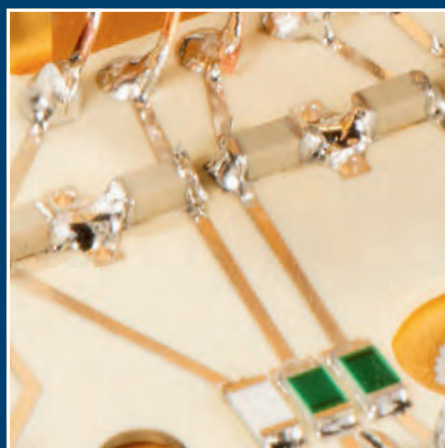
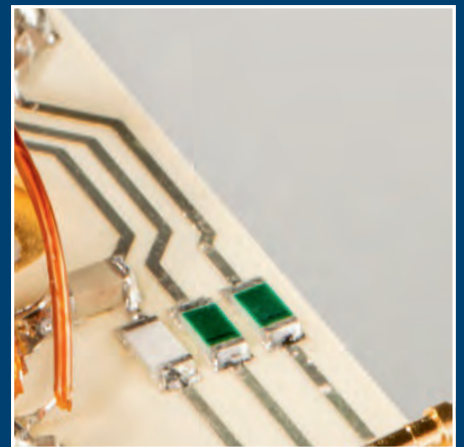
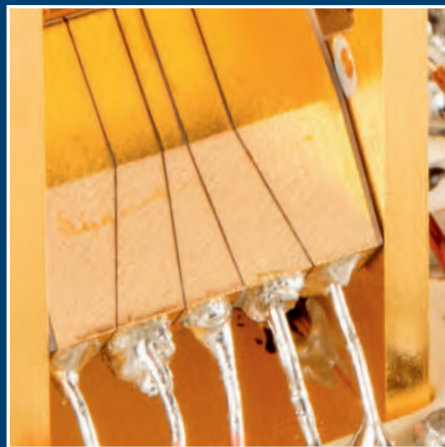


Quantentechnologie mit Atomen und Photonen Teil I



**Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft, Amts- und
Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

128. Jahrgang, Heft 3, Dezember 2018

Aus redaktionellen Gründen erscheinen in 2018 lediglich
drei Ausgaben der PTB-Mitteilungen, d. h. die nächste Ausgabe
wird Heft 1/2019 sein.

**Quantentechnologie
mit Atomen und Photonen
Teil I**

Inhalt

Quantentechnologie mit Atomen und Photonen, Teil I

- Quantentechnologie in Deutschland und Europa. 03
Wolfgang Ertmer
- Ultrastabile Laser 07
Uwe Sterr
- Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie 17
Christian Lisdat, Jürgen Müller, Piet O. Schmidt
- Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik 27
André P. Kulosa, Tanja E. Mehlstäubler, Ekkehard Peik, Piet O. Schmidt, Andrey Surzhykov

Aktuelles aus der OIML

- Bericht über die 53. Sitzung des CIML in Hamburg. 43
Roman Schwartz, Peter Ulbig, Susanne Ludwig

PTB-Innovationen

- Ausgesuchte Technologieangebote und Erfolgsgeschichten 49

Quantentechnologie in Deutschland und Europa

Wolfgang Ertmer*

Es hat wohl kaum ein Technologiefeld in den letzten Jahren eine solche Beachtung gefunden wie das relativ junge, interdisziplinäre Gebiet der Quantentechnologien. Die Erforschung der zugrundeliegenden quantenphysikalischen Basis ist eine der ganz großen Erfolgsgeschichten des vergangenen Jahrhunderts. Gemeinsam mit der Allgemeinen Relativitätstheorie hat die quantenphysikalische Forschung unsere Auffassung von den Grundgesetzen der Natur dramatisch verändert. Die inzwischen hinlänglich als zutreffend überprüften quantenmechanischen und relativistischen Gesetzmäßigkeiten unterscheiden sich deutlich von unserer Alltagserfahrung, ja scheinen sogar im Widerspruch zu ihnen zu stehen. Auch wenn diese einzigartigen Facetten der Quantenwelt nur sehr schwer einem allgemeinen Publikum kommuniziert werden können, so bilden sie doch inzwischen – oft unbemerkt – die Grundlage für viele Schlüsseltechnologien unserer Wirtschaft. Beispiele sind hier die Halbleitertechnologie als Basis moderner Computer- und Informationstechnologien, die Lasertechnologie bzw. moderne Beleuchtungselemente basierend auf LED-Technologie oder die Magnetresonanztomographie (MRT) als unverzichtbares medizinisches bildgebendes Verfahren. Diese Erfolgsgeschichte wird oft auch mit der ersten Quantenrevolution umschrieben. Hier spielt die Quantenphysik von Festkörpern, Lasersystemen und deren Verhalten basierend auf deren mikrophysikalischem Verhalten die wesentliche Rolle.

Daneben haben in jüngerer Vergangenheit große Fortschritte in der Quantenoptik und Quantenphysik den Blick auf völlig neue Perspektiven zukünftiger Quantentechnologie eröffnet. Diese Erfolge basieren größtenteils darauf, dass man inzwischen gelernt hat, die inneren als auch die äußeren Freiheitsgrade von Licht und

Materie voll quantenphysikalisch manipulieren zu können – nur noch limitiert von den eigentlichen Quantengrenzen. Dies betrifft insbesondere die Manipulation isolierter Quantensysteme, wie einzelne Atome und Ionen, einzelne Elektronