

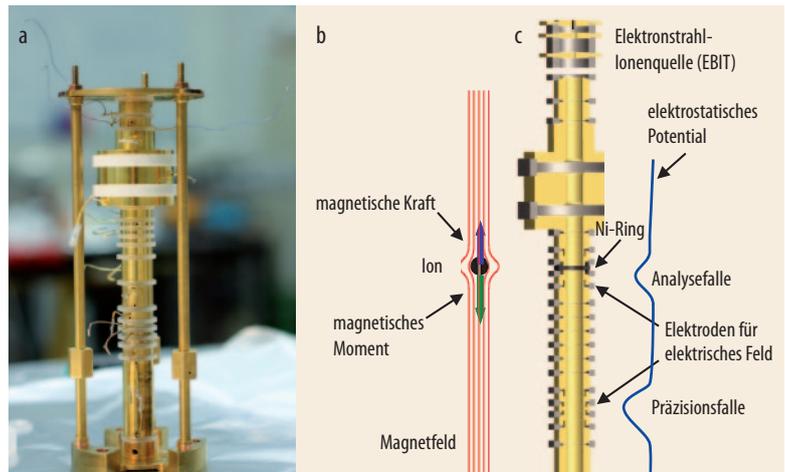
## ■ Das Elektron auf der Präzisionswaage

Deutschen Physikern gelingt es, die Masse des Elektrons um einem Faktor 13 genauer als bisher zu bestimmen.

1) CODATA Internationally recommended values of the Fundamental Physical Constants <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>

Das Elektron bestimmt fast alle elektrischen Phänomene und ist für das Verhalten und die Reaktionen der Atome und Moleküle verantwortlich. Doch viele seiner Eigenschaften sind noch immer ein Rätsel. So wissen wir nur, dass sein Radius kleiner als  $2 \cdot 10^{-20}$  Meter sein muss, wahrscheinlich ist es sogar punktförmig. Das Elektron ist das leichteste elektrisch geladene Elementarteilchen. Seine Masse gibt CODATA derzeit mit  $9,109\,382\,91(40) \cdot 10^{-31}$  Kilogramm an.<sup>1)</sup> Ladung und Masse des Elektrons gehen als fundamentaler Parameter in das Standardmodell und viele grundlegende Berechnungen ein. Leider sind diese Größen nicht vorhersagbar, sondern müssen gemessen werden. Daher bemühen sich Physiker, Experimente zu entwickeln, mit denen sich die Genauigkeit erhöhen lässt.

Für die Präzisionsmassenmessungen dienen heute in der Regel Penning-Fallen [1], die geladene Teilchen in einer Kombination aus elektro- und magnetostatischen Feldern speichern. Die Teilchen vollführen darin eine charakteristische Eigenbewegung, aus der man ihre Umlauffrequenz bestimmen kann, die Zyklotronfrequenz. Diese wiederum lässt bei Kenntnis der Magnetfeldstärke einen Rückschluss auf die Masse des gespeicherten Teilchens zu. Dazu dient üblicherweise ein zweites



Teilchen mit bekannter Masse, um die Frequenzen vergleichen zu können. Allerdings macht die äußerst geringe Masse des Elektrons eine genaue Bestimmung sehr schwierig, weil es schon bei den kleinsten Bewegungsamplituden großen systematischen Verschiebungen unterliegt, unter anderem aufgrund der relativistischen Massenzunahme.

Eine deutlich höhere Messgenauigkeit erreichte nun das Team von Klaus Blaum vom Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg, zusammen mit Kollegen von der Universität Mainz

und vom GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung [2]. Dazu nutzten sie einen Kniff: Sie brachten das Elektron nicht einzeln in die Falle, sondern banden es an einen nackten Kohlenstoffkern. Das entstandene hochgeladene Ion hat eine deutlich höhere Masse als das Elektron und ist somit träger. Bei gleicher Energieaufnahme fällt der relativistische Zuwachs also geringer aus. Gemessen werden nun gleichzeitig die Zyklotronfrequenz des Ions und die Larmor-Frequenz (Spinpräzessionsfrequenz) des Elektrons. Letztere ist abhängig vom magnetischen Moment und damit auch der Masse des Elektrons, die sich aus dem Verhältnis der beiden Frequenzen ergibt. Eine genauere Messung mit dieser Methode war aber nur möglich, weil die Theoriegruppe um Christoph Keitel am MPIK den g-Faktor des gebundenen Elektrons, der die notwendige Verbindung zwischen Larmor-Frequenz und Elektronenmasse herstellt, quantenelektrodynamisch mit bisher unerreichter Genauigkeit berechnen konnte.

Die von Projektleiter Sven Sturm speziell entwickelte Apparatur ist

Die daraus folgende magnetische Kraft auf das gefangene Ion ist von der Orientierung seines magnetischen Moments (im Wesentlichen des gebundenen Elektrons) abhängig. In der Präzisionsfalle wird seine Orientierung resonant geändert und kann damit bestimmt werden.

Die von Projektleiter Sven Sturm speziell entwickelte Apparatur ist

### KURZGEFASST

#### ■ Hochkomplexe Verschränkung

Einer Forschergruppe um Anton Zeilinger von der Universität Wien ist es gelungen, zwei Photonen 100-dimensional zu verschränken. Dazu erzeugten sie mit einem nichtlinearen optischen Kristall Photonen mit einer hohen Zahl räumlicher Moden. Die Forscher verifizierten die Dimensionalität der Verschränkung, indem sie die Verschränkung zwischen jeweils zwei Moden der beiden Photonen maßen. Das Experiment ist ein wichtiger Schritt, um zu klären, ob die Menge an Information, welche räumlich getrennte Teilchen

durch Verschränkung teilen können, fundamental beschränkt ist.

