



Titel

Facharbeit

im Leistungskurs Physik

„Eine Methode zur Isolierung von
einzelnen geladenen Teilchen im
Modellexperiment“

Verfasser:	Hendrik Gräber
Kurslehrer:	Herr Schomaker
Themenstellung:	11. Februar 2013
Abgabe:	3. April 2013

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Geschichtlicher Hintergrund	1
2.1. Grenzen zu Beginn der experimentellen Atomphysik	1
2.2. Entwicklung einer Teilchenfalle	2
3. Entwurf einer Teilchenfalle	3
3.1. Prinzipielle Funktionsweise einer Teilchenfalle	3
3.2. Stabilität	6
4. Versuchsdurchführung	8
4.1. Versuchsaufbau	8
4.2. Versuchsdurchführung	9
4.3. Auswertung der Ergebnisse	10
5. Ausblick	11
Literatur	12
A. Anhang	13

1. Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit der Funktionsweise der Paulfalle. Nach dem Prinzip der Paulfalle werden beispielsweise Teilchenfallen für Ionen in Teilchenbeschleunigern wie am Cern konzipiert. Ein weiteres Anwendungsgebiet findet dieses Funktionsprinzip in (Rest-)Gasanalysatoren und Massenspektrometern. Das Ziel einer Teilchenfalle ist es, Teilchen mit gewünschten Spezifikationen von Masse und Ladung durch magnetische beziehungsweise elektrische Feldern einzufangen und für weitere eingehendere Untersuchung frei von Störfaktoren für Messungen zu isolieren. Darüber hinaus soll im Rahmen dieser Facharbeit das Prinzip der Teilchenfalle experimentell angewendet werden. Hierzu soll aus den theoretischen Überlegungen eine für das Experiment verwendbare Falle nach dem Prinzip von Paul gebaut werden, welche Teilchen in Form von ionisiertem Mehl einfangen soll.

2. Geschichtlicher Hintergrund

Bereits in der Antike versuchten die Menschen den Aufbau der Materie zu ergründen. 500 v. Chr. stellten der Philosoph Leukipp und dessen Schüler Demokrit die These auf, dass die Materie aus elementaren Teilchen, den sogenannten Atomen (vom griechischen Wort atomos, das Unteilbare) und leerem Raum bestehen.¹ Doch müssen diese Theorien über den Aufbau der Materie nicht nur formuliert, sondern diese auch an Hand von Experimentellen belegt werden. Es gilt in der Naturwissenschaft das Bestreben, die komplizierten Vorgänge der Natur auf ihre fundamentalen Grundgrößen zurückzuführen und diese gesondert zu betrachten.²

2.1. Grenzen zu Beginn der experimentellen Atomphysik

Mit der Entdeckung des Elektrons 1897 durch Joseph John Thomson (Nobelpreis 1906)³ und der Bestimmung der Elementarladung durch Robert Millikan (Nobelpreis 1923)⁴ begann die Erforschung der Atomphysik. Die

¹Giudice, *Odysee im Zeptoraum Eine Reise in die Physik des LHC*, S. 4.

²Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 1.

³Giudice, *Odysee im Zeptoraum Eine Reise in die Physik des LHC*, S. 7.

⁴Giudice, *Odysee im Zeptoraum Eine Reise in die Physik des LHC*, S. 9.

Experimentalphysik steht bei dem Nachweis der stetig fortschreitenden Theorien vom klassischen Teilchenmodell über das Bohrsche Atommodell hin zur Quantenphysik immer wieder vor dem Problem, neue, ausreichend genaue Messmethoden zu entwickeln, um diese Theorien zu belegen oder zu widerlegen und dabei zum Teil komplett neue und zuvor unbekannte Phänomene zu enthüllen.

Der Göttinger Physiker Georg Christoph Lichtenberg formulierte hierzu in seinem „Suddelbuch“ vor gut 200 Jahren: „Man muß etwas Neues machen, um etwas Neues zu sehen.“⁵ Gerade beim Vordringen in die Sphären der Teilchenphysik wurde dieses Bestreben zum Problem, weil Methoden zur Sortierung, Trennung und Isolierung von den zu untersuchenden Teilchen fehlten. Somit sei ein Verfahren zu entwickeln, dass diesen Ansprüchen gerecht wird.

2.2. Entwicklung einer Teilchenfalle

Das Ziel einer Teilchenfalle ist es, Teilchen einer bestimmten Ladung und Masse mithilfe von elektrischen Feldern und/oder magnetischen Feldern in einem wandlosen Raum für eingehendere Beobachtungen zu isolieren. Im Jahre 1936 schlug F. M. Penning die Speicherung von geladenen Teilchen durch ein statisches elektrisches Feld in Kombination mit einem magnetischen Feld vor.⁶ Im Jahre 1952 publizierten Courant, Livingston und Snyder ihre Arbeit zur Fokussierung geladener Teilchenstrahlen durch Quadrupolmagneten (Abbildung 4a). Durch die noch im selben Jahr erbrachte Beweisführung der Analogie von magnetischen zu elektrischen Quadrupolfeldern zur Fokussierung in der Beschleunigerphysik durch Blewett wurden die Voraussetzungen zur Konstruktion einer Teilchenfalle geschaffen.⁷ In Folge dessen gelang dem Physiker Wolfgang Paul unter Verwendung seiner Erfahrungen aus der Molekülstrahlphysik, Massenspektroskopie und der Fokussierung in Teilchenbeschleunigern in den Jahren 1950 bis 1955 die Entwicklung einer Teilchenfalle, dessen Fokussierung ausschließlich mithilfe von elektrischen Feldern auskommt. Ähnlich der Fokussierung in Teilchenbeschleunigern und

⁵Schmitt, Coberger und Wendt, »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«, S. 1.

⁶Schmitt, Coberger und Wendt, »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«, S. 1.

⁷Leuthner, »Gespeicherte Ionen in der Paulfalle«, S. 9.

Massenspektrometern werden dabei die geladenen Teilchen durch elektrische Felder zweidimensional fokussiert. Bei der Paulfalle hingegen erfolgt die Fokussierung in allen drei Raumrichtungen.⁸ Mit dieser Weiterentwicklung der Penningfalle durch Wolfgang Paul (Nobelpreis 1989)⁹ gelang es, die vorher erforderlichen sehr starken Magnetfelder durch inhomogene elektrische Felder zu ersetzen. Damit wurde die Grundlage für eingehendere Forschungen im Bereich der Teilchenwelt geschaffen, welche auch die Untersuchung von Teilchen mit höheren Energien ermöglichte.

3. Entwurf einer Teilchenfalle

3.1. Prinzipielle Funktionsweise einer Teilchenfalle

Zunächst erscheint die Speicherung eines geladenen Teilchens recht einfach, da man dieses erreichen könnte, indem man es mit gleich geladenen Elektroden umgibt, die allesamt eine Abstoßung des Teilchens zum Zentrum der Falle hin bezwecken. Doch dabei ergibt sich das Problem, dass es zwischen Elektroden gleichen Potentials keine elektrischen Felder gibt und es auf die Geometrie der Falle ankommt. Wenn andererseits die Elektroden statisch unterschiedliche Potenziale haben, werden geladene Teilchen von der stärker entgegengesetzten Elektrode angezogen, bis sie auf die Elektrode treffen.¹⁰

Dieses Verhalten wird durch das Earnshaw-Theorem (1842) beschrieben, welches besagt, dass sich in einem statischen magnetischen-oder elektrischen Feld für ein geladenes Teilchen keine stabile Gleichgewichtsposition ergeben kann. Somit wird ein Feld benötigt, dass in allen drei Raumrichtungen eine zum Fallenzentrum gerichtete Kraft auf das Teilchen ausübt, um dieses speichern zu können.¹¹ Folglich muss die Kraft F mit dem Abstand r vom Fallenzentrum ansteigen.¹² $e = mc^2$

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (1)$$

⁸Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 2.

⁹Schmitt, Coberger und Wendt, »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«.

¹⁰Schmitt, Coberger und Wendt, »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«, S. 2.

¹¹Baltrusch, »Quanteninformationsverarbeitung mit Ionenkristallen in einer Penningfalle«.

¹²Schmitt, Coberger und Wendt, »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«, S. 2.

$$\vec{E} = \nabla \Phi \quad (2)$$

Das elektrische Vektorfeld \vec{E} wird durch eine Ableitung des skalaren Potenzialfeldes Φ erzeugt. Die Ableitung nach allen drei Raumrichtungen wird durch den Nabla-Operator ∇ ausgedrückt. Durch erneute Anwendung des Nabla-Operators auf das elektrische Feld ergibt sich:

$$\nabla \vec{E} = \nabla \cdot \nabla \cdot \Phi = \Delta \cdot \Phi \quad (3)$$

Mit dem Laplace-Operator wird der Zusammenhang zwischen Potenzial und Ladungsdichte als Laplace-Gleichung beschrieben:

$$\Delta \Phi = \frac{\phi}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Ein Potential mit rückstellender Kraft für alle drei Richtungen des Raumes zum Zentrum der Falle kann es nur geben, wenn sich eine Ladung ($\phi =$ Ladungsdichte) im Zentrum befindet.¹³ Dort darf sich aber keine Elektrode befinden, weil ansonsten eine Entladung des zu beobachtenden Teilchens stattfinden würde. Folglich muss die Ladungsdichte $\phi = 0$ sein, so dass folgt:

$$\Delta \Phi = 0 \quad (5)$$

Damit das elektrische Feld mit dem Abstand in alle drei Raumrichtungen (x,y,z) zunimmt¹⁴ wird folgendes Potenzial angenommen:

$$\Phi = (\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2) \quad (6)$$

Zwei spezielle Lösungen dieses Potenzials sind:¹⁵

1. Lösung für das Massenspektrometer (Abbildung 4a):

$$\alpha = -\beta, \text{ und } \gamma = 0$$

¹³Leuthner, »Gespeicherte Ionen in der Paulfalle«, S. 13.

¹⁴Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 2.

¹⁵Leuthner, »Gespeicherte Ionen in der Paulfalle«, S. 13.

2. Lösung für die Ionenfalle (Abbildung 4b)):

$$\alpha = \beta, \text{ und } \gamma = -2\alpha$$

Bei beiden Lösungen haben die Koeffizienten entgegengesetzte Vorzeichen, sodass die Kraft in mindestens einer Raumrichtung der Falle zum Zentrum hin defokussierend wirkt.

Um das Problem der Defokussierung zu lösen und eine Fokussierung der Teilchen auch in die dritte Raumrichtungen zu ermöglichen, gibt es zwei Möglichkeiten:

Penning löste das Problem der unzureichenden Fokussierung in x- und y-Richtung, indem er zu den statischen elektrischen Feldern ein zusätzliches Magnetfeld verwendet. Durch dieses wird das Teilchen bei einer sich vom Zentrum entfernenden Bewegung durch die dabei wirkende Lorenzkraft auf einer Kreisbahn zum Zentrum der Falle zurückgeführt. Wenn mit zunehmendem Abstand zum Zentrum die Geschwindigkeit zunimmt, ist die Lorenzkraft größer als nahe zum Zentrum, so dass das Teilchen trotz abfallendem elektrischen Potentials wieder zum Zentrum zurückgeführt wird. Ein großer Nachteil der Penningfalle besteht jedoch darin, dass mit zunehmender Geschwindigkeit der Teilchen, auch die Magnetfelder größer werden müssten. In den 50er Jahren konnten selbst mit Supramagneten nur magnetische Feldstärken von 3 Tesla¹⁶ erzeugt werden, die das Einfangen von Teilchen auf Grund ihrer kinetischen Energie stark einschränkten.

Bei der Paulfalle lässt sich die Problematik der nicht ausreichend starken Magnetfelder durch elektrische Wechselfelder umgehen. Die Teilchen erfahren bei Wechselfeldern eine abwechselnde Fokussierung und Defokussierung in allen Raumrichtungen. Dazu muss wie bereits oben beschrieben das elektrische Feld mit dem Abstand in alle drei Raumrichtungen (x,y,z) zunehmen.¹⁷ Für die Laplace-Gleichung des nachfolgend beschriebenen Potentials gibt es zwei einfache Lösungen.¹⁸

Die erste Lösung ergibt ein oszillierendes, sattelförmiges Potenzial (Abbildung 5). Zunächst wird das Teilchen in x-Richtung fokussiert, jedoch in

¹⁶Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 8.

¹⁷Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 2.

¹⁸Leuthner, »Gespeicherte Ionen in der Paulfalle«, S. 13.

y-Richtung defokussiert, sodass durch ein Umschalten der Polarität in Form von Wechselfeldern eine abwechselnde Fokussierung und Defokussierung in die beiden Raumrichtungen entsteht. Zunächst mag nun der Eindruck entstehen, dass sich die Effekte des Wechselfeldes aufheben, jedoch gelten nach Pauls Berechnungen:¹⁹

„In einem periodischen [, oszillierenden] inhomogenen Feld wie dem Quadrupolfeld bleibt dagegen eine kleine mittlere Kraft übrig, die immer in Richtung des abnehmenden Feldes wirkt, also in unserem Fall in Richtung des Feldmittelpunktes.“

Dieses führt dazu, dass die Teilchen infolge der alternierenden Felder durch eine rückstellende, zum Zentrum der Falle gerichtete Kraft eingefangen werden können. Da jedoch diese Lösung für den Aufbau eines Massenspektrometers noch keine Fokussierung in z-Richtung aufweist, kann es sich noch nicht um eine Lösung bei der Suche nach einer Falle handeln.

Die zweite Lösung hingegen liefert auch ein Potenzial und Feldstärken in z-Richtung, sodass es sich hierbei um eine Möglichkeit zur Fokussierung in allen drei Raumdimensionen handelt und für eine Ionenfalle geeignet wäre. Der Aufbau einer solchen Falle sieht zwei Kappenelektroden vor, die an den Enden eines Hyperboloidringes positioniert werden. Jedoch ist auch eine quadrupolförmige Anordnung mit zwei zusätzlichen Endkappen möglich, wie in Abbildung 4a zu sehen.

Wie Paul des Weiteren gezeigt hat, können nur solche Teilchen gefangen werden, deren Ladungsmassenverhältnis $\frac{q}{m}$ umgekehrt proportional zur angelegten Spannung ist. Es gibt nur wenige Bereiche für die Lösung der Bewegungsgleichung der Teilchen, die sich aus der mathieuschen Differentialgleichung ergeben.

3.2. Stabilität

Für den allgemeinen Ansatz zur Beschreibung des Potentials durch Gleichspannung U und Wechselspannung V :

$$\varphi_0 = U + V \cdot \cos(\omega + t) \quad (7)$$

¹⁹Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 3.

Die mathieusche Differentialgleichung verwendet die Parameter a und q um stabile Zustände für Ionen in der Falle zu beschreiben.

$$a = \frac{4 \cdot U e}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega} \quad (8)$$

$$q = \frac{2 \cdot e \cdot V}{m \cdot r_0^2 \cdot \omega} \quad (9)$$

Stabile Lösungen der Differenzialgleichung, gleichbedeutend mit Fokussierung in der Ionenfalle hängen nur von a und q ab. Die Anfangsbedingungen wie Geschwindigkeit oder Richtung der Teilchen haben keinerlei Einfluss auf die Stabilität in der Falle. Diese Bedingungen für die Parameter lassen sich in einem aq -Diagramm ablesen Abbildung 1.

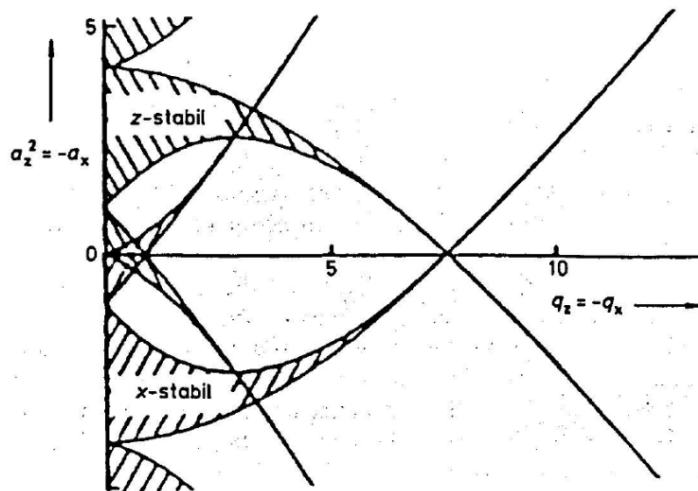


Abbildung 1: Das Stabilitätsdiagramm für das 2-dimensionale Quadrupolfeld²⁰

Bei der Paulfalle liegt eine reine Wechselspannung vor, sodass der Gleichspannungsanteil U null beträgt und somit auch $a = 0$ ist. Die Parameter Abstand r_0 der Pole zum Fallenzentrum, Frequenz ω , Wechselspannung V und der Ladungsmassenverhältnis $\frac{e}{m}$ müssen in diesem Fall so gewählt werden, dass q die Bedingung erfüllt:

$$q < q_{max} < 0,92 \quad (10)$$

Aufgrund der Schwerkraft ergibt sich auch ein q_{min} , welches die Untergrenze größer Null werden lässt und Null nur ein theoretischer Wert ist.²¹

4. Versuchsdurchführung

Vor Beginn der Versuchsdurchführung sind einige sicherheitsrelevante Aspekte zu berücksichtigen. Es ist sehr wichtig vor jeder Abänderung des Experimentes zu überprüfen, ob die Spannungsquelle ausgeschaltet ist, da in dem Versuch mit gefährlichen Spannungen gearbeitet wird. Zudem muss darauf geachtet werden, dass kein Licht aus dem Laser direkt in das Auge des Betrachters fällt, weil dieses Verletzungen nach sich ziehen könnte.

