

Digitale Manipulation

Die Echtzeit-Signalverarbeitung ermöglicht es, einzelne Ionen in einer Penning-Falle dynamisch zu manipulieren.

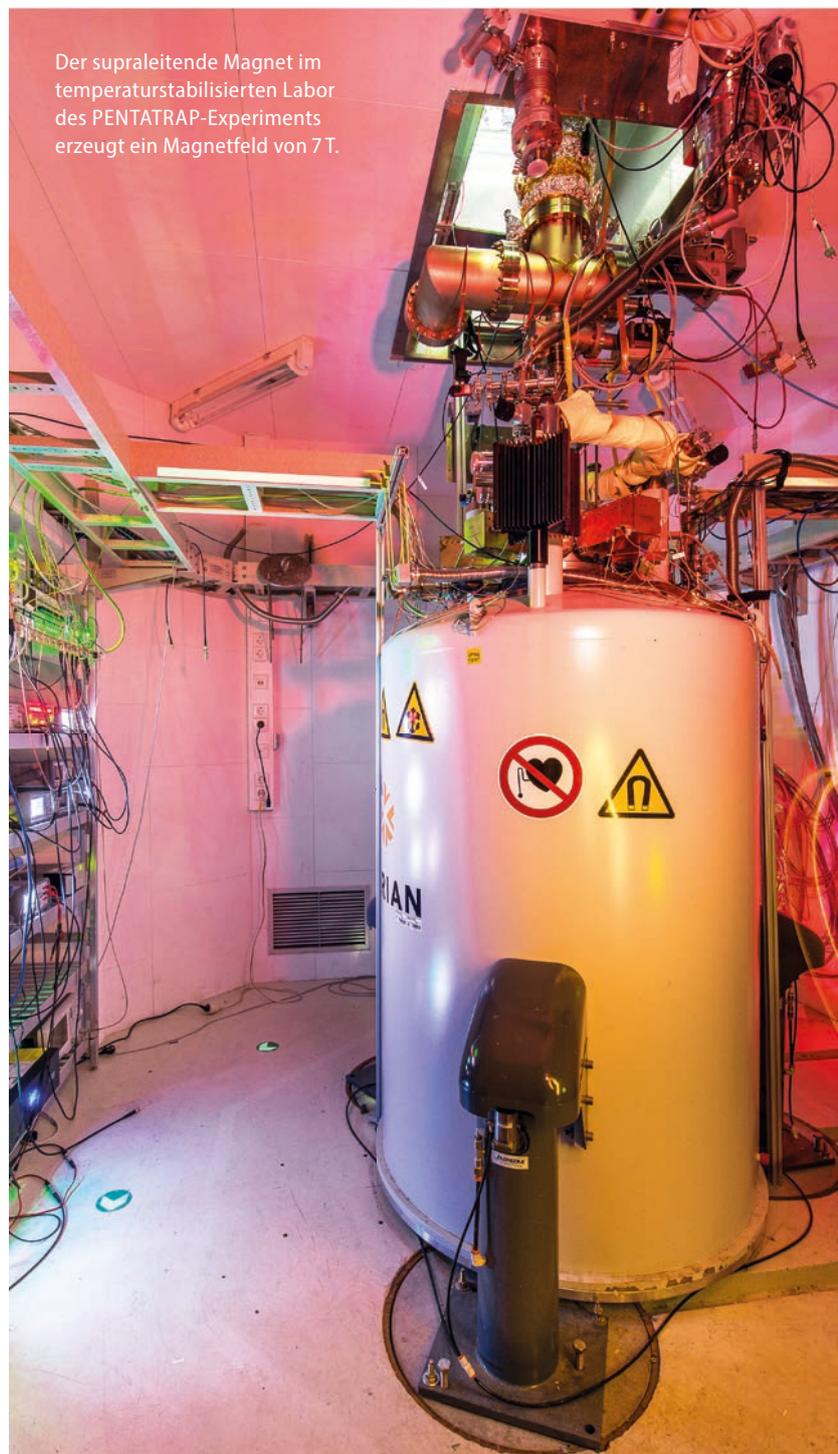
Jost Herkenhoff

Experimente mit Penning-Fallen liefern wichtige Daten, um fundamentale Theorien zu überprüfen. Hierbei werden winzige Eigenschwingungen eines einzelnen gespeicherten Ions aufgenommen, um seine Masse präzise zu ermitteln. Durch elektronische Rückkopplung der Schwingungssignale auf das Ion lässt sich dessen Bewegung manipulieren. Dies ermöglicht es unter anderem, die Temperatur des Ions stark zu kühlen. Ein Rückkopplungssystem, das die Schwingung des Ions digitalisiert und in Echtzeit weiterverarbeitet, eröffnet neue Möglichkeiten der Ionenmanipulation.

Einsteins wahrscheinlich berühmteste Formel $E = mc^2$ beschreibt die Äquivalenz von Energie und Masse und bildet mit der zugrundeliegenden Speziellen Relativitätstheorie einen Grundpfeiler der modernen Physik. Die aktuell genauesten Experimente zum direkten Test dieser Formel kombinieren Ergebnisse aus Gammaskpektrometern zur Bestimmung der Kernbindungsenergie mit hochpräzisen Massenmessungen von Ionen mittels Penning-Fallen-Massenspektrometrie [1]. Zuletzt gelang damit eine Übereinstimmung zu mindestens 99,99996 Prozent [2].

Das Penning-Fallen-Experiment PENTATRAP am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg zielt darauf ab, die Theorie um eine Größenordnung genauer zu überprüfen [3, 4]. Eine der Hauptkomponenten ist ein supraleitender Magnet, der ein homogenes Magnetfeld von rund 7 Tesla erzeugt. Dieses zwingt ein zu vermessendes Ion aufgrund der Lorentz-Kraft auf eine Kreisbahn, wodurch es in der Ebene gespeichert ist. Die Kreisfrequenz dieser Bewegung ist durch $\omega = qB/m$ gegeben. Daher leitet sich die Masse m eines Ions mit Ladungszustand q aus einer Frequenzmessung ab.

Eine Struktur aus fünf Elektroden innerhalb des Magnetfeldes (Abb. 1b) erzeugt ein elektrostatisches Quadrupolfeld, welches das Entweichen des Ions in Richtung der Magnetfeldlinien verhindert und es somit vollständig einschließt. Allerdings beschreibt die Ionenbewegung aufgrund der Überlagerung von magnetischem und elektrostatischem Feld keine perfekte Kreisbahn, sondern folgt einer komplexen Trajektorie aus drei unabhängigen harmonischen Oszillationen: der Axialbewegung sowie den radialen Zyklotron- und Magnetronbewegungen (Abb. 1a). Aufgrund der modifizierten Ionenbewegung folgt für die Kreisfrequenz: $\omega = \sqrt{\omega_a^2 + \omega_z^2 + \omega_m^2}$. Zur Bestimmung der Ionenmas-



Der supraleitende Magnet im temperaturstabilisierten Labor des PENTATRAP-Experiments erzeugt ein Magnetfeld von 7 T.

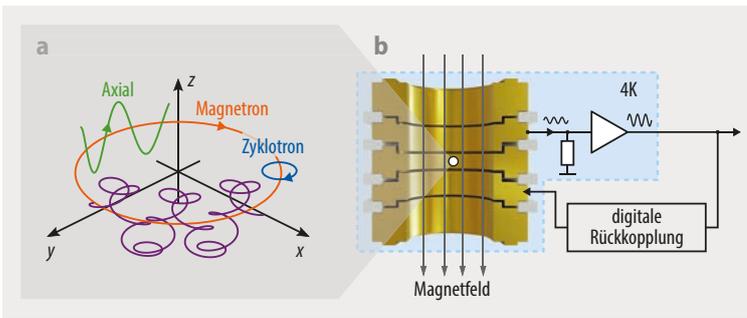


Abb. 1 Durch die Überlagerung von drei Oszillationen entsteht in der Penning-Falle eine komplexe Teilchenbewegung (lila, a). Die Detektion der axialen Bewegung erfolgt durch Messung des Stroms, den das Ion in einer der fünf Fallenelektroden induziert (b). Das Signal wird digital weiterverarbeitet und über eine Elektrode wieder in die Penning-Falle eingespeist.

se gilt es, alle drei Bewegungsfrequenzen (ω_a , ω_z und ω_m) zu messen.

Um die Bewegungsfrequenzen zu ermitteln und das Ion zu detektieren, wird mittels hochsensitiver Elektronik ein Strom von einigen Femtoampere gemessen, der durch die Bewegung des Ions als Spiegelstrom in den Elektroden der Penning-Falle entsteht. Hierbei überträgt sich Energie aus der Oszillation des Ions ins Detektionssystem, wodurch die Bewegungsamplitude und damit die effektive Temperatur des Ions abnehmen. Diesem sog. Widerstandskühlen wirkt das thermische Rauschen des Detektionssystems entgegen, sodass das Ion nicht bis zum absoluten Nullpunkt abkühlen kann. Da der Aufbau von PENTATRAP mit samt Detektionssystem mit flüssigem Helium auf etwa 4 K gekühlt wird, pendelt sich auch die Temperatur des Ions dort ein. Für hochpräzise Massenmessungen ist dies essenziell, da bei großen Bewegungsamplituden ungewollte systematische Effekte zum Tragen kommen und sich Fehler im Aufbau wie Inhomogenitäten des Magnetfeldes stärker auswirken und die Messgenauigkeit beeinträchtigen.

