

## Handwerkszeug Relativität

Mit neuen optischen Uhren lassen sich bisher unerreicht kleinste Höhenunterschiede und Geschwindigkeiten messen.

Zeit ist die grundlegendste Dimension der Physik, und dementsprechend sind Uhren ihr wichtigstes Messgerät. Sie bilden im Rahmen der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie den Grundstein, um die Geometrie von Raum und Zeit einzuführen und zu bestimmen. Die damit verbundenen Einflüsse auf den Uhrengang wie Zeitdilatation oder die gravitative Rotverschiebung und Zeitverzögerung (Shapiro-Effekt) sind extrem klein, weil sie mit der inversen Lichtgeschwindigkeit  $c^{-1}$  skalieren. Im täglichen Leben spielten sie daher bislang überhaupt keine Rolle – bis vor Kurzem.

Mit der Satellitennavigation wurden zum ersten Mal die Auswirkungen der Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie auf Uhren alltagsrelevant. Denn ohne sie können sich die Fehler im Laufe eines Tages auf über 10 km addieren. Grundlage dieser Effekte sind die gravitative Rotverschiebung

$$\nu(x_2) = \left(1 - \frac{U(x_2) - U(x_1)}{c^2}\right) \nu(x_1), \quad (1)$$

welche die Uhrenfrequenz  $\nu$  an zwei Positionen im Raum  $x_1$  und  $x_2$  mit dem Newtonschen Potential  $U$  verknüpft, sowie der Doppler-Effekt

$$\nu(\mathbf{v}) = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left(1 - \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}}{c}\right) \nu_0, \quad (2)$$

der direkt mit der speziell-relativistischen Zeitdilatation zusammenhängt. Hierbei ist  $\nu_0$  die Frequenz des Senders,  $\mathbf{v}$  die Relativgeschwindigkeit und  $\mathbf{n}$  die Richtung zwischen Sender und Empfänger. Somit gehen Uhren auf dem Hausdach etwas schneller und bewegte Uhren gemäß des linearen Doppler-Effekts je nach Bewegungsrichtung langsamer oder schneller, im Durchschnitt wegen des quadratischen Doppler-Effekts aber etwas langsamer.

Experimente mit möglichst großen Potentialdifferenzen, beispielsweise auf dem Satelliten Gravity Probe A, haben die Gültigkeit der gravitativen Rotverschiebung mit



Bereits wenige Zentimeter Höhenunterschied reichen aus, damit die höhere Uhr messbar schneller tickt.

einer Genauigkeit von  $7 \cdot 10^{-5}$  bestätigt [1], während Tests der Zeitdilatation oder des Doppler-Effekts bei möglichst großen Relativgeschwindigkeiten eine Genauigkeit von  $8 \cdot 10^{-8}$  erreicht haben [2]. Nun hat die Arbeitsgruppe von Dave Wine-land am NIST in Boulder, USA, das andere Ende des Parameterbereichs für Höhen und Geschwindigkeiten ausgemessen, d. h. zwei Uhren bei sehr kleinen Höhenunterschieden und Relativgeschwindigkeiten miteinander verglichen [3].

Als Uhren dienen hier einzelne  $^{27}\text{Al}^+$ -Ionen in einer Paul-Falle. Der genutzte Uhrenübergang besitzt eine natürliche Linienbreite  $\Delta\nu$  von nur 8 mHz, was bei einer Übergangsfrequenz  $\nu$  von rund  $10^{15}$  Hz einem Gütefaktor  $\nu/\Delta\nu$  von  $10^{17}$  entspricht. Aufgrund seiner kleinen Linienbreite und der geringen Empfindlichkeit auf externe Störungen gilt  $^{27}\text{Al}^+$  als einer der aussichtsreichsten Kandidaten für neue, hochgenaue optische Uhren. Allerdings besitzt es keine geeigneten optischen Übergänge zur

Laserkühlung sowie zur Präparation und Detektion seines inneren Zustands. Daher bedient man sich einer aus der Quanteninformation übernommenen Technik, bei der ein zusätzliches Ion in derselben Falle wie das Uhren-Ion gefangen ist [4]. Dieses sog. Logik-Ion dient einerseits zur „sympathetischen“ Kühlung des  $^{27}\text{Al}^+$ -Ions, andererseits dazu, den Zustand des Uhren-Ions zu bestimmen, der sehr empfindlich von der Frequenz des eingestrahlteten Probestrahls bei 267 nm Wellenlänge abhängt.

Das NIST-Experiment verwendet zwei  $^{27}\text{Al}^+$ -Uhren mit verschiedenen Logik-Ionen,  $^9\text{Be}^+$  bzw.  $^{25}\text{Mg}^+$ . In einem vorangegangenen Vergleich der  $^{27}\text{Al}^+ / ^9\text{Be}^+$ -Uhr mit einer weiteren Ionen-Uhr wurde eine systematische Unsicherheit von nur  $2,3 \cdot 10^{-17}$  für die Al-Ionen-Uhr ermittelt [5]. Dies liegt bereits deutlich unterhalb der gegenwärtig realisierten SI-Genauigkeit der Sekunde von  $3,3 \cdot 10^{-16}$ , wobei sogar eine Genauigkeit von  $10^{-18}$  möglich erscheint.