4.1. Versuchsaufbau

In der Literatur lässt sich eine Quelle finden,²² nach der ein quadrupolförmiges Massenspektrometer als Apparatur für Experimente verwendet wird. Aufgrund seiner großen Ähnlichkeit zur Paulfalle und der Möglichkeit auch in einer solchen Konstruktion Teilchen zum Schweben zu bringen, bietet sich ein Nachbau dieses Experimentes an.

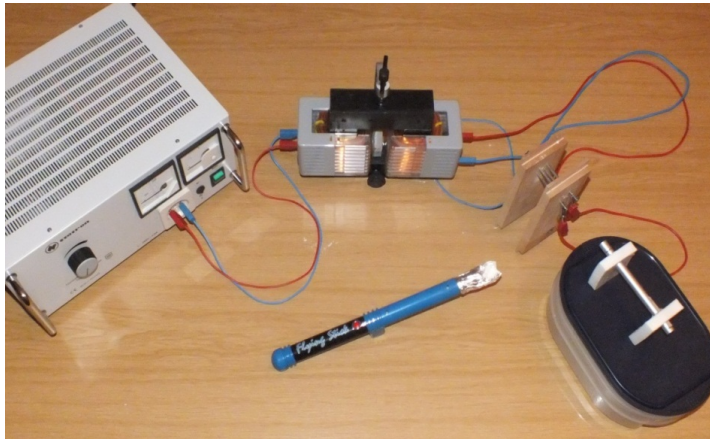


Abbildung 2: Versuchsaufbau des Quadrupols mit Generator, Laser und Transformer

²¹Paul, *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen*, S. 3.

²²Stárek, »Elektrostatická kvadrupolová past«.

Der Versuchsaufbau findet sich in Abbildung 2 und entspricht dem Schaltplan aus Abbildung 6. Bei dem Experiment von Jaroslav Stárek wird die standardmäßige Wechselspannung von 230 Volt mit der Frequenz von 50 Hz eines Spannungsgenerators durch einen Transformator aus einer Mikrowelle auf 1000 bis 2000 Volt hochtransformiert. Die Stäbe des Quadrupols sind aus Messingdraht und haben einen Durchmesser von 2 mm. Der Abstand r_0 der Pole vom Fallenzentrum beträgt 0,7 cm.²³ Die sich jeweils gegenüberliegenden Pole des Quadrupols werden phasengleich an den Transformator angeschlossen. Anschließend werden elektrostatisch aufgeladene Teilchen in die Falle eingebracht. Aufgrund der Wechselfelder lassen sich Teilchen bestimmter Eigenschaften in der Falle halten. In diesem Falle werden Mehlteilchen elektrostatisch von einem „flying Stick“ ionisiert. Hierbei ist besondere Vorsicht geboten, da ein Kontakt mit den Stäben des Quadrupols zu einem Stromschlag führt. Durch einen im Inneren und parallel zum Quadrupol verlaufenden Laserstrahl können die feinen Mehlteilchen durch Lichtreflexion sichtbar gemacht werden.

4.2. Versuchsdurchführung

Bei der Umsetzung des Experiments wurde besonders auf gleiche Ausgangsbedingungen geachtet, sodass die beiden Aufbauten fast identisch sind. Aber dennoch war es nicht möglich, die Mehlteilchen zum Schweben zu bringen. Die Geometrie des Quadrupols entspricht im Durchmesser der Stäbe sowie im Abstand r_0 den Vorgaben. Der Isolator aus Holz, der den Quadrupol in Form hält, lässt sich als Fehlerquelle auch ausschließen, da dessen Isolierung ausreichend ist und nur geringste Ströme von 5,5 A bei einer Spannung von 500 V fließen. Als Transformator wurden in diesem Experiment zwei Kupferspulen mit folgenden Windungszahlen $n = 1000$, $n = 500$ und $n = 250$ zur Verfügung. Dadurch, dass bei der Spule drei Anschlüsse mit Anfang, Mitte und Ende zur Verfügung standen, konnte die Windungszahl durch die Wahl des Anschlusses AM gegenüber AE noch einmal halbiert werden, sodass man auf ein maximales Windungsverhältnis von 1:8 kommen konnte, sodass rechnerisch eine Spannung von 2000 V möglich sein sollte. Bei näherer Untersuchung stellte sich jedoch heraus, dass in den Spulen sehr große Verluste entstanden und somit die gewünschte Sekundärspannung nicht erreicht

²³Stárek, »Elektrostatická kvadrupolová past«, S. 27.

wurde (s. Diagramme Abb.6-9). Mit zunehmender Primärspannung wurden die Verluste am Transformator größer, sodass durch die Strombegrenzung von 5 A nur eine Maximalspannung von 500 V erzielt werden konnte. Bei der Primärspule mit $n = 500$ waren die Verluste deutlich geringer, jedoch konnten aufgrund des Windungsverhältnisses 2:1 auch nur 460 V transformiert werden. Mit der Spule 500 AM konnte die höchste Spannung erreicht werden, sodass diese für den Versuch verwendet wurde. Unter der Annahme, dass das verwendete Mehl, das gleiche Ladungsmassenverhältnis e/m hat wie im Vergleichsexperiment, lässt sich ein anderer Fallenradius errechnen, bei dem auch mit geringerer Spannung die Teilchen schweben. Für die Stabilität der Teilchen in der Falle ist der Wert des Parameters q entscheidend. Da der erforderliche Wert durch die Spannung nicht erreicht werden kann, ist eine Beeinflussung dieses Wertes lediglich durch den Parameter des Fallenradius möglich. Denn die anderen Parameter lassen sich nicht großartig beeinflussen. Die Frequenz ist mit 50 Hz vorgegeben sowie die Spannung mit max. 2000V nach der Literatur anzunehmen und der Radius r_0 mit 0,7 cm bekannt. Es folgt aus (9) für q_{min} :

$$q_{min} = \frac{\frac{e}{m} \cdot 2 \cdot 2000V}{0,7^2 cm^2 \cdot 50^2 Hz^2} = \frac{\frac{e}{m} \cdot 2 \cdot 500V}{r_0^2 \cdot 50^2 Hz^2}$$

Somit lässt sich nun der Radius r_0 unserer Falle mit den uns gegebenen max. 500 V bestimmen:

$$0,7 cm \cdot \sqrt{\frac{500 V}{2000 V}} = 0,35 cm \quad (11)$$

Damit die Falle trotz der geringeren Spannung die Mehlteilchen fangen kann, muss der Fallenradius um mindestens die Hälfte auf 0,35 cm reduziert werden.

4.3. Auswertung der Ergebnisse

Nachdem der Fallenradius halbiert wurde und dünnere Stäbe aus Schweißdraht den Quadrupol aus Nägeln ersetzt haben, konnten einige Teilchen in der Falle gefangen werden. Durch eine Formveränderung der Spitze des “flying Stick“ von einer Schale hin zu einer platten Oberfläche stoßen sich

größere Mengen elektrostatisch geladenes Mehl von der Aluminiumfolie ab
Abbildung 3.

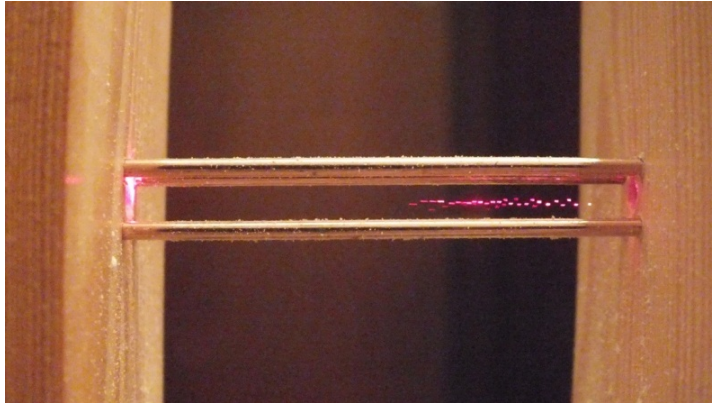


Abbildung 3: Von einem Laser beleuchtete Mehlteilchen in der Falle

Bei einer Reduzierung der Spannung auf 380 V lässt sich beobachten, dass sich die Mehlteilchen aufgrund der Schwerkraft nicht länger in der Falle halten können und somit die Minimalspannung gibt. Daraus erklärt sich auch das Scheitern des ersten Nachbaus mit dem Fallenradius von $r_0 = 0,7 \text{ cm}$, welcher nach Gleichung 9 mit den obigen Messergebnissen eine Spannung von mindestens 1520 V annehmen müsse, damit die Teilchen schweben.

