

Mikrostrukturierte Ionenfallen

Tanja E. Mehlstäubler¹, André P. Kulosa², Amado Bautista-Salvador³, Alexandre Didier⁴, Christian Ospelkaus⁵

Einführung

Atome sind die Bausteine jeder Form von Materie. Alles, was wir in unserem täglichen Alltag berühren oder benutzen, sogar unser eigener Körper, ist aus einer großen Anzahl unterschiedlichster Atome zusammengesetzt. Da mag es nur schwer vorstellbar sein, jemals einzelne Atome isolieren und betrachten zu können. Wissenschaftler des späten 20. und frühen 21. Jahrhunderts haben sich aber in der Disziplin der Quantenoptik auf die hochgenaue Kontrolle weniger Atome spezialisiert. Gerade diese hochgenaue Kontrolle einzelner Quanten-Teilchen ist entscheidend für die Realisierung eines zukünftigen Quantencomputers oder für das Betreiben hochgenauer Atomuhren. Die Plattform für moderne Quantenrechner, Quanten-Simulatoren und optische Uhren basierend auf lasergekühlten Ionen, ist die sogenannte Paul-Falle. Hier können atomare „Qubits“ kodiert und fast vollständig isoliert von der Umgebung gespeichert und manipuliert werden.

Die Anfänge der Ionenfallen

Im frühen 20. Jahrhundert gelang es Robert Millikan, kleinste Ladungsmengen zu isolieren und somit die Elementarladung zu bestimmen. Diese Experimente wurden jedoch mit makroskopischen Öltröpfchen durchgeführt, die Milliarden von Atomen enthalten. Die Speicherung von einzelnen Atomen

in Form von geladenen Ionen erfolgte erst im späten 20. Jahrhundert und wurde zu einer Erfolgsgeschichte in der Messbarkeit von physikalischen Größen, wie der Sekunde.

Die Grundlage dafür wurde auf dem Gebiet der Massenspektrometrie gelegt: bestimmte Massen werden aus einem Gasgemisch verschiedener, ionisierter Teilchen gezielt aussortiert und vermessen. 1953 berichteten Wolfgang Paul und Helmut Steinwedel in der „Zeitschrift für Naturforschung“ erstmals über ein „neues Massenspektrometer ohne Magnetfeld“ [1], [2]. In diesem linearen Massenfilter wird ein zur Längsachse symmetrisches, elektrisches Wechselfeld mittels vier hyperbolischen Elektroden erzeugt, wobei jeweils sich gegenüber liegende Elektroden miteinander verbunden sind, die Elektrodenpaare A und B, wie in *Abbildung 4.1* dargestellt. Aufgrund der Verwendung von vier elektrischen Polen wird diese Anordnung auch als „Quadrupol-Massenfilter“ bezeichnet. An die Elektrodenpaare wird eine Spannung U angelegt, die mit der Frequenz ω periodisch oszilliert. Für Ionen ergibt sich nun die folgende Bewegung: entlang der x -Achse bewegen sie sich gleichförmig und in y - sowie z -Richtung gemäß dem Verhältnis ihrer Ladung zur Masse. Dies bedeutet insbesondere, dass bei geeigneten Kombinationen von Werten für U und ω nur Ionen mit einem bestimmten Ladung-zu-Masse-Verhältnis das Filter passieren können, für die sich eine stabile Trajektorie durch das Filter ergibt.

- ¹ Prof. Dr. Tanja E. Mehlstäubler, QUEST | Institut an der PTB, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: tanja.mehlstaeubler@ptb.de
- ² Dr. André P. Kulosa, QUEST | Institut an der PTB, E-Mail: andre.kulosa@ptb.de
- ³ Dr. Amado Bautista-Salvador, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, QUEST | Institut an der PTB, E-Mail: amado.bautista@ptb.de
- ⁴ Dr. Alexandre Didier, QUEST | Institut an der PTB, E-Mail: alexandre.didier@ptb.de
- ⁵ Prof. Dr. Christian Ospelkaus, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, QUEST | Institut an der PTB, E-Mail: christian.ospelkaus@iqo.uni-hannover.de

Abbildung 4.1: Skizze des Vierpol-Feldes zur Massenspektrometrie. Vier Elektroden (jeweils Paare A und B) erzeugen ein zur x -Achse symmetrisches Wechselfeld, das mit Frequenz ω periodisch oszilliert [3].

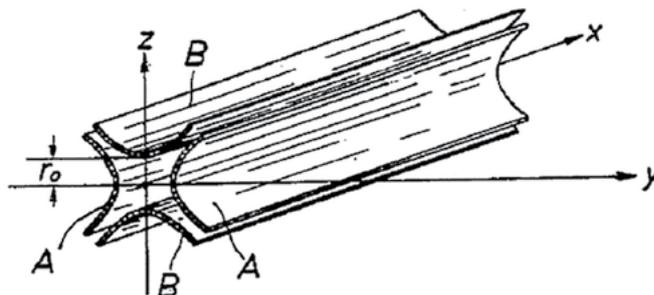
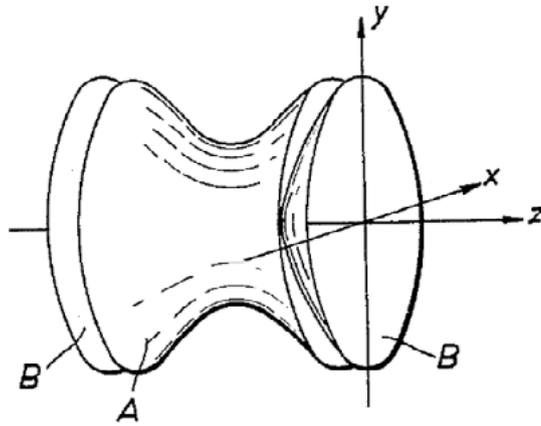


Abbildung 4.2:
Links: Skizze des „Ionenkäfigs“ bestehend aus hyperbolischer Ringelektrode (A) und Endkappen (B) [3].
Rechts: Fotografie des Ionenkäfigs nach Gernot Greff (Foto: Deutsches Museum)



Das bisherige Quadrupol-Massenfilter erlaubte zwar die gezielte Selektion eines geladenen Ions aufgrund seiner bestimmten Trajektorie durch den Messapparat, jedoch noch nicht seine dauerhafte Speicherung. Dies wurde erst mit der Weiterentwicklung zur Ionenfalle durch Wolfgang Paul und Manfred Raether im Jahr 1955 möglich. Die bisherige Apparatur mit vier Elektroden wurde durch eine einzige, hyperbolische Ringelektrode ersetzt, die von zwei Endkappen abgeschlossen wird und somit ein ideales Quadrupolfeld erzeugt (siehe *Abbildung 4.2*). Aus heutiger Sicht der Quantenoptik mit lasergekühlten Atomen stellt diese Anordnung ein fundamentales Problem dar: es findet sich kein optischer Zugang zum Ion für Laserkühlung und dem optischen Auslesen atomarer Zustände! Damals war dieser Freiheitsgrad tatsächlich nicht notwendig, da die Temperatur des Ions mittels resistiver Kühlung kontrolliert wurde. Hierfür wurde ein elektrischer Widerstand zwischen die Endkappen-Elektroden geschaltet. Bewegt sich ein Ion aufgrund seiner kinetischen Energie in der Falle, induziert es über die Coulomb-Wechselwirkung Ladungen in den Endkappen. Diese Ladungen ändern sich kontinuierlich und erzeugen somit einen Strom zwischen den Endkappen, der durch den Widerstand fließt. Energie, die aus der Bewegungsenergie der Ionen genommen wird, wird im Widerstand in Form von Wärme dissipiert. Wurden diese Experimente früher bei Raumtemperatur durchgeführt, lag somit die limitierende Temperatur des resistiven Kühlens bei ungefähr 300 K und konnte nur durch die Verwendung von kryogenen Apparaturen auf etwa 4 K reduziert werden. Paul-Fallen bieten aber typischerweise Potentialtiefen in einer Größenordnung von 10^4 K und erlauben daher Speicherzeiten für gefangene Ionen von mehreren Wochen bis hin zu Monaten. Die Entwicklung der Paul-Falle (von Wolfgang Paul favorisiert als „Ionenkäfig“ bezeichnet) wurde 1989 schließlich mit dem Nobelpreis der Physik gewürdigt [4].



Abbildung 4.3:
 Wolfgang Paul – gewürdigt mit dem Nobelpreis in Physik 1989 „für die Entwicklung der Technik der Ionenfalle“ [4].

Die Ära der zustandsselektiven Manipulation

Nur kurze Zeit später nach der Entwicklung des Paul'schen Ionenkäfigs gelang Theodor H. Maiman 1960 die erste Demonstration eines Lasers [5], was als Meilenstein der sogenannten 1. Quantenrevolution anzusehen ist. Die nun beginnende Weiterentwicklung der Laser sowie ihre kommerzielle Verfügbarkeit läutete auch eine neue Ära in der Grundlagenforschung mit Atomen ein. Dank der Methode der Laserkühlung kann die Temperatur von Atomen von mehreren 100 K in den mK-Bereich reduziert werden. Die während dieses Prozesses emittierten Fluoreszenz-Photonen können mit Kameras detektiert werden und erlauben somit eine direkte Beobachtung von einzelnen Atomen. Das Design der Ionenfalle wurde nun ebenfalls um optische Zugänge angepasst, um Ionen mit Laserstrahlung zu kühlen und zu detektieren. So gelang es schließlich Peter E. Toschek, der ebenfalls ein ehemaliger Mitarbeiter Wolfgang Pauls war, und Hans Dehmelt an der Universität Heidelberg im Jahr 1980 erstmals ein einzelnes, lasergekühltes Ba^+ -Ion in einer Paul-Falle zu speichern [6].

Nahe dem Fallenzentrum kann das Potential der Paul-Falle als harmonisch approximiert werden, so dass für die gespeicherten Ionen die Bewegungszustände des quantenmechanischen harmonischen Oszillators vorliegen. Laserlicht kann nun genutzt werden, um die inneren Freiheitsgrade (elektronische Zustände) des Ions mit seinen äußeren Freiheitsgraden (Bewegungszustände im Potential) zu koppeln. Dieser Mechanismus des Quantenregimes wird im Allgemeinen mit dem Jaynes-Cummings-Modell erklärt. Unter gewissen Bedingungen, nämlich wenn die Bewegungsamplitude des Ions kleiner ist als die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts, kann dem Ion mittels sogenanntem Seitenband-Kühlen gezielt Energie in Form eines Bewegungsquantums entzogen werden und schließlich die Population des absoluten Bewegungs-Grundzustands erreicht werden.

Diese gezielte Atom-Licht-Wechselwirkung wurde maßgeblich von David J. Wineland und seinen Kollegen am National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) entwickelt und legte den Grundstein für die Quantenlogikspektroskopie (s. Artikel „Quantenlogik-Spektroskopie“ in dieser Ausgabe) [7]. Diese „bahnbrechenden, experimentellen Methoden, die die Messung und Manipulation individueller Quantensysteme ermöglichten“ wurden 2012 mit dem Nobelpreis für Physik gewürdigt [4].

Mit der gezielten Kontrolle über die Qubit-Zustände in gefangenen Ionen kamen erste Quanteninformationsexperimente in Sicht. Die ersten Ionenfallen, in denen erfolgreich Quantengatter implementiert wurden, erlauben jedoch nur die Speicherung einiger weniger Ionen. Eine absolute Notwendigkeit für die Realisierung künftiger Quantencomputer ist aber die Operation auf vielen Qubits gleichzeitig, eines der sogenannten DiVincenzo-Kriterien für Quantencomputer [8]. Doch wie kann man Ionenfallen skalieren, um dieser Anforderung gerecht zu werden?

Eine Antwort auf diese Frage entwickelte ebenfalls die Gruppe von David J. Wineland mit dem Konzept von einem „Quantum Charge-Coupled Device“ (QCCD) [7], [9]. Auf einem solchen Gerät sollen Elektroden segmentiert werden, so dass die elektrischen Potentiale in jedem Segment unabhängig ausgewählt werden können. Damit können viele Ionen gleichzeitig gespeichert und zwischen

verschiedenen Zonen transportiert werden (siehe [Abbildung 4.4](#)), damit kontrollierbare Quantenoperationen durchgeführt werden können.

Dieses Konzept stellte aber eine große technische Herausforderung dar. Die Segmente müssen elektrisch getrennt werden und eine Vielzahl von elektrischen Verbindungen müssen angebracht werden. Um elektrische Feldgradienten zu vermeiden, muss die Segmentierung präzise hergestellt werden. Alle Isolatoren, die sich elektrisch aufladen können, müssen möglichst von den Ionen ferngehalten werden, um Störfelder zu vermeiden. Außerdem müssen passende Materialien verwendet werden, um den Betrieb in Ultrahochvakuum zu ermöglichen und die störende Erwärmung der Falle zu minimieren. Deshalb stellte sich damals die Frage: Können Ionenfallen wirklich skalierbar und komplizierter werden?

Die ersten mikrostrukturierten Ionenfallen

Die Gruppe von David J. Wineland stellte zeitgleich eine Falle mit segmentierten Elektroden her und demonstrierte die erfolgreiche Speicherung und den Transport von Ionen in zwei unterschiedlichen Fallensegmenten [10]. Der erste Baustein für die Umsetzung der Idee von einem QCCD für Quantencomputer wurde gelegt. Die Falle basierte auf einem vergoldeten Al_2O_3 -Wafer und die präzise Segmentierung der Fallenschlitze wurde mittels Laserablation definiert.

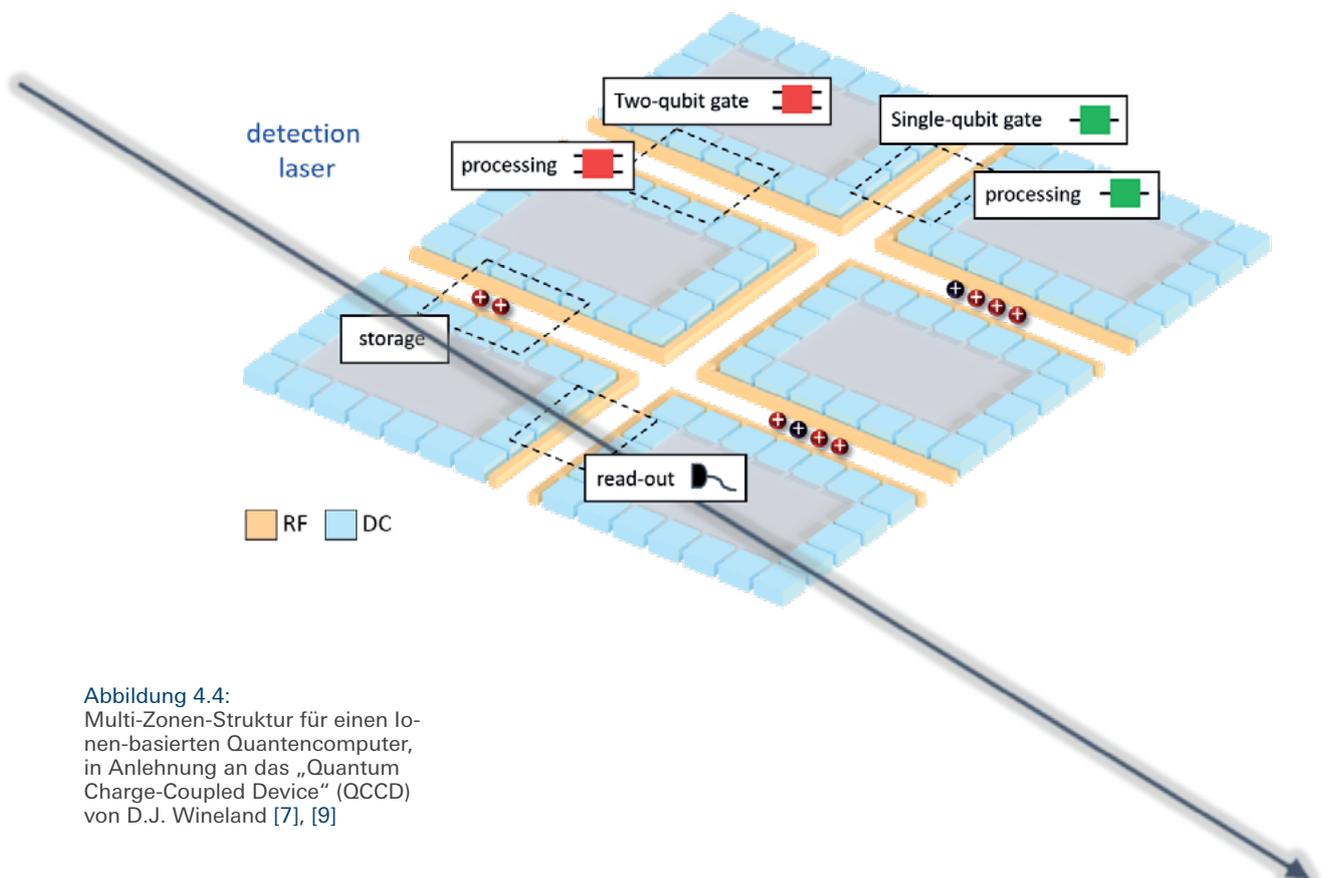


Abbildung 4.4:
Multi-Zonen-Struktur für einen Ionen-basierten Quantencomputer, in Anlehnung an das „Quantum Charge-Coupled Device“ (QCCD) von D.J. Wineland [7], [9]

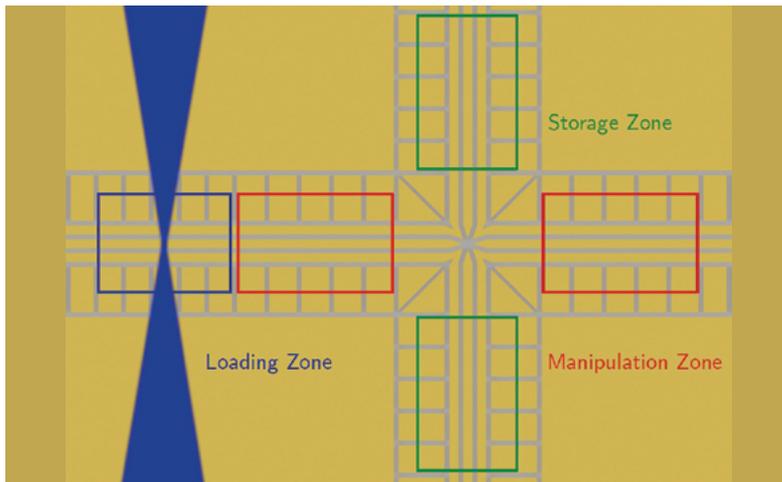


Abbildung 4.5: Skizze einer mikrostrukturierten Oberflächenfalle, wie sie derzeit am QUEST-Institut entwickelt wird. In den verschiedenen Zonen können Ionen geladen, gespeichert und manipuliert werden. Die zentrale Kreuzung ermöglicht den Transport zwischen diesen Zonen.

Im Jahr 2006 wurde erstmals eine segmentierte Falle mit einer T-Struktur in der Gruppe von Christopher R. Monroe aufgebaut [11]. Diese Falle bestand aus drei vergoldeten Al_2O_3 -Wafers mit insgesamt 49 Elektroden und 11 Zonen. Ionen konnten in verschiedenen Zonen erfolgreich gespeichert, separiert, transportiert und getauscht werden. Die Realisierung solcher grundlegenden Operationen bestätigte das Konzept des skalierbaren Ionen-Quantencomputers. Die Herstellung skalierbarer Ionenfallen für Quantencomputer hat seitdem signifikante Weiterentwicklungen erfahren. Die Gruppe von Ferdinand Schmidt-Kaler entwickelte im Jahr 2007 eine mikrostrukturierte Falle mit einer großen Anzahl von Segmenten in drei unterschiedlichen Zonen [12]. Dieses Design wurde später in der Gruppe von Rainer Blatt verwendet, um parallel zu Arbeiten am NIST [13] die Bewegungszustände von räumlich getrennten Ionen zu koppeln [14]. Im Jahr 2009 wurde am NIST erstmals zuverlässiger Transport von Ionen durch Kreuzungen und praktisch im Bewegungs-Grundzustand demonstriert [15]. Gegenwärtig wird auch am QUEST-Institut eine skalierbare Oberflächenfalle entwickelt, die dedizierte Zonen für flexible Qubit-Operationen vorweist (siehe [Abbildung 4.5](#))

Skalierbare Ionenfallen für die Quantenmetrologie

Die präzise Kontrolle von Ionen in unterschiedlichen Segmenten einer linearen Falle ermöglicht neue Anwendungen der Quantenmetrologie. Damit können neue Uhren basierend auf Quantenlogikspektroskopie gebaut werden [16] und auch die Realisierung einer skalierbaren Multi-Ionen-Uhr rückt näher [17], [18].

Für solche Anwendungen entwickelt die PTB seit 2012 präzise, skalierbare Chip-Ionenfallen. Die technisch ausgefeilteste Version der Falle basiert auf vier Aluminiumnitrid (AlN)-Keramik-Platinen, die in der PTB lasergeschnitten und vergoldet werden. Passende, vakuumtaugliche und unmagnetische Materialien werden für die Falle, deren Zusammenbau, und die Anbringung integrierter SMD-Filterelektronik ausgewählt, um einen Betrieb in Ultrahochvakuum mit einem Restdruck unter 10^{-10} mbar zu ermöglichen. Integrierte Temperatursensoren erlauben die präzise Bestimmung der Erwärmung der Falle und damit den Beitrag der Schwarzkörperstrahlung zur Uhrenungenauigkeit. Diese High-end-Fallen bieten eine sehr geschützte Umgebung für die Speicherung von Ionenketten, in der eine Uhr mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-19} realisiert werden kann [18].

Basierend auf diesen guten Ergebnissen wurde ein Teil des BMBF-geförderten Industrieprojekts „Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“ (Opticlock) den skalierbaren Ionenfallen gewidmet. In diesem Projekt wird der Prototyp einer Einzelionen-Uhr entwickelt, die dauerhaft und zuverlässig funktionieren soll. Eine kompakte skalierbare Falle (siehe [Abbildung 4.6](#)) wurde in der PTB entwickelt und hergestellt, um später Präzisionsspektroskopie von mehreren Ionen in einer solchen Uhr zu ermöglichen. Die Falle basiert auf vier AlN-Keramik-Platinen, die in der PTB lasergeschnitten wurden. Die Platinen

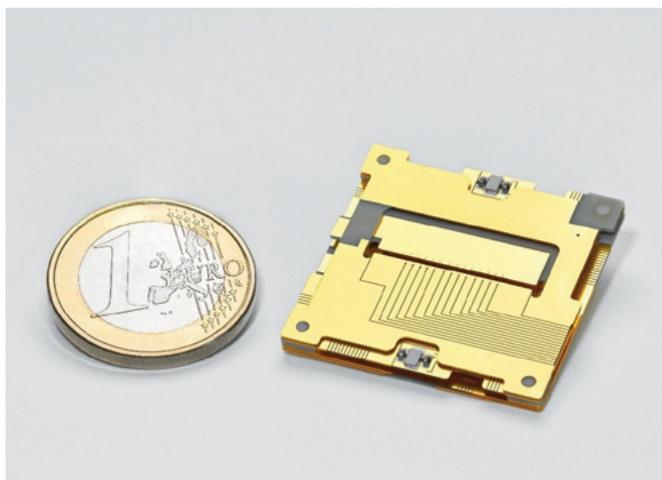
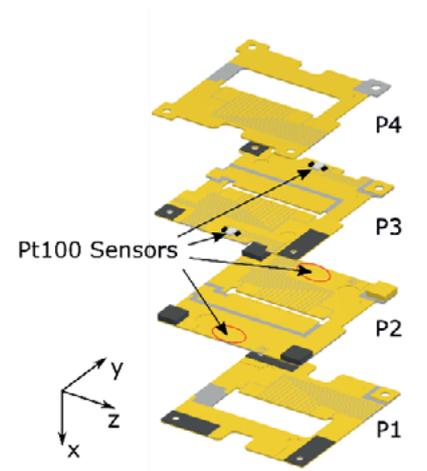


Abbildung 4.6: Die Opticlock-Falle für die Spektroskopie von Coulomb-Kristallen.



wurden anschließend mit Ti/Au beschichtet und die Elektroden und Segmente darauf laserstrukturiert. Vier Temperatursensoren werden auf der Falle integriert, um die Temperaturverteilung auf der Falle bestimmen zu können. Zunächst wurden die Chips mit einer Präzision besser als 10 μm aufeinander platziert und kontaktiert.

Die Falle wurde auf einem AlN-Keramikträger kontaktiert (siehe [Abbildung 4.7](#)), der im Rahmen des Projekts in Kollaboration mit der Universität Siegen entwickelt wurde. Der Träger enthält die Filterelektronik und alle elektrischen Anschlüsse. Die Falle wird momentan bei einem Vakuumdruck von weniger als 10^{-10} mbar in der Universität Siegen betrieben, wo bereits Ketten von $^{172}\text{Yb}^+$ -Ionen gefangen werden konnten.

Weitere Fallen werden momentan für interne und externe Partner entwickelt. In der PTB wird eine neue Uhr mit einer skalierbaren Ionenfalle aufgebaut, in der gekühlte Yb^+ und Sr^+ -Ionen gleichzeitig gespeichert werden sollen. Andere Fallen dienen der Quantenlogik-Spektroskopie an gespeicherten He^+ Ionen im extremen Ultraviolett-Bereich (32 nm) und an Al^+ Ionen für den Uhrenbetrieb.

Diese mehrlagigen, skalierbaren Fallen werden auch „skalierbare 3D-Falle“ genannt, da die Fallenelektroden in drei Dimensionen angeordnet sind. Mit ihnen werden sehr tiefe Fallenpotentiale erreicht, in denen die Ionen über Tage gefangen bleiben und sogar Stöße mit Restgasmolekülen überstehen. Aufgrund der hohen Schirmung der darin gespeicherten Ionen von äußeren elektrischen Feldern und deren Rauschen, sowie äußerst

niedriger Heizraten, bieten diese Fallen eine sehr gute Plattform für Präzisionsspektroskopie, Atomuhren und lange Kohärenzzeiten. Ebenfalls erlauben sie eine einfache Integration von optischen Glasfasern, welche zwischen den Elektroden geschirmt eingeführt werden können.

Oberflächenfallen für die Quanteninformationsverarbeitung

Planare oder Oberflächenionenfallen [19], [20] stellen eine flexible skalierbare Plattform für die Realisierung zukünftiger Anwendungen in Quantencomputern, Quantensimulatoren und Quantenmetrologie dar. Unter Skalierbarkeit versteht man hierbei die Möglichkeit, im Prinzip beliebig viele individuelle „Bauelemente“ von Fallensystemen auf einer Trägerstruktur in einem einzelnen Fabrikationsdurchgang herstellen zu können, ähnlich wie Halbleiterbauelemente auf Computerchips untergebracht werden. Dabei baut man auf etablierten Verfahren der Halbleiterindustrie auf, welche es erlauben, planare Strukturen zu realisieren. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen dreidimensionalen Strukturen wird hier die oberste Metallschicht in Segmente (Elektroden) unterteilt. Durch Anlegen geeigneter Spannungen an diese Elektroden können Ionen oberhalb der Oberfläche gespeichert werden; durch zusätzliche Unterteilung der Oberfläche in funktional unterschiedliche Zonen oder Register kann die oben beschriebene QCCD-Architektur implementiert werden. Die Ionen werden in der Regel einige zehn Mikrometer oberhalb der Oberfläche lokalisiert.

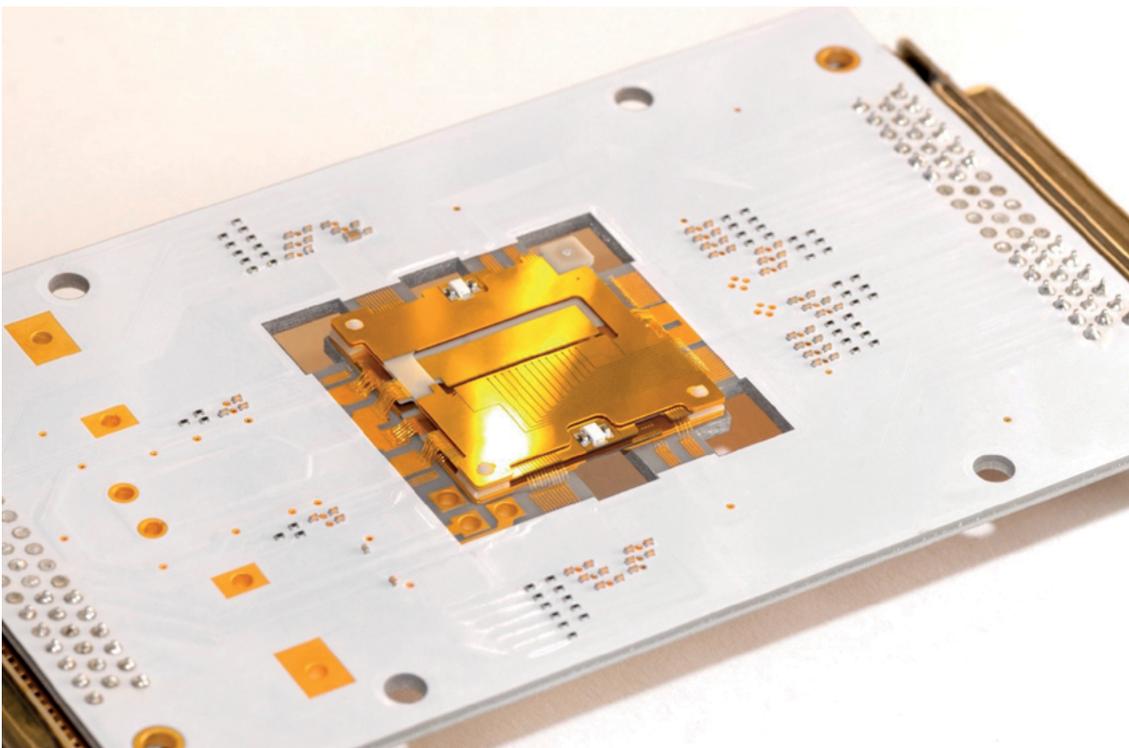
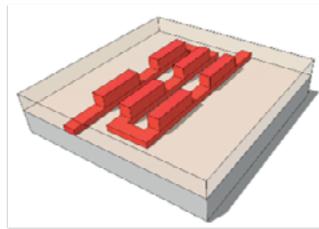
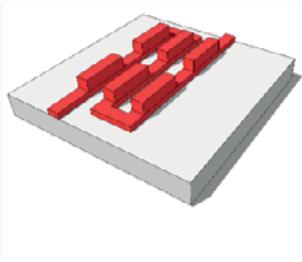