M. Krenn et al., PNAS, DOI: 10.1073/pnas.1402365111 (2014)

#### ■ Das Gesetz des Spielfelds

Französische Physiker haben gezeigt, dass die Größen von Sportfeldern linear von der maximalen Wurf- bzw. Schussweite des Sportgeräts abhängen. Die Maximalweiten berechneten sie ausgehend von Geschwindigkeitsrekorden und unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes.

B. D. Texier et al., NJP 16, 033039 (2014)

Prof. Dr. Reinhold Such, Atomic Physics, Fysikum, Stockholm University, AlbaNova, 10691 Stockholm, Schweden

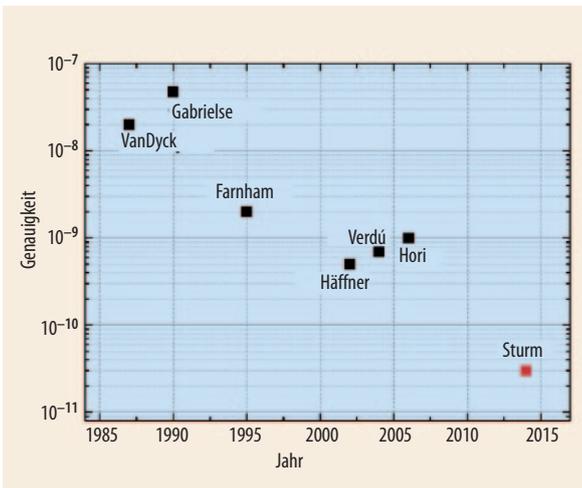


Abb. 2 Die Entwicklung der Genauigkeit der Elektronenmasse: Der neue Wert (rot) ist über eine Größenordnung präziser als alle vorherigen Messungen.

in einem supraleitenden Magneten mitsamt entsprechender kryogener hochsensitiver Elektronik bei der Temperatur von flüssigem Helium untergebracht [3] (Abb. 1): Die hochgeladenen Kohlenstoffionen werden in einer Elektronenstrahl-Ionenquelle (EBIT) erzeugt. In der Analysefalle bestimmt man den Spinquantenzustand des Elektrons, welches im  $C^{5+}$ -Ion gebunden ist, nichtdestruktiv mittels des kontinuierlichen Stern-Gerlach-Effektes. Diese Methode geht auf Hans Dehmelt (Nobelpreis 1989) zurück: In der Analysefalle wird das sonst sehr homogene Magnetfeld  $B_0$  durch einen magnetisierbaren Ni-Ring etwas inhomogen gemacht und eine magnetische „Flasche“ erzeugt. Dann wirkt auf das Ion mit magnetischem Moment  $\mu$  die Kraft  $F = -\nabla(\mu B)$  mit

$B = B_0 + B_2[(z^2 - r^2/2)e_z - z\mathbf{r}]$  und damit  $F_z = -2\mu_z B_2 z$ , also linear in der axialen Koordinate  $z$  genau wie die Kraft in  $z$ -Richtung durch die elektrostatischen Elektroden.

Dies bewirkt eine harmonische Schwingung in  $z$ -Richtung mit verschobener Frequenz um die Grundfrequenz je nach Einstellung der Spinkomponente. In der Präzisionsfalle wird die Orientierung der Spinkomponente durch Mikrowellen resonant geändert und damit, in Kombination mit der Analysefalle, die Lamor-Frequenz des Elektrons gemessen. Dank einer neuartigen Messtechnik lässt sich die Zyklotronfrequenz, und damit die Größe des Magnetfelds, in der Präzisionsfalle phasensensitiv sehr genau messen [4]. Insgesamt resultiert daraus für die Elektronenmasse eine Genauigkeit von elf Stellen, mehr

als eine Größenordnung genauer als alle bisherigen Messungen [5, 2] (Abb. 2).

Der neue Wert der Elektronenmasse – der  $1/1836,152673777$ te Teil der Protonenmasse – eröffnet nun die Möglichkeit, das Standardmodell noch wesentlich genauer als bisher zu prüfen und so nach möglicher „neuer Physik“ zu suchen. Unter anderem gibt es zurzeit sowohl im Rahmen der SPARC-Kollaboration<sup>2)</sup> an der GSI bzw. künftig FAIR als auch am MPIK Anstrengungen, die Quantenelektrodynamik durch Messungen des  $g$ -Faktors in schweren, hochgeladenen Ionen unter extremsten Bedingungen zu prüfen [6]. Dafür wird die Elektronenmasse als Eingangsparameter benötigt. Darüber hinaus eröffnet die verbesserte Genauigkeit auch einen Zugang zu weiteren Fundamentalkonstanten, wie beispielsweise der Feinstrukturkonstanten  $\alpha_{em}$  [7].

Reinhold Schuch

- [1] S. Sturm, G. Werth und K. Blaum, *Annalen der Physik* **525**, 8 (2013)
- [2] S. Sturm et al., *Nature* **506**, 467 (2014)
- [3] B. Schabinger et al., *Eur. Phys. J. D* **66**, 71 (2012)
- [4] S. Sturm, A. Wagner, B. Schabinger und K. Blaum, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 14 (2011)
- [5] P. J. Mohr, B. N. Taylor und D. B. Newell, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 4 (2012)
- [6] D. von Lindenfels et al., *Phys. Rev. A* **87**, 023412 (2013)
- [7] R. Bouchendira et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 8 (2011)