

Laborpraktikum Teilchenphysik

Paulsche Teilchenfalle

Knut Kiesel
Tobias Pook

1. September 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel der Messung	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Ergebnisse	3
3.1	Bahnbeschreibung	3
3.2	Kompensation der Gewichtskraft	4
3.3	Resonanz	5
3.4	Stabilitätsdiagramm	6
4	Vergleich der Messungen	6
5	Fazit	6

1 Ziel der Messung

Ziel des Versuches ist die Speicherung von elektrisch geladenen Teilchen und die Bestimmung des Ladungs-Massen Verhältnisses. Um die Teilchen in einem räumlich begrenzten Feld zu halten, ist ein statisches elektrisches Feld nicht ausreichend, da man damit keine Potentialminima schaffen kann. Eine Möglichkeit dennoch Teilchen zu fangen ist das Anlegen von phasenverschobenen Wechselspannungen und Gleichspannungen, wobei bei richtiger Einstellungen der Spannungen und Frequenzen die Teilchen stabil in der Falle bleiben. Konkret wurden beim durchgeführten Experiment der meta-stabile Bereich eines rotierenden Sattelpotential genutzt um Teilchen zu speichern. Für jede räumliche Komponente $i \in \{x, y, z\}$ lautet die Bewegungsgleichung

$$\frac{4}{m\Omega^2}|\vec{F}_i| + (a_i - 2q_i \cos(2\xi_i))i + 2k_L \frac{dx}{d\xi_i} + \frac{d^2x}{d\xi_i^2} = B \cos\left(\frac{2\omega_W}{\Omega}\xi_i\right)$$

mit dem gleichstromabhängigen Koeffizienten $a_i = \frac{16KqU_{G,i}}{3\Omega^2mr_0^2}$, dem wechselstromabhängigen Koeffizienten $q_i = -\frac{4kqU_i}{\Omega^2mr_0^2}$, dem Antriebskoeffizienten $B = \frac{2qU_W}{r_0m\Omega^2}$, dem Luftreibungskoeffizient $k_L = \frac{6\pi\eta R}{m\Omega}$, der Winkelfrequenz der Dreiphasenspannung Ω , der Winkelfrequenz der zusätzlich an einem Plattenpaar angelegten Wechselspannung ω_W und der normalisierten Zeit $\xi = \frac{\Omega t}{2}$. Die Kraft \vec{F} ist die Gewichtskraft (die nur auf die z-Komponente Auswirkungen hat). Die Grundschiwingung der Lösung wird durch $\beta_i = \sqrt{a_i + \frac{q_i^2}{2}}$ beschrieben. Durch Anlegen geeigneter Frequenzen und Spannungen und das Beobachten der entstehenden Teilchenbewegungen kann mit unterschiedlichen Methoden das Verhältnis von Ladung zur Masse bestimmt werden.

2 Aufbau und Durchführung

Die z-Achse verläuft vertikal, die y-Achse ist die Blickrichtung, und die x-Achse liegt senkrecht zu den beiden übrigen.

Die Falle wird aus sechs Kupferringen und 12 Verbindungsstücken zu einem Würfel geklebt. Nach dem Anlöten und Isolieren der Anschlusskabel wird die Falle mit schwarzem Lack angemalt, um Streulicht in der Kammer zu verringern. Die Falle wird mittig über der Öffnung für die Spritze an den Anschlusskabeln befestigt, und die Plattform von unten an die Spannungsversorgung angeschlossen (siehe Bild 1), welche je nach Hebelstellung die Gleichspannungen oder die zusätzliche Wechselspannung zur Dreiphasenspannung hinzufügt. Die Dreiphasenspannung, im folgenden auch Fokussierspannung genannt, besteht aus drei Wechselspannungsquellen die mit einem konstanten Phasenunterschied von 120° betrieben werden. Die Amplitude kann dabei für jedes Flächenpaar individuell eingestellt werden.

Im Spannungsgenerator gibt es mehrere Möglichkeiten die Gleichspannung anzulegen: Man kann sie auf den beiden gegenüber liegenden Seiten oder zwischen zwei gegenüberliegenden Seiten anbringen. Die Verschaltung kann man Bild 2 entnehmen.

Aus Sicherheitsgründen wird die Falle durch eine durchsichtige Acrylhaube abgedeckt. Die Haube wurde zusätzlich mit schwarzem Klebeband verkleidet, mit zwei Öffnungen



Abbildung 1: Versuchsaufbau der Paulschen Teilchenfalle

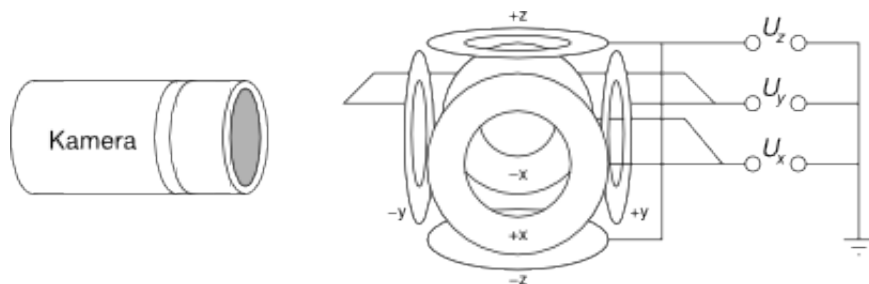


Abbildung 2: Verschaltung im Generator

eine für die seitliche Beobachtung der Falle und eine für die von oben angebrachte Lampe. Der Versuch wird mit Aluminium Pulver durchgeführt, dieses wird mittels einer Spritze durch eine Öffnung unterhalb der Falle eingebracht. Da zwischen Öffnung und dem stabilen Bereich der Teilchenfalle ein Abstand von ca. $(2.5)cm$ besteht wurden die Teilchen durch anschnippsen der Spritze in die Falle geschleudert.

3 Ergebnisse

Mit einem Messschieber wird der Plattenabstand der Teilchenfalle auf $(3.05 \pm 0.02) cm$ abgeschätzt.

3.1 Bahnbeschreibung

Ellipsen In den meisten Fällen beschreiben die eingefangenen Teilchen eine elliptische Teilchenbahn, dabei lässt sich der Radius und die Exzentrizität durch das Verhältnis der angelegten Potenziale in der Fokussierspannung

Lissajous Figures Lissajous Figures entstehen bei der Überlagerung harmonischer Schwingungen wenn das Verhältnis der Frequenzen rational ist, sich also durch einen ganzzahligen Bruch darstellen lässt. In diesem Fall bildet die Teilchenbahn eine geschlossene Figur. Die möglichen Formen der Figures sind sehr vielfältig und hängen vom Frequenzverhältnis und dem Phasenunterschied der Schwingungen ab.

, Kristallstrukturen, Ellipsen: Spannungen nicht gleich. . .



Abbildung 3: Beispiel für das auftreten einer Lissajous Figur

3.2 Kompensation der Gewichtskraft

In Gleichung (??) wird der Einfluss der Luftreibung vernachlässigt und ein Näherungsansatz der Form $z(\xi_z) = Z(\xi_z) + d(\xi_z)$ durchgeführt. Die z-Komponente wird nun durch

$$Z(\xi) = Z_0 \sin(\beta_z \xi) - \frac{4|\vec{F}_z|}{m\beta_z\Omega^2}$$

beschrieben. Man sieht, dass die Schwingung um einen konstanten Term verschoben ist, der von a_z und q_z abhängt. Diese Abhängigkeit besteht nicht mehr, wenn gilt:

$$|\vec{F}_z| = |\vec{F}_G + \vec{F}_{qE}| = 0$$

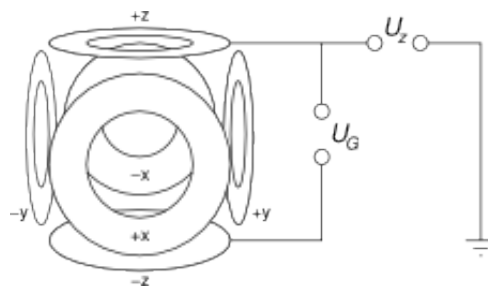


Abbildung 4: Schaltbild Z-Kompensation

Die Fokussierspannung wird bei (1000 ± 50) V für alle Flächenpaare betrieben. Zu der Fokussierspannung wird nun ein zusätzlicher Potentialunterschied zwischen den beiden z-Komponenten angeschlossen (siehe 4), dieser wird solange erhöht bis die Gravitationskraft kompensiert wird. Dies kann dadurch überprüft werden, dass sich der Mittelpunkt der Teilchenschwingung bei Änderung der Amplitude der Z-Komponente der 3-Phasenspannung nicht mehr ändert. Die Gleichspannung hat während des Versuchs teilweise stark geschwankt. Die effektive Spannung wurde durch notieren der angezeigten Werte in einem Zeitraum von ca. 20 s und anschliessendem Mitteln bestimmt. Da die

$U_G[V]$	$\sigma_{U_G}[V]$	Verhalten des Bahnmittelpunkt bei Änderung von U_z
45	5	Teilchen 1,2 Bewegung
92	8	Teilchen 1 still, Teilchen 2 Bewegung
168	4	Teilchen 1,2 Bewegung
228	3	Teilchen 1,2 Bewegung
273	5	Teilchen 1 verloren, Teilchen 2 still

Tabelle 1: Messpunkte der Z-Kompensationsmessung

$U_{G,komp}[V]$	$\sigma_{U_{G,komp}}[V]$	$\frac{q}{m}[\frac{C}{kg}]$	$\frac{\sigma_{\frac{q}{m}}}{\frac{q}{m}}$
Teilchen 1			
92	61.5	0.0	0.0
Teilchen 2			
273	45	0.0	0.0

Tabelle 2: Messpunkte der Z-Kompensationsmessung

Teilchen oft wegen spontaner Spannungsschwankungen der Quelle verloren gegangen sind konnte der Bereich, in dem die Gravitationskraft kompensiert wird, nicht in feineren Spannungsabschnitten untersucht werden. Da so nicht abzuschätzen ist wie exakt der Wert für die Kompensationsspannung U_G getroffen wurde, wird als Fehler die mittlere Differenz zu den nächstliegenden U_G gewählt, bei dem wieder Bewegungen des Schwingungsmittelpunkt bei Variation der Fokussierspannung U_z zu beobachten sind. Die Messung wurde für mehrere gleichzeitig gefangene Teilchen durchgeführt und die Spannung erhöht bis alle Teilchen den Stabilitätsbereich verlassen haben. Wegen den bereits erwähnten Schwankungen konnte die Messung nur für 2 Teilchen erfolgreich durchgeführt werden.

Aus ?? lässt sich direkt eine Formel für die spezifische Ladung des untersuchten Teilchen herleiten:

$$\frac{q}{m} = \frac{gd}{U_G}$$

Beim Berechnen der Ergebnisse wurde die Erdbeschleunigung mit 9.81 als fehlerfrei angenommen, der Plattenabstand wurde zu (3.05 ± 0.02) cm abgeschätzt. Die errechneten Werte können ?? entnommen werden.

3.3 Resonanz

In diesem Versuchsteil wurde zusätzlich zur Fokussierspannung eine Wechselspannung zwischen dem Flächenpaar entlang der X-Achse angelegt. Damit vereinfacht sich ?? zu:

$$(a_i - 2q_i \cos(2\xi_i))i + 2k_L \frac{dx}{d\xi_i} + \frac{d^2x}{d\xi_i^2} = B \cos\left(\frac{2\omega_W}{\Omega}\xi_i\right)$$

Die Teilchenbahn wird also durch eine erzwungene Schwingung moduliert, die Lösung von ?? ist gegeben durch:

$$X(\xi_x) = X_0(\beta_x, \omega_W) \cdot B \cdot \cos\left(2\frac{\omega_W}{\Omega}\xi_x - \Phi(\beta_x, \omega_W)\right)$$

$$\tan\Phi(\beta_x, \omega_W) = \frac{4k_L\Omega\omega_W}{\beta_x^2\Omega^2}$$

$$X_0 = \frac{1}{\sqrt{16\omega_W^4\Omega^{-4} + \beta_x^4 + 16\Omega^{-2}k_L\omega_W^2 - 8\Omega^{-2}\beta_x^2\omega_W^2}}$$

bei einer Frequenz von $\omega_W^{res} = \frac{\Omega}{2}\sqrt{\beta_x^2 - 2k_L^2}$ tritt eine resonante Verstärkung der Oszillation auf und die Teilchenbahn erreicht ihre maximale Auslenkung. Mit einer Digitalkamera wurden jeweils Fotos des Teilchens gemacht für eine spätere digitale Vermessung der Auslenkung. Dazu wurde vor Durchführung des Versuchs die Falle entfernt und eine Längenskala auf Höhe der Fallenmitte senkrecht zur Kamerablickrichtung platziert. Da sowohl die Kameraposition als auch die Teilchenfalle nicht mehr bewegt werden, kann aus diesen Bildern ein Zusammenhang zwischen Pixeln pro cm in der Beobachtungsebene bestimmt werden.

$$A_{max} = \frac{B}{2k_L\sqrt{\beta_x^2 - k_L^2}}$$

Bei der Durchführung des Versuch wurde die Wechsellspannung variiert bis die maximale Auslenkung für das Teilchen beobachtet wurde

3.4 Stabilitätsdiagramm

4 Vergleich der Messungen

5 Fazit

Die Versuchsdurchführung war dadurch geprägt das die Spannungsquelle nur stark schwankende Ausgangsspannungen geliefert hat. Besonders ein reglemäßiges plötzliches Abfallen der Fokussierspannung für ein Flächenpaar hat zu regelmäßigem Verlust der Teilchen geführt. Insbesondere die Resonanzmessung und die Stabiliätsmessung waren oft nicht durchzuführen, weil ein langfristiges einfangen der Teilchen nicht möglich war.