Für die angestrebte Messgenauigkeit von 10^{-12} [4] ist die Temperatur des Ions aber noch zu hoch. Daher kommt das Rückkopplungskühlen zum Einsatz, bei dem das Ionensignal nach elektronischer Verarbeitung auf eine Elektrode der Penning-Falle zurückgeführt wird und so eine Kraft auf das Ion ausübt. Ist das Ionensignal genau um 180° phasenverschoben, wirkt diese Kraft der Ionenbewegung genau entgegen (negative Rückkopplung). Dadurch verringern sich die Bewegungsamplitude und die Temperatur des Ions [5]. Diese Technik ist vergleichbar mit der aktiven Rauschunterdrückung, wie sie heutzutage in manchen Kopfhörern zu finden ist. Eine Phasenverschiebung von 0° regt das Ion dagegen weiter an (positive Rückkopplung).

Dies unterdrückt das Einkühlen und ermöglicht es, das Ion äußerst schnell zu detektieren [9]. Da bereits eine minimale Abweichung der Phasenverschiebung von 0° bzw. 180° die Ionenfrequenz moduliert und somit die Massenmessungen erheblich beeinflusst, erfordert das Rückkopplungssystem eine äußerst genaue und stabile Signalverarbeitung.

Digitale Rückkopplung

Bei PENTATRAP übernimmt ein digitales System die Signalverarbeitung. Dieses übertrifft analoge Rückkopplungssysteme in puncto Stabilitätsanforderungen um Größenordnungen. Zudem erlaubt die digitale Implementierung bisher schwer realisierbare Funktionalitäten und bietet deutlich höhere Flexibilität.

Die Signalverarbeitung findet auf einem „Zynq 7000“ von Xilinx statt: einem modernen System-on-Chip, der zwei ARM-Prozessorkerne mit einem Field Programmable Gate Array (FPGA) vereint. Das sind integrierte Schaltkreise aus hunderttausenden zunächst unverdrahteten Logikeinheiten, die erst durch Laden einer Konfigurationsdatei intern miteinander verschaltet werden und so nahezu jede erdenkliche digitale Funktion abbilden können. Anders als Prozessoren, bei denen eine Software sequenziell abläuft, lassen sich damit komplexe Schaltungen direkt in der Hardware realisieren. Hierdurch eignen sich FPGAs besonders, um hochspezialisierte Algorithmen zur Echtzeit-Signalverarbeitung zu implementieren – ideal für ein Rückkopplungssystem.

Im Rückkopplungssystem wird über einen Analog-Digital-Converter (ADC) das verstärkte Ionensignal zunächst in einen digitalen Datenstrom umgewandelt und im FPGA in zwei identische, parallele Verarbeitungspfade eingespeist (**Abb. 2**). Jeder Pfad besteht aus einem digitalen Dämpfungsglied und einem digitalen Phasenschieber mit einer Auflösung von etwa $0,002^\circ$. Die verarbeiteten Datenströme werden anschließend über zwei Digital-Analog-Converter (DAC) zurück in analoge Signale umgewandelt, über Dämpfungsglieder auf die benötigte Signalamplitude

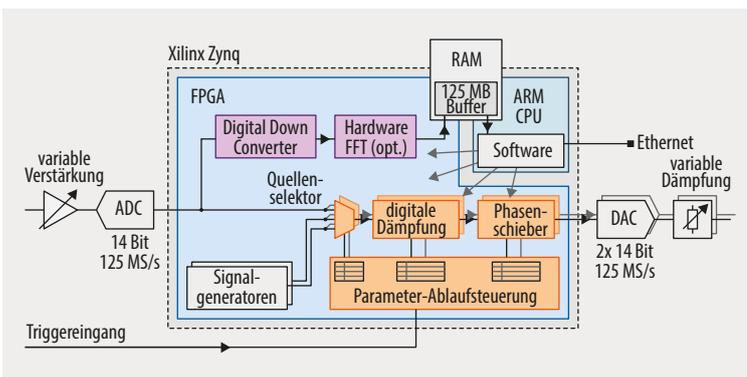


Abb. 2 Nach Digitalisierung des Ionensignals mittels ADC verarbeitet ein FPGA den Datenstrom. Zwei DACs wandeln das Ergebnis in analoge Signale um, sodass es sich erneut in die Penning-Falle einspeisen lässt. Die in lila dargestellten Blöcke dienen zur Aufnahme eines Frequenzspektrums. Alle Komponenten innerhalb des FPGAs lassen sich per Software parametrisieren.

de heruntersetzt und als Rückkopplungssignale in die Penning-Falle zurückgeführt. Zwei Rückkopplungssignale sind notwendig, um unerwünschte Signalkopplungen zu kompensieren. Die Parameter beider Pfade (Dämpfung und Phasenverschiebung) sind unabhängig voneinander einstellbar. Zudem sind mehrschrittige Parameterabfolgen möglich, die sequenziell in die Rückkopplungspfade geladen werden. Das Weiterschalten erfolgt über ein externes Triggersignal mit einer internen Verzögerung von maximal 8 ns, sodass die Parameterabfolge mit dem Messablauf synchronisierbar ist.