Um nun den Effekt der gravitativen Rotverschiebung bei kleinen Potentialdifferenzen nachzuweisen, verglichen die Physiker zunächst die Uhren bei einem Höhenunterschied von 17 cm über 100 000 s hinweg. Anschließend hoben sie eine der beiden Uhren um 33 cm an und integrierten über weitere 40 000 s. Die beobachtete Frequenzverschiebung  $\Delta\nu/\nu_0$  von  $(4,1 \pm 1,6) \cdot 10^{-17}$  steht dabei in Einklang mit dem vorhergesagten Effekt von etwa  $3,7 \cdot 10^{-17}$ .

In einem zweiten Experiment gelang auch der Nachweis des relativistischen Doppler-Effekts bei kleinsten Geschwindigkeiten ( $v^2/c^2$ -Anteil in Gl. (2)). Dazu wurde in einer der beiden Uhren das  $^{27}\text{Al}^+$ -Ion mittels eines statischen elektrischen Feldes aus der Fallenmitte herausgetrieben. Außerhalb des Fallenminimums folgt das Ion dem oszillierenden elektrischen Feld der Paul-Falle und besitzt somit eine nicht verschwindende mittlere

Geschwindigkeit, die je nach Stärke des statischen elektrischen Felds zwischen wenigen und einigen zehn m/s liegt. Der damit verbundene quadratische Doppler-Effekt wurde durch den Vergleich mit einer zweiten Uhr mit ruhendem Ion nachgewiesen.

Um bei dieser Messung den linearen Anteil des Doppler-Effekts zu eliminieren, fällt der Probestrahl zum Auslesen des Uhrenübergangs senkrecht zur Oszillationsrichtung auf das Ion und abwechselnd aus gegenläufigen Richtungen. Tatsächlich liegt die Differenz der Messungen mit gegenläufigen Probestrahlen bei  $\Delta\nu/\nu = 1,2 \cdot 10^{-17}$ , was einer mittleren Geschwindigkeitskomponente parallel zum Probestrahl von gerade einmal 1,8 nm/s entspricht – dies ist vergleichbar mit der Kontinentaldrift!

Die Bedeutung dieser Experimente liegt dabei nicht darin, neuartige oder verbesserte Tests der Relativitätstheorie durchgeführt zu haben. Vielmehr wurde hier gezeigt, wie sich die enorme Genauigkeit dieser Uhren in der Praxis nutzen lässt, um sehr kleine Höhenunterschiede und Relativgeschwindigkeiten zu messen. Dies ist ein erster Schritt zu einer uhrenbasierten Geodäsie und Geophysik, die den Einfluss des Gravitationspotentials auf den Uhrengang ausnutzt. So ließe sich mit einem Netzwerk von Uhren der Geoid, eine als einheitliche Referenz für Höhenmessungen gewählte Äquipotentialfläche des Erdschwerefeldes, genau bestimmen. Transportable optische Uhren mit einer Präzision von  $10^{-18}$  oder besser könnten es künftig ermöglichen, das Gravitationspotential mit einer Zentimeter-Auflösung zu messen oder die Kontinentaldrift im Doppler-Signal zu sehen. Uhren könnten auch das bisherige Vermessen der Erde mittels Streckenbestimmung ablösen.

Neben den hochgenauen Uhren sind natürlich auch Verbindungen dazwischen nötig, die den Vergleich der optischen Frequenzen mit hinreichender Genauigkeit erlauben. Im NIST-Experiment gelang dieser Vergleich über eine phasenstabilisierte optische Faser zwischen den

75 Meter voneinander entfernten Laboren. Doch auch über weit größere Distanzen wird derzeit an der Übertragung von optischen Frequenzen zwischen verschiedenen Uhrenstationen gearbeitet. Über eine 146 km lange Faserverbindung zwischen dem Institut für Quantenoptik in Hannover und der Physikalisch Technischen Bundesanstalt PTB in Braunschweig gelang es zu zeigen, dass die Übertragung von optischen Frequenzen mit einer relativen Genauigkeit von bis zu  $10^{-19}$  prinzipiell möglich ist [6]. Eine Erweiterung der Verbindung bis zum Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München ist derzeit in Arbeit [7], und auch über eine Verbindung zum Internationalen Büro für Maße und Gewichte (BIPM) in Paris wird bereits nachgedacht.

Das Konzept der hochgenauen Uhrenvergleiche lässt sich schließlich auch auf Satelliten ausdehnen. Im Orbit stationierte und untereinander synchronisierte optische Uhren könnten als globale Referenz für eine uhrenbasierte Geodäsie über Kontinente hinweg dienen. Allerdings sind, was die Anwendungen für Erdvermessung und -beobachtung betrifft, noch große Hürden zu überwinden, insbesondere im Hinblick auf die Einflüsse der Atmosphäre auf die Signalübertragung.

Ob nun erdgebunden oder satellitengestützt, die uhrenbasierte Geodäsie wäre von enormem praktischem Wert, sei es für die Konstruktion von Pipelines und Tunneln, sei es für die Ozeanographie oder die Klimaforschung. Damit wäre die Relativitätstheorie endgültig im Alltag angekommen.

**Sven Herrmann und Claus Lämmerzahl**

- [1] R. F. C. Vessot et al., Phys. Rev. Lett. **45**, 2081 (1980)
- [2] S. Reinhardt et al., Nature Physics **3**, 861 (2007)
- [3] C. W. Chou et al., Science **329**, 1630 (2010)
- [4] P. O. Schmidt et al., Science **309**, 749 (2005)
- [5] T. Rosenband et al., Science **319**, 1808 (2008)
- [6] G. Grosche et al., Opt. Lett. **34**, 2270 (2009)
- [7] H. Schnatz et al., IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control **57**, 175 (2010)