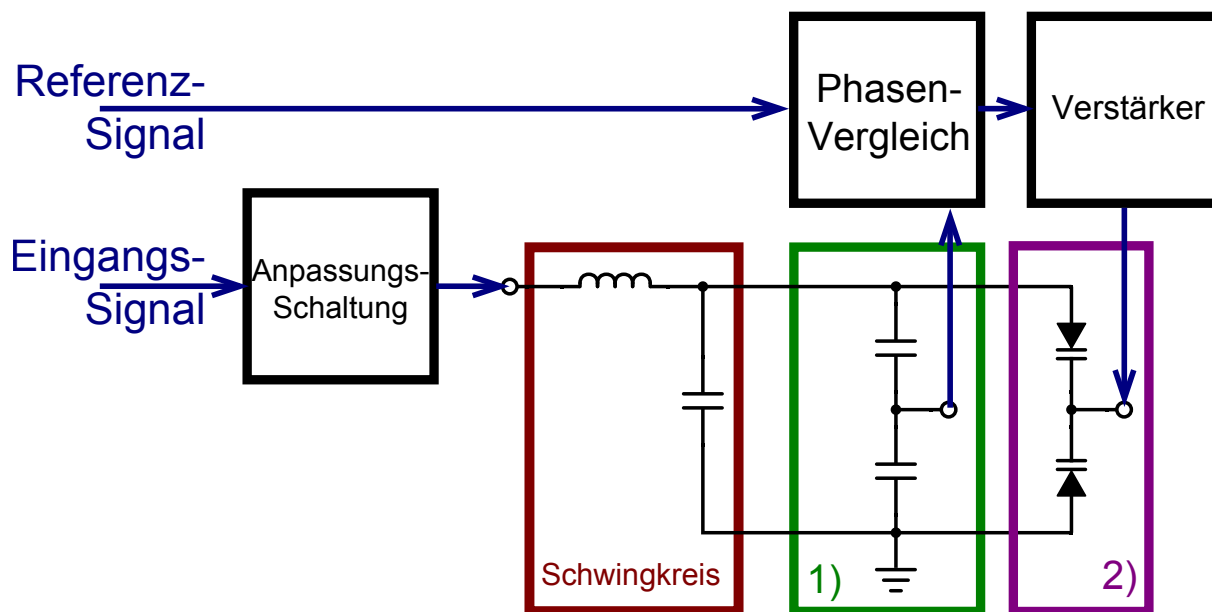
Die maximale Amplitude mit einem Schwingkreis an der Falle wird erreicht, wenn dieser mit der Resonanzfrequenz getrieben wird. Durch die kapazitive Kopplung zwischen den verschiedenen Elektroden (siehe Abschnitt 4.1) beeinflussen sich die Resonanzfrequenzen der ungekoppelten Schwingkreise gegenseitig. Da im Bereich der Resonanzfrequenz die Änderung der Phasenverschiebung am größten ist (siehe Abb. 5.2), variiert diese stark bei einer Änderung der Ansteuerung einer anderen Elektrode. Zum Speichern und Adressieren mehrerer Ionen müssen die Phasen der Elektroden jedoch aneinander angeglichen sein. Eine Möglichkeit, diese Phasen zu stabilisieren, ist der phasenstabilisierte Schwingkreis.

Herzstück dieser Schaltung, wie im Blockschaltbild in Abb. 5.5 dargestellt, ist ein Phasenvergleich. Der Phasenvergleich wird mit einem Integrierten Schaltkreis (Analog Devices AD8302), welches eine proportionale Spannung zur die Phasendifferenz zweier Eingangssignale ausgibt, realisiert. Ein Eingangssignal dieses Bauteils ist ein Referenzsignal, welches für alle Schwingkreise gleich ist. Der zweite Eingang des Phasenvergleichs ist mit einem kapazitiven Spannungsteiler an das Ausgangssignal des Schwingkreises geschaltet, welches die Falle betreibt. Da ein direktes Abgreifen der Spannung im Schwingkreis zu einer starken Reduktion des Gütefaktors führen würde, wird mit einen kapazitiven Spannungsteiler nur ein Teil der Spannung abgenommen. Dieser wirkt für den Schwingkreis nur als vernachlässigbare Belastung und verringert gleichzeitig die Spannung für den Integrierten Schaltkreis zum Phasenvergleich. Diese Ausgangsspannung des Schaltkreises, welche proportional zum Phasenverschub ist, wird aufbereitet und verstärkt. Damit werden variable Kapazitäten (Varaktordioden), welche parallel zur Falle geschalten sind, gesteuert und somit die Grenzfrequenz neu angepasst. Durch diesen Regelkreis wird sichergestellt, dass alle RF-Signale, die zum Treiben der Elektroden benötigt werden, die gleiche Phasenlage besitzen.

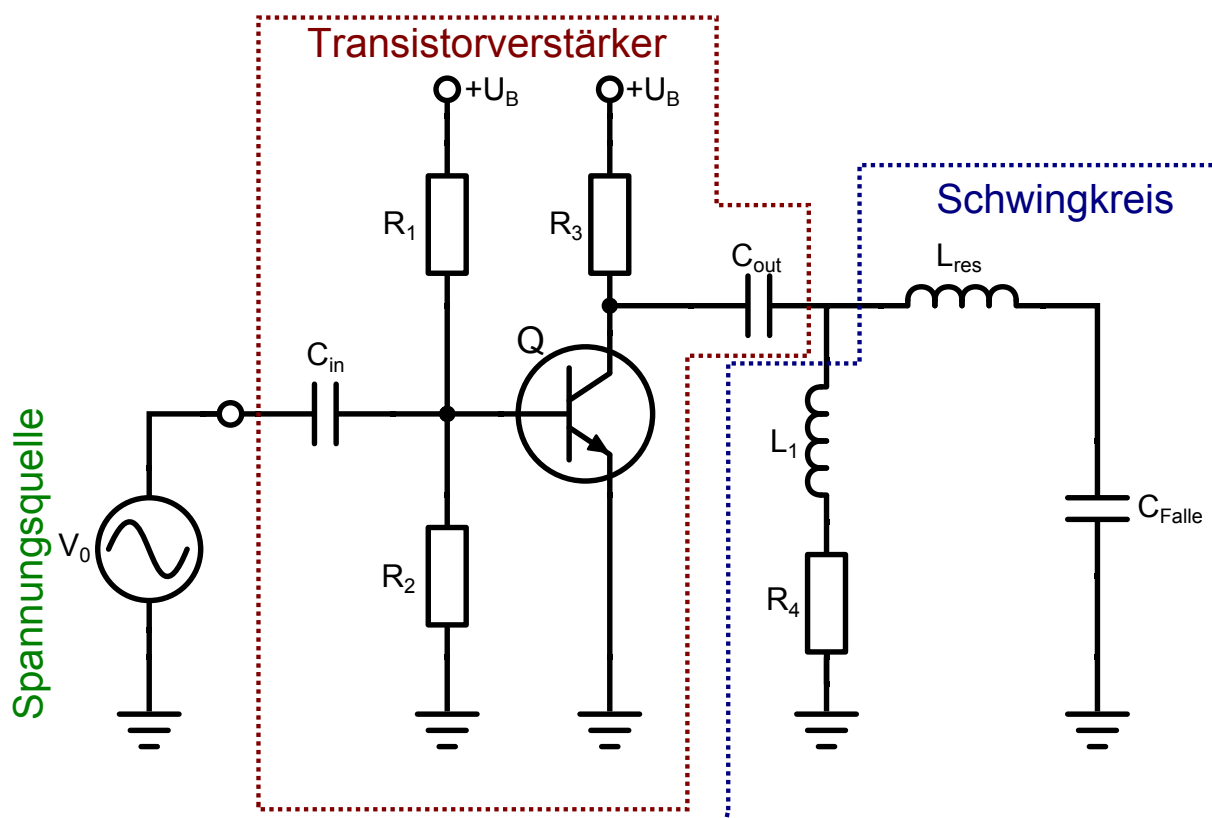
## 5.4 Stromgesteuerter Schwingkreis

Werden mehrere Elektroden mit verschiedenen RF-Signalen betrieben, so entsteht eine Spannungskopplung zwischen den Schwingkreisen. Diese Spannungskopplung verschiebt die Resonanzfrequenz und dadurch auch die Phase des Schwingkreises. Soll diese Spannungskopplung vermieden werden, so kann anstelle einer Spannungsquelle eine Stromquelle verwendet werden. Herkömmliche Funktionsgeneratoren können nur als Spannungsquelle arbeiten. Es gibt jedoch Schaltungen, die ein Spannungssignal in ein Stromsignal wandeln.

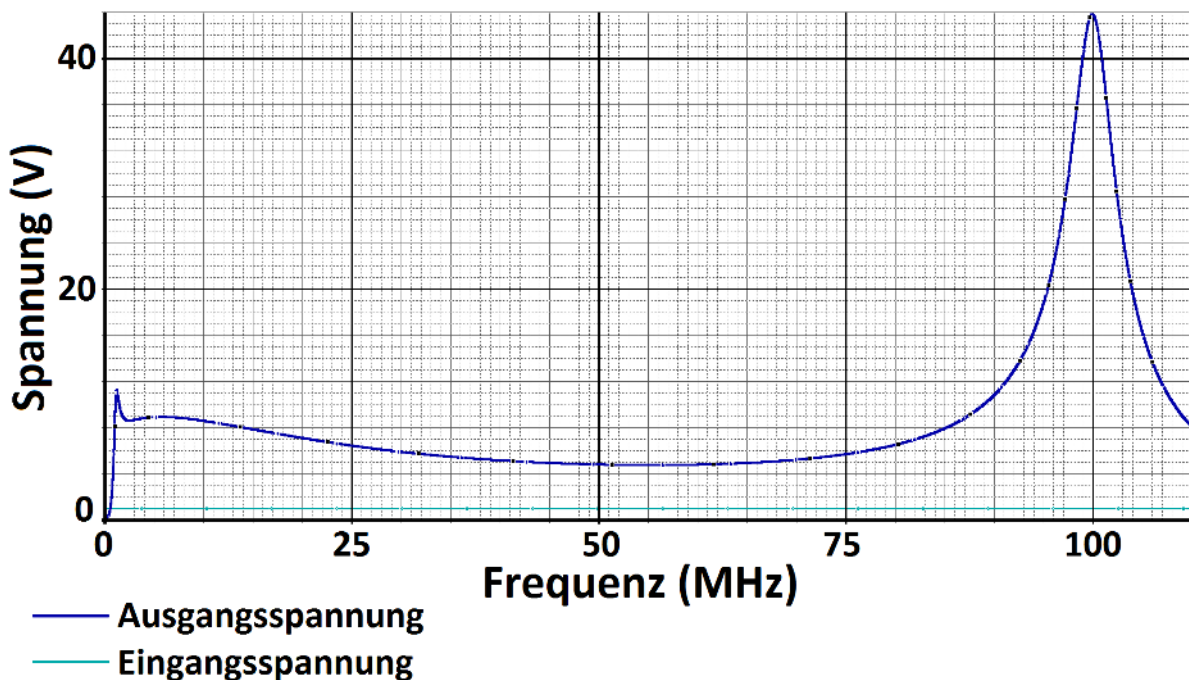
Mit Transistorschaltungen kann diese spannungsgesteuerte Stromquelle realisiert werden [41]. Die Emittergrundsaltung kann ein spannungsgesteuertes Signal in ein stromverstärktes Ausgangssignal wandeln. Am Ausgang wird mit dem Strom der übliche Schwingkreis betrieben.



**Abbildung 5.5:** Blockschaltbild des Phasen-stabilisierenden Schwingkreises. Eine Anpassschaltung gewährleistet die Impedanzanpassung. Diese hängt wie in Abschnitt 5.2 gezeigt mit dem Schwingkreis zusammen. Mittels eines kapazitiven Spannungsteilers (Block 1) wird die Ausgangsspannung mit einem Referenzsignal anhand ihrer Phasenlage verglichen. Der Unterschied der Phase wird als DC-Spannung ausgegeben. Diese Spannung wird verstärkt und steuert Varaktordioden an (Block 2). Diese verändern die Resonanzfrequenz und damit den Phasenhub des Ausgangs. Somit wird die Ausgangsphase dem Referenzsignal angepasst.



**Abbildung 5.6:** Der Stromgesteuerte Schwingkreis besteht aus einer Spannungsquelle, einer Transistorverstärkerschaltung und einem Schwingkreis. Der Transistorverstärker wandelt das Spannungssignal des Funktionsgenerators in ein Stromsignal um. Dieses steuert den Schwingkreis.



**Abbildung 5.7:** Spannung an der Falle in Abhängigkeit der Frequenz des stromgesteuerten Schwingkreises. Die Eingangsspannung wurde konstant = 1 V gesetzt. Durch den stromgesteuerten Schwingkreis wird bei 100 MHz eine Verstärkung von mehr als 40 erzielt, welche nicht durch Spannungskopplungen beeinflusst wird. Durch Optimierung des Transistors kann eine noch höhere Verstärkung erzielt werden.

Wie in Abbildung 5.6 zu sehen ist, kann die Schaltung in zwei Blöcke geteilt werden. Mit dem Koppelkondensator  $C_{\text{in}}$  wird das Spannungssignal in die Transistorschaltung eingekoppelt und gefiltert. Die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  bilden einen Spannungsteiler zwischen der Versorgungsspannung  $U_B = 10 \text{ V}$  und der Masse und erlauben es, den Arbeitspunkt des Transistor zu steuern. Dieser wird üblicherweise in einen annähernd linearen Bereich des Transistors gelegt, um keine Verzerrungen im Signal zu erhalten. Mit dem Widerstand  $R_3$  kann der Strom gesteuert werden, welcher den Schwingkreis betreiben wird. Für die Erzeugung eines großen Stromes ( $\sim 1 \text{ A}$ ), wird ein kleiner Widerstand ( $\sim 10 \Omega$ ) gewählt. Die an diesem Widerstand dissipierte Leistung ( $\sim 10 \text{ W}$ ) wird durch eine Kühlfläche am Widerstand abgeführt. Über den Koppelkondensator  $C_{\text{out}}$  wird der Schwingkreis betrieben. Dieser Kondensator filtert den Gleichstromanteil heraus, um ein reines Wechselnungssignal zu erhalten. Damit die Spule  $L_{\text{res}}$  auch gleichstromgeerdet wird, liegt parallel eine Gleichstrommassenschaltung aus der Spule  $L_1$  und dem Widerstand  $R_4$ .

Mithilfe des Simulationsprogramms für elektrische Schaltungen PSpice wurden verschiedene Arbeitspunkte dieser Schaltung simuliert. Die Bauteilwerte für die in Abbildung 5.6 gezeigte Schaltung, welche die Resultate in Abbildung 5.7 ergeben, sind:

- Transistor Q: Q2N2222
- $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

- $R_3 = 16 \Omega$
- $R_4 = 3 \text{ k}\Omega$
- $C_{\text{in}} = 1 \text{ nF}$
- $C_{\text{out}} = 10 \text{ pF}$
- $C_{\text{Falle}} = 10 \text{ pF}$
- $L_1 = 1 \text{ mF}$
- $L_{\text{res}} = 507 \text{ nF}$  mit Verlustwiderstand  $R_L = 1 \Omega$

Die Eingangsspannung war mit 1 V Wechselspannung gewählt, sodass der Wert der Ausgangsspannung gleichzeitig die Verstärkung angibt. Für die Resonanzfrequenz wurde hier  $\sim 100 \text{ MHz}$  gewählt, da dies eine hervorragende Fallentiefe erzeugen würde (siehe Kapitel 2). Der Transistor erzeugt zusätzlich zum Schwingkreis eine Verstärkung, welche in Abbildung 5.7 zu erkennen ist. Durch die Dimensionierung des Koppelkondensators  $C_{\text{in}}$  wirkt nur im untersten Frequenzbereich (bis 1 MHz) keine Verstärkung. Dies ist so beabsichtigt, damit keine Gleichspannungsverstärkung wirkt, welche den Arbeitspunkt verschieben würde. Da der gewählte Transistor  $Q$  (Q2N2222) nicht für höhere Frequenzen ausgelegt ist (nur dieser steht für Simulationen zur Verfügung) verringert sich die Verstärkung mit höherer Frequenz. Dies ist in Abbildung 5.7 im Bereich von 6 MHz bis 55 MHz zu erkennen. Ab 55 MHz beginnt die Verstärkung des Schwingkreises zu wirken und die Gesamtverstärkung steigt. Bei der Resonanzfrequenz  $f_0 \approx 100 \text{ MHz}$  wird eine Verstärkung von  $G_V = 44$  erreicht.

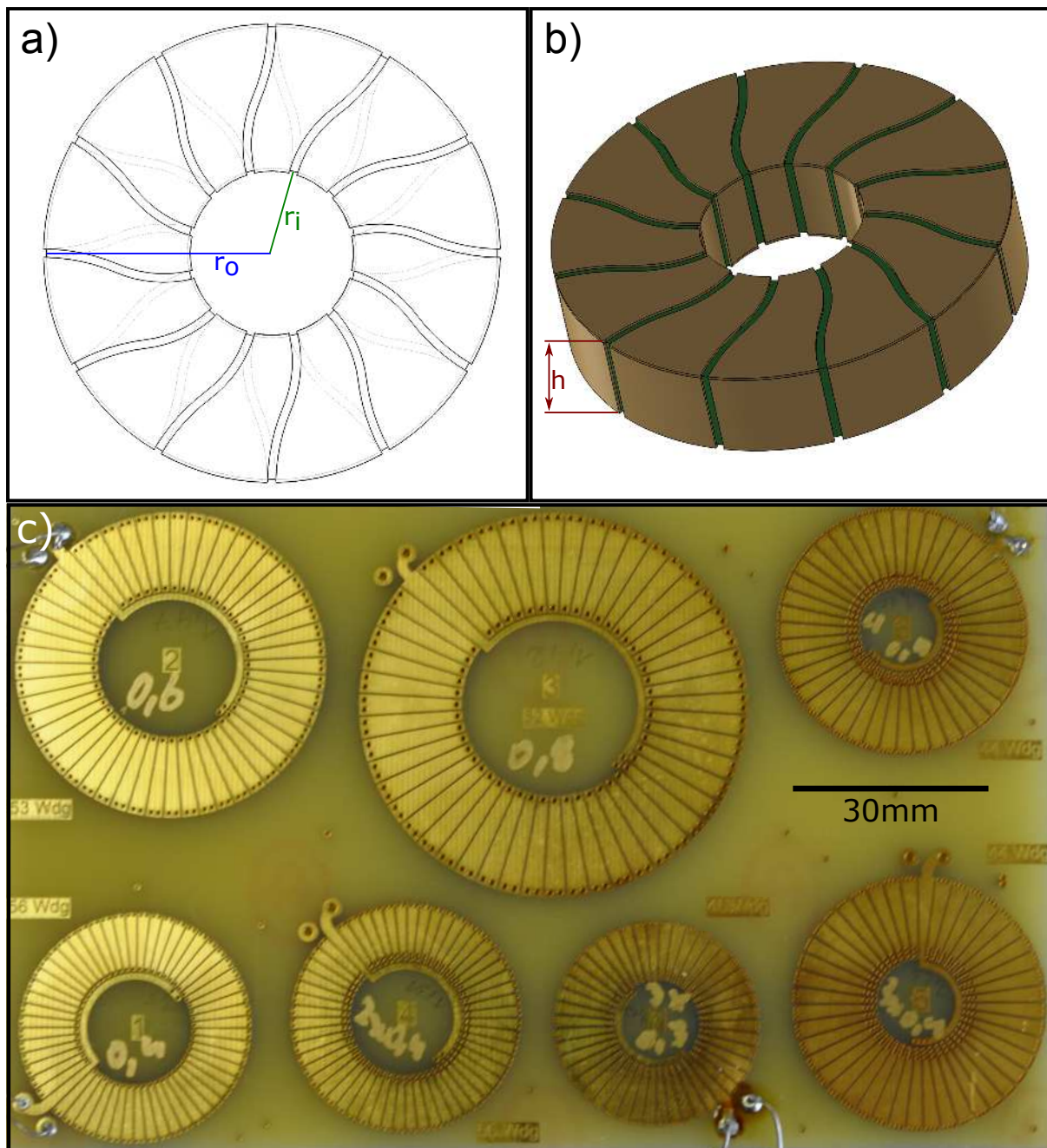
Durch die Wahl eines anderen Transistors, welcher besser für hohe Frequenzen geeignet ist, kann diese Verstärkung noch weiter erhöht werden. Ein Leistungstransistor ( $\sim 1 \text{ W}$ ) mit einer Grenzfrequenz von mindestens 100MHz ist jedoch schwer zu finden und muss gekühlt werden, was einen Einsatz nahe der Falle unmöglich macht. Die hohe Leistung am Widerstand  $R_3$  strahlt außerdem ein starkes RF-Feld aus und kann die Falle beeinflussen. Dies kann durch ein RF-Schild um die Schaltung verhindert werden.

## 5.5 Platinenspule

Ein häufiges Problem bei Schwingkreisen ist die mechanisch instabile Spule, was zu Veränderungen der Induktivität und dadurch zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz führt. Da sich deren Induktivität schon bei leichten Berührungen verändert, verschiebt diese die Resonanzfrequenz und die Phasenverschiebung des gesamten Schwingkreises. Des Weiteren ist es nur schwer möglich, mehrere nahezu identische Spulen herzustellen, was jedoch bei Ziegelstahl (im Bereich von 10%) notwendig ist.

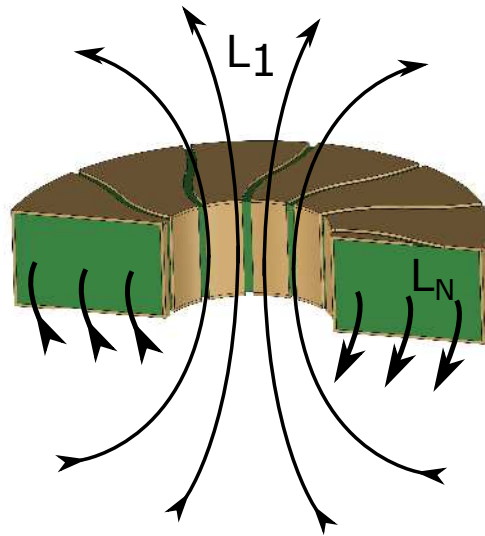
Eine Möglichkeit, eine stabile Spule zu produzieren, ist diese direkt auf eine Platine zu ätzen. Diese Spulen, wie sie in Abbildung 5.8 gezeigt sind, heißen Platinenspulen oder auch On-Board Spulen [43]. Diese Spule ist direkt als Leiterbahn auf die Platine geätzt, und somit nicht mehr gegen Berührungen anfällig. Da die Herstellung von Platinen sehr exakt ist, haben die Spulen dadurch auch immer annähernd die gleiche Induktivität ( $\sim 5\%$ ).





**Abbildung 5.8:** Platinenspulen. a) Konturen der Oberseite werden dunkel dargestellt, Konturen der Unterseite Grau. Jeweils ein Segment der Oberseite ist mit einem der Unterseite verbunden. Dieses verbindet zum nächsten Segment auf der Oberseite, so dass sich insgesamt Windungen wie bei einer gewickelten Spule ergeben. b) 3D Bild der Spule. c) Testplatine mit Realisierungen mehrerer Platinenspulen. Es wurden mehrere Größen mit verschiedenen Windungsanzahlen getestet. Außerdem wurden verschiedene Anordnungen der Durchführungslöcher erprobt.





**Abbildung 5.9:** Schnitt durch die Platinspule mit eingezeichneten Magnetfeldern. Bei Ringspulen bilden sich zwei Magnetfelder. Das Hauptmagnetfeld verläuft im Spulenkern und führt zu Induktivität  $L_N$ . Durch die Mitte der Spule verläuft ein weiteres Magnetfeld, welches zur Induktivität  $L_1$  führt.

### 5.5.1 Berechnungen

Zur Berechnung der Induktivität der Spule muss die Gesamtimpedanz berechnet werden. Die Induktivität setzt sich aus zwei Teilinduktivitäten zusammen. Wie in Abbildung 5.9 gezeigt wird, besteht die Gesamtinduktivität aus der Hauptinduktivität  $L_N$ , die sich aus der Zahl der Windungen ergibt, wie auch der Induktivität  $L_1$ , die durch die einzelne Windung rund um das Mitteloch entsteht. Für eine Spule mit Windungszahl  $N$ , Innendurchmesser  $r_i$  und Außendurchmesser  $r_o$  erhält man [44, 45]:

$$L_N = \frac{N^2 h \mu}{2\pi} \ln \left( \frac{r_o}{r_i} \right) \quad (5.12)$$

und

$$L_1 = \frac{r_i + r_o}{2} \mu \left[ \ln \left( 8 \frac{r_o + r_i}{r_o - r_i} \right) - 2 \right], \quad (5.13)$$

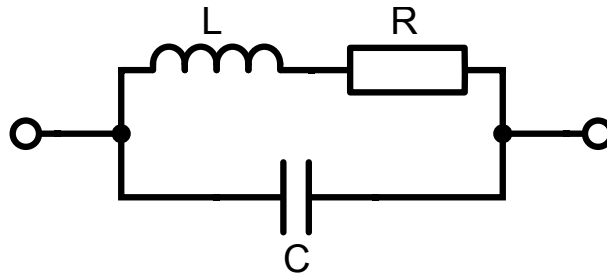
wobei die verwendete Platine die Höhe  $h$  und die magnetische Permeabilität  $\mu$  des Platinenmaterials bestimmt. Addiert man die beiden Teilinduktivitäten, erhält man die Gesamtinduktivität der Spule:

$$L_{\text{ges}} = L_N + L_1. \quad (5.14)$$

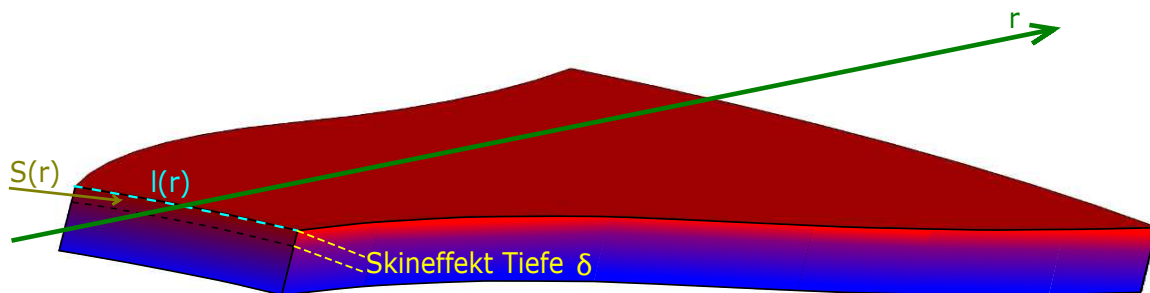
Für die Berechnung des Qualitätsfaktors der Spule benötigt man den Verlustwiderstand und die Kapazität dieser Spule. Abbildung 5.10 zeigt das Ersatzschaltbild, wie mit der Induktivität  $L_{\text{ges}}$ , dem Verlustwiderstand  $R_{\text{ges}}$  und der Kapazität  $C_{\text{ges}}$  eine reale Spule betrachtet werden kann.

Für die Berechnung der Verlustwiderstandes  $R_{\text{ges}}$  wird der Widerstand eines Segmentes  $R_{\text{Segment}}$  und der Widerstand einer Durchführung  $R_{\text{Via}}$  benötigt.

Für die Berechnung des Widerstandes eines Segmentes  $R_{\text{Segment}}$  muss die Querschnittsfläche des Leiters bekannt sein. Für die Berechnung der Querschnittsfläche muss zuerst die Breite des Segmentes  $l(r)$ , welche bei einer kreisförmigen Spule nicht konstant ist, und die



**Abbildung 5.10:** Ersatzschaltplan einer realen Spule. Zusätzlich zur gewünschten Induktivität ist ein Verlustwiderstand vorhanden. Durch die Windungen entsteht auch eine zusätzliche Kapazität.



**Abbildung 5.11:** Dreidimensionale Ansicht eines einzelnen Segmentes. Darstellung des Skin-Effekts an der Kupferschicht durch die hohe Frequenz: Der Strom fließt nicht durch den gesamten Querschnitt des Leiters, sondern nur an der Oberfläche bis zu einer Tiefe von  $\delta$ . Der Rot eingefärbte Bereich markiert eine hohe Stromflussdichte, wohingegen der blaue Bereich eine niedrige Stromflussdichte darstellt. Dieser Effekt beeinflusst den Widerstand der Spule.

Flusstiefe des Stroms berechnet werden. Bei hohen Frequenzen ist die Stromdichte im Leiter nicht mehr homogen verteilt. Wird die Frequenz erhöht, so verdichtet sich die Stromdichte am Rand des Leiters und im Kern des Leiters nimmt diese Stromdichte ab. Diesen Effekt nennt man den Skineneffekt [44] und wird in Abbildung 5.11 veranschaulicht. Die Eindringtiefe ist abhängig von der Kreisfrequenz  $\omega$ , dem spezifischen Widerstand  $\rho$  und kann durch

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (5.15)$$

angenähert werden [45]. Wie in Abbildung 5.11 zu sehen ist, hängt die Breite des Segmentes  $l(r)$  vom Abstand zum Kreiszentrum ab. Mit einer Windungszahl (Segmentanzahl)  $N$  und einem Abstand  $\alpha$  zwischen den einzelnen Segmenten ergibt sich die Breite

$$l(r) = \frac{2r\pi}{N} - \alpha \quad (5.16)$$

des Segmentes in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  zum Mittelpunkt der Spule. Zusammen mit der Eindringtiefe  $\delta$  ergibt sich die Querschnittsfläche des Segmentes

$$S_{\text{Segment}}(r) = \delta \cdot l(r) = \delta \left( \frac{2r\pi}{N} - \alpha \right) \quad (5.17)$$

in Abhängigkeit vom Abstand  $r$  zum Mittelpunkt der Spule. Der differentielle Widerstand  $dR_{\text{Segment}}$  für eine Länge  $dr$  dieses Segmentes kann dadurch bestimmt werden:

$$dR_{\text{Segment}} = \frac{\rho}{S(r)} dr. \quad (5.18)$$

Durch Integration dieses differentiellen Widerstandes  $dr$  vom inneren Radius  $r_i$  bis zum äußeren Radius  $r_o$  kann der Widerstand des Segmentes  $R_{\text{Segment}}$  berechnet werden:

$$R_{\text{Segment}} = \int_{r_i}^{r_o} \frac{\rho}{S(r)} dr = \int_{r_i}^{r_o} \frac{\rho}{\delta \left( \frac{2r\pi}{N} - \alpha \right)} dr = \frac{\rho N}{\pi \delta} \cdot \ln \left( \frac{2\pi r_o - \alpha N}{2\pi r_i - \alpha N} \right). \quad (5.19)$$

Damit die Leiterschicht auf der Oberseite der Platine mit der Leiterschicht auf der Unterseite elektrisch verbunden werden kann, benötigt es elektrische Durchführungen (auch Vias genannt). Wie in Abbildung 5.8c) zu sehen ist, werden diese Durchführungen mit durchkontaktierten Bohrungen realisiert. Als Vereinfachung für die Berechnungen werden wie in Abbildung 5.8b) die gesamten Seitenwände als Durchführung gerechnet. Dafür wird wieder die Querschnittsfläche  $S_{\text{Innen}}$  bzw.  $S_{\text{Außen}}$ , die durch die Breite des Segmentes  $l(r)$  und der Eindringtiefe des Stroms  $\delta$  gegeben ist, berechnet:

$$S_{\text{Innen}} = \int_{r_i}^{r_i+\delta} \frac{2r\pi}{N} - \alpha dr = \delta \left( \frac{2r_i\pi - \delta\pi}{N} - \alpha \right), \quad (5.20)$$

$$S_{\text{Außen}} = \int_{r_o-\delta}^{r_o} \frac{2r\pi}{N} - \alpha dr = \delta \left( \frac{2r_o\pi - \delta\pi}{N} - \alpha \right). \quad (5.21)$$

Mit dieser Querschnittsfläche kann der Widerstand der Durchführung berechnet werden

$$R_{\text{Via}} = \frac{\rho h}{S_{\text{Außen}}} + \frac{\rho h}{S_{\text{Innen}}} = \frac{\rho h}{\delta \left( \frac{2r_o\pi - \delta\pi}{N} - \alpha \right)} + \frac{\rho h}{\delta \left( \frac{2r_i\pi - \delta\pi}{N} - \alpha \right)}. \quad (5.22)$$

Dadurch ergibt sich ein Gesamtwiderstand der Spule von

$$R_{\text{ges}} = N \cdot R_{\text{Segment}} + N \cdot R_{\text{Via}} = \frac{\rho N^2}{\pi \delta} \cdot \ln \left( \frac{2\pi r_o - \alpha N}{2\pi r_i - \alpha N} \right) + \frac{\rho h N}{\delta \left( \frac{2r_o \pi - \delta \pi}{N} - \alpha \right)} + \frac{\rho h N}{\delta \left( \frac{2r_i \pi - \delta \pi}{N} - \alpha \right)}. \quad (5.23)$$

Da die Segmente als Plattenkondensatoren angenommen werden können [41][44], erhält man für ein Segment eine Kapazität von

$$C_{\text{Segment}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}, \quad (5.24)$$

wobei  $\epsilon_0 = 1/(\mu_0 c^2)$  die elektrische Feldkonstante und  $\epsilon_r$  die relative Permittivität des Mediums sind ( $\epsilon_{\text{Leiterplatte}} = 3.5$ ).  $A$  entspricht der Fläche eines Teilssegmentes. Die Gesamtkapazität ist eine Serienschaltung [46] aller Teilkondensatoren. Da weitere Kapazitäten, zum Beispiel zwischen zwei benachbarten Segmenten auf der gleichen Platinenseite, einzurechnen sind, hat sich bei den Messungen eine Multiplikation mit 2 für die Gesamtkapazität als angemessen erwiesen. Dadurch ist die Gesamtkapazität durch

$$C_{\text{ges}} = 2 \cdot \frac{C_{\text{Segment}}}{N - 1} \quad (5.25)$$

gegeben. Somit kann nun die Gesamtimpedanz  $Z_{\text{ges}}$  der Platinenspule berechnet werden. Diese ergibt sich durch das Ersatzschaltbild (Abb. 5.10) aus einer Serienschaltung der Spule  $L_{\text{ges}}$  mit dem Widerstand  $R_{\text{ges}}$ , parallel zur Kapazität  $C_{\text{ges}}$

$$Z_{\text{ges}} = \frac{(Z_L + R_{\text{ges}}) \cdot Z_C}{Z_L + R_{\text{ges}} + Z_C} \quad (5.26)$$

mit

$$Z_L = i\omega L_{\text{ges}} \quad (5.27)$$

als Impedanz der Induktivität  $L_{\text{ges}}$  und

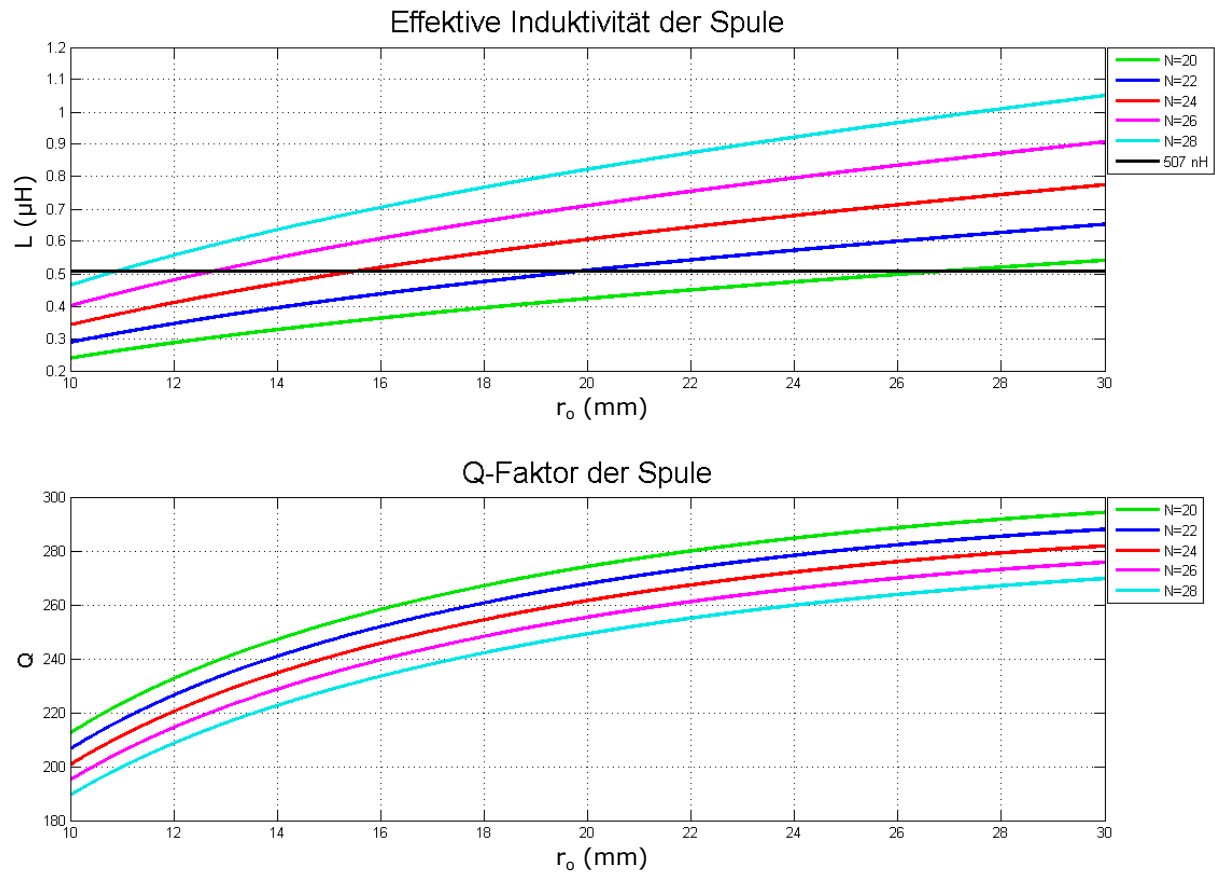
$$Z_C = \frac{-i}{\omega C_{\text{ges}}} \quad (5.28)$$

als Impedanz der Kapazität  $C_{\text{ges}}$ . Durch diese Gesamtimpedanz  $Z_{\text{ges}}$  ergeben sich die effektive Induktivität  $L_{\text{eff}}$ , der effektive Widerstand  $R_{\text{eff}}$  und der Qualitätsfaktor  $Q$  der Spule

$$L_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}(Z_{\text{ges}})}{\omega}, \quad (5.29)$$

$$R_{\text{eff}} = \text{Re}(Z_{\text{ges}}), \quad (5.30)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_{\text{ges}})}{\text{Re}(Z_{\text{ges}})}. \quad (5.31)$$



**Abbildung 5.12:** Abhängigkeit der Induktivität und des Q-Faktors vom äußeren Radius der Spule. Es wurden 5 verschiedene Windungszahlen simuliert. Mit steigender Windungszahl sinkt die Größe der Spule, um 507 nH zu erreichen. Dafür fällt bei kleineren Spulen auch der Q-Faktor und somit die zu erreichende Verstärkung der Spannung. Für diese Simulation wurde ein Innenradius von  $r_i = 4$  mm gewählt bei einer Platinendicke von  $h = 3,2$  mm.

### 5.5.2 Simulation und Design

Damit möglichst viele Schwingkreise auf einer Platine platziert werden können, wird versucht, eine möglichst kleine Spule zu dimensionieren. Trotzdem soll sie sich durch einen möglichst hohen Q-Faktor auszeichnen, damit eine hohe Spannung an der Falle anliegt (siehe Abschnitt 5.1). Für die entworfene Schaltung in Abschnitt 5.4 wird eine Spule mit der Induktivität von  $L = 507 \text{ nF}$  gestaltet. Dafür werden verschiedene Windungszahlen der Spule simuliert. Abbildung 5.12 zeigt die Ergebnisse einer Simulation einer Spule mit einem inneren Radius von  $r_i = 4 \text{ mm}$  mit verschiedenen Windungszahlen  $N$ . Mit steigender Windungszahl  $N$  wird die benötigte Größe der Spule kleiner. So wird mit einer Windungszahl von  $N = 20$  ein äußerer Radius von ca.  $r_o = 27 \text{ mm}$  benötigt. Mit einer Windungszahl von  $N = 28$  verkleinert sich dieser auf ca.  $r_o = 11 \text{ mm}$ . Durch eine vergrößerte Windungszahl erhöht sich die Gesamtleitlänge und verkleinert sich der Querschnitt der Segmente. Das erhöht den Widerstand und reduziert damit auch den Qualitätsfaktor. Bei  $N = 20$  ergibt sich  $Q \approx 290$ , wobei bei  $N = 28$  der Qualitätsfaktor auf  $Q = 200$  verringert wird.

Für die Überprüfung der Genauigkeit der Berechnungen, wurden mehrere Prototypen mit verschiedenen Induktivitäten gefertigt (siehe Abb. 5.8c). Aufgebaut wird die Spule auf einer 3,2 mm dicken Leiterplatte (Material: Rogers 4260) mit goldbeschichteten Kupferbahnen. Die elektrische Verbindungen zwischen der Oberschicht und der Unterschicht werden mit durchkontaktierten Löchern realisiert. Diese Dimensionen und die Anzahl der Löcher variieren bei den Testspulen, um die ideale Konfiguration zu finden. Bei der Berechnung der Induktivität wird eine Übereinstimmung von  $\sim 1\%$  im Vergleich zum gemessenen Wert erreicht. Auch verschiedene Spulen mit gleicher Architektur unterscheiden sich kaum ( $\leq 1\%$ ). Nur der Q-Faktor der realen Spulen unterscheidet sich erheblich ( $\sim 30\%$ ) von dem berechneten Wert. Dies ist auf die Verbindung zwischen den verschiedenen Schichten mittels durchkontaktierter Löcher zurückzuführen. Diese haben, vor allem bei Radiofrequenzen, einen höheren Widerstand als der berechnete Wert bei einer Vollkontaktierung der Innen- und Außenwände. Dadurch ist der reale Qualitätsfaktor durchwegs geringer als der berechnete Wert (siehe Berechnungen 5.26 - 5.31). Die Spulen mit vielen kleinen Durchführungen pro Segment schnitten am besten ab. Mehrere elektrische Durchführungen in nur einem Segment wirken wie eine Parallelschaltung von Widerständen. Dadurch verringert sich der Gesamtwiderstand der elektrischen Durchführung. Durch kleinere Widerstandswerte verbessert sich der Q-Faktor. Um noch kleinere Widerstände zu erzielen, sollte die nächste Version mit durchkontaktierten Fräsungen als Durchführung entworfen werden. Diese sorgen für eine maximale Oberfläche und dadurch einen minimalen Verlustwiderstand. Die Spule kann durch ihre Eigenschaften auch direkt an der Platine des stromgesteuerten Schwingkreises verwendet werden.

## 5.6 Zusammenfassung

Die Idee des Schwingkreises zur Ansteuerung der Radiofrequenz der Falle wurde so erweitert, dass eine Spannungskopplung zwischen den Elektroden nicht eine Phasenverschiebung zur Folge hat. Dafür wurden zwei Möglichkeiten vorgestellt. Der phasenstabilisierte Schwingkreis vergleicht das Ausgangssignal mit einem Referenzsignal. Durch einen Regelkreis werden die Phasen dieser Signale aneinander angepasst. Diese Variante wurde schon erfolgreich zum Speichern von Ionen verwendet [37]. Der stromgesteuerte Schwingkreis wandelt ein Spannungssi-

gnal in ein verstärktes Stromsignal um, welches nicht von einer Spannungskopplung beeinflusst wird. Dieses Signal treibt mit einem Schwingkreis die Falle. Da selbstgewickelte Spulen durch mechanische Einflüsse die Induktivität und dadurch die Resonanzfrequenz des Schwingkreises ändern, wurde eine Spule, die sich direkt als Leiterbahn auf der Platine befindet, entwickelt. Mithilfe der angeführten Berechnungen kann die Induktivität mit einer Genauigkeit von 1% bestimmt werden. Es wurden Modifikationen vorgeschlagen, die eine weitere Erhöhung des Q-Faktors ermöglichen sollten.



# Kapitel 6

## Ausblick

Einige Experimente zur Quantensimulation verwenden die Energiezustände der Ionen als Quantenbit. Diese Ionen werden meist in einer linearen Paul-Falle als Kette gefangen. Alternativ dazu können auch sphärische Paul-Fallen, in denen jeweils nur ein Ion gefangen ist, verwendet werden. Durch ihre Struktur können diese in zweidimensionalen Gitter angeordnet werden [47], was jedoch bislang noch nie realisiert wurde. Diese Arbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung und Ansteuerung der Ionenfalle Ziegelstadl, welche nach diesem Konzept konstruiert wurde. Sie bietet eine kurze Einführung in Paul-Fallen mit Bezug auf Oberflächenfallen. Die Änderungen an der Ionenfalle Ziegelstadl, die Entwicklung des Vakuumsystems mit den elektronischen Durchführungen und die elektronische Ansteuerung wurden diskutiert.

Das Vergrößern der Bondflächen und das Vergrößern des Abstandes dieser Flächen ermöglichen nun eine vollständige Kontaktierung der Ionenfalle mit dem Filterboard. Zusätzlich wurde die Falle mit Gold beschichtet, um bessere Bondeigenschaften zu erreichen. Durch diese Änderung konnte zusätzlich auf das Ätzen und das Beschichten der Oberfläche mit Palladium verzichtet werden. Dadurch wird die Oberfläche der Falle geschont. Da für das Bonden der Falle eine Goldschicht verwendet wird, ist das Kupfer in den Leitungsschichten nicht mehr nötig und kann mit verschiedenen Metallen ersetzt werden. Zukünftig können die Vor- und Nachteile verschiedener Materialien getestet werden. Im Zuge dieser Umstellung wurden weitere geometrische Änderungen an der Falle vorgenommen. Durch eine Abänderung der Elektroden und der Rotation der Falle um  $45^\circ$  kann das gespeicherte Ion mit nur einem Laserstrahl gekühlt werden.

Mithilfe der Masseplatine wurde die Potentialtiefe der Falle weiter gesenkt. Zusätzlich bieten diese Möglichkeiten, um Vakuumtaugliche Elektronik nahe der Falle zu platzieren. Die Masseplatine wurde mit 4 UV-LEDs ausgestattet, welche zum Laden/ Entladen und Reinigen der Oberfläche der Falle verwendet werden können. Zusätzlich können diese Dioden zur Photoionisation von Kalzium als Teil der Ladeprozedur dienen.

Eine spezielle Vakuumdurchführung erlaubt das Steuern aller elektronischen Parameter der Falle und der Masseplatine. Diese kann 30 Signal- und 30 Massekanäle in die Vakuumkammer führen. Durch ihre geringe Eigenkapazität wird die Ansteuerung der Falle nicht durch Übersprechen von anderen elektrischen Leitungen beeinträchtigt. Durch die Entwicklung eines Spezialflansches kann das System mit  $130^\circ\text{C}$  ausgeheizt werden. Dafür wird die Durchführung von beiden Seiten unter Vakuum gehalten, um deren Beschädigung zu vermeiden. Dadurch konnte ein Druck von  $10^{-9}$  mbar erreicht werden. Nach ca. 10 Tagen nach dem Ausheizen beginnt der Druck in der Kammer zu steigen, was auf eine Diffusion von Gasen durch die

Durchführung zu erklären ist. Die Verwendung einer Mehrschichtplatine kann dieses diffundieren zukünftig abschwächen.

An dieser Durchführung werden zur Steuerung Schwingkreise betrieben. Das Variieren der Spannung, ohne dass durch eine Kopplung eine Phasenverschiebung verschiedener Kanäle entsteht, wurde mithilfe von zwei verschiedenen Steuerschaltungen ermöglicht. Der Phasenstabilisierter Schwingkreis arbeitet mit einem Regelkreis, wobei die Ausgangsphase mit einer Referenzphase verglichen wird. Durch die Regelung wird dieser Phasenunterschied kompensiert. Die zweite Variante tauscht die Spannungssteuerung in eine Stromsteuerung, damit die Spannungskopplung keinen Einfluss hat. Dazu wird das Spannungssignal der Steuereinheit mit einer Transistorschaltung in ein Strom gesteuertes Signal gewandelt, was einen Schwingkreis betreibt. Solange nur einzelne Ionen in der Falle gespeichert werden, kann ein einfacher Schwingkreis oder der Phasenstabilisierter Schwingkreis verwendet werden. Sobald mehrere Ionen ( $n \geq 5$ ) gespeichert werden sollen, wird das Einstellen dieser Schaltungen zu kompliziert. Hier lohnt es sich, auf den stromgesteuerten Schwingkreis umzustellen, da durch die leichte Handhabung dieser Schaltung eine Skalierbarkeit möglich ist.

Eigens entworfene Platinenspulen schützen die Spulen vor mechanischen Belastungen, welche die Induktivität und dadurch die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises verändert würden. Diese Spulen werden durch spezielle Anordnungen der Leiterbahnen auf der Platine erzeugt und sind somit von mechanischen Deformationen geschützt. Durch den reproduzierbaren Herstellungsprozess kann deren Induktivität gut ( $\sim 1\%$ ) vorherbestimmt werden. Die mechanische Festigkeit der Spule sichert auch die Stabilität der Induktivität. Mit diesen Spulen wurde eine für unsere Anwendung ausreichend hohe Güte ( $Q \approx 150$ ) erreicht. Die Verwendung von supraleitenden Materialien kann diese Güte weiter erhöhen. Wird der Schwingkreis unterhalb der Sprungtemperatur betrieben, würde die Güte um mehrere Größenordnungen steigen.

Als nächster Schritt wird das System mit einer kontaktierten Falle bestückt. Nach Einstellung der vorhandenen Laser soll ein Ion gespeichert werden und die Eigenschaften der Falle dokumentiert werden. Das Verschieben der Ionen muss gezeigt werden, sowie die Kopplung zwischen mehreren Ionen. Funktioniert das Fangen und Koppeln der Ionen, können zweidimensionale Quantensimulationen betrieben werden.

**Teil II**  
**Schulischer Teil**

# Kapitel 7

## Einleitung

Immer mehr Geräte im Alltag werden mittels Elektronik betrieben oder gesteuert. Sei es als Arbeitswerkzeug, Unterhaltungsmedium, bei medizinischen Geräten oder einfach die Beleuchtung im eigenen Zimmer. Da Elektronik mittlerweile eine so zentrale Rolle im Leben jeder Person ist, ist es auch wichtig, dass Grundfunktionen von elektronischen Bauteilen verstanden und auch selber angewendet werden können. Dieses Grundverständnis der Elektronik erleichtert den Umgang mit Geräten im Bezug auf Handhabung, Belastbarkeit und vor allem Sicherheit. Sowohl medizinische Apparaturen als auch Haushaltsgeräte arbeiten zum Teil mit Strömen und Spannungen, die bei falscher Handhabung gefährlich und sogar tödlich werden können.

Daher ist es wichtig, dass in höher bildenden Schulen das Thema Elektronik ausführlich besprochen wird. In technischen Schulen (z.B.: Höhere technische Lehranstalt HTL) hat dieses Thema eine besondere Wichtigkeit, da die Schüler für diese Berufssparte speziell ausgebildet werden sollen. Auch in den allgemeinbildenden höheren Schulen (AHS) ist dieses Thema von großer Wichtigkeit, da viele weiterführende Studien auf dieses Basiswissen zugreifen wollen. Vor allem in der Physik, aber auch in der Biologie, Pharmazie und auch in der Medizin werden für das Studium ein solides Grundwissen von Elektronik verlangt, um die Funktionsweise von später verwendeten Geräten zu verstehen. Daher verlangt auch das Auswahlverfahren für manche Studien ein Basiswissen in diesem Themengebiet (siehe z.B.: Aufnahmeverfahren für medizinische Studien MED-AT). Besonders die Medizin ist als Anhaltspunkt für den Physikunterricht immer hilfreich, da viele Studien belegen, dass der Kontext Medizin besonders gut für die Motivation von Mädchen geeignet ist, auf welche im Physikunterricht besonders geachtet werden sollte [48–50].

In diesem Teil der Arbeit wird aufgezeigt, wie verschiedene Themengebiete aus dem Bereich der Elektronik in der Schule bearbeitet werden können. Diese Themengebiete sind nicht vollständig und sollen nur beispielhaft darstellen, wie die Unterrichtsstruktur aussieht und wie das Thema mit meiner Arbeit an den Ionenfallen zusammenhängt. Die Arbeitsaufträge in diesem Abschnitt wurden von Schülern der HTL gemessen und auf dem Niveau der Schüler analysiert. An dieser Stelle wird keine Fehlerrechnung durchgeführt, da diese in der Schule erst in den 4. und 5. Stufen erlernt wird. Auch die verwendeten Programme zur Analyse der Messergebnisse sind Standardprogramme in den Schulen und unterscheiden sich dadurch von den professionellen Analyseprogrammen.

In Kapitel 8 wird mithilfe der Vermessung eines Widerstandes das Ohmsche Gesetz erarbeitet. Mithilfe der Kirchhoffschen Gesetze werden in Kapitel 9 Serienschaltung und Parallelschal-

tung von Widerständen besprochen. Mit diesen Grundelementen können Widerstandsnetzwerke berechnet werden. Dabei entstehende Messfehler werden in Kapitel 10 erklärt. Die verschiedenen Arten von Messfehlern sind dabei ein zentraler Punkt in dieser Arbeit, da diese auch im wissenschaftlichen Teil beachtet werden mussten. Dabei wird auf die beiden grundlegenden Methoden zur gleichzeitigen Messung von Strom und Spannung eingegangen. Kondensator und Spule, welche die Elemente eines elektronischen Schwingkreises bilden, werden in Kapitel 11 eingeführt.

# Kapitel 8

## Ohmsches Gesetz

Das Ohmsche Gesetz ist eine der grundlegenden Gesetzmäßigkeiten in der Elektronik und beschreibt die Proportionalität zwischen Strom und Spannung. Grundlage für dieses Thema ist das Verstehen der Begriffe Strom, Spannung, Strom- Spannungsquellen und Stromkreis. Des Weiteren sind das Ampèremeter und Voltmeter schon bekannt.

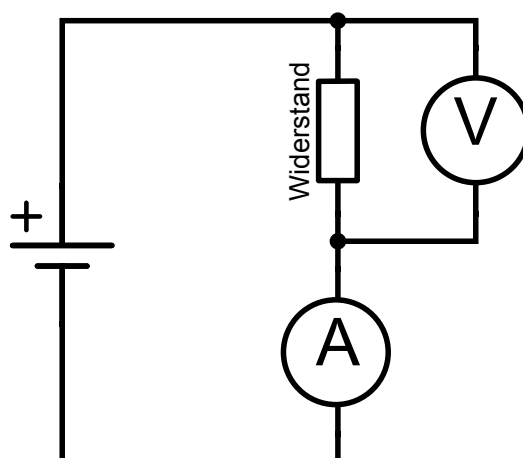
Das Ohmsche Gesetz soll von den Schülern selbst hergeleitet werden, hierzu wird als Versuchsanordnung ein Stromkreis mit Quelle und Widerstand aufgebaut. Die Spannung und der Strom werden gleichzeitig am Widerstand gemessen. Nun werden verschiedene Spannungen an der Quelle eingestellt und die jeweiligen Spannungs- und Stromwerte der Messgeräte in eine (am besten Excel) Tabelle eingetragen. Durch eine grafische Darstellung dieser Werte (Strom-Spannungsdiagramm) kann die Proportionalität gesehen werden. Mithilfe der Fit-Funktion kann auch der Proportionalitätsfaktor (Widerstand) abgelesen werden. Im Anschluss kann dieser berechnete Widerstand noch direkt mithilfe eines Multimeters zum Vergleich gemessen werden. Diese Arbeitsaufträge werden mittels einer schriftlichen Anleitung in Kleingruppen (3-4 Schüler) durchgeführt. In dieser Schulstufe (1. oder 2. Oberstufe) werden noch keine Fehlerrechnungen durchgeführt, jedoch wird auf Ungenauigkeiten der Messgeräte und der gesamten elektronischen Ausrüstung hingewiesen.

### Arbeitsauftrag: Ohmsches Gesetz

Folge den angegebenen Anleitungsschritten:

- Baue die Schaltung laut Schaltplan auf.
- Variiere die Quellenspannung und lies dabei die Spannungs- und Stromwerte ab. Erstelle dafür eine Exceltabelle. Messe ausreichend viele Werte (10-20).
- Erstelle ein Punktdiagramm mit dem Strom an der  $x$ -Achse und der Spannung an der  $y$ -Achse (U-I-Diagramm).
- Lege eine passende Fit-Funktion über die Messpunkte (Beachte dabei: Die Funktion soll durch den Ursprung gehen).
- Lass dir diese Fit-Funktion als Funktionsgleichung ausgeben und adaptiere sie mit den richtigen Variablen.

- Erstelle einen Messbericht.



**Abbildung 8.1:** Schaltplan zur Arbeitsaufgabe: Ohmsches Gesetz. Das Schaltzeichen “V” steht für ein Voltmeter. Mit dieses Voltmeter kann die Spannung am Widerstand gemessen werden. Das Schaltzeichen “A” steht für ein Ampèremeter. Mit einem Ampèremeter kann die Stromstärke gemessen werden.

### Arbeitsdurchführung

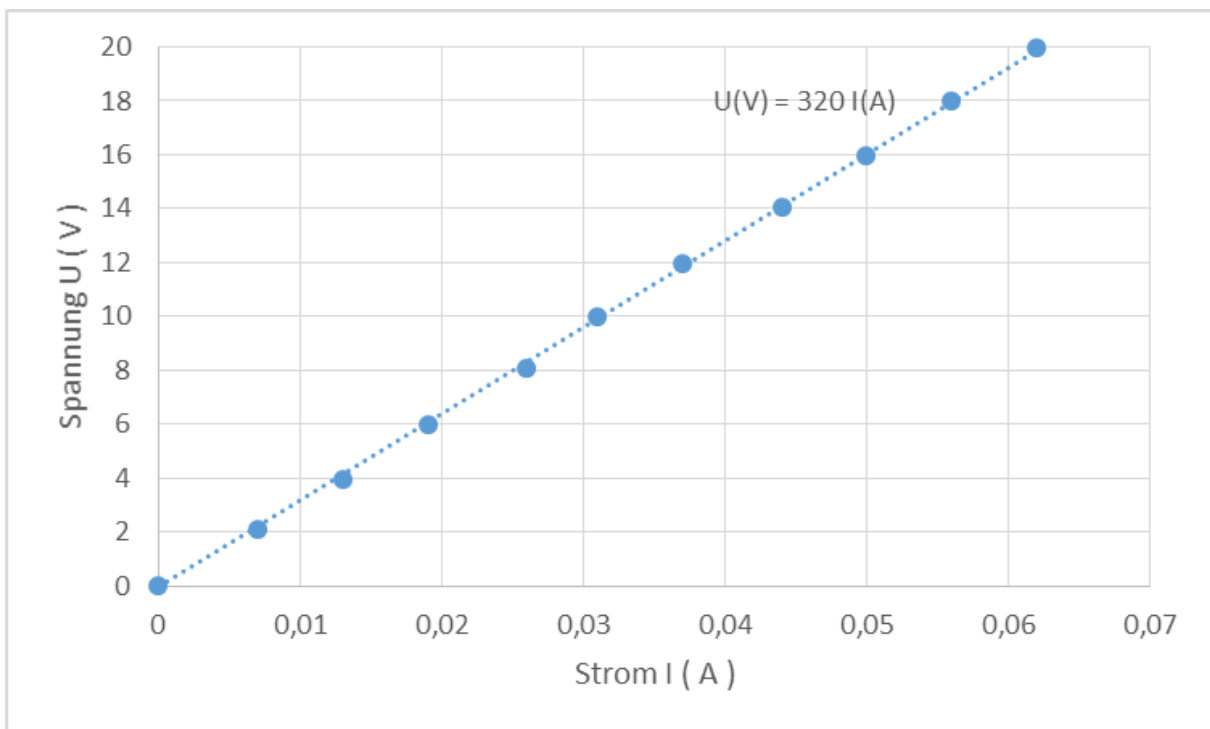
Hier wird eine beispielhafte Arbeitsdurchführung für diesen Arbeitsauftrag aufgezeigt, die an einem realen Widerstand gemessen wurde. Diese wird als Unterstützung meiner Argumente zur Wahl dieser Unterrichtsmethode dienen. Anhand dieser Arbeitsanweisungen lernen die SchülerInnen das Bauen und Messen einfacher Schaltungen. Auch lernen sie dabei den Umgang mit Excel, welcher besonders wichtig ist. Das selbständige Erstellen von Tabellen und Graphen ist eine wichtige Kompetenz in der heutigen Zeit. Die Verbindung der Physik mit der Mathematik und somit die fächerübergreifende Handlung stärkt die Vernetzung einzelner Fachgebiete.

Nach dem Aufbau der Schaltung laut Abbildung 8.1 werden mehrere Strom- und Spannungswerte gemessen. Die Abbildung 8.2 wurde durch diese Probemessung erstellt. Werden für die angegebene Fit-Funktion die richtigen Variablen ersetzt so ergibt dies die Formel

$$U = 320 \cdot I \Leftrightarrow \frac{U}{I} = 320. \quad (8.1)$$

Dies zeigt die Proportionalität zwischen Spannung und Stromstärke. Dieser Faktor wird Widerstand genannt und mit  $R$  (Resistance) bezeichnet. Gemessen wird dieser Wert in  $V$  pro  $A$ , d.h.  $[\text{Widerstand}] = V/A = \Omega$ . Der Widerstand des gemessenen Bauteils beträgt somit  $R = 320 \Omega$ . Dieser Wert kann mit einem Multimeter auch direkt gemessen werden. Diese Funktion wird auch in der Schule zur Überprüfung des berechneten Wertes angewendet. Der gemessene Wert mit einem Multimeter liegt bei  $R = 330 \Omega$ . Die Abweichung von ca. 2% liegt einerseits an den Messgenauigkeiten durch die verwendeten Messgeräte. Andererseits wird durch den Messvorgang von Strom und Spannung ein systematischer Fehler verursacht, da hier die Spannungsmessung die Strommessung beeinflusst. Dieser Fehler wird in Abschnitt 10.1 genauer erläutert.





**Abbildung 8.2:** Messreihe der Strom und Spannungswerte an einem Widerstand. Auf der  $x$ -Achse ist die Stromstärke in Ampère aufgetragen, auf der  $y$ -Achse die Spannung in Volt. Die gepunktete Gerade ist die homogene lineare Regressionsfunktion. Die Funktionsgleichung dieser Funktion wird dabei ausgegeben.

# Kapitel 9

## Widerstandsnetzwerk

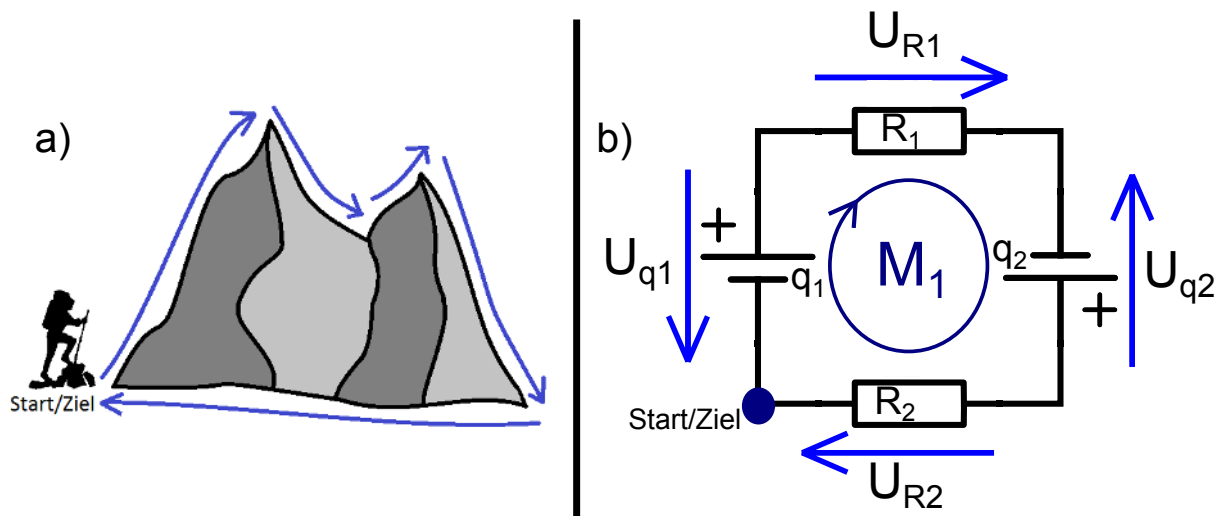
Bei größeren Widerstandsnetzwerken werden Widerstände oft zusammengefasst und der Ersatzwiderstand dieser Schaltung für die Rechnung verwendet. Damit solche Widerstandsnetzwerke auf Ersatzschaltungen reduziert werden können, müssen die beiden Grundschaltungen (Serienschaltung und Parallelschaltung) beherrscht werden. Einige Schulbücher gehen, sobald der Begriff des Widerstandes klar ist, zur Berechnung von Serien- und Parallelschaltungen weiter und versuchen diese zu erklären, indem sie die Kirchhoffschen Regeln verwenden, ohne sie richtig eingeführt zu haben [51, 52]. Mit dieser Reihenfolge ist es schwer, den roten Faden während eines Unterrichts zu halten und man verwirrt dadurch die Schüler. Der Ansatz dieser Arbeit geht deshalb einen anderen Weg und beginnt mit der Berechnung von Strom und Spannung bei leichten Kombinationen von Widerständen. Mit diesem Wissen werden die Grundschaltungen erarbeitet. Mithilfe dieser können dann komplexere Widerstandsnetzwerke berechnet werden.

### 9.1 Maschenregel

Da die elektrische potentielle Energie (Spannung) und die potentielle Energie der Gravitation ( $m \cdot g \cdot h$ ) sehr ähnlich definiert sind, können zum leichteren Verständnis manche Problemstellungen für Spannungsberechnungen auf eine Berggrundwanderung verlagert werden. Werden bei einer Berggrundwanderung alle Höhenmeter nach oben zusammengezählt und alle Höhenmeter nach unten abgezogen, kommt man, wenn man wieder am Anfang ist, immer auf 0 Meter. Äquivalent verhält es sich mit der Spannung. Einen Umlauf in einer elektrischen Schaltung, wie in Abbildung 9.1 dargestellt, nennt man Masche. Wird eine Masche gebildet, ergeben alle Spannungen zusammen 0 Volt. Quellen erhöhen die Spannung und Widerstände verringern die Spannung. Formell bedeutet dies für alle Spannungen  $U_i$  einer Masche M:

$$\sum_i U_i = 0, \quad (9.1)$$

wobei sich die Vorzeichen der Spannungsabfälle an den Richtungen der Pfeile im Schaltplan orientieren.



**Abbildung 9.1:** Interpretation der Maschenregel. a) Bei einer Berggrundwanderung ist kein Unterschied zwischen dem Start- und Endpotential. Die Summe aller potentiellen Energien nach oben (positiv) und nach unten (negativ) ergibt immer Null. b) Genauso verhält sich ein Umlauf im Stromkreis. Diesen elektrischen Umlauf nennt man Masche (hier  $M_1$ ). Werden entlang einer Masche alle Spannungen addiert, so ergibt sich 0 Volt.

Im Beispiel in Abbildung 9.1b) kann die Masche  $M_1$  gebildet werden, die aus den beiden Quellenspannungen  $U_{q1}$  und  $U_{q2}$  und den Spannungsabfällen an den Widerständen  $U_{R1}$  und  $U_{R2}$  besteht. Mithilfe der Maschenregel ergibt sich für die Masche  $M_1$ :

$$-U_{q1} + U_{R1} - U_{q2} + U_{R2} = 0 \quad (9.2)$$

## 9.2 Knotenregel

Da der elektrische Strom (Fluss von Elektronen bzw. Ladung pro Zeit) sehr ähnlich einem Wasserfluss (Fluss von Wassertropfen bzw. Masse pro Zeit) ist, kann hier diese Analogie verwendet werden. Wie in Abbildung 9.2 dargestellt ist, ist eine Flussgabelung eine Stelle, wo ein Fluss sich in zwei (oder mehrere) Teilflüsse aufteilt. Bei einer Flussgabelung muss gleich viel Wasser pro Zeit in die Gabelung einfließen, wie aus der Gabelung heraus fließt. Äquivalent verhält es sich mit dem Strom. Einen Kreuzungspunkt von Stromleitungen, wo mehrere elektrische Leitungen elektrisch verbunden sind, nennt man Knotenpunkt. Hier teilt sich der Strom in zwei (oder mehrere) Teilströme. Gleich wie beim Wasserfluss verhält sich auch der Strom (Ladung pro Zeit) bei einem Knotenpunkt. Die Summe der zufließenden Ströme muss gleich der Summe der abfließenden Ströme sein. In einem Knoten gilt für jeden Strom  $I_n$  (zufließende Ströme sind positiv, abfließende Ströme negativ) an dem Knoten K:

$$\sum_n I_n = 0, \quad (9.3)$$

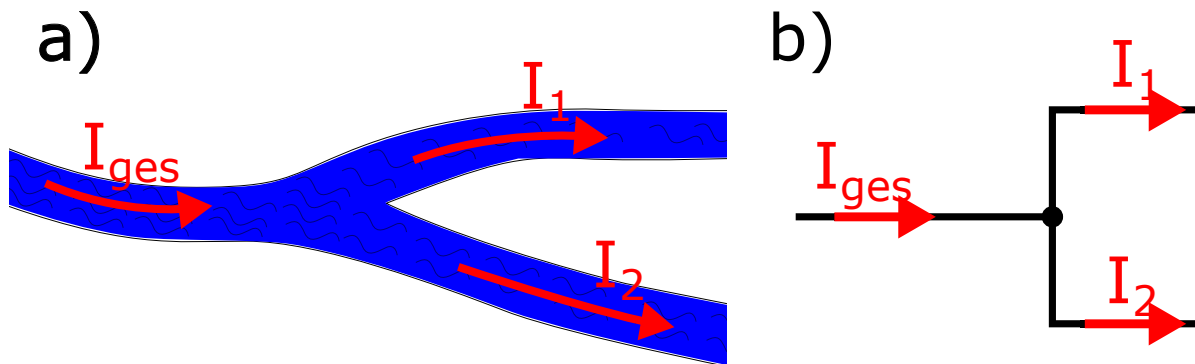
wobei zufließende und abfließende Ströme vom Vorzeichen unterschiedlich sind.

Im Beispiel in Abbildung 9.2b) kann der Knoten  $K_1$  gebildet werden, der aus dem einfließenden Strom  $I_{ges}$  und den beiden Teilströmen  $I_1$  und  $I_2$  besteht. Mithilfe der Knotenregel ergibt

sich für den Knoten  $K_1$ :

$$I_{\text{ges}} - I_1 - I_2 = 0, \quad (9.4)$$

$$\text{d.h. } I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 \quad (9.5)$$



**Abbildung 9.2:** Interpretation der Knotenregel. a) Bei einer Flussgabelung fließt gleich viel Wasser pro Zeiteinheit hinein, wie auch heraus fließt. Die Summe aller zufließenden Ströme (positiv) und abfließenden Ströme (negativ) ist Null. b) Genauso verhält es sich bei einem Kreuzungspunkt im Stromkreis. Diesen Kreuzungspunkt nennt man Knotenpunkt. Die Summe aller zufließenden Ströme (positiv) und abfließenden Ströme (negativ) ist Null.

## 9.3 Serienschaltung

Sind die Kirchhoffschen Regeln verstanden, ist es sehr leicht, die zwei Grundschaltungen von Widerständen verständlich zu argumentieren, da diese eine direkte Folgerung der Maschen- und Knotenregeln sind. Es wird eine Herleitung dieser Formeln gezeigt, wie sie in der Schule durchführbar ist. Diese können auch nachgemessen werden, indem man Testschaltungen aufbaut und vermisst. Solch ein Arbeitsauftrag wird in Kapitel 9.4 aufgezeigt.

Eine Hintereinanderschaltung von zwei Widerständen, wie in Abbildung 9.3 dargestellt, nennt man eine Serienschaltung von zwei Widerständen. Dabei kommt es zu keinem Knotenpunkt, da der Strom nirgends abzweigt. Laut der Knotenregel wird daraus gefolgert, dass überall in dieser Schaltung die gleiche Stromstärke fließen muss. Bei einer Serienschaltung (wie in Abbildung 9.3) wird die Maschenregel angewendet. Die Maschenregel für die Masche  $M_1$  lautet

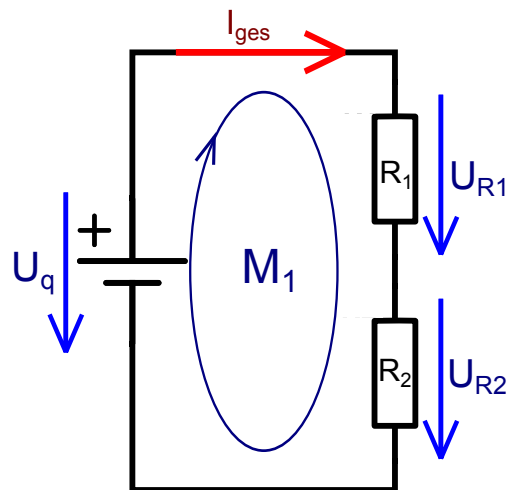
$$-U_q + U_{R1} + U_{R2} = 0 \Leftrightarrow U_q = U_{R1} + U_{R2}, \quad (9.6)$$

wobei  $U_q$  die Quellenspannung ist und  $U_{R1}$  bzw.  $U_{R2}$  die Spannungsabfälle an den Widerständen  $R_1$  bzw.  $R_2$  sind. Nun kann für jede Spannung das Ohmsche Gesetz angewendet werden. Dies ist praktisch, da überall der gleiche Strom  $I_{\text{ges}}$  fließt. Als Widerstand bei der Quelle kann der Ersatzwiderstand für diese Schaltung verwendet werden. Dieser wird auch oft Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}$  genannt.

$$I_{\text{ges}} \cdot R_{\text{ges}} = I_{\text{ges}} \cdot R_1 + I_{\text{ges}} \cdot R_2. \quad (9.7)$$

Wird durch den Strom dividiert, ergibt sich die Formel für den Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}$  dieser Serienschaltung:

$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2. \quad (9.8)$$



**Abbildung 9.3:** Einfache Serienschaltung der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ . Der Stromkreis wird vervollständigt mit einer Spannungsquelle mit der Spannung  $U_q$ . Es sind bereits die Masche  $M_1$  sowie alle Spannungsabfälle und der Strom  $I_{ges}$  eingezeichnet

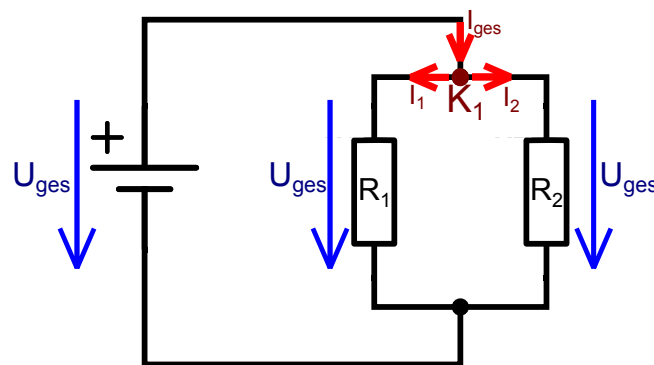
Wird eine kompliziertere Serienschaltung mit mehreren Teilwiderständen berechnet, kann das gleiche Prinzip mit einer größeren Masche durchgeführt werden. Alternativ werden immer nur 2 Widerstände zusammengefügt. Diesen Ersatzwiderstand führt man dann mit den nächsten zusammen. So kommt man auf die Formel für  $n$  Ersatzserienwiderstände  $R_i$ :

$$R_{ges} = \sum_{i=1}^n R_i . \quad (9.9)$$

Da jeder Widerstand positiv ist, vergrößert eine Serienschaltung immer den Gesamtwiderstand.

## 9.4 Parallelschaltung

Die Kombination der Widerstände in Abbildung 9.4 nennt man Parallelschaltung von Widerständen. Anhand der Maschenregel kann gezeigt werden, dass bei jedem Zweig einer Parallelschaltung der gleich große Spannungsabfall sein muss. Als Analogie kann man sich eine Weggabelung vorstellen, die zwei verschiedene Wege vom Berg ins Tal zur Auswahl stellt. Da beide Wege an der gleichen Position starten und auch enden, muss der Höhenunterschied auch gleich sein.



**Abbildung 9.4:** Einfache Parallelschaltung der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$ . Der Stromkreis wird vervollständigt durch eine Spannungsquelle mit Spannung  $U_{\text{ges}}$ . Es sind bereits ein Knotenpunkt  $K_1$  sowie alle Teilströme eingezeichnet. Die Teilspannungen, die alle durch die Maschenregel gleich groß sind, sind mit  $U_{\text{ges}}$  gekennzeichnet.

Bei einer Parallelschaltung (wie in Abbildung 9.4) wird die Knotenregel angewendet. Die Knotenregel für den Knoten  $K_1$  lautet

$$I_{\text{ges}} - I_1 - I_2 = 0 \Leftrightarrow I_{\text{ges}} = I_1 + I_2, \quad (9.10)$$

wobei  $I_{\text{ges}}$  der Gesamtstrom ist, der von der Quelle geliefert wird und  $I_1$  bzw.  $I_2$  die Teilströme an den Ästen durch  $R_1$  bzw.  $R_2$  bezeichnen. Für jeden Strom kann das Ohmsche Gesetz angewendet werden. Dies ist praktisch, da überall der gleiche Spannungsabfall  $U_{\text{ges}}$  vorliegt. Als Widerstand bei der Quelle kann der Ersatzwiderstand  $R_{\text{ges}}$  für diese Schaltung verwendet werden.

$$\frac{U_{\text{ges}}}{R_{\text{ges}}} = \frac{U_{\text{ges}}}{R_1} + \frac{U_{\text{ges}}}{R_2} \quad (9.11)$$

Wird durch die Spannung dividiert, ergibt sich der Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}$  dieser Parallelschaltung:

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (9.12)$$

Wird eine kompliziertere Parallelschaltung mit mehreren Teilwiderständen berechnet, kann das gleiche Prinzip mit einem größeren Knoten durchgeführt werden. Alternativ fügt man immer nur 2 Widerstände zusammen und diesen Ersatzwiderstand führt man dann mit den nächsten zusammen. So kommt man auf die Formel für  $n$  Ersatzserienwiderstände  $R_i$ :

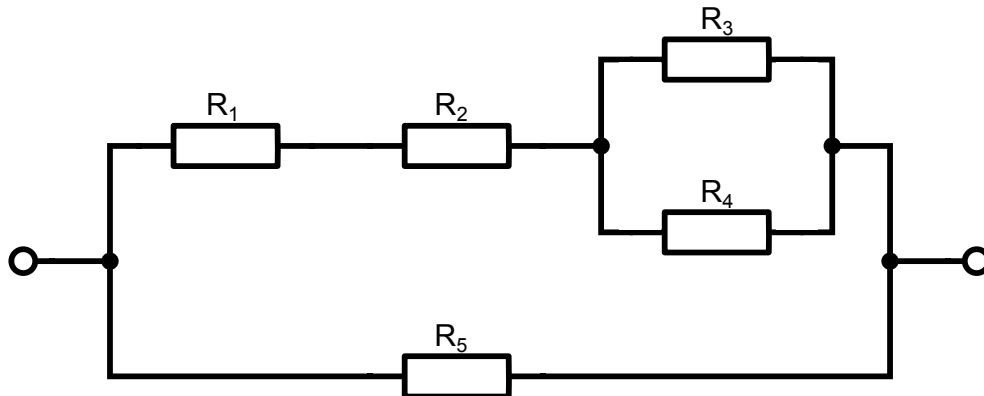
$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}. \quad (9.13)$$

Da jeder Widerstand positiv ist, verringert eine Parallelschaltung immer den Gesamtwiderstand.

#### Arbeitsauftrag: Widerstandsnetzwerk

- Berechne den Gesamtwiderstand der gegebenen Schaltung zwischen den zwei Anschlussstellen.
- Baue die Schaltung laut Schaltplan.

- Messe den Gesamtwiderstand dieser Schaltung.
- Berechne die Abweichung des gemessenen Widerstandes zum berechneten Wert in Prozent.
- Begründe die möglichen Abweichungen zwischen Messwert und berechnetem Wert.
- Erstelle einen Messbericht.



**Abbildung 9.5:** Widerstandsnetzwerk:  $R_1 = 470 \Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 2.2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_5 = 2.2 \text{ k}\Omega$

### Arbeitsdurchführung

Für die Bearbeitung dieser Arbeitsaufträge werden mehrere Kompetenzen abverlangt, was auch den modernen Unterrichtsstil widerspiegelt. Im Mittelpunkt der Arbeit steht das Berechnen des Gesamtwiderstandes. Dies geschieht schrittweise von innen nach außen. Zuerst wird der Ersatzwiderstand für die Parallelschaltung von  $R_3$  und  $R_4$  berechnet, welcher die Bezeichnung  $R_{3,4}$  erhält.

$$R_{3,4} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (9.14)$$

Dieser Ersatzwiderstand ist in Serie geschaltet mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$ . Diese bilden den Ersatzwiderstand  $R_{1,2,3,4} \equiv R_{1-4}$

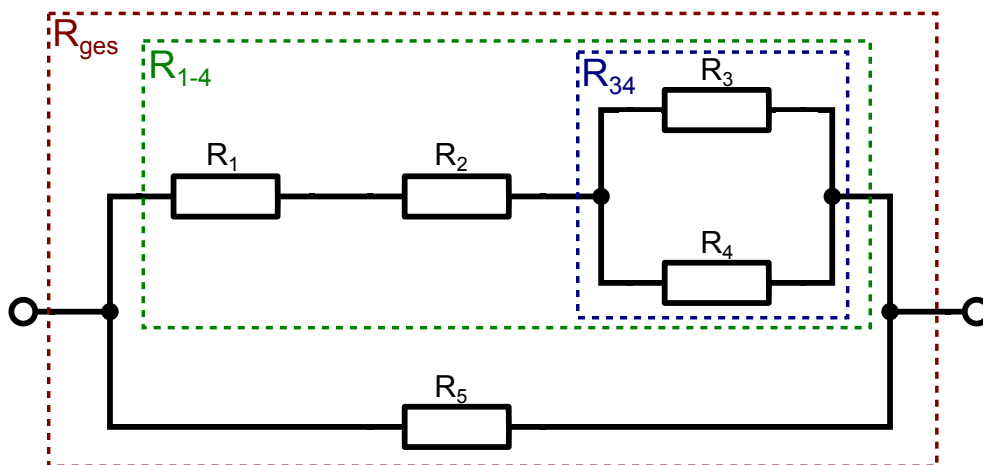
$$R_{1-4} = R_1 + R_2 + R_{3,4} = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (9.15)$$

Der Ersatzwiderstand  $R_{1-4}$  ist wiederum parallel geschaltet zum Widerstand  $R_5$ . Zusammen mit diesem Widerstand wird der Gesamtwiderstand  $R_{\text{ges}}$  berechnet.

$$R_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{1-4}} + \frac{1}{R_5}} \quad (9.16)$$

Diese Berechnung wird mit den in Abbildung 9.5 gegebenen Widerstandswerten berechnet. Hier ist ein wichtiger Bestandteil der Aufgabe, dass eine Parallelschaltung von gleichen Widerständen ( $R_3$  und  $R_4$ ) den Ersatzwiderstand halbiert. Zur Vertiefung der Messtechnik wird





**Abbildung 9.6:** Berechnung des Ersatzwiderstandes von innen nach außen. Zuerst wird der Ersatzwiderstand für  $R_3$  und  $R_4$  berechnet. Als nächstes werden die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  dazugerechnet. Zuletzt wird noch der parallele Widerstand  $R_5$  dazu gefügt.

dieses Netzwerk auch aufgebaut und vermessen. Dies hilft bei der Selbstkontrolle des berechneten Wertes. Widerstände gibt es in verschiedenen Serien zu kaufen, welche die Widerstandswerte, den Toleranzbereich und den Preis der Bauteile bestimmen. Die angegebenen Widerstände sind alle aus der E3 Serie und sind dadurch sehr häufig. Deshalb schult das Suchen dieser Werte das Lesen der Farbkodierungen von axialen Widerständen. Das Lesen der Farbkodierungen und auch die Beschriftungen der oberflächenmontierten Widerstände (surface-mount device: SMB) beruht auf der Gleitkommadarstellung. Somit ist eine Verbindung zum Mathematikunterricht hergestellt. Auch die Berechnung der Abweichung der Messwerte vom berechneten Wert ist stark an den Mathematikunterricht angelehnt, obwohl die Kenntnis der Messungenauigkeiten ein physikalisches Grundprinzip ist. Durch das Begründen und Argumentieren der letzten Teilaufgabe wird noch eine weitere Grundkompetenz in diesem Arbeitsauftrag bearbeitet. Hier wird auf den letzten Farbkodierungsring des Widerstandes eingegangen, welcher die Toleranz angibt.

# Kapitel 10

## Messfehler

Ein wichtiger Aspekt in der Elektronik ist die richtige Messung, beziehungsweise das Bewusstsein der Messfehler. Da bei Messungen in der Elektronik fast immer systematische und statistische Fehler auftreten, muss der Schüler daran gewöhnt werden, diese zu beachten und die Gründe für Unterschiede zwischen Theorie und Praxis zu erkennen. Oft verhindern nur die Messungen das richtige Verhalten der Schaltung.

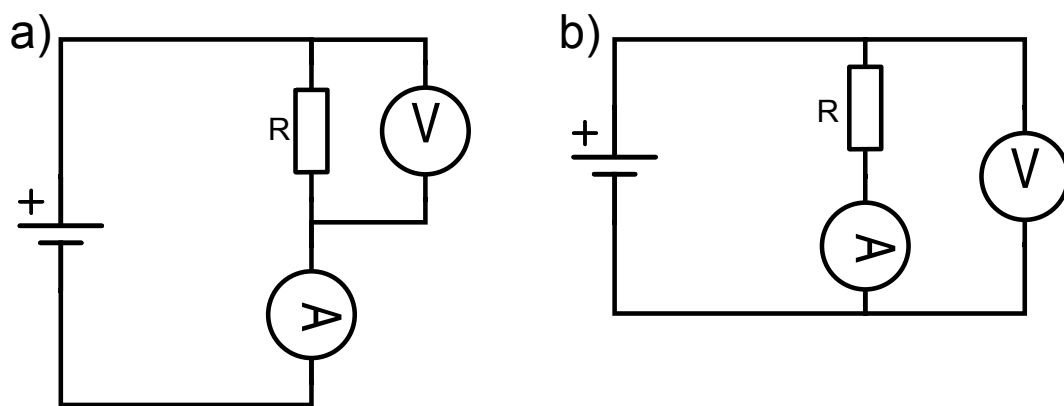
In dieser Arbeit werden zwei große Aspekte der richtigen Messung aufgezeigt. Der Innenwiderstand von Messgeräten und der Ausgangswiderstand von Quellen (Wechselspannungsquellen haben meist  $50 \Omega$  Innenwiderstand) werden hier besprochen. Dies dient außerdem der Veranschaulichung der Leistungsanpassung, welche auch im wissenschaftlichen Teil in Kapitel 5.2 beschrieben wird. Die Auswirkungen der Messfehler in der Elektronik sind auch schon bei Schulaufgaben sehr früh erkennbar. Damit diese Messfehler erkannt und auch korrigiert werden können, werden diese schon früh (2. Oberstufe) besprochen. Besonders in der Wechselstromrechnung bei hohen Frequenzen sind die Abweichungen zum berechneten Wert und die Messeinflüsse nicht mehr vernachlässigbar. In technischen Schulen ist die Leistungs- und Impedanzanpassung eine weitere wichtige Grundlage für das richtige Messverhalten und für gelungene Schaltungsgestaltung.

### 10.1 Innenwiderstand

Jedes Messgerät besitzt einen Innenwiderstand, welcher Messungen beeinflussen kann. Besonders bei der gleichzeitigen Messung von Spannung und Strom ist auf diesen Innenwiderstand zu achten. Neue Messgeräte haben bei einer Spannungsmessung Innenwiderstände mit über  $5 \text{ M}\Omega$ , damit der Großteil des Stroms bei der Messung durch die Schaltung und nur ein vernachlässigbarer Teil durch das Messgerät fließt. Bei der Stromstärkenmessung haben neue Messgeräte Innenwiderstände von unter  $1 \Omega$ , damit im Vergleich zur Schaltung nahezu kein Spannungsabfall am Messgerät entsteht. Ältere Messgeräte hingegen haben wesentlich schlechtere Werte (bei sehr alten Geräten: Spannungsmessung:  $R_i \leq 10 \text{ k}\Omega$ , Strommessung:  $R_i \geq 10 \Omega$ ). Will man Strom und Spannung gleichzeitig messen, beeinflusst ein Messgerät das andere. Somit gibt es eine stromrichtige- und eine spannungsrichtige Messung. Bei der stromrichtigen Messung wird der richtige Strom, der durch den Widerstand fließt, gemessen, das Voltmeter misst jedoch den Spannungsabfall vom Widerstand und vom Ampèremeter. Dadurch kann der

Widerstand nicht richtig berechnet werden. Es muss zuerst die gemessene Spannung in die reale Spannung, die am Widerstand anliegt, umgerechnet werden. Dafür benötigt man den Wert des Innenwiderstandes des Ampèremeters. Dieser ist meist auf der Rückseite des Messgerätes angegeben oder kann aus der Produktbeschreibung entnommen werden. Der Innenwiderstand kann aber auch durch Messungen bestimmt werden. Analog gilt das für die spannungsrichtige Messung.

Für die SchülerInnen soll in dieser Einheit ersichtlich werden, dass für eine Messung diese Innenwiderstände in einer Schaltung (bzw. Ersatzschaltung) berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren soll aufgezeigt werden, wann die stromrichtige- und wann die spannungsrichtige Methode zu bevorzugen ist. Dafür werden Versuchsreihen durchgeführt, die mittels Anleitungsblatt geleitet werden. Es werden Kleingruppen gebildet (4 Personen). Auftrag A behandelt die stromrichtige Methode, Auftrag B die spannungsrichtige Messung. Beide Aufgaben werden nacheinander gelöst, damit der Unterschied zwischen den beiden Methoden verständlich wird.



**Abbildung 10.1:** Unterschiedliche Messmethoden zur gleichzeitigen Messung von Strom und Spannung. a) zeigt die spannungsrichtige Methode, welche die direkte Spannung am Widerstand misst. Das Amperemeter misst den Gesamtstrom der Schaltung. Die stromrichtige Messung in b) misst den Strom direkt am Widerstand, jedoch die Gesamtspannung an der Schaltung. Je nach Widerstand ist die richtige Messmethode zu wählen.

Dafür wird die Messung aus Kapitel 8 wiederholt mit einem sehr großem, bzw. einem sehr kleinen Widerstand bezogen auf den Innenwiderstand des verwendeten Messgerätes. Damit der Effekt der jeweiligen Messmethode verdeutlicht wird, werden alte Messgeräte verwendet, die noch, bezogen auf moderne Messinstrumente, einen großen Innenwiderstand bei der Strommessung und einen kleinen Innenwiderstand bei der Spannungsmessung haben. Zusätzlich bekommt die Gruppe der stromrichtigen Methode einen Widerstand in der Größenordnung von mehreren  $10 \Omega$  und die Gruppe der spannungsrichtigen Messung erhält Widerstände mit mehreren  $100 \text{ k}\Omega$ , um den Unterschied sehr deutlich zu sehen.

### Arbeitsauftrag: Widerstandsbestimmung

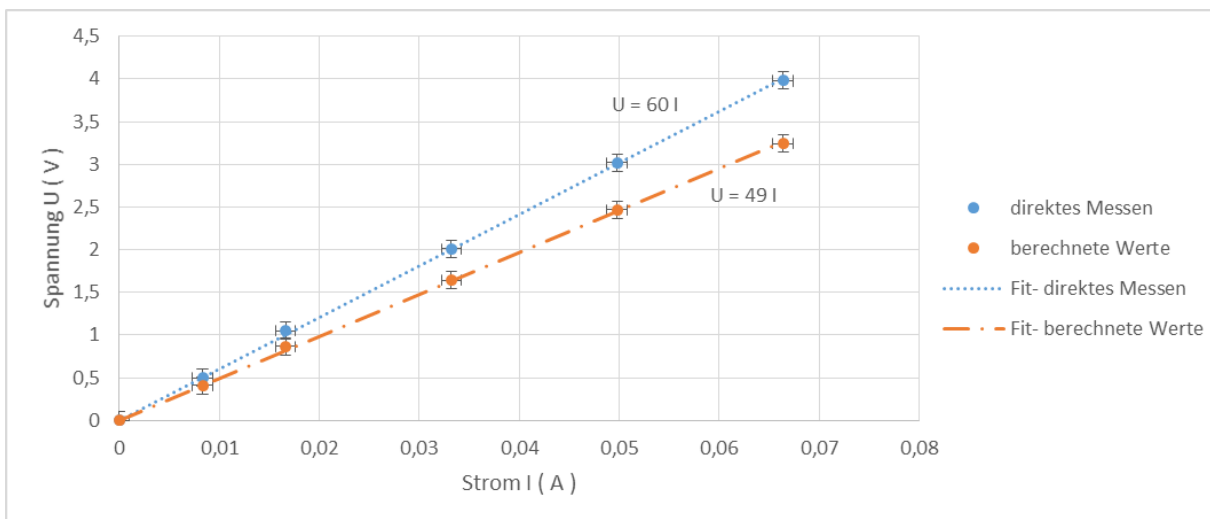
- Messe gleich wie im gegebenen Schaltplan die Strom-Spannungs-Kennlinie des beigelegten Widerstandes.
- Übertrage diese Kennlinie in Excel und erstelle dazu eine Fit-Funktion.

- Lies daraus den Wert des gegebenen Widerstandes ab.
- Messe direkt mit einem Ohmmeter den Widerstand.
- Vergleiche beide Werte.
- Erstelle einen Messbericht.

Der beigelegte Schaltplan entspricht für Gruppe A der Abbildung 10.1a) und für Gruppe B der Abbildung 10.1b).

### Arbeitsdurchführung

Als Demonstration ist der Arbeitsauftrag für Gruppe B bearbeitet worden. Durch Aufbau der Schaltung laut Angabe konnte der Graph in Abbildung 10.2 gemessen werden. Daraus konnte der Wert des gesuchten Widerstandes abgelesen werden:  $R = 60 \Omega$ .



**Abbildung 10.2:** Durchgeführte Messreihe mit der stromrichtigen Methode. Bei dieser Methode wird die Serienschaltung des gesuchten Widerstandes und des Innenwiderstandes des Ampèremeters gemessen. Der Einfluss in die Messgenauigkeit ist bei kleinen Widerständen (im Bereich des Innenwiderstandes des Messgerätes) groß und muss dadurch beachtet werden. Der falsche Spannungswert kann zurückgerechnet werden, indem der Spannungsabfall des Amperemeters vom Messwert abgezogen wird. Diese Kennlinie wird in orange (strich-punktiert) dargestellt.

Direktes Messen ergibt jedoch einen Widerstand von  $R = 48 \Omega$ . Da sich der reale Wert und der berechnete Wert des Widerstandes deutlich unterscheiden, kann nun auf die Einwirkung von Messgeräten auf die Schaltung hingewiesen werden. Dafür werden die idealisierten Messgeräte im Schaltplan durch Einfügen von Innenwiderständen zu einem realen Schaltplan ergänzt. Der ideale Innenwiderstand eines Ampèremeters beträgt  $R_A = 0 \Omega$ , der eines Voltmeters  $R_V \rightarrow \infty \Omega$ . Die realen Innenwiderstände der verwendeten Messgeräte betragen  $R_A = 11 \Omega$  und  $R_V = 2,1 \text{ M}\Omega$ . Der hier gemessene Widerstand  $R_M = R + R_A$  ist die Serienschaltung des

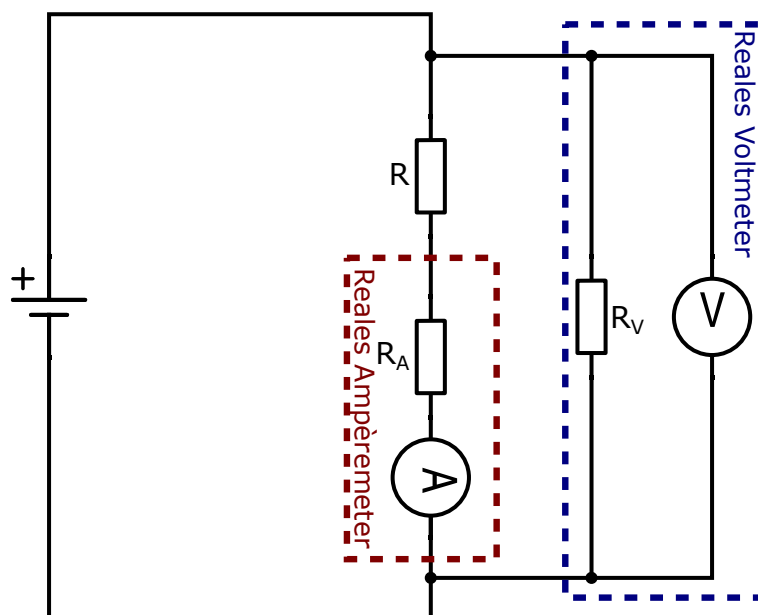
gesuchten Widerstandes und des Innenwiderstandes des Amperemeters. Somit ist der gesuchte Widerstand

$$R = R_M - R_A = 60 \, \Omega - 11 \, \Omega = 49 \, \Omega, \quad (10.1)$$

welcher nur noch eine Abweichung von 3% zum direkt gemessenen Wert ergibt. Die Abweichung kann auch direkt bei den Messwerten eingerechnet werden, indem der Spannungsabfall am Amperemeter  $U_{R_A}$  von der gemessenen Spannung  $U_M$  abgezogen wird. Der Spannungsabfall am Widerstand  $U_R$  ergibt sich aus

$$U_R = U_M - U_{R_A} = U_M - I_M \cdot R_A \quad (10.2)$$

wobei  $I_M$  der Messwert des Amperemeters und  $R_I$  dessen Innenwiderstand ist.



**Abbildung 10.3:** Schematische Zeichnung der realen stromrichtigen Messmethode. Das Amperemeter wird durch ein ideales Amperemeter und einen seriell geschalteten Innenwiderstand ersetzt. Das Voltmeter wird durch ein ideales Voltmeter mit einem parallel geschalteten Innenwiderstand ersetzt. Diese Methode misst zwar den richtigen Strom durch den gesuchten Widerstand  $R$ , jedoch den Spannungsabfall an der Serienschaltung vom gesuchten Widerstand  $R$  und den Innenwiderstand des Amperemeters  $R_A$ .

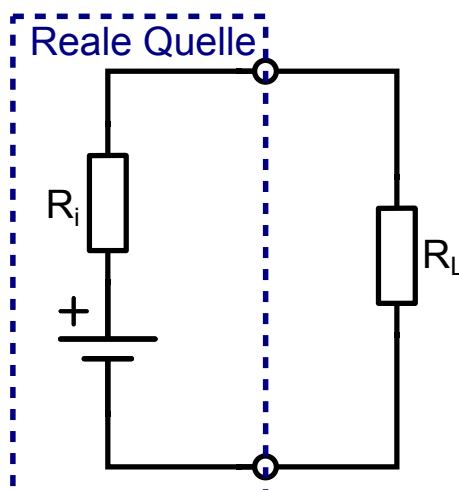
Am Ende der Messungen wird diskutiert, wann welche Messmethode vorteilhaft ist. Die stromrichtige Methode wird bei großen Widerstandswerten ohne Korrekturrechnung das bessere Ergebnis liefern, die spannungsrichtige Methode hingegen bei kleinen Widerstandswerten.

## 10.2 Leistungsanpassung

Auch eine Spannungsquelle ist kein ideales Bauteil. In der Realität besitzt dieses Bauteil einen Ausgangswiderstand (kann auch Innenwiderstand genannt werden). Vor allem im Wechselstrombetrieb (Innenwiderstand normalerweise  $50 \, \Omega$ ) muss dieser Innenwiderstand beachtet wer-

den. Dieser Widerstand, der unabhängig von der Last existiert, verbraucht einen Teil der Leistung der Quelle. Somit liegt nicht mehr die volle Leistung der Quelle an der Last an. Wird die Last so optimiert, dass trotz Innenwiderstand die maximal mögliche Leistung an der Last anliegt, so nennt man diesen Vorgang die Impedanzanpassung. Auch in anderen Bereichen der Physik, wie Akustik und Optik, spielt die Impedanzanpassung eine Rolle. Ein medizinisches Beispiel wäre das Kontaktgel für Ultraschalluntersuchungen, welches zur Impedanzanpassung zwischen dem Ultraschallgerät und dem menschlichen Gewebe dient. Die elektronische Impedanzanpassung setzt ein gutes Verständnis der Funktionsweise von realen Quellen und Messgeräten voraus. Somit kann dieses Thema sehr gut an den Messfehlern angeknüpft werden um einen roten Faden im Unterricht zu halten. Bei diesem Thema wird die vorherige ideale Quelle zu einer realen Quelle erweitert. Dazu wird bei Spannungsquellen ein Widerstand seriell hinzugefügt, bei einer Stromquelle wird ein Widerstand parallel eingefügt.

Da bei Gleichspannungsquellen dieser Widerstand ( $\sim 1 \Omega$ ) im Vergleich zur Last vernachlässigbar klein ist, wird dieser hier oft weggelassen. Damit der Effekt der Leistungsanpassung besser ersichtlich wird, wird hier mit einem Funktionsgenerator gearbeitet. Diese Spannungsquelle hat im Wechselspannungsbetrieb einen genormten Innenwiderstand von  $50 \Omega$ . Diese Eigenschaft hat großen Einfluss auf das Messverhalten und muss dadurch immer beachtet werden. So werden vom Funktionsgenerator nur dann die gewünschten Spannungen ausgegeben, wenn dieser auch auf die richtige Last (Gesamtwiderstand der Schaltung) eingestellt ist. Dafür gibt es verschiedene Einstellungsmöglichkeiten am Funktionsgenerator. Die standardmäßige Einstellung am Funktionsgenerator ist  $50 \Omega$  Last. Das bedeutet, dass die angegebenen Spannungswerte nur dann stimmen, wenn die Last einen Widerstand von  $50 \Omega$  besitzt. Warum eine  $50 \Omega$  Last sinnvoll ist, wird den Schülern durch die Berechnung der Leistungsanpassung erklärt. In der Elektronik ist diese Berechnung relativ einfach und kann somit als Beispiel für andere Impedanzanpassungen dienen.



**Abbildung 10.4:** Erweiterung der idealen Quelle zur realen Quelle. Bei der realen Spannungsquelle ist seriell ein Innenwiderstand geschaltet. Die Größe dieses Widerstands hängt von der jeweiligen Quelle ab. Er ist jedoch bei Funktionsgeneratoren auf  $50 \Omega$  genormt. Durch diese Normierung kann er leicht in den Berechnungen von Schaltungen beachtet werden.

Das Ersatzschaltbild in Abbildung 10.4 zeigt die reale Quelle, bestehend aus einer idealen

Quelle und einem Innenwiderstand  $R_i$ . An dieser realen Quelle hängt eine variable Last  $R_L$ . Hier kann die Leistung am Lastwiderstand  $P_L$  mithilfe des Stroms  $I$  und der Spannungsabfall am Lastwiderstand  $U_L$  berechnet werden.

$$P_L = U_L \cdot I = I^2 \cdot R_L = U_q^2 \cdot \frac{R_L}{(R_i + R_L)^2} \quad (10.3)$$

wobei  $U_q$  die Quellenspannung,  $R_L$  den Lastwiderstand und  $R_i$  den Innenwiderstand des Funktionsgenerators bezeichnet. Für die Berechnung der maximalen Leistung  $P_{\max}$  am Lastwiderstand, wird eine Extremwertrechnung durchgeführt. Wurde dies in der Schule noch nicht gelehrt, kann der Graph auch gezeichnet und der Maximalwert abgelesen werden. Auch alternative Extremwertberechnungen (z.B.: Tangente mit einer Konstanten) können zum Einsatz kommen. Bei der Extremwertrechnung mittels differenzieren muss am lokalem Maximum die Ableitung gleich Null sein:

$$\frac{dP_L}{dR_L} \stackrel{!}{=} 0 \Leftrightarrow \frac{(R_i + R_L) - 2R_L(R_i + R_L)}{(R_i + R_L)^4} = 0 \Leftrightarrow R_L = R_i \quad (10.4)$$

Dadurch steht der Last die größte Leistung zur Verfügung, wenn der Innenwiderstand dem Lastwiderstand angepasst ist ( $R_L = R_i$ ). Diesen Vorgang nennt man Impedanzanpassung. Bei Anpassung liegt somit am Lastwiderstand  $R_L$  eine Spannung von

$$U_L = U_q \cdot \frac{R_L}{R_i + R_L} = U_q \cdot \frac{R_L}{2 \cdot R_L} = \frac{U_q}{2} \quad (10.5)$$

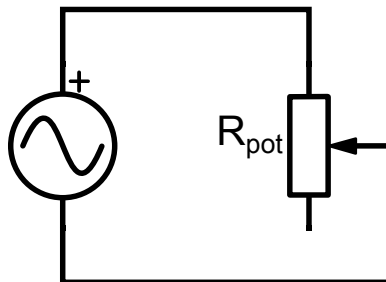
an. Die Spannung  $U_q$  ist die Gesamtspannung, mit welcher die Quelle die Schaltung versorgt. Ist die Schaltung angepasst, so liefert die Quelle eine doppelt so hohe Spannung, wie an der Last anliegt. Dies wird bei den Anzeigen der Wechselspannungsquellen berücksichtigt. Auf diesen wird die Spannung, welche an der Last abfällt, angezeigt, sofern die Schaltung an den Innenwiderstand angepasst ist. Ist die Last nicht dem Innenwiderstand der Wechselspannungsquelle angepasst, so zeigt die Anzeige dieser Quelle auch nicht die Spannung an der Last an.

Dieser Zusammenhang und die Leistungsanpassung kann auch mit einem Versuch erarbeitet werden. Dazu wird an einem Potentiometer die Leistung an einem Lastwiderstand in Abhängigkeit seines Widerstandswertes gemessen. Diese Abhängigkeit kann in einem Graphen gezeichnet werden. Aus diesem Graphen kann der Maximalwert der Leistung abgelesen werden.

### Arbeitsauftrag: Bestimmung der Leistungskurve einer variablen Last

- Baue mit einem Funktionsgenerator und einem Potentiometer ( $1 \Omega - 100 \Omega$ ) die gegebene Schaltung auf.
- Miss Strom und Spannung an diesem Widerstand (überlege dir, ob strom- oder spannungsrichtige Messung).
- Variiere das Potentiometer und übertrage Widerstandswert, Strom, Spannung und angezeigte Spannung am Funktionsgenerator in eine Tabelle. Messe ausreichend viele Messpunkte.

- Berechne die Leistungen an der Last mithilfe der gemessenen Werte.
- Erstelle einen Graphen mit  $x$ -Achse für Widerstand und  $y$ -Achse für Leistung.
- Ermittle das Maximum dieser Kurve.
- Vergleiche die gemessenen und die angezeigten Spannungen.
- Erstelle einen Messbericht.



**Abbildung 10.5:** Schaltung zum Übungsblatt der Leistungsanpassung. Als variabler Widerstand wird ein Potentiometer verwendet. Der dritte Anschluss wird deshalb nicht kontaktiert.

### Arbeitsdurchführung

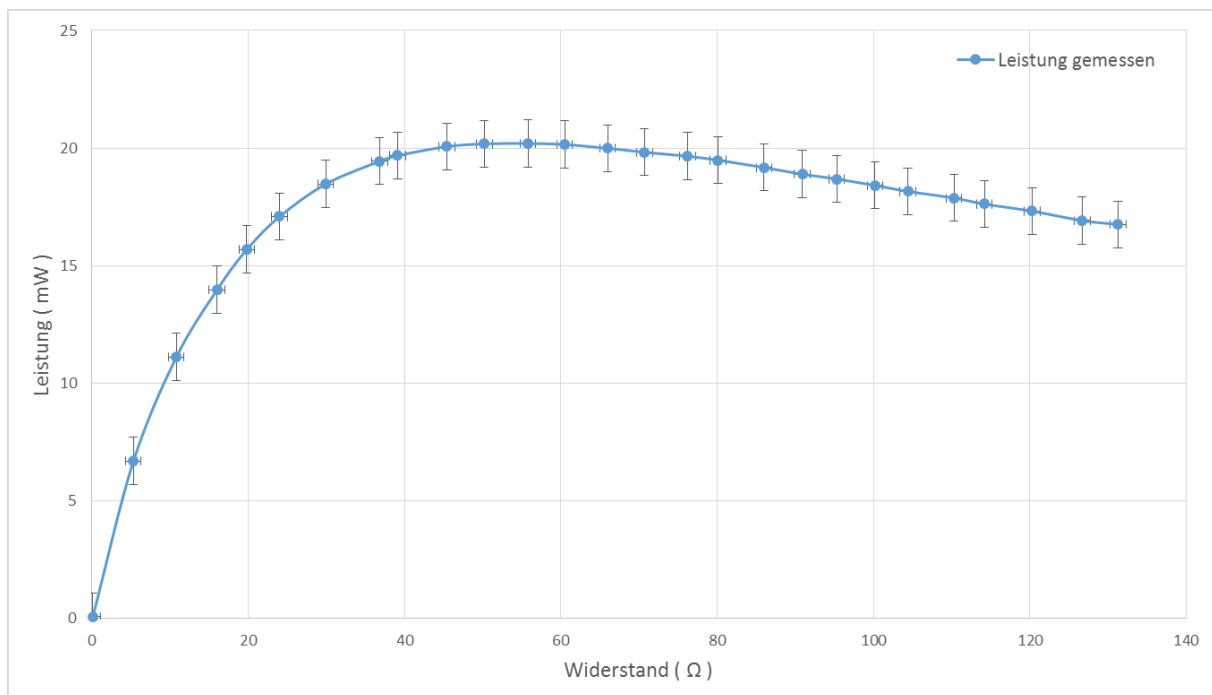
Als variabler Widerstand wurde ein Leistungspotentiometer verwendet. Gemessen wurde mit der spannungsrichtigen Methode, da der zu messende Widerstand bei manchen Messungen sehr klein ( $1\ \Omega - 10\ \Omega$ ) ist. Trotzdem wird dies die Messung beeinflussen, da der Innenwiderstand des Amperemeters zum Innenwiderstand des Funktionsgenerators addiert werden muss, und dieser so verändert wird. Dadurch ändert sich die Anpassung. Diese Abweichung würde das Prinzip der Leistungsanpassung jedoch verkomplizieren und verschleiern, deshalb wird dies für diese Übung nicht berücksichtigt. Als Spannungsquelle wird ein Funktionsgenerator mit  $1V_{\text{eff}}$  und  $50\ \text{Hz}$  verwendet.

Der Schüler misst die Leistung am Lastwiderstand in Abhängigkeit des Widerstandswertes der Last. Dabei überträgt er gemessene Spannung und angezeigte Spannung des Funktionsgenerators in eine Tabelle. Dabei wird dem Schüler bewusst, dass die angegebene Spannung vom Funktionsgenerator nicht am Lastwiderstand anliegt, da beide Spannungswerte unterschiedlich sind. Nur beim Messwert für  $R_L = 50\ \Omega$  stimmen diese beiden Werte überein.

Mit einem Tabellenkalkulationsprogramm wird von den SchülerInnen mithilfe der Messwerte die Leistung  $P_L = U_L \cdot I$  am Lastwiderstand berechnet und in einem Graphen dargestellt. Abbildung 10.6 zeigt diese Leistungskurve von den gemessenen Werten. Durch diesen Graphen wird der Schüler erkennen, dass das Maximum der Kurve bei ca.  $50\ \Omega$  liegt.

Da das Maximum der Kurve bei  $50\ \Omega$  liegt, und zudem nur bei  $50\ \Omega$  der richtige Spannungswert am Funktionsgenerator angezeigt wird, wird das Interesse des Schülers geweckt. Diese Vorgehensweise motiviert die Schüler zur Berechnung des Problems und festigt dadurch ein vertieftes Verständnis zur Impedanzanpassung. Durch diese Aufgaben lernt der Schüler auch





**Abbildung 10.6:** Entstandener Graph zur Durchführung des Übungsblattes zur Leistungsanpassung. Dieser ist durch die Messergebnisse (ohne Berücksichtigung der Innenwiderstände der Messgeräte) entstanden und zeigt die Leistung an der Last in mW in Abhängigkeit des Lastwiderstandes. Das Maximum der Kurve liegt bei ca. 50  $\Omega$ . Nur bei diesem Wert stimmen die angezeigte Spannung des Funktionsgenerators und die gemessene Spannung überein.

den Umgang mit dem Funktionsgenerator, der vorher selten gebraucht wurde. Auch die Unterscheidung zwischen Spitzen-Spitzen Spannung ( $U_{pp}$ ) und Effektivwerten ( $U_{eff}$  oder in englischsprachigem Raum  $U_{rms}$ ), auf die hier nicht genauer eingegangen wird, muss vom Schüler beachtet werden.

# Kapitel 11

## Komplexe Widerstände

Kondensatoren und Spulen sind wichtige Bauteile der Elektronik, vor allem im Wechselstrombetrieb. Die Funktionsweise dieser Bauteile im Einzelnen wird schon häufig in den Schulen unterrichtet, jedoch die Weiterführung und Schaltungsberechnungen dieser Bauteile werden häufig nicht unterrichtet, da diese in der herkömmlichen Methode zu kompliziert werden. Wird jedoch anstelle von Differentialgleichungen mit komplexen Zahlen gerechnet, so erleichtern sich die Aufgaben wesentlich, da mit dem schon vorhandenen Wissen fast jedes Problem gelöst werden kann. Die Herleitung der komplexen Schreibweise von Kondensator und Spule dient als Erklärung für die Lehrperson, kann jedoch auch mit Schülern, die Differenzieren und Integrieren können, durchgeführt werden. Wird das Ergebnis dieser Herleitung den Schülern direkt gegeben, können Berechnungen komplexerer Schaltungen schon ab der 2. Oberstufe durchgeführt werden. Dies ist für technische Schulen interessant, da die Schüler dort schon früh die komplexen Zahlen lernen. In solchen Klassen kann das Anwenden dieser Zahlen hilfreich für den Mathematikunterricht sein, da diese sonst im Schulgebrauch selten zum Einsatz kommen.

### 11.1 Kondensator

Bei einem Kondensator mit der zeitlich veränderbaren Spannung  $u(t)$  (die momentane Spannung und der momentane Strom werden kleingeschrieben) und der Ladung  $Q$  ergibt sich die Kapazität  $C$  aus der Formel

$$C = \frac{Q}{u(t)} \Leftrightarrow u(t) = \frac{1}{C} \cdot Q. \quad (11.1)$$

Da der Strom  $i(t)$  durch die zeitliche Änderung der Ladung  $i(t) = \frac{dQ}{dt}$  definiert ist, kann die Ladung durch die Integration

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (11.2)$$

ersetzt werden. Da Wechselspannungen immer periodisch sind können diese als Überlagerung mehrerer Grundschwingungen betrachtet werden. Daher wird nur eine Grundschwingung der Form  $i(t) = i_0 \cdot e^{j\omega t}$  betrachtet. Hier beschreiben  $i_0$  die Amplitude des Stromes und  $\omega$  die Kreisfrequenz der Schwingung. Die imaginäre Einheit  $j^2 = -1$  wird in der Elektrotechnik nicht mit dem üblichen  $i$  bezeichnet, um Verwechslungen mit der Stromstärke vorzubeugen. Im

Stromkreis fließt nur der reale Anteil der Funktion (hier:  $\operatorname{Re}(i_0 e^{j\omega t}) = \cos(\omega t)$ ). Wird die Integration durchgeführt, ergibt sich

$$u(t) = \frac{1}{j\omega C} \cdot i_0 e^{j\omega t} = \frac{1}{j\omega C} \cdot i(t). \quad (11.3)$$

Da ein Widerstandswert der Quotient von Spannung und Strom ist, kann durch Umformung dieser Formel für einen Kondensator ein Widerstandswert gefunden werden. Dieser ist jedoch eine komplexe Zahl, welcher die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom beschreibt. Ein komplexer Widerstand wird mit  $Z$  abgekürzt.

$$Z_C = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{1}{j\omega C}. \quad (11.4)$$

Wird die Phasenverschiebung nicht beachtet und werden nur die Amplitude oder der Effektivwert von Strom oder Spannung gemessen, kann mit dem Betrag des Widerstandes  $|Z_C| = \frac{1}{\omega C}$  gerechnet werden. Dieser komplexe Widerstand ist abhängig von der Frequenz  $\omega$  und eröffnet dadurch weitere Möglichkeiten zur Schaltungsgestaltung.

### Arbeitsauftrag: Bestimmung der Kapazität eines Kondensators

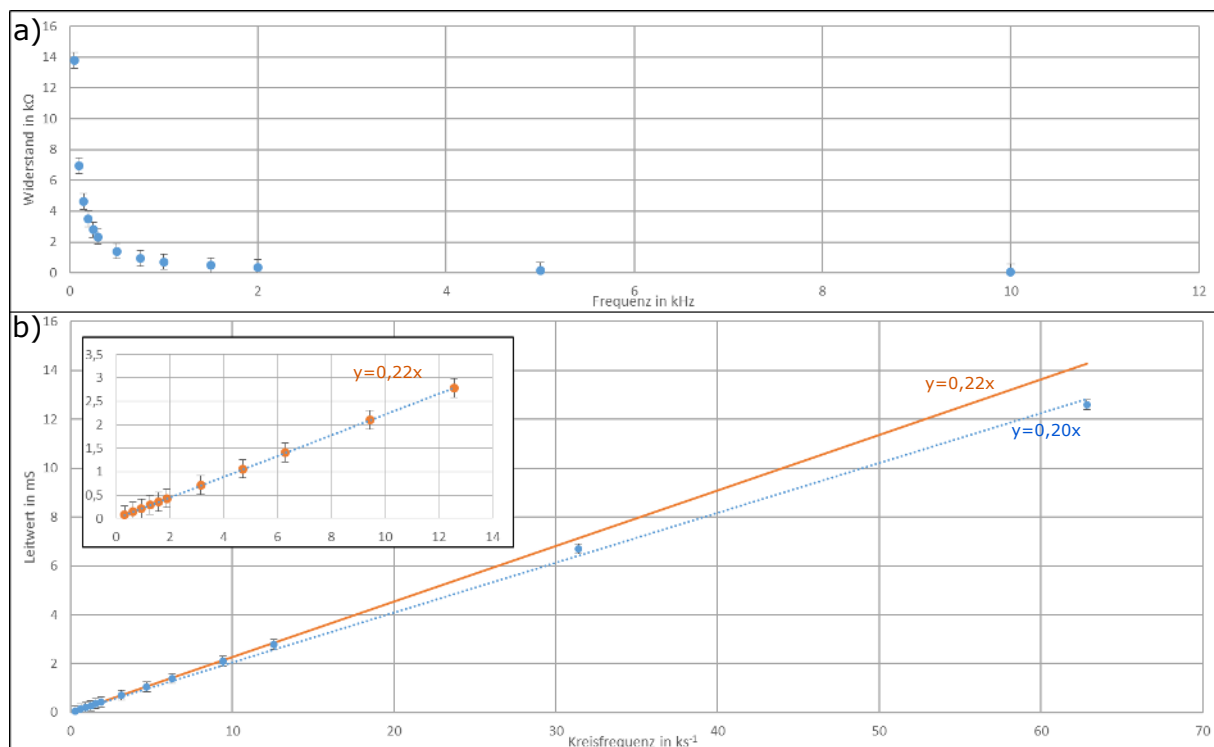
- Miss mit den dir bekannten Methoden die Abhängigkeit des Widerstandes des gegebenen Kondensators von der Frequenz. (Hilfestellung: die Kapazität liegt zwischen 100 nF und 1  $\mu$ F)
- Konstruiere damit einen aussagekräftigen Graphen.
- Lies die Kapazität des Kondensators ab.
- Erstelle einen Messbericht.

### Arbeitsdurchführung

Bei diesem Auftrag werden keine exakten Vorgaben zur Durchführung der Messung gegeben. Da jedoch schon vorher einige ähnliche Messungen durchgeführt worden sind, kann auf dieses Wissen zurückgegriffen werden. Diese Aufgabenstellung soll verstärkt auf die Selbstständigkeit der Schüler abzielen. Durch die ungefähre Angabe der Kapazität in der Hilfestellung kann der Widerstandswert zur jeweiligen Frequenz abgeschätzt werden. Dadurch lässt sich vorhersagen, ob auf die strom- oder spannungsrichtige Methode zurückgegriffen werden soll. Die hier beschriebene Messung wird zwischen 50 Hz und 10 kHz stattfinden. Daher wird ein Widerstand von ca. 16  $\Omega$  – 32 k $\Omega$  erwartet. In diesem Bereich sind beide Messmethoden sinnvoll, da hier sowohl der Innenwiderstand des Ampèremeters, als auch der des Voltmeters vernachlässigbar sind. Hier wurde die stromrichtige Methode verwendet. Da der Scheinwiderstand  $Z_C$  indirekt proportional zur Frequenz ist, kann dieser nicht in Excel mit einer Fit-Funktion angenähert werden (siehe Abbildung 11.1a). Eine einfache Methode in der Schule ist, einen linearen Zusammenhang zu suchen. Da der Leitwert des Kondensators  $G_C = |Z_C|^{-1}$  der Kehrwert des Widerstandes ist, verhält dieser sich in direkter Proportion zur Frequenz. Damit die Kapazität direkt abgelesen werden kann, wird statt der Frequenz die Kreisfrequenz verwendet (siehe 11.1b).

So kann das annähernd lineare Verhältnis und die Kapazität des Kondensators abgelesen werden. Da ein realer Kondensator noch weitere Eigenschaften (Innenwiderstand, Induktivität und Nichtlinearität) besitzt, werden die Messpunkte bei höherer Frequenz deutlich davon beeinflusst. Deshalb werden für die Fit-Funktion die beiden letzten, nicht mehr linearen Messpunkte gestrichen. Dadurch ergibt sich eine Kapazität von 220 nF, welche auch mit dem angegebenen Wert des Kondensators übereinstimmt.

Durch diese Messung wird einerseits der Umgang mit frequenzabhängigen Instrumenten gelernt, andererseits die Funktionsweise eines Kondensators veranschaulicht. Durch die elektronische und mathematische Auswertung ergibt sich eine Kreuzverbindung zu den Fächern Informatik und Mathematik. Auch verdeutlicht diese Messanordnung die Nichtlinearität und somit die Nichtidealität der Kondensatoren, welche bei der Hochfrequenztechnik beachtet werden muss.



**Abbildung 11.1:** Graphen aus der Messung an einem 220 nF Kondensator. a) Wird die Frequenzabhängigkeit des Widerstandes gezeigt, so ergibt sich eine indirekte Proportionalität. Diese lässt sich in einigen Tabellenkalkulationsprogrammen nicht mit einer Fitfunktion analysieren. b) Deshalb wird der lineare Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Leitwert betrachtet. Damit die Kapazität direkt aus der Funktion abgelesen werden kann, wird die Kreisfrequenz verwendet. Die blaue Fitfunktion (gepunktete Linie) ergibt sich durch Verwendung aller Messpunkte. Durch nichtideale Eigenschaften des Kondensators flacht sich die Kurve aber mit steigender Frequenz ab und weicht daher von der idealisierten Geraden ab. Dieses Verhalten kann als Ausgangspunkt für das Einführen des realen Kondensators dienen. Da in diesem Experiment jedoch die ideale Kapazität bestimmt werden soll, wurden für die orange (durchgezogene Linie) Fitfunktion die höheren Messwerte, welche vom Idealen Kondensator abweichen, gestrichen.

## 11.2 Spule

Bei einer Spule mit der Wechselspannung  $u(t)$ , einem Strom  $i(t)$  und der Selbstinduktivität  $L$  ergibt sich der Zusammenhang

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} . \quad (11.5)$$

Wird diese Rechnung analog wie in Kapitel 11.1 durchgeführt, so ergibt sich ein Widerstand

$$Z_L = j\omega L , \quad (11.6)$$

beziehungsweise der Betrag des Widerstandes  $|Z_L| = \omega L$ . Somit ist dieses Bauteil auch ein frequenzabhängiger Widerstand.

Ein analoger Arbeitsauftrag zum Kondensator lässt sich mit Spulen erstellen. Spulen haben durch ihre Leiterlänge einen wesentlich höheren Verlustwiderstand als Kondensatoren. Dadurch weichen Spulen auch wesentlich weiter als Kondensatoren vom Idealverhalten ab. Dies erschwert diese Messung.

# **Anhang A**

## **Spezialflansch**

Spezialanfertigung von VACOM. Dieser Spezialflansch basiert auf dem Doppelflansch DN160. Dieser wird für den doppelseitigen Ausheizprozess benötigt. Für diesen ist es notwendig, Vakumbauteile an der Luftseite zu montieren und demontieren, ohne dabei die Verbindung zur Vakuumseite zu lösen. Dafür wurden an den Löchern, die der Befestigung zur Vakuumseite dienen, Aussparungen gefräst, um die Schrauben zu versenken. Dadurch kann auch ein Bauteil an der zweiten Seite des Flansches angebracht werden. Für die Befestigung dieses Bauteils, werden zusätzlich M8 Gewindelöcher in den Flansch gebohrt. Diese Änderungen werden direkt von VACOM vorgenommen.



# Literaturverzeichnis

- [1] A. Church, “An unsolvable problem of elementary number theory,” *American Journal of Mathematics*, vol. 58, no. 2, pp. 345–363, 1936.
- [2] A. M. Turing, “On computable numbers, with an application to the entscheidungsproblem,” *Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s2-42, no. 1, pp. 230–265, 1937.
- [3] E. Beth *The Journal of Symbolic Logic*, vol. 4, no. 4, pp. 165–165, 1939.
- [4] R. Feynman, “Simulating physics with computers,” *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, no. 6-7, pp. 467–488, 1982.
- [5] I. Buluta and F. Nori, “Quantum simulators,” *Science*, vol. 326, no. 5949, pp. 108–111, 2009.
- [6] R. Blatt and C. F. Roos, “Quantum simulations with trapped ions,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 277–284, 2012.
- [7] I. Bloch, J. Dalibard, and S. Nascimbene, “Quantum simulations with ultracold quantum gases,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 267–276, 2012.
- [8] A. Aspuru-Guzik and P. Walther, “Photonic quantum simulators,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 285–291, 2012.
- [9] A. A. Houck, H. E. Tureci, and J. Koch, “On-chip quantum simulation with superconducting circuits,” *Nature Physics*, vol. 8, pp. 292–299, 2012.
- [10] D. P. Divincenzo, “The physical implementation of quantum computation,” *Fortschr. Phys*, vol. 48, p. 2000, 2000.
- [11] R. Blatt and D. Wineland, “Entangled states of trapped atomic ions,” *Nature*, vol. 453, pp. 1008–1015, 2008.
- [12] P. Zoller, T. Beth, D. Binosi, R. Blatt, H. Briegel, D. Bruss, T. Calarco, J. I. Cirac, D. Deutsch, J. Eisert, A. Ekert, C. Fabre, N. Gisin, P. Grangiere, M. Grassl, S. Haroche, A. Imamoglu, A. Karlson, J. Kempe, L. Kouwenhoven, S. Kröll, G. Leuchs, M. Lewenstein, D. Loss, N. Lütkenhaus, S. Massar, J. E. Mooij, M. B. Plenio, E. Polzik, S. Popescu, G. Rempe, A. Sergienko, D. Suter, J. Twamley, G. Wendin, R. Werner, A. Winter, J. Wrachtrup, and A. Zeilinger, “Quantum information processing and communication,” *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 36, no. 2, pp. 203–228, 2005.



- [13] R. J. Hughes, D. F. V. James, E. H. Knill, R. Laflamme, and A. G. Petschek, “Decoherence Bounds on Quantum Computation with Trapped Ions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 77, pp. 3240–3243, Oct 1996.
- [14] D. J. Wineland, C. Monroe, W. M. Itano, D. Leibfried, B. E. King, and D. M. Meekhof, “Experimental issues in coherent quantum state manipulation of trapped atomic ions,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Tech.*, vol. 103, p. 259, 1998.
- [15] B. Paredes and I. Bloch, “Minimum instances of topological matter in an optical plaquette,” *Phys. Rev. A*, vol. 77, p. 023603, Feb 2008.
- [16] P. Hauke, “Quantum disorder in the spatially completely anisotropic triangular lattice,” *Phys. Rev. B*, vol. 87, p. 014415, Jan 2013.
- [17] J. D. Siverns, S. Weidt, K. Lake, B. Lekitsch, M. D. Hughes, and W. K. Hensinger, “Optimization of two-dimensional ion trap arrays for quantum simulation,” *New Journal of Physics*, vol. 14, no. 8, p. 085009, 2012.
- [18] R. C. Sterling, H. Rattanasonti, S. Weidt, K. Lake, P. Srinivasan, S. C. Webster, M. Kraft, and W. K. Hensinger, “Fabrication and operation of a two-dimensional ion-trap lattice on a high-voltage microchip,” *arXiv:1302.3781v5 [quant-ph]*, vol. 5, no. 3637, 2014.
- [19] H. Dehmelt, “Experiments with an isolated subatomic particle at rest,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 62, pp. 525–530, Jul 1990.
- [20] H. G. Dehmelt and F. L. Walls, ““Bolometric“ Technique for the rf Spectroscopy of Stored Ions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 21, pp. 127–131, Jul 1968.
- [21] W. Paul, “Electromagnetic traps for charged and neutral particles,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 62, pp. 531–540, Jul 1990.
- [22] G. Werth, V. N. Gheorghe, and F. Major, *Charged Particle Traps: Physics and Techniques of Charged Particle Field Confinement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1. ed., 2005.
- [23] G. Werth, V. N. Gheorghe, and F. Major, *Charged Particle Traps II: Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1. ed., 2009.
- [24] K. H. Kingdon, “A method for the neutralization of electron space charge by positive ionization at very low gas pressures,” *Phys. Rev.*, vol. 21, pp. 408–418, Apr 1923.
- [25] M. van Eijkelenborg, M. Storkey, D. Segal, and R. Thompson, “Ion dynamics in a novel linear combined trap,” *International Journal of Mass Spectrometry*, vol. 188, no. 3, pp. 155–161, 1999.
- [26] K. Langer, “Miniaturisierte zweidimensionale Ionenfallen mit segmentierter Radiofrequenzelektrode,” Master’s thesis, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Österreich, 2013.
- [27] D. Gandolfi, “Compact RF Amplifier for Scalable Ion-Traps,” Master’s thesis, Università degli studi di Trento, Universität Innsbruck, Italien, Österreich, 2011.

- [28] C. J. Foot, *Atomic Physics (Oxford Master Series in Atomic, Optical and Laser Physics)*. Oxford University Press, USA, 1. ed., Feb. 2005.
- [29] D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe, and D. Wineland, “Quantum dynamics of single trapped ions,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 75, pp. 281–324, Mar 2003.
- [30] J. Chiaverini, R. B. Blakestad, J. Britton, J. D. Jost, C. Langer, D. Leibfried, R. Ozeri, and D. J. Wineland, “Surface-electrode architecture for ion-trap quantum information processing,” *Quant. Inf. Comput.*, vol. 5, no. 6, pp. 419–439, 2005.
- [31] S. Seidelin, J. Chiaverini, R. Reichle, J. J. Bollinger, D. Leibfried, J. Britton, J. H. Wesenberg, R. B. Blakestad, R. J. Epstein, D. B. Hume, W. M. Itano, J. D. Jost, C. Langer, R. Ozeri, N. Shiga, and D. J. Wineland, “Microfabricated Surface-Electrode Ion Trap for Scalable Quantum Information Processing,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, p. 253003, Jun 2006.
- [32] J. H. Wesenberg, “Electrostatics of surface-electrode ion traps,” *Phys. Rev. A*, vol. 78, p. 063410, Dec 2008.
- [33] M. Kumph, M. Brownnutt, and R. Blatt, “Two-dimensional arrays of radio-frequency ion traps with addressable interactions,” *New Journal of Physics*, vol. 13, no. 7, p. 073043, 2011.
- [34] K. R. Brown, C. Ospelkaus, Y. Colombe, A. C. Wilson, D. Leibfried, and D. J. Wineland, “Coupled quantized mechanical oscillators,” *Nature*, vol. 471, pp. 196–199, Feb. 2011.
- [35] M. Harlander, R. Lechner, M. Brownnutt, R. Blatt, and W. Hansel, “Trapped-ion antennae for the transmission of quantum information,” *Nature*, vol. 471, pp. 200–203, Mar. 2011.
- [36] A. Wilson, Y. Colombe, K. R. Brown, E. Knill, D. Leibfried, and D. J. Wineland, “Tunable spin–spin interactions and entanglement of ions in separate potential wells,” *Nature*, vol. 512, pp. 57–60, Aug. 2014.
- [37] M. Kumph, *2D arrays of ion traps for large scale integration of quantum information processors*. PhD thesis, Universität Innsbruck, Österreich, 2014.
- [38] D. M. Lucas, A. Ramos, J. P. Home, M. J. McDonnell, S. Nakayama, J.-P. Stacey, S. C. Webster, D. N. Stacey, and A. M. Steane, “Isotope-selective photoionization for calcium ion trapping,” *Phys. Rev. A*, vol. 69, p. 012711, Jan 2004.
- [39] M. Brownnutt, M. Kumph, P. Rabl, and R. Blatt, “Ion-trap measurements of electric-field noise near surfaces,” *Reviews of modern Physics*, 2015.
- [40] P. V. GmbH, *The Vacuum Technology Book, Vumlume II*. Pfeiffer Vacuum GmbH, 2. ed., 2013.
- [41] E. Böhmer, D. Ehrhardt, and W. Oberschelp, *Elemente der angewandten Elektronik*. Viewegs Fachbücher der Technik, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (GWV), 2007.

- [42] U. Freyer, *Nachrichten-Übertragungstechnik: Grundlagen, Komponenten, Verfahren und Systeme der Telekommunikationstechnik*. Lernbücher der Technik, Hanser, 2009.
- [43] P. Kamby, A. Knott, and M. Andersen, “Printed circuit board integrated toroidal radio frequency inductors,” in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 680–684, Oct 2012.
- [44] M. Kazimierczuk, *High-Frequency Magnetic Components*. John Wiley & Sons, 2009.
- [45] C. Sullivan, W. Li, S. Prabhakaran, and S. Lu, “Design and fabrication of low-loss toroidal air-core inductors,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*, pp. 1754–1759, June 2007.
- [46] G. Grandi, M. K. Kazimierczuk, A. Massarini, and U. Reggiani, “Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 35, no. 5, pp. 1162–1168, 1999.
- [47] J. I. Cirac and P. Zoller, “A scalable quantum computer with ions in an array of microtraps,” *Nature*, vol. 404, no. 6778, pp. 579–581, 2000.
- [48] H. Wiesner and G. Colicchia, “Motivierender Physikunterricht durch fächerübergreifende Beispiele aus Medizin und Biologie,” *PLUS LUCIS*, 2002.
- [49] G. Colicchia, *Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie*. PhD thesis, LMU - München, Deutschland, 2002.
- [50] P. Häußler and L. Hoffmann, “Physikunterricht - an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert,” *Unterrichtswissenschaft*, vol. 23, 1995.
- [51] M. Apolin, *Big Bang 6 RG, Schülerbuch*. öbv, öbv - Österreichischer Bundesverlag, 2008.
- [52] H. Meister, *Elektronik 1. Elektrotechnische Grundlagen*. Vogel Business Media, 2012.