Das hochpräzise dynamische Anpassen des Rückkopplungssystems erlaubt neue Messtechniken. Über zwei Signalgeneratoren lassen sich Sinusschwingungen mit einstellbarer Frequenz in die Rückkopplungspfade einspeisen, um beispielsweise Pulse für die kontrollierte Anregung des Ions zu generieren. Zusätzlich wurde im FPGA ein komplettes Messsystem implementiert, welches das Ionensignal heruntermischet (Digital Down-Conversion), filtert und mittels schneller Fourier-Transformation ein Frequenzspektrum berechnet. Diese Daten werden in den Arbeitsspeicher geschrieben, von wo aus die Prozessoren sie weiterverarbeiten können.

Mit diesem System gelang es, eine selbstgetriebene Schwingung des Ions zu realisieren, bei der eine positive Rückkopplung ein Einkühlen des Ions verhindert und die Ionenbewegung auf einer konstanten Amplitude hält. Da die positive Rückkopplung intrinsisch instabil ist, bedarf es einer aktiven Regelung der Rückkopplungsverstärkung, damit die Bewegungsamplitude nicht divergiert. Dafür überwacht das integrierte Messsystem stetig die Signalamplitude. Eine Software-Regelschleife berechnet Korrekturwerte für die Rückkopplungsverstärkung.

Die freie Konfigurierbarkeit eröffnet weitere Einsatzmöglichkeiten. So lassen sich komplexe Messaufbauten, bestehend aus Signalgeneratoren, Oszilloskopen oder

Spektrumanalysatoren, als monolithisches digitales System implementieren. Das System trägt unmittelbar dazu bei, die vom PENTATRAP-Experiment angestrebte Genauigkeit von 10^{-12} zu erreichen. Neben dem direkten Test von $E = mc^2$ sind auch Tests der Quantenelektrodynamik im bisher wenig erforschten Bereich extrem starker Felder möglich [6] oder die Ermittlung eines oberen Limits der Neutrinomasse [7]. Dies könnte Hinweise auf Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik liefern.

Literatur

- [1] K. Blaum, Y. N. Novikov und G. Werth, *Contemp. Phys.* **51**, 149 (2009)
- [2] S. Rainville et al., *Nature* **438**, 1096 (2005)
- [3] C. Roux et al., *Appl. Phys. B* **107**, 997 (2011)
- [4] J. Repp et al., *Appl. Phys. B* **107**, 983 (2012)
- [5] B. D'Urso, B. Odom und G. Gabrielse, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 043001 (2003)
- [6] R. X. Schüssler et al., *Nature* **581**, 42 (2020)
- [7] L. Gastaldo et al., *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **226**, 1623 (2017)
- [8] L. S. Brown und G. Gabrielse, *Rev. Mod. Phys.* **58**, 233 (1986)
- [9] H. Dehmelt, W. Nagourney und J. Sandberg, *PNAS* **83**, 5761 (1986)

Der Autor



Jost Herkenhoff studierte Elektrotechnik mit Fachrichtung Informationstechnik an der Hochschule Bremen. Das hier vorgestellte digitale Rückkopplungssystem entwickelte er während seiner Bachelorarbeit am MPI für Kernphysik in Heidelberg. Aktuell bereitet er seine Promotion in Physik an der Universität Heidelberg vor.

Jost Herkenhoff, B.Sc., Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupferheckweg 1, 69117 Heidelberg

Reinraum-Services

PiNK[®]

PiNK Vakuumtechnik hat die Reinraum-Infrastruktur auf über 4.000 m² erweitert.

Feinstreinigung, RGA-Qualifizierung und Reinraum-Montage

Höchste Sauberkeit, die man messen kann

- Reinraum-Nassreinigungsprozesse: vollautomatische Ultraschall-Reinigung für Bauteile bis 1.110 x 650 x 400 mm, Feinstreinigung von Großteilen bis 2,5 t Gewicht
- Reinraum-Trockenreinigungsprozesse: Ausheizen im Ultrahochvakuum unter Reinraumbedingungen, integrierte optionale Niederdruckplasma-Reinigung
- Quantitative Restgasanalyse für Massen von 0-512 amu
- Montageservice für gereinigte Bauteile im Reinraum

UHV-Ofen mit optionaler Plasma-Reinigung und integriertem Massenspektrometer