Abbildung 4.7: Die Opticlock-Falle auf dem Trägerboard. Eine Glass-Küvette (nicht gezeigt) wurde darauf platziert, um die Falle in einer Vakuum Umgebung mit $<10^{-10}$ mbar benutzen zu können.

a) Metallagen (L1 und D1)



b) Planarisierung des Polymers

c) oberste Metallschicht (L2)

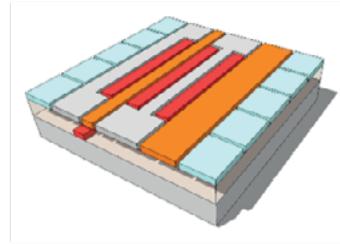


Abbildung 4.8: Herstellungsprozess für mehrlagige Ionenfallen.

a) Aufbringen von Metalllage und Durchkontaktierungsebene auf das Substrat mittels Photolithographie und Galvanik.
b) Aufbringen und Planarisierung des Dielektrikums (Polymer).
c) Aufbringen der obersten Metallschicht durch Wiederholen von Schritt a).

Durch vertikale Stapelung mehrerer solcher Strukturen ist es im Prinzip aber auch möglich, das Prinzip hin zu dreidimensionalen Fallen zu erweitern. Ein wesentliches Element für die Realisierung einer planaren Ionenfalle ist die Wahl eines geeigneten Beschichtungsverfahrens, welches das Versprechen der Skalierbarkeit beispielsweise durch die Verwendung lithographischer Techniken einlöst. Um die Kontrollsignale zur Speicherung und Manipulation der Ionen auch in einer komplexen Struktur mit vielen über die Oberfläche verteilten Quantenregistern zuführen zu können, sollte eine geeignete Beschichtungstechnologie Kontrollsignale, ähnlich einer mehrlagigen Leiterplatte, in zusätzlichen Schichten unterhalb der Elektrodenoberfläche führen können. Diese können dann flexibel mit der obersten Elektrodenoberfläche zur Manipulation der Ionen verbunden werden. Das Verfahren sollte auf einer breiten Auswahl an Substraten realisierbar sein, idealerweise den in [Tabelle 4.1](#) aufgeführten und zusätzlich auf Silizium. Eventuell exponierte Dielektrika sollten so weit wie möglich vor den Ionen verborgen werden. Es sollte auch möglich sein, dicke metallische Leiter zu realisieren, um größere Ströme führen zu können. Gegebenenfalls im Prozess aufgebraute Dielektrika zur elektrischen Isolation der verschiedenen Metalllagen voneinander sollten die gleichen hohen Anforderungen erfüllen, die auch an Substrate gestellt werden (vgl. [Tabelle 4.1](#) unten) und zusätzlich noch strukturierbar sein.

Im Reinraumzentrum der PTB wurde hierzu ein patentierter Prozess entwickelt [21] und

demonstriert [22], [23], der diese Anforderungen hervorragend erfüllt. Dieser Prozess ermöglicht die Realisierung komplexer Fallenstrukturen; dank der breiten Materialauswahl für Substrate können die fabrizierten Fallen sowohl bei Raumtemperatur als auch in einer kryogenen Umgebung verwendet werden.

Der hierzu entwickelte Fabrikationsprozess wird im Folgenden kurz dargestellt (siehe [Abbildung 4.8 a](#)).

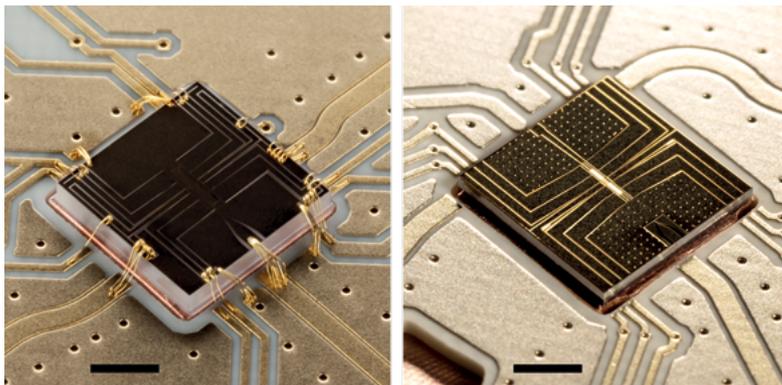
a) Auf einem Substrat wird mittels Photolithographie und Galvanik eine erste Metalllage M1 aufgetragen. Mittels eines weiteren Schrittes von Photolithographie und Galvanik entsteht hierauf eine weitere Metallschicht D1, welche sogenannte „Durchkontaktierungen“ beinhaltet.
b) Die von Metall freien Bereiche werden in einem weiteren Schritt mit einem polymerbasierten Dielektrikum aufgefüllt und anschließend planarisiert, so dass die Oberseiten der Durchkontaktierungen in der planarisierten Oberfläche freiliegen.
c) Hierauf können weitere Schichten von metallischen Leitern M_n und Durchkontaktierungen D_n aufgebracht werden ($n=2,3,\dots$), bis schließlich eine letzte Metallschicht M_n aufgebracht wird und mittels eines finalen Ätzschrittes verbliebene Bereiche mit Dielektrika zwischen den Goldleitern freigestellt werden können.

Beispiele von einfachen leitenden Strukturen, bei denen alle Verbindungen in einer Ebene liegen, wie in [Abbildung 4.9](#) (links) dargestellt, wurden mittels Photolithographie und Galvanik hergestellt. Insbesondere in Hinblick auf die Skalierbarkeit ist es aber wünschenswert, Zuleitungen für Kontrollfelder auch in mehrlagigen Strukturen führen zu können oder gar durch das Substrat der Strukturen hindurchführen zu können, wie in [Abbildung 4.10](#) (rechts) dargestellt.

Dass es sich dabei um eine genuine Mehrlagen-Struktur handelt, wird in der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme [Abbildung 4.10](#) deutlich. Hier wurde eine Chipstruktur durchgebrochen, um die Mehrlagen-Struktur sichtbar zu machen. Man erkennt deutlich eine untere Ebene (L1), die sich beispielsweise zum Führen von Kontrollsignalen (D1) eignet, sowie eine obere Metalllage (L2).

Abbildung 4.9: Links: Einlagige Oberflächenfalle mit Drahtbonds elektrisch verbunden mit einer Leiterplatte aus Rogers 4350B™ Material.

Rechts: Eine Mehrlagen-Falle bevor die elektrischen Verbindungen (Drahtbonds) zwischen den Fallenelektroden und der Leiterplatte aufgebracht wurden. Die schwarze Maßstabsleiste entspricht ~ 2 mm.



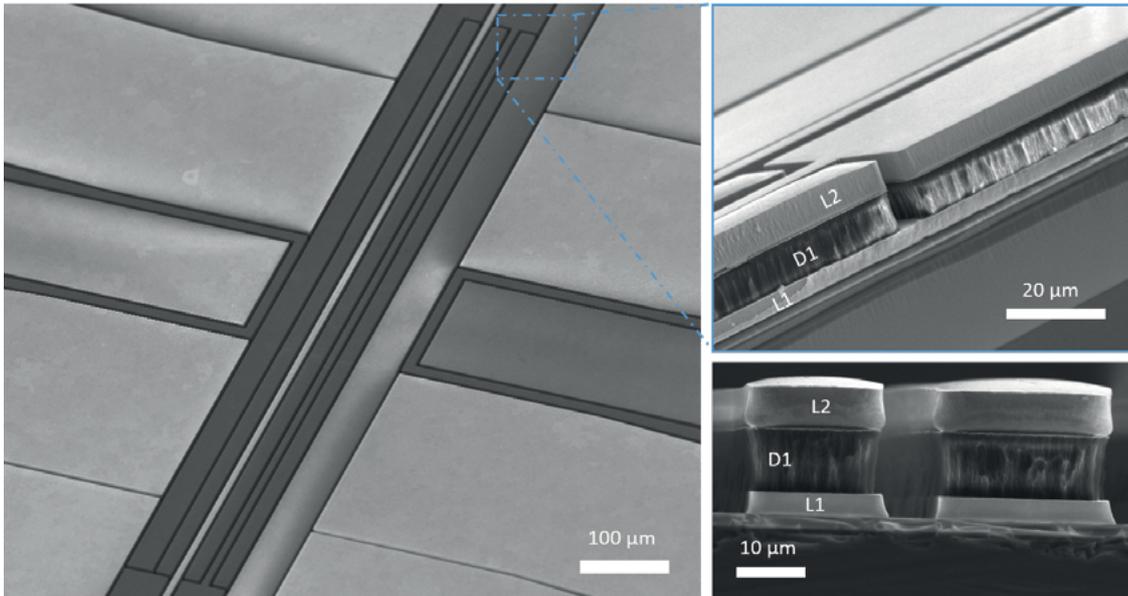


Abbildung 4.10:
Links: REM-Abbildung der inneren Seite einer mehrlagigen Ionenfalle die an der PTB fabriziert wurde.

Rechts oben: Querschnitt des geschnittenen Chips, in dem Lage 1 (L1), Durchkontaktierung (D1) und Lage 2 (L2) zu erkennen sind.

Rechts unten: Querschnitt von Teststrukturen; die Herstellungsmethode ermöglicht Lücken mit hohem Aspektverhältnis (1 : 4) zwischen den Fallenelektroden.

Die oberhalb der Oberfläche gespeicherten Ionen werden im Wesentlichen durch von der obersten Lage ausgehende Signale beeinflusst. Die unteren Zuführungslagen werden an geeigneten Stellen mithilfe der Durchkontaktierungsebene mit der obersten Lage verbunden. Zu den wesentlichen Vorteilen des hier vorgestellten Prozesses gehört die Skalierbarkeit zu im Prinzip beliebig vielen Metalllagen, da hierbei aufgrund der Planarisierung keine Unebenheiten akkumuliert werden. Weiterhin lassen sich sehr dicke Metallschichten realisieren. Dies ist wichtig, weil in den Lücken zwischen den Elektroden der obersten Metalllage Dielektrika, in den unteren Lagen und vom Substrat, für das Ion „sichtbar“ werden können. Dies ist unerwünscht, denn Dielektrika können sich in einer unkontrollierten Weise aufladen und die Ionen beeinflussen. In dem demonstrierten Prozess lassen sich sehr dicke metallische Schichten ($>10\ \mu\text{m}$) mit sehr kleinen lateralen Lücken von $2\ \mu\text{m}$ herstellen, sodass verbliebene Dielektrika rein geometrisch sehr effektiv vor den Ionen versteckt werden. Weiterhin konnte durch Optimierung des Galvanikprozesses die Oberflächenrauigkeit bis auf unter $20\ \text{nm RMS}$ gesenkt werden, was insbesondere interessant werden kann, wenn weitere Fabrikationstechniken integriert werden sollen und was auch Vorteile für die Kontrolle der Ionen oberhalb der Oberfläche hat.

Die Ionenfallen der Zukunft

Ionenfallen wurden als eine der Schlüsselkomponenten für neue Quantentechnologien in Deutschland und weltweit erkannt. Allerdings muss noch viel getan werden, damit die perfekte Plattform für Quantencomputer, Quantensimulationen und Quantenmetrologie realisiert werden kann.

Welche Materialien für die Ionenfallen?

Die ersten skalierbaren Fallen für Quantenanwendungen wurden mit Al_2O_3 -Wafeln aufgebaut. Dieses Material besitzt gute, elektrische Eigenschaften und lässt sich mit Laserablation präzise bearbeiten, weist aber eine schlechte Wärmeleitfähigkeit vor. Verschiedene Materialien für den Fallenbau wurden an der PTB getestet. Das Glasfaser-verstärkte Leiterplattenmaterial „RO4350B“ hat kleine, dielektrische Verluste (siehe [Tabelle 4.1](#)) und kann leicht geschnitten, beschichtet und strukturiert werden. Mit diesem Material können Fallen mit guten Eigenschaften zu einem erschwinglichen Preis hergestellt werden. Die High-end-Fallen der PTB werden mit einer AlN-Keramik gefertigt. Dieses Material besitzt sehr geringe, elektrische Verluste und hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit, die zu einer verringerten Erwärmung der Falle führt. Die präzise Bearbeitung eines solchen Materials ist aber aufwendiger als Al_2O_3 . Nach einem mehrjährigen Entwicklungsprozess gelang es an der PTB mit einem gepulsten ns-Lasersystem, hoch-präzise Fallen basierend auf diesem Material herzustellen. Diese Fallen befinden sich aktuell im Einsatz in den Atomuhren und zeigten hervorragende Eigenschaften für die Frequenzmetrologie.

Darüber hinaus werden neue Materialien mit neuen Bearbeitungstechnologien getestet. Insbesondere der Einsatz von fs-Laser-basierten Bearbeitungsmethoden erlaubt es, neue, noch vorteilhaftere Materialien zu erschließen.

Eine aus Diamant bestehende Falle wird beispielsweise im Rahmen des BMBF-geförderten IDEAL-Projekts entwickelt (siehe nächster Abschnitt). Auch Materialien wie Quarzglas und Saphir kommen in Frage. Subtraktives Laserätzen erlaubt es, Elektroden und Volumina mit einer Präzision von $1\ \mu\text{m}$ zu definieren.

Integration von Optik

Die gespeicherten Ionen müssen lasergekühlt und mit Lasern abgefragt werden, damit ihr Anregungszustand detektiert werden kann. Typischerweise werden zu diesem Zweck Laserstrahlen von außerhalb der Vakuumkammer auf die Ionen gerichtet. Die Fluoreszenz der Ionen wird in der Regel auch mit voluminöser Optik außerhalb der Kammer gesammelt. Nur wenige Segmente können damit mit ausreichender Auflösung gleich-

zeitig abgebildet werden. Bei 2D-Fallen gehen die Laserstrahlen sehr nah an der Oberfläche der Fallenelektroden entlang. Um tausende Qubits manipulieren zu können, müssen sehr breite Wafer benutzt werden. Das führt dazu, dass die Strahlen wegen ihrer Divergenz die Fallenelektroden berühren. Damit die Anzahl an Qubits erhöht werden kann, sollen die Optiken sehr kompakt und möglichst nah an der Falle integriert werden. Integrierte Mikrooptiken wie Fresnel-Linsen oder Wellenleiter wurden für die Fluoreszenzdetektion

Tabelle 4.1: Ausgewählte Eigenschaften von Materialien für den Fallenbau [24] – [32]. Die Werte für Saphir hängen von der Kristallrichtung ab [26].

	Quarzglas	Saphir	Rogers (RO4350B™)	Al ₂ O ₃	AlN	CVD-Diamant
Dielektrischer Verlustfaktor ($\times 10^{-4}$)	<4	1	37 (10 GHz)	1 (1 MHz)	4	10 (15 MHz)
Dielektrische Konstante	3,8	9,4–11,5	3,5	9,9	8,9	5,7
Thermische Leitfähigkeit ($W m^{-1} K^{-1}$) bei Raumtemperatur	1,4	23,0–25,8	0,7	32	175	>1800
Ausdehnungskoeffizient ($10^{-6} K^{-1}$) bei Raumtemperatur	0,52	5,9–7,0 (70° C)	10–32	7,2	4,6	1,0

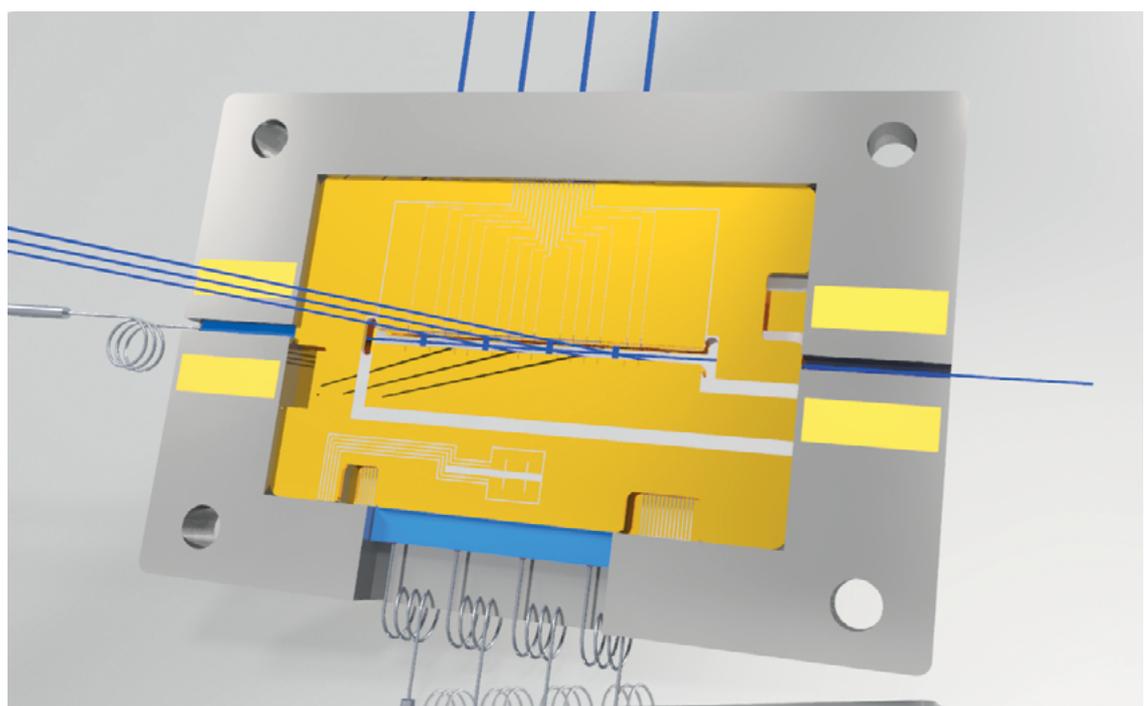


Abbildung 4.11: Konzept von der Ionenfalle mit integrierter Optik. Die Mikrooptiken für die Fluoreszenzdetektion werden hier nicht gezeigt.

und Laserstrahlen erprobt [33], [34]. Zusätzliche Abbildungsobjektive oder Freistrahl-optik außerhalb der Vakuumkammer mussten aber immer noch verwendet werden, um die Ionen vollständig abzufragen und zu detektieren.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts „Integrierte Diamant Ionenfalle“ (IDEAL) wird in der PTB eine Falle mit integrierter Optik entwickelt, sowohl für die Fluoreszenzdetektion als auch für die Formung aller benötigten Laserstrahlen (siehe *Abbildung 4.11*). In Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie und von der Leibniz Universität Hannover werden Chips aus Diamant präzise bearbeitet. Integrierte, achromatische Mikrooptiken werden verwendet, um die Laserstrahlen aus drei unabhängigen Richtungen auf die Ionen richten zu können. Ein Mikrolinsen-Array wird die Fluoreszenz von Ionen, die in unterschiedlichen Segmenten gespeichert werden, gleichzeitig sammeln.

Hybride Integration

Ein funktionaler Quantencomputer oder Quantensimulator erfordert über die Skalierung der Fallenelektroden im Rahmen der QCCD-Architektur die Skalierung weiterer Kontroll- und Manipulationstechniken. Wie in dem Artikel „Quantenvielteilchenphysik und Quantencomputer“ in diesem Heft bereits beschrieben, können mit dem oben beschriebenen Mikrofabrikationsprozess die elementaren Gatteroperationen eines zukünftigen Quantenprozessors auf Basis einzelner Ionen realisiert und skaliert werden. Darüber hinaus ist es auch wünschenswert, die Zuführung der elektrischen Signale skalierbarer zu gestalten. Vergleiche hierzu *Abbildung 4.9* links, wo die Kontaktierung von der Oberseite erfolgt. Insbesondere in Hinblick auf die in jedem Szenario erforderliche Kühlung, Zustandspräparation und Detektion der Ionen mittels Laserstrahlen ist es erforderlich, die elektrischen Verbindungen aus dem Bereich der optischen Kontrolle von der Vorderseite auf die Rückseite des Chips zu verlegen. Hierzu wird an der PTB ein Prozess entwickelt, der es erlaubt, die Elektroden auch mittels Substrat-Durchkontaktierungen von der Rückseite des Substrats her zu kontaktieren. Dies ermöglicht es auch, die Fallenstrukturen mit anderen elektronischen Baugruppen und Standard-Prozessen hybrid zu integrieren. Die Skizze in *Abbildung 4.12* zeigt ein solches Szenario, wo eine Ionenfallen-Chip zu Illustrationszwecken auf einer in CMOS gefertigten Struktur aufgesetzt ist. Ein solcher Hybrid-Integrationsansatz erlaubt es, entwickelte und demonstrierte Vorteile verschiedener Mikrofabrikationsverfahren miteinander zu verknüpfen.

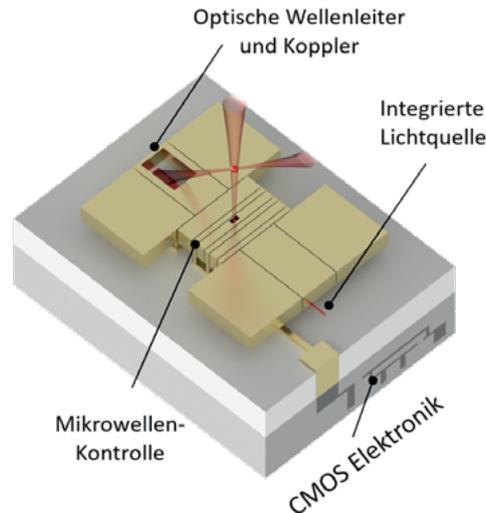


Abbildung 4.12: Szenario zur Integration verschiedener elektronischer und optischer Kontrolltechniken am Beispiel einer Oberflächenfalle.

Weiterhin lässt das entwickelte Beschichtungsverfahren die Integration weiterer optischer Kontrolltechnologien zu, die in Ergänzung zu den oben beschriebenen Mikrooptiken auf Chip-Ebene durchgeführt werden könnten. Hier sind in den letzten Jahren interessante Ansätze beispielsweise an den MIT-Lincoln Laboratories oder an der ETH Zürich verfolgt worden. Diese lassen sich mit dem beschriebenen Verfahren kombinieren. Darüber hinaus könnte die im Exzellenzcluster *Quantum Frontiers* bestehende Expertise genutzt werden, um aktive optische Elemente und integrierte Detektoren in den Strukturen einzubetten. Das verwendete Dielektrikum erlaubt es, diese zuerst unabhängig direkt auf dem Substrat auszuführen und nach Aufbringen einer Schutzschicht den für die Ionenfalle erforderlichen Prozess auf dem bereits prozessierten Substrat durchzuführen. Anschließend könnten die integrierten Elemente in einem finalen Schritt lokal selektiv für optischen Zugang zu den Ionen in ausgewählten Bereichen wieder freigelegt werden.

Literatur

- [1] W. Paul und H. Steinwedel, „Notizen: Ein neues Massenspektrometer ohne Magnetfeld“, *Z. Naturforsch.* **8a**, 448–450 (1953)
- [2] W. Paul und H. Steinwedel, D-Patent DE944900C „Verfahren zur Trennung bzw. zum getrennten Nachweis von Ionen verschiedener Ladung“ (1956)
- [3] W. Paul und H. Steinwedel, US-Patent 2939952 „Apparatus for separating charged particles of different specific charges“ (1960)
- [4] <http://www.nobelprize.org>, letzter Aufruf: 18.02.2020
- [5] T.H. Maiman, „Stimulated Optical Radiation in Ruby“, *Nature* **187**, 493–494 (1960)
- [6] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, P.E. Toschek und H. Dehmelt, „Localized visible Ba⁺ mono-ion oscillator“, *Phys. Rev. A* **22**, 1137 (1980)

- [7] D.J. Wineland, C. Monroe, W.M. Itano, D. Leibfried, B.E. King und D.M. Meekhof, „Experimental issues in coherent quantum-state manipulation of trapped atomic ions“, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* **103**, 259 (1998)
- [8] D.P. DiVincenzo, „The Physical Implementation of Quantum Computation“, *Fortschr. Phys.* **48**, 771–783 (2000)
- [9] D. Kielpinski, C. Monroe und D.J. Wineland, „Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer“, *Nature* **417**, 709–711 (2002).
- [10] M. A. Rowe, A. Ben-Kish, B. DeMarco, D. Leibfried, V. Meyer, J. Beall, J. Britton, J. Hughes, W.M. Itano, B. Jelenkovic, C. Langer, T. Rosenband und D. J. Wineland, „Transport of Quantum States and Separation of Ions in a Dual RF Ion Trap“, *Quant. Inf. Comp.* **2**, 257 (2002)
- [11] W.K. Hensinger, S. Olmschenk, D. Stick, D. Hucul, M. Yeo, M. Acton, L. Deslauriers und C. Monroe, „T-junction ion trap array for two-dimensional ion shuttling, storage, and manipulation“, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 034101 (2006)
- [12] S.A. Schulz, U. Poschinger, F. Ziesel und F. Schmidt-Kaler, „Sideband cooling and coherent dynamics in a microchip multi-segmented ion trap“, *New J. Phys.* **10**, 045007–045021 (2008)
- [13] K.R. Brown, C. Ospelkaus, Y. Colombe, A.C. Wilson, D. Leibfried und D.J. Wineland, „Coupled quantized mechanical oscillators“, *Nature* **471**, 196 (2011)
- [14] M. Harlander, R. Lechner, M. Brownnutt, R. Blatt und W. Hänsel, „Trapped-ion antennae for the transmission of quantum information“, *Nature* **471**, 200–203 (2011)
- [15] R.B. Blakestad, C. Ospelkaus, A.P. VanDevender, J.M. Amini, J. Britton, D. Leibfried und D.J. Wineland, „High-Fidelity Transport of Trapped-Ion Qubits through an X-Junction Trap Array“, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 153002 (2009)
- [16] S.M. Brewer, J.-S. Chen, A.M. Hankin, E.R. Clements, C.-W. Chou, D.J. Wineland, D.B. Hume und D.R. Leibbrandt, „ $^{27}\text{Al}^+$ Quantum-Logic Clock with a Systematic Uncertainty below 10^{-18} “, *Phys. Rev. Lett.* **123**, 033201 (2019)
- [17] N. Herschbach, K. Pyka, J. Keller und T.E. Mehlstäubler, „Linear Paul trap design for an optical clock with Coulomb crystals“, *Applied Physics B* **107**, 891–906 (2012)
- [18] J. Keller, T. Burgermeister, D. Kalincev, A. Didier, A.P. Kulosa, T. Nordmann, J. Kiethe und T.E. Mehlstäubler, „Controlling systematic frequency uncertainties at the 10^{-19} level in linear Coulomb crystals“, *Phys. Rev. A* **99**, 013405 (2019)
- [19] J. Chiaverini, R.B. Blakestad, J. Britton, J.D. Jost, C. Langer, D. Leibfried und D. J. Wineland, „Surface-electrode architecture for ion-trap quantum information processing“, *Quant. Inf. Comp.* **5**, 419 (2005)
- [20] 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 und D.J. Wineland, „Microfabricated Surface-Electrode Ion Trap for Scalable Quantum Information Processing“, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 253003 (2006)
- [21] A. Bautista-Salvador, G. Zarantonello, H. Hahn, A. Preciado-Grijalva, J. Morgner, M. Wahnschaffe und C. Ospelkaus, „Multilayer Ion Trap Technology for Scalable Quantum Computing and Quantum Simulation“, *New Journal of Physics* **21**, 043011 (2019)
- [22] A. Bautista-Salvador, C. Ospelkaus, M. Wahnschaffe und J. Morgner, D-Patent DE 2018 10 111 220 „Verfahren zum Herstellen einer Atomfalle sowie Atomfalle“ (2019)
- [23] H. Hahn G. Zarantonello, A. Bautista-Salvador, M. Wahnschaffe, M. Kohnen, J. Schoebel, P.O. Schmidt und C. Ospelkaus, „Multilayer Ion Trap with Three-Dimensional Microwave Circuitry for Scalable Quantum Logic Applications“, *Applied Physics B* **125**, 154 (2019)
- [24] Quarzglas: <http://valleydesign.com/7940.htm>, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [25] Quarzglas: https://www.hebo-glass.com/pdf/datasheets/HEBO_Spezialglas_FSUV1_FQVIS2.pdf, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [26] Saphir: <http://valleydesign.com/sappprop.htm>, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [27] Saphir: https://global.kyocera.com/prdct/fc/product/pdf/s_c_sapphire.pdf, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [28] Rogers: <https://rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf>, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [29] Al_2O_3 : <https://global.kyocera.com/prdct/fc/list/material/alumina/alumina.html>, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [30] AlN: <http://customdicing.com/aln-links.htm>, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [31] AlN: T. Burgermeister, „Development and characterization of a linear ion trap for an improved optical clock performance“, Dissertation (2019)
- [32] CVD-Diamant: http://www.diamond-materials.com/downloads/cvd_diamond_booklet.pdf, letzter Aufruf: 03.08.2020
- [33] CVD-Diamant: A. Ibarra, M. González, R. Vila und J. Mollá, „Wide frequency dielectric properties of CVD diamond“, *Diamond and Related Material* **6**, 856–859, (1997)
- [34] A. Jechow, E.W. Streed, B.G. Norton, M.J. Petrasiusas und D. Kielpinski, „Wavelength-scale imaging of trapped ions using a phase Fresnel lens“, *Opt. Lett.* **36**, 1371–1373 (2011)

- [35] R.J. Niffenegger, J. Stuart, C. Sorace-Agaskar, D. Kharas, S. Bramhavar, C.D. Bruzewicz, W. Loh, R. McConnell, D. Reens, G.N. West, J.M. Sage und J. Chiaverini, „Integrated optical control and enhanced coherence of ion qubits via multi-wavelength photonics”, arXiv:2001.05052 (2020)