5. Ausblick

In weiteren Versuchen könnte man das Verhalten der Mehlteilchen bei variierender Spannung beobachten, sowie die Ursachen für die Verschiebung der Teilchen zum rechten Rand der Falle untersuchen, die eventuell durch eine nicht ganz waagerecht ausgerichtete Falle entstehen könnten. Das Thema der Teilchenfallen könnte in der Informationstechnik noch große Bedeutung bekommen, da sich hieraus beispielsweise eine Anwendung bei der Entwicklung von Quantencomputern ergeben könnte, bei der die Superposition der Teilchen und deren Verschränkung eine weitaus größeres Potential zur Informationsspeicherung bieten würden als herkömmliche Methoden. Dieses wird nach heutigem Stand noch durch unzureichende Methoden bei der Bestimmung der Quantenzustände beschränkt.²⁴

²⁴Baltrusch, »Quanteninformationsverarbeitung mit Ionenkristallen in einer Penningfalle«, S. 1.

Literatur

- Baltrusch, Jens Domagoj. »Quanteninformationsverarbeitung mit Ionenkristallen in einer Penningfalle«. Magisterarb. Universität Ulm, 13. Nov. 2008.
- Giudice, Gian Francesco. *Odysee im Zeptoraum Eine Reise in die Physik des LHC*. Springer-Verlag GmbH, 11. Feb. 2012. ISBN: 978-3-642-22394-5.
- Leuthner, Heiko. »Gespeicherte Ionen in der Paulfalle«. Diss. Fachbereich Physik der Johannes Gutenberg Universität Mainz, 12. Mai 2011.
- Blätter, Physikalische, Hrsg. *Elektromagnetische Käfige für geladene und neutrale Teilchen* 46.7 (Juli 1990). DOI: 10.1002/phb1.19900460708. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/phb1.19900460708>.
- Schmitt, Annette, N. Coberger und K. Wendt. »Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule«. In: *Teilchenfalle aus dem Baumarkt* 59 (2010), S. 44–49. ISSN: 0177-8374; 1617-5689. eprint: 1617-56890177-8374;1617-5689.
- Stárek, aroslov. »Elektrostatická kvadrupólová past«. Magisterarb. Masarykova Univerzita, 2012.

Selbsterklärung

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

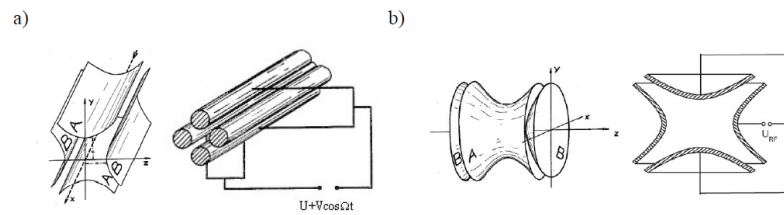
.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

A. Anhang



- a) Massenfilter; durch Variation der an den Elektroden anliegenden Gleich- und Wechselspannungsamplituden läßt sich erreichen, daß nur Teilchen eines bestimmten Masse-Ladungs-Verhältnisses eine stabile Bahn innerhalb des HF-Quadrupolfelds beschreiben. Sie werden also in radialer Richtung gespeichert und verlassen das Filter am Ende wieder. Die Bahnen aller übrigen Teilchen sind instabil, d.h. sie weiten sich auf, womit der Flug auf den Elektroden endet.
b) Elektrodenanordnung einer klassischen Paulfalle, bestehend aus Ring und Kalotten.
(Die drei Bilder links stammen aus der original Patentschrift vom 24.12.1953, rechts aus [Alt98b])

Abbildung 4: Vgl. Heiko Leuthner, Gespeicherte Ionen in der Paulfalle S.11

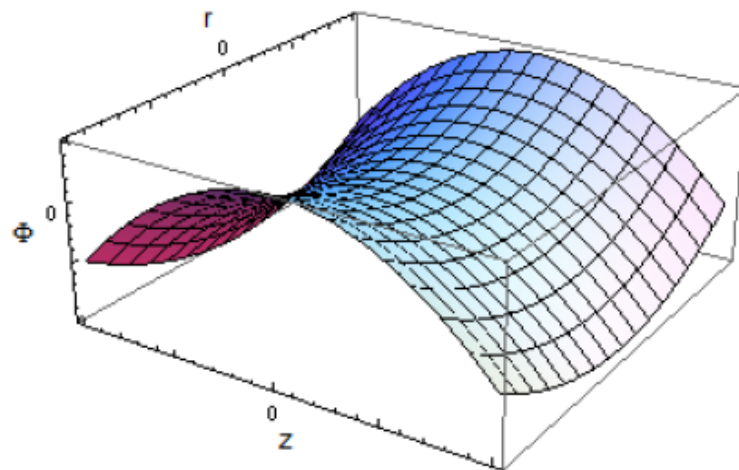


Abbildung 5: Potentialsattel; Vgl. Robin Marzucca, Florian Froning, Thomas Spieker und Andreas Liehl, Projektpraktikum Paul-Falle S.10

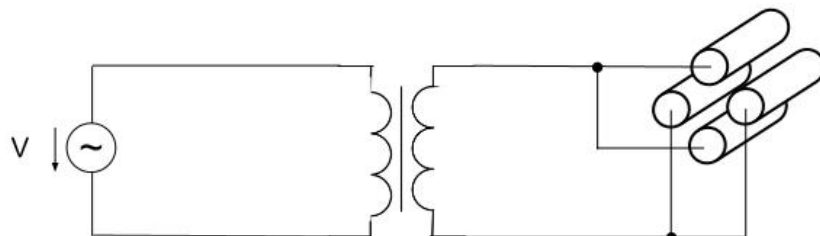


Abbildung 6: Beschaltung des Quadrupols

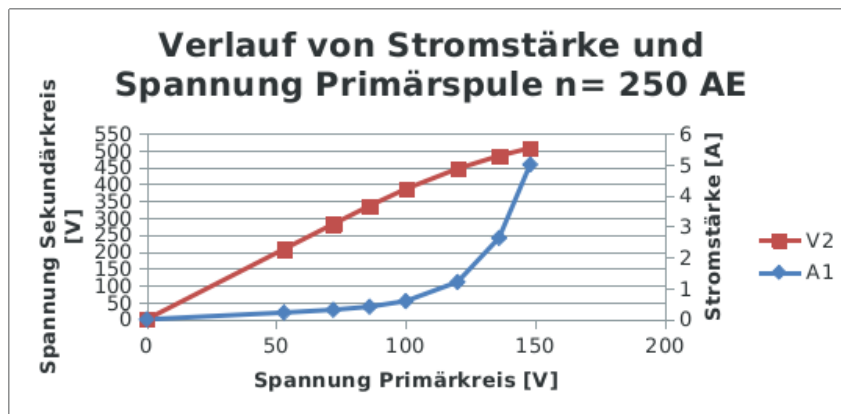


Abbildung 7:

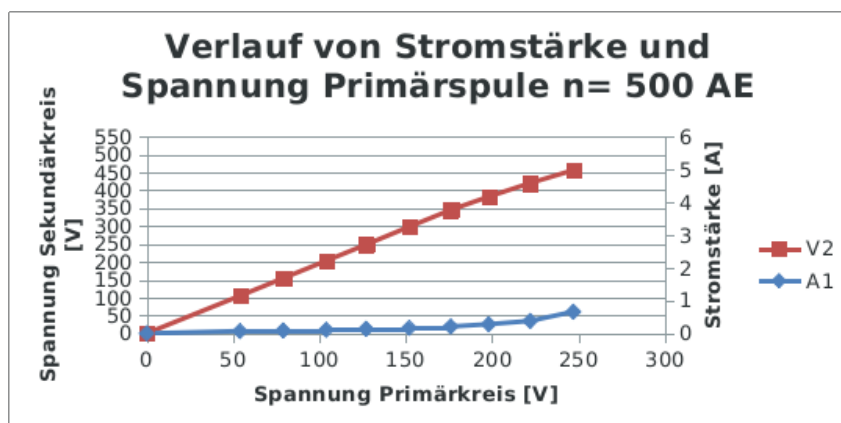


Abbildung 8:

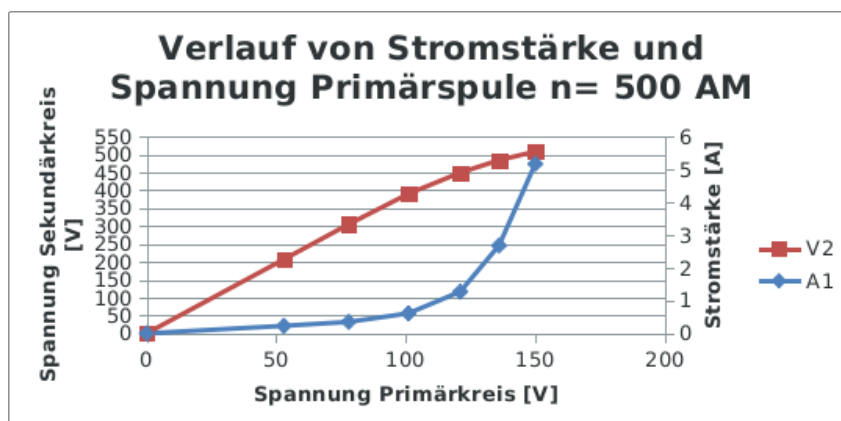


Abbildung 9: