

Demonstrationsexperimente mit linearen Paulfallen

Stephan A. Schulz*[#], Robert Wöstenfeld⁺, Robert Kastl⁺,
Ferdinand Schmidt-Kaler*, und Volkhard Nordmeier⁺

*Universität Ulm, Institut für Quanteninformationsverarbeitung,
Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm,

⁺Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik,
Arnimallee 14, 14195 Berlin

(Eingegangen: TT.MM.2006; Angenommen: TT.MM.2006)

Kurzfassung

Experimente mit Paulfallen finden vielseitige Anwendung in den verschiedensten Bereichen aktueller Forschung. Die elementare Verwendung in der Massenspektrometrie für Präzisionsmessungen erstreckt sich in den industriellen Bereich hinein, während Experimente in der Grundlagenforschung z.B. im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung neuartige Konzepte für die Verwendung von linearen Paulfallen für die Entwicklung von Quantencomputern und -simulatoren zeigen. Demonstrationsexperimente veranschaulichen das Konzept der Paulfallen zum Fangen von elektrisch geladenen Einteilchen- oder Vielteilchensystemen mit elektrischen Wechselfeldern. Das Prinzip der linearen segmentierten Paulfalle wird mittels zwei verschiedener Experimente mit ionisierten Mikropartikeln vorgestellt und durch einfache Messungen das didaktische Konzept veranschaulicht. Die Paulfallen zeichnen sich durch eine einfache Konstruktion und eine sichere Verwendung in der experimentellen Durchführung aus.

1. Einleitung

Die Entwicklung der Paulfalle hat das Fangen und Speichern von elektrisch geladenen Ionen und Elektronen durch elektrische Wechselfelder ermöglicht. Seit den ersten Experimenten im Jahr 1953 [1] hat die Quadrupol-Ionenfalle, für deren Entwicklung der Physiker W. Paul im Jahr 1989 den Nobelpreis für Physik erhalten hat [2], in unterschiedlichsten Bereichen aktueller Forschung Einzug erhalten. Das Spektrum der Verwendung von Paulfallen reicht von Präzisionsmessungen im Bereich der Massenspektrometrie [3] über Experimente zu schnellen chemischen Reaktionen mit Einzelmolekülen [4] bis hin zur Grundlagenforschung an Ionenfallen-Quantencomputern [5] und -simulatoren [6] in der Quanteninformationsverarbeitung.

Neben anderen Konzepten zum Fangen und Speichern von neutralen bzw. geladenen Teilchen wie z.B. Penning-Fallen, magneto-optischen Fallen und Magnetfallen erlauben nur Paulfallen [7] und Fallen basierend auf optischen Pinzetten [8] die einfache Realisierung im Demonstrationsexperiment mit Mikroteilchen. Die Paulfalle (Abb. 1a) ermöglicht die didaktische Verbindung von Grundlagen der Elektrodynamik zum Fangen der Mikroteilchen mit Elementen der Strahlenoptik für die optische Detektion. Dabei steht das Demonstrationsexperiment im Kontext aktueller Forschung und es kann Bezug auf neue

Entwicklungen in Forschung und Technologie genommen werden. Die konventionelle Paulfalle mit einem dreidimensionalen elektrodynamischen Einschluß (Abb. 1a) steht neben linearen Paulfallen mit einem zweidimensionalen elektrodynamischen Einschluß, bei denen der Einschluß des Mikroteilchens in der axialen Richtung elektrostatisch durch Endkappen (Abb. 1b) oder durch eine Segmentierung der Elektroden (Abb. 1c) erfolgt.

In diesem Beitrag werden die theoretischen Grundlagen zur linearen Paulfalle vorgestellt und der experimentelle Aufbau zum Betrieb der Paulfalle erläutert. Es werden zwei verschiedene Formen der Segmentierung gezeigt: Basierend auf mechanisch verschiebbaren Stiftelektroden und eine elektrisch ansteuerbare Segmentierung (Abb. 1c). Es werden die Eigenschaften der Falle kurz charakterisiert und der sich Ausblick erörtert zukünftige Experimente.



Abb. 1: Evolution der Paulfallen: Paulfalle mit hyperbolischen Elektroden (a), lineare Paulfalle mit Endkappen (b) und lineare Paulfalle mit segmentierten Elektroden (c) bestehend aus Gleich- (blau) und Wechselfeldselektroden (braun).

[#] stephan.schulz@uni-ulm.de

2. Theoretische Grundlagen

Die linearen Paulfallen zeichnen sich als Quadrupol-Ionenfallen [9] im Gegensatz zu den Multipol-Ionenfallen [10] durch ein zeitabhängig oszillierendes reines Quadrupolpotential aus, das einen zweidimensionalen radialen Einschluß (x-, y-Richtung) des geladenen Teilchens bewirkt. Der axiale Einschluß (z-Richtung) erfolgt elektrostatisch. Das zweidimensionale elektrische Potential ϕ ergibt sich unter Berücksichtigung der Laplace-Gleichung zu:

$$\phi = \frac{\alpha}{2}(x^2 - y^2)(U_{dc} + U_{ac} \cos(\omega t))$$

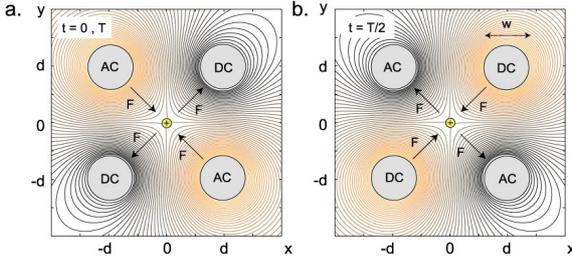


Abb. 2: Zeitabhängiges Quadrupolpotential der linearen Paulfalle: Isolinien des elektrischen Potentials zu verschiedenen Zeitpunkten (a) und (b) zeigen den wechselseitigen stabilen bzw. instabilen Einschluß entlang der Wechselspannungs- (AC) und Gleichspannungselektroden (DC) [11].

Der Geometrieparameter α ergibt sich aus den Dimensionen der Falle und kann durch numerische Feldsimulationen bestimmt werden. Die elektrische Gleichspannung U_{dc} bezieht sich auf einen Spannungsoffset, die elektrische Wechselspannung U_{ac} mit der Frequenz $\omega/2\pi$ erzeugt den wechselseitigen Einschluß des Teilchens (Abb. 2). Betrachtet man nun die Bewegungsgleichung eines einzelnen geladenen Teilchens mit

$$\ddot{\mathbf{x}} = -\frac{Ze}{m} \nabla \phi, \quad \mathbf{x} = (x, y),$$

so kann diese mit den Substitutionen

$$a = \frac{4Ze\alpha}{m\omega^2} U_{dc}, \quad q = \frac{2Ze\alpha}{m\omega^2} U_{ac}, \quad \theta = \frac{\omega t}{2}$$

auf die Standardform einer Mathieu-Differentialgleichung gebracht werden:

$$\frac{d^2 x}{d\theta^2} + (a + 2q \cos(2\theta))x = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d^2 y}{d\theta^2} - (a + 2q \cos(2\theta))y = 0.$$

Die Stabilitätsparameter a und q unterscheiden stabile Bahntrajektorien von instabilen Lösungen, d.h. Teilchen mit zeitlich exponentiell zunehmender Amplitude. Die analytische Lösung mit einem Potenzreihenansatz liefert ebenso wie die numerische Simulation die Information über den Stabilitätsbereich der Lösung. Es wird hier nur der bedeutendste Stabilitätsbereich 1. Ordnung betrachtet (Abb. 3), der

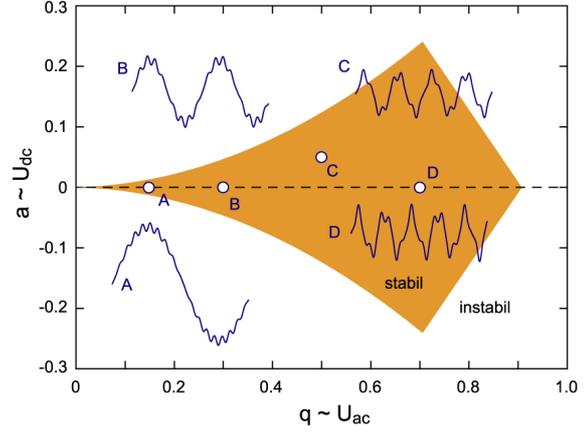


Abb. 3: Stabilitätsdiagramm (orange) der linearen Paulfalle für das zweidimensionale Quadrupolpotential mit verschiedenen numerisch berechneten Bahnkurven (blau): A ($a=0, q=0.15$), B ($a=0, q=0.3$), C ($a=0.05, q=0.5$), und D ($a=0, q=0.7$).

den Nullpunkt des Stabilitätsparameters einschließt. Ausgehend vom Ladung-Masse-Verhältnis des Teilchens sind bei einer vorgegebenen Antriebsfrequenz $\omega/2\pi$ eine entsprechende Gleichspannung U_{dc} und Wechselspannung U_{ac} zu wählen, um stabile Lösungen zu erhalten. Die Gleichspannung U_{dc} ist im allgemeinen Null, die Wechselspannung U_{ac} wird für eine stabile Bahntrajektorie um $q=0.3$ eingestellt.

Der axiale Einschluß beruht auf einem eindimensionalen statischen elektrischen Potential ϕ_{ax} (z-Richtung), das in erster Näherung harmonisch ist:

$$\phi_{ax} \approx \frac{1}{2} U_{ax} \beta z^2$$

Das ionisierte Teilchen führt eine Schwingungsbewegung analog zum harmonischen Oszillator aus, die axiale Schwingungsfrequenz ω_{ax} ergibt sich mit dem Geometrieparameter β und der Spannung U_{ax} zu

$$\omega_{ax} = \sqrt{\frac{Ze}{m} U_{ax} \beta}$$

Die radiale Bewegung hingegen entsteht durch das zweidimensionale zeitabhängige Potential (x-, y-Richtung), das eine charakteristisch abweichende Bahnform von einem harmonischen Oszillator aufweist.

Der radiale Anteil der Bahnkurve besteht aus einer Superposition von Säkularbewegung und der wesentlich kleineren Mikrobewegung. Die Frequenz der Säkularbewegung $\omega_{sec}/2\pi$ ist in der niedrigsten Näherung

$$\omega_{sec} = \sqrt{a + q^2/2} \cdot \frac{\omega}{2}, \quad a, q \ll 1,$$

die Frequenz der Mikrobewegung ist gleich der Antriebsfrequenz $\omega/2\pi$. Im idealen Fall ist die Mikrobewegungsamplitude um den Faktor $q/2$ kleiner zur Amplitude der Säkularbewegung und zeigt einen Phasensprung um π bezüglich der Antriebsfrequenz.

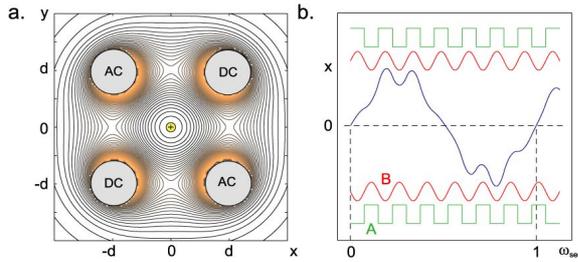


Abb. 4: Ponderomotives Potential für den zweidimensionalen harmonischen Einschluß (a) und numerische Trajektorienberechnung (b) für die Antriebsspannung als Rechteck (A) oder Sinus (B). Die Trajektorie zeigt die charakteristische Superposition aus Säkular- und Mikrobewegung.

Die Pseudopotentialnäherung [12] erlaubt die Berechnung eines zeitgemittelten effektiven elektrischen Potentials ϕ_{ps} , in dem sich das geladene Teilchen bewegt (Fig. 4a) - für das Quadrupolpotential ergibt sich ein harmonisches Pseudopotential ϕ_{ps} unter Vernachlässigung der Mikrobewegung:

$$\phi_{ps} = \frac{(Ze)^2}{4m\omega^2} |\nabla\phi|^2$$

Das Pseudopotential ist proportional zum Betragsquadrat des elektrischen Feldes. Die Frequenz der Säkularbewegung als zentrale Eigenschaft des Pseudopotentials wird bestimmt durch die Steigung α des elektrischen Quadrupolpotentials, so daß die Elektrodengeometrie der Paulfalle neben der Amplitude U_{ac} und Frequenz ω der Wechselspannung den Säkularanteil der Bewegung beeinflusst. Die Säkularfrequenz ist in erster Näherung proportional zur Wechselspannungsamplitude.

Die Superposition aus Säkular- und Mikrobewegung (Fig. 4b) besitzt einen definierten Phasenbezug relativ zur Antriebsspannung mit einem Sinus (A) oder Rechteck (B). Die numerisch berechnete Bahnkurve besitzt die Ausgangsparameter $a=0$ und $q=0.28$ mit sinusförmigem Antrieb. Ausgehend von einer sinusförmigen Wechselspannung besitzt die rechteckige Wechselspannung bei gleichem Scheitelwert eine $4/\pi$ -fach größere effektive Amplitude, die sich aus der ersten Fourierkomponente der Rechteckzerlegung ergibt. Das Stabilitätsdiagramm hat deswegen einen um $\pi/4$ gestauchten q -Parameter (vgl. Abb. 3).

Die Amplitude der Mikrobewegung ist direkt gekoppelt mit der Energieaufnahme des gefangenen Teilchens aus dem elektrischen Wechselfeld. Befindet sich der gefangene Partikel im Knotenpunkt des zeitabhängigen Quadrupolpotentials, ist die Mikrobewegungsamplitude minimal, dagegen vergrößert jede Verschiebung aus dem Knotenpunkt durch statische elektrische Felder die Mikrobewegung. Dieses wird ausgehend von einer punktförmigen Ausdehnung des gefangenen Partikels im Knotenpunkt hin zu einer länglichen Bahnform deutlich. Durch zusätzliche

statische Elektroden kann die Mikrobewegung kompensiert werden. Eine vergrößerte Amplitude der Mikrobewegung entsteht z.B. durch statische Aufladung von Isolatoren in der Nähe der Fallenelektroden oder eine nichtideale Fallengeometrie durch unsymmetrische Abweichungen beim Aufbau.

3. Experimenteller Aufbau

Die Erzeugung der Netzfrequenz-Hochspannung für den radialen Einschluß der geladenen Mikropartikel erfolgt mit einem Transformator, der von einem 220V-Stelltransformator gespeist wird. Herkömmliche Hochspannungs-Printtransformatoren eignen sich aufgrund des kleinen Eisenkerns nicht und bewegen sich im allgemeinen bei den erforderlichen Betriebsparametern im niedrigen Frequenzbereich von 35Hz bis 200Hz im Sättigungsbereich. Dagegen wird mit einem einfachen Zündtransformator (COFI TRS515PC) bei einer Eingangswchselspannung von maximal 220V bei 50Hz eine maximale Ausgangsspannung von 5kV bei 15mA Stromstärke erreicht. Im niedrigen Ausgangsspannungsbereich von weniger als 2kV bleibt die Hochspannung sinusförmig. Soll die Frequenz der Hochspannung variiert werden, wird alternativ ein Leistungsfunktionsgenerator zusammen mit einem Eisenkerntransformator verwendet.

Die elektrische Ansteuerung der verschiedenen Elektrodensegmentpaare zum axialen Verschieben der geladenen Mikroteilchen erfolgt durch eine Spannungsinverterschaltung, die mit Mittelspannungsschiebepotentiometern eine individuell einstellbare elektrische Gleichspannung für jedes Segmentpaar erzeugt (Abb. 5a). Der Spannungsinverter, z.B. aus einer elektrischen Schaltung für Kaltkathoden-

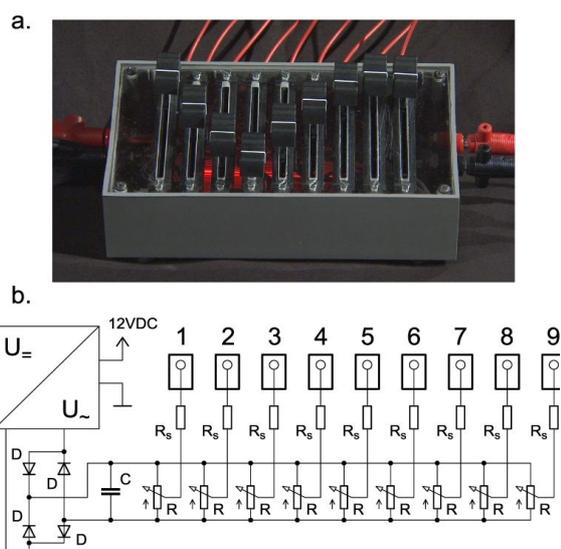


Abb. 5: Elektrische Ansteuerung der axialen Segmentpaare zum Verschieben der Ionenkristalle: Gerät (a) und elektrischer Schaltplan (b).

denröhren, liefert bei einer statischen Eingangsspannung von 12V eine Wechselspannung von $800V_{pp}$ bei einer Frequenz von 5kHz. Durch eine Graetz-Brückenschaltung gleichgerichtet und geglättet mit einem Kondensator einer Kapazität von $100\mu F$ wird eine Gleichspannung mit einem Grundrauschen von 50mV erreicht. Die Schiebepotentiometer besitzen einen Widerstand von $1M\Omega$, zwischen dem Abgriff und der Ausgangsbuchse ist ein $100k\Omega$ Schutzwiderstand zwischengeschaltet (Abb. 5b). Der Schutzwiderstand dient der Strombegrenzung, dennoch ist die Berührung spannungsführender Elektroden nicht ungefährlich. Damit ergibt sich eine maximale Ausgangsspannung von 360V, die durch die Schiebepotentiometer kontinuierlich für alle 9 Segmentpaare individuell eingestellt werden kann.

Die optische Detektion erfolgt durch Streuung eines Diodenlasers an den gefangenen Mikroteilchen bei einer Ausgangsleistung von weniger als 5mW und einer Wellenlänge von 640nm. Eine selbstgebaute Teleskopoptik bestehend aus zwei Linsen ermöglicht die Ausleuchtung der Paulfalle entlang der axialen Fallenrichtung mit konstanter Lichtintensität. Ein Makroobjektiv mit einer 20-fachen Vergrößerung erlaubt zusammen mit einer Farb-CCD-Kamera die Detektion und die quantitative Vermessung der zeitgemittelten Bahnkurve der geladenen Mikropartikel.

Die Mikropartikel zeigen durch die geringe Masse eine große Sensitivität auf Luftfluktuationen. Um lange Lebensdauern in einer Paulfalle von mehreren Minuten bis Stunden zu erreichen, wird die Falle von einem Acrylgehäuse umschlossen. Damit ist ein guter optischer Zugang sichergestellt und die Be-

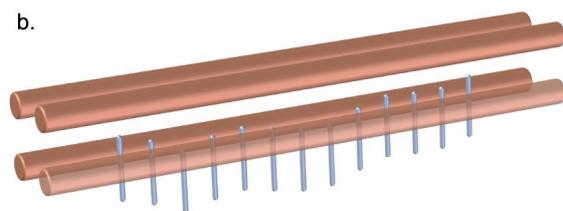
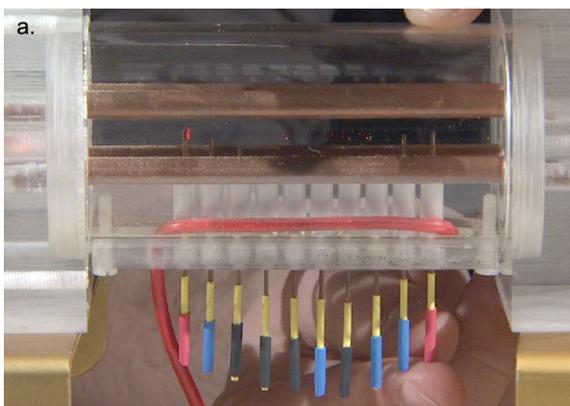


Abb. 6: Segmentierte Paulfalle mit mechanisch verschiebbaren Stiftelektroden: Einzelne Ionen der Falle im Betrieb (a) zeigen die erfolgreiche Realisierung des Konzepts (b).

triebssicherheit durch eine transparente Abschirmung als zusätzlicher Isolierung der spannungsführenden Elektroden gewährleistet.

Das Laden der Paulfalle mit Mikropartikeln wird mit Hilfe einer elektrisch leitfähigen Stahlkanüle durchgeführt. Die Kanüle liegt auf dem gleichen elektrischen Potential wie die Elektrodensegmente, die das axiale statische Fallenpotential erzeugen. Es werden Korkmehlteilchen mit Durchmessern $< 300\mu m$ als Mikropartikel mit der Kanüle direkt in das oszillierende Quadrupolpotential eingebracht. Zudem ist es durch den Fallenbetrieb unter Atmosphäre aufgrund dissipativer Kräfte möglich, daß geladene Teilchen aus dem Außenraum in das Fallenpotential eindringen und gefangen werden. Der Fallenbetrieb im Vakuum würde diese charakteristische Eigenschaft unterdrücken.

4. Lineare Paulfalle mit Stiftelektroden

Die lineare Paulfalle mit mechanisch verschiebbaren Stiftelektroden erlaubt eine Segmentierung der Falle, dessen axiales elektrisches Potential durch die mechanische Position der Stiftelektroden direkt veranschaulicht wird (Abb. 6a).

Die Konstruktion entspricht dem elementaren Design eines linearen Paul-Massenfilters. Dabei liegt ein diagonales Stabelektrodenpaar auf einem Wechselspannungspotential, das andere Elektrodenpaar ist geerdet. Der Durchmesser der Elektroden beträgt 8mm, die Länge der Falle beläuft sich auf 14cm. Die Mittelpunkte der Stabelektroden befinden sich im radialen Querschnitt in den Eckpunkten eines Quadrates einer Seitenlänge von 12mm. Die Wechselspannungselektroden sind zur Spannungsversorgung einseitig über Schraubverbindungen mit Hochspannungsbuchsen verbunden. Für einen optimierten optischen Zugang wurde in der radialen Elektrodengeometrie der Abstand zwischen den Stabelektroden vergrößert, der Nachteil eines Quadrupolpotentials mit Multipolanteilen höherer Ordnung wurde dafür in Kauf genommen. Es sind Wechselspannungsamplituden von 1000V bei einer Frequenz von 50Hz erforderlich, um geladene Mikropartikel aus Korkmehl im radialen Potential zu fangen.

Die axiale Segmentierung (Abb. 6b) besteht in der linearen Falle aus 9 Edelstahlstiften, die äquidistant längs der Symmetrieachse angeordnet sind und individuell in das Quadrupolpotential mechanisch eingeschoben werden können. Die Stifte befinden sich auf gleichem elektrischen Potential, so daß die Stellung der Stifte direkt das resultierende axiale elektrische Potential widerspiegelt. Die numerische Simulation (Abb. 7a) zeigt im radialen Querschnitt das elektrische Potential ausgehend von einem einzelnen Stift - die Isolinien des elektrischen Potentials sind durch die einseitige Segmentierung bedingt sehr unsymme-

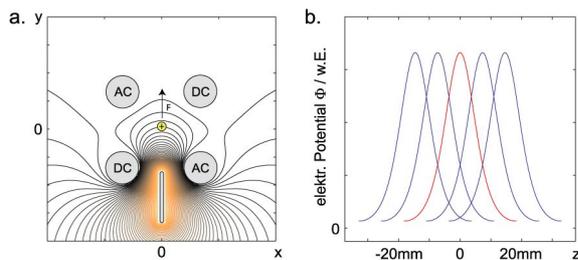


Abb. 7: Elektrisches Potential der Stiftelektroden zur Segmentierung der linearen Falle: Isolinien des Potentials im Querschnitt (a), elektrisches Potential entlang der axialen Richtung (b) für eine Elektrode (rot) und die angrenzenden Elektroden (blau).

trisch, dennoch ergibt sich aus der dreidimensionalen numerischen Simulation für jede Stiftelektrode ein Fangpotential, das mit den Potentialen benachbarter Elektroden wesentlich überlappt (Abb. 7b). Elektrische Gleichspannungen im Bereich von 20V reichen aus, um geladene Mikropartikel durch Einschleusen der Stiftelektroden in axialer Richtung zu speichern. Die Stiftelektroden sind jeweils über einen Kabel-Schleifkontakt kontaktiert. Durch das individuelle Einschleusen der Stiftelektroden wird die Erzeugung der axialen Potentialmulde haptisch erfahrbar.

Die segmentierte Falle ermöglicht das Speichern von linearen Ionenkristallen, durch das manuelle Verschieben der Stiftelektroden wird das axiale Potential verändert - der Transport einzelner gespeicherter Mikropartikel, aber auch linearen Ionenketten bestehend aus bis zu 10 Ionen ist genauso wie das Trennen von Ionenketten im Experiment realisierbar.

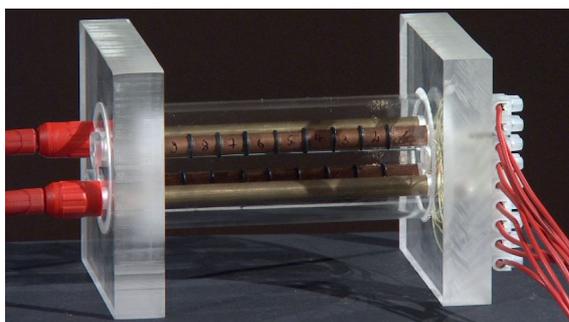


Abb. 8: Lineare segmentierte Paulfalle mit 9 Segmentpaaren für das Verschieben mit elektrischen Gleichspannungsegmenten (DC). Die Wechselspannungselektroden (AC) bleiben unsegmentiert.

Die Mikropartikel werden jedoch aufgrund der un-symmetrischen Segmentierung durch die Stiftelektroden aus dem Wechselspannungsknoten verschoben, so daß die Mikrobewegung der gespeicherten Teilchen einen wesentlichen Anteil besitzt (Abb. 6a). Dieses ist an der Ausdehnung der zeitgemittelten Bahntrajektoren zu erkennen, die aufgrund der Verschiebung stets parallel zu den Stiftelektroden liegt. Für eine geringe Mikrobewegung und die

punktförmige Abbildung eines Mikroteilchens ist eine symmetrische Segmentierung erforderlich, wie mit der folgenden Fallenkonstruktion (Abb. 8) gezeigt wird.

Die lineare Falle mit verschiebbaren Stiftelektroden zur axialen Segmentierung zeigt in einem Experiment die kontrollierte Beeinflussung von einzelnen geladenen Mikroteilchen bezüglich des Transports und des Verschiebens von linearen Ionenketten - durch die mechanische Verstellung der Stiftelemente wird die Erzeugung und Veränderung des elektrostatischen Potentials in Verbindung mit dem gespeicherten Mikroteilchen als Mikrosonde deutlich.

5. Segmentierte lineare Paulfalle

Die segmentierte lineare Paulfalle (Abb. 8) folgt im grundlegenden Design dem eines Massenfilters nach W. Paul. Zwei diagonal zueinander angeordnete Elektroden werden mit einer Wechselspannung zur Erzeugung des oszillierenden radialen Fallenpotentials betrieben. Die übrigen beiden Stabelektroden sind jeweils in 9 äquidistante Segmente unterteilt und erzeugen einen axialen Einschluß der geladenen Mikropartikel mit verschiedenen Gleichspannungen (Abb. 5). Gegenüberliegende Segmente beider Elektroden werden paarweise als Segmentpaar betrieben, so daß das axiale Fallenpotential wesentlich symmetrischer zum Knotenpunkt des Wechselspannungspotentials ist. Die Mikrobewegung der Partikel ist daher im Vergleich zum Design mit den Stiftelektroden wesentlich verringert (vgl. Abb. 6a).

Wie bei der vorigen Konstruktion wird die Hochspannung den Stabelektroden über Buchsen zugeführt, die mit den Messingstäben verschraubt sind. Die Länge der Elektroden beträgt 13cm mit einem Durchmesser von 8mm. Die Stabelektroden befinden sich mittig in den Eckpunkten eines Quadrates mit einer Seitenlänge von 15mm. Die neun mit Gleichspannung individuell ansteuerbaren Segmentpaare besitzen eine Länge von 6mm und sind auf der Innenseite mit Wirewrap-Draht verlötet. Die einzelnen Segmente sind auf einen Plastikstab geschoben, als isolierende Abstandshalter werden Gummidicht-ringe verwendet. Durch eine in den Plastikstab gefräste Nut werden die Drähte nach außen geführt und dort über Klemmen mit der Gleichspannungsvorsorgung verbunden (Abb. 8). Jedes Elektrodenpaar kann individuell mit bis zu 360V über die Schiebepotentiometerschaltung angesteuert werden (Abb. 5). Auf den Elektroden angelagerte Mikropartikel können zu einer verminderten Isolation zwischen den Elektrodensegmenten im Bereich von bis zu einigen 10MΩ führen.

Die segmentierte lineare Paulfalle ermöglicht das Laden und Speichern von einzelnen geladenen Mikropartikeln und linearen Ionenkristallen. Die 9 Elek-

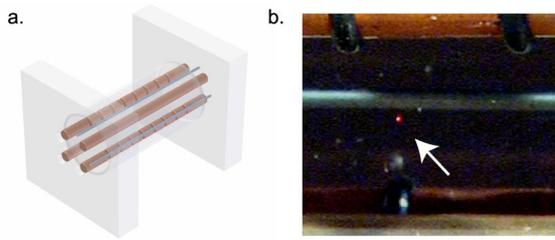


Abb. 9: Kompensation der Mikrobewegung: Elektroden zur Gleichspannungskompensation (blau) ermöglichen die Verringerung der Mikrobewegung (a) bis hin zur punktförmigen Speicherung (b) der Partikel (Pfeil). Im Hintergrund ist die Kompensationselektrode zu sehen, oben befinden sich die vorderen Gleichspannungssegmente, unten die vordere Wechselspannungselektrode.

trodensegmente erlauben das Verschieben und das Trennen von linearen Ionenketten genauso wie den kontrollierten Transport von einzelnen Partikeln. Das axiale Fallenpotential kann vielfältig geformt werden. Die Ansteuerung über die Hochspannungsschiebepotentiometer erlaubt einen einfachen Zugang und verlagert die Haptik der Potentialform auf die Stellung der Potentiometer, zusätzlich noch mit dem Vorteil, reproduzierbar verschiedene Potentialformen testen zu können. Dabei wirkt das geladene Teilchen als Mikrosonde im Potentialminimum des axialen elektrischen Feldes. Die gespeicherten Mikroartikel wie z.B. Korkmehl oder Bärlappsporen besitzen aufgrund der Mikrobewegung keine punktförmige Abbildung, es kann jedoch das Konzept der Mikrobewegungskompensation durch Zusatzelektroden gezeigt werden (Abb. 9b, vgl. Abb. 6a). Damit wird auch das Zusammenspiel von radialem elektrostatischen Feld und oszillierendem Wechselfeld gezeigt. Das statische elektrische Potential ermöglicht das Verschieben des Teilchens in den Knotenpunkt des radialen Wechselfeldes, wobei die minimale Ausdehnung des Teilchens direkt den Knotenpunkt des Wechselfeldes zeigt.

Die Mikrobewegungskompensation kann experimentell durch die Erzeugung statischer elektrischer

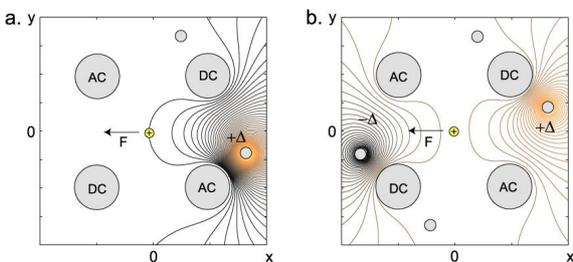


Abb. 10: Konzept der Mikrobewegungskompensation durch Zusatzelektroden: Verschiebung durch ein statisches Feld aufgrund der elektrischen Spannung Δ in x-Richtung mit einer Hilfelektrode (a) oder durch zwei antisymmetrische elektrische Spannungen Δ und $-\Delta$ mit zwei Hilfelektroden (b).

Felder mit Hilfelektroden sehr gut veranschaulicht werden (Abb. 9a). Dabei wird die laterale Ausdehnung des gefangenen Mikroteilchens vermessen, wobei sich die zeitgemittelte Amplitude der aus Säkular- und Mikrobewegung superponierten Trajektorie in Abhängigkeit von der Lokalisierung des Teilchens im Quadrupolpotential ändert. Nur im Knotenpunkt des Quadrupolpotentials wird die Mikrobewegung minimal und die Bahntrajektorie läßt sich auf einen Punkt zusammenziehen (Abb. 9b). Anderenfalls ist die Ausdehnung der zeitgemittelten Bahntrajektorie wesentlich vergrößert.

Mit Hilfe von Zusatzelektroden kann in beide radiale Raumrichtungen ein Kompensationsfeld erzeugt werden, um die Mikrobewegung zu minimieren. Es werden mindestens 2 Kompensationselektroden benötigt, die sich im Außenraum der Falle befinden (Abb. 10a). Damit bleibt ein guter optischer Zugang gewährleistet, die Kompensationsspannungen erhöhen sich aber entsprechend, weil der elektrische Durchgriff aus dem Außenraum eingeschränkt ist. Für eine bessere Entkopplung der Kompensationsrichtungen sind jeweils 2 gegenüberliegende Elektroden besser geeignet (Abb. 10b), weil das resultierende elektrische Feld im Fallenmittelpunkt homogener wird. Desweiteren ist die Kompensationsspannung selbst am Ortspunkt der Kompensation nahe Null, was sich auf die Stabilität der Bahnkurve auswirken kann (vgl. Abb. 3). Hier wird das Konzept jedoch nur mit insgesamt 2 Kompensationselektroden demonstriert.

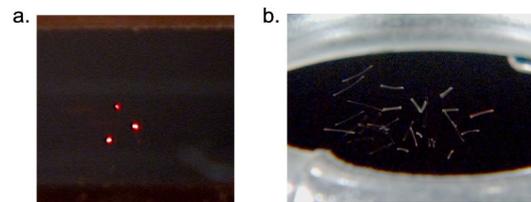


Abb. 11: Ionenkristalle in der linearen segmentierten Paulfalle (a) und einer herkömmlichen Ring-Paulfalle (b) mit größerer Mikrobewegung.

In der segmentierten Falle befinden sich parallel zu den Fallenelektroden Stahldrähte mit einem Durchmesser von 1.5mm (Abb. 9a), um das statische elektrische Kompensationsfeld zu erzeugen. Die Drähte sind von der optischen Detektionsebene 45mm entfernt und aus der optischen Achse um 4mm verschoben. Für die Mikrobewegungskompensation eines einzelnen Ions werden elektrische Spannungen im Bereich ca. 180V benötigt, die zeitgemittelte Abbildung zeigt dann eine punktförmige Ausdehnung des Teilchens (Abb. 9b).

Der große didaktische Vorteil einer linearen Paulfalle gegenüber einer dreidimensionalen Fallengeometrie wird an der Kompensation der Mikrobewegung deutlich (Abb. 11a): Das entkoppelte Konzept zwi-

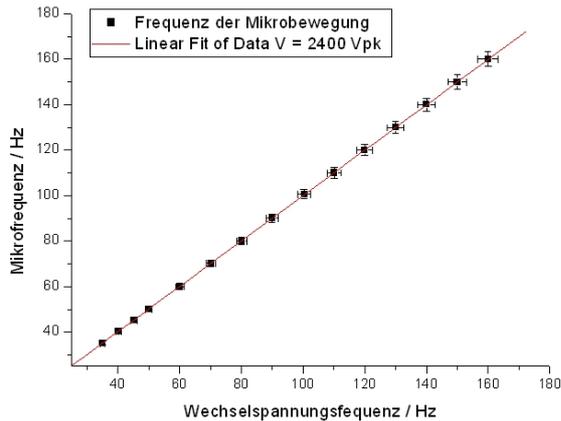


Abb. 12: Messung der Frequenz der Mikrobewegung für verschiedene Antriebsfrequenzen $\omega/2\pi$ an einem Mikroteilchen. Die Ausgleichsgerade zeigt die Proportionalität zwischen der beiden Frequenzen.

schen axialer und radialer Bewegung zeigt einen eindimensionalen statischen Einschluß ohne Mikrobewegung und einen zweidimensionalen Einschluß durch das elektrische Wechselfeld mit entsprechender Mikrobewegung. Diese kann jedoch durch statisches Verschieben des gefangenen Mikropartikels effektiv minimiert werden. Dabei agiert das Teilchen als Mikrosonde für die charakteristische Form des zweidimensionalen Wechselfeldes.

Dieses Konzept ist auf Ionenkristalle übertragbar: Der Vergleich mit einer herkömmlichen Ringfalle zeigt den Unterschied zwischen einem statischen Ionenkristall und einer gefangenen Ionenwolke mit Mikrobewegung (Abb. 11b). Durch die lineare Fallen-geometrie erfolgt der Wechselfeldeinschluß stets ra-

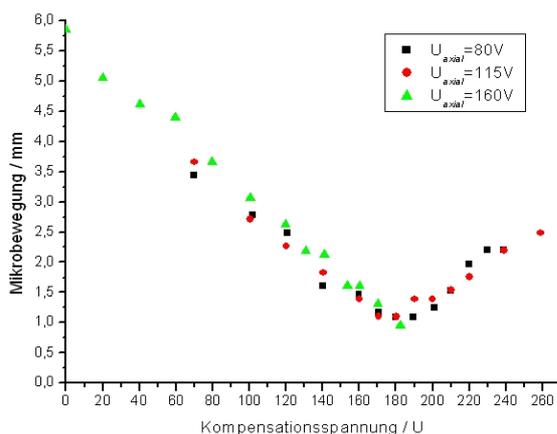


Abbildung 13: Messung der Mikrobewegung für ein Mikroteilchen bei verschiedenen axialen Einschlußspannungen: Die zeitgemittelte Ausdehnung zeigt ein Minimum bei einer Kompensationsspannung von 180V unabhängig vom axialen Einschluß. Die verbleibende Mikrobewegung ist auf Aufladungen und Asymmetrien der Falle zurückzuführen.

dial, der statische Einschluß immer axial. Diese charakteristische Eigenschaft ermöglicht das Fangen und Kompensieren von linearen Ionenkristallen beliebiger Größe. Diese Eigenschaft macht sich die Quanteninformationsverarbeitung zu Nutze, die durch gezielte Anregung von Schwingungsquanten in axialer Richtung nicht nur Wechselwirkungen zwischen benachbarten Ionen, sondern auch kollektive Anregungen der Ionenkristalle zum Austausch von Information zwischen den Qubits (bzw. Mikropartikeln) verwendet [13]. Die kontrollierte Vibrationsanregung zur Wechselwirkung einzelner Qubits untereinander wird auch als Quantenbus bezeichnet.

6. Messungen zur Mikrobewegung

Die charakteristischen Eigenschaften der Mikrobewegung kann an Messungen mit einem gefangenen Mikroartikel in der segmentierten linearen Paulfalle (Abb. 8) sehr gut nachvollzogen werden. Durch eine stroboskopische Beleuchtung durch den Diodenlaser mit einer drehenden Lochscheibe kann die Bewegungsfrequenz der Mikrobewegung bis auf wenige Schwingungen pro Sekunde genau bestimmt werden. Die direkte Proportionalität zwischen der Mikrobewegungsfrequenz und der Antriebsfrequenz (Abb. 12) wird durch die lineare Ausgleichsgerade sehr gut bestätigt.

Die laterale Verschiebung des Mikroteilchens im radialen Querschnitt zeigt die Verwendung des Partikels als Mikrosonde für das elektrische Wechselfeld (Abb. 13): Für verschiedene axiale Einschlußspannungen wird die Kompensationsspannung variiert und die zeitgemittelte Ausdehnung des Mikropartikels gemessen. Das statische elektrische Kompensationsfeld bewirkt eine laterale Verschiebung aus dem Knotenpunkt des oszillierenden Wechselfeldes, so daß der Mikrobewegungsanteil an der Bahntrajektorie vergrößert wird. Diese charakteristische Eigenschaft ist deutlich an den beidseitig ansteigenden Flanken um die elektrische Spannung von 180V zu sehen. Die verbleibende laterale Ausdehnung von ca. 1mm ist auf elektrostatische inhomogene Aufladungen und lokale Asymmetrien beim Fallenbau zurückzuführen, so daß eine Offsetspannung von 180V zur Kompensation notwendig wird.

7. Verwendung als Demonstrationsexperiment

Die vorgestellten Experimente unterscheiden sich wesentlich von derzeitigen Demonstrationsexperimenten mit Paulfallen und gehen bezüglich der zur Verfügung stehenden didaktischen Möglichkeiten über Lehrexperimente mit Paulfallen hinaus.

Die lineare Paulfalle mit mechanisch verschiebbaren Stiften benötigt ebenso wie die segmentierte lineare Paulfalle nur einen Generator zur Erzeugung der Wechselspannung, eine Gleichspannungsquelle,

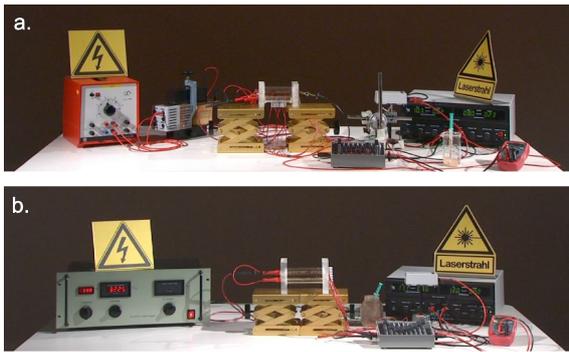


Abb. 14: Demonstrationsexperimente zur linearen Paulfalle mit mechanisch verschiebbaren Stiften (a) und elektrisch ansteuerbaren Segmentpaaren (b).

einen Diodenlaser mit Fokussieroptik und eine CCD-Kamera zur Abbildung. Durch den Einbau in ein transparentes Gehäuse sind die Paulfallen abgeschlossen gegenüber äußeren Störungen bei gleichzeitig gutem optischen Zugang, so daß die Lebensdauer eines einzelnen gefangenen Mikroteilchens einige Stunden oder Tage betragen kann. Einzelne Ionen bzw. Ionenkristalle können in diesen Fallen gespeichert und räumlich transportiert werden - das Aufspalten, Verschieben und Zusammenfügen von linearen Ionenketten im axialen Potential veranschaulicht die nichttriviale Manipulation von geladenen Teilchen mit elektrischen Feldern. Neben konventionellen Ringfallen sind die linearen Paulfallen ebenfalls mit einfachen Mitteln zu realisieren.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Neben den qualitativen Experimenten zur elementaren Funktionsweise der linearen Paulfalle, dem elektrostatischen eindimensionalen und dem elektrodynamischen zweidimensionalen Einschluß, eignen sich diese Demonstrationsexperimente hervorragend zum tieferen Verständnis der Mikrobewegung im elektrischen Wechselfeld und damit dem Unterschied zwischen elektrostatischen und -dynamischen Feldern.

Anhand der segmentierten linearen Paulfalle können grundlegende Konzepte der Massenspektrometrie bzgl. des Massenfilters nach Paul, genauso wie die komplexe Manipulation linearer Ionenketten für Experimente in der Quanteninformationsverarbeitung zur Realisierung von Ionenfallen-Quantencomputern bzw. -simulatoren veranschaulicht werden. Der wesentliche Vorteil der linearen Fallen im Vergleich zu den dreidimensionalen Fallen verdeutlicht die zweidimensionale Mikrobewegung, die nicht entlang der axialen Richtung auftritt. Diese Eigenschaft ist wesentlich für Experimente zur Entwicklung von Ionenfallen-Quantencomputern.

Eine zukünftige Erweiterung des Experiments stellt der Betrieb der Paulfalle unter Vakuum dar. Aufgrund der Entdämpfung der Bewegung der gefange-

nen Mikropartikel können durch Resonanzanregung die Säkularfrequenzen stroboskopisch gemessen und mit numerischen Simulationen verglichen werden. Zudem führen Abweichungen von einem reinen radialen Quadrupolpotential zu Instabilitäten in der Bewegung [14], so daß evakuierte Paulfallen zur Veranschaulichung von deterministischem Chaos dienen können. Bestimmte Zonen im Stabilitätsdiagramm sind für quantitative Experimente besonders geeignet [15]. Die Masse von einem Mikropartikel kann bestimmt werden [16].

Zukünftige Experimente mit den vorgestellten segmentierten linearen Paulfallen liegen auch Bereich einfacher spektroskopischer Untersuchungen, bei denen geladene mikroskopische Flüssigkeitströpfchen gefangen und untersucht werden können [17].

Insgesamt sind die segmentierten linearen Paulfallen hervorragend geeignet, um die didaktischen Grundkonzepte elektrostatischer und elektrodynamischer Felder zu vermitteln. Nebenbei ermöglichen diese Fallen auch die Spektroskopie an einzelnen gefangenen Flüssigkeitspartikeln, um die Lernkonzepte der Elektrostatik und Elektrodynamik mit Grundlagen der Atomphysik zu verbinden. Der aktuelle Bezug zur Massenspektrometrie und Quanteninformationsverarbeitung wird ersichtlich durch die Manipulation von Ionenketten und kann dahingehend grundlegendes Hintergrundwissen zu aktuellen Forschungsergebnissen liefern.

9. Literatur

- [1] *W. Paul und H. Steinwedel*, Z. Naturforsch. 8a, 448 (1953), *W. Paul und M. Raether*, Zeitschr. Phys. A 140, 262 (1955).
- [2] *W. Paul*, Rev. Mod. Phys. 62, 531 (1990).
- [3] *R. C. Thompson*, Meas. Sci. Technol. 1, 93 (1990), *R. E. March*, J. Mass Spec. 32, 351 (1997), *R. Aebersold und M. Mann*, Nature 422, 198 (2003).
- [4] *P. F. Staunum et al.*, Phys. Rev. Lett. 100, 243003 (2008).
- [5] *H. C. Nägerl et al.*, Appl. Phys. B 66, 608 (1998), *F. Schmidt-Kaler et al.*, Appl. Phys. B 77, 789 (2003), *R. Blatt*, Physik Journal 4, 37 (2005).
- [6] *R. Schützhold et al.*, Phys. Rev. Lett. 99, 201301 (2007), *A. Friedenauer et al.*, Nature Physics 4, 757 (2008).
- [7] *H. Winter und H. W. Ortjohann*, Am. J. Phys. 59, 807 (1991).
- [8] *S. P. Smith et al.*, Am. J. Phys. 67, 26 (1999), *J. Bechhoefer et al.*, Am. J. Phys. 70, 393 (2002).
- [9] *M. Drewsen und A. Bröner*, Phys. Rev. A 62, 045401 (2000).
- [10] *D. Gerlich*, Physica Scripta T59, 256 (1995).

- [11] Die numerischen 2D- und 3D-FEM-Simulationen der elektrischen Potentiale wurden mit COMSOL Multiphysics V3.2 durchgeführt (<http://www.comsol.de>).
- [12] *D. Leibfried et al.*, Rev. Mod. Phys. 75, 281 (2003), *W. R. Plass*, Int. J. Mass. Spec. 202, 175 (2000).
- [13] *A. Steane*, Appl. Phys. B 64, 623 (1997).
- [14] *R. Alheit et al.*, Int. J. Mass Spec. 154, 155 (1996).
- [15] *R. Alheit et al.*, Appl. Phys. B 61, 277 (1995).
- [16] *S. Schlemmer et al.*, J. Appl. Phys. 90, 5410 (2001).
- [17] *C. S. Fong et al.*, Am. J. Phys. 75, 499 (2007), *A. A. Kolomenskii et al.*, J. Appl. Phys. 102, 094902 (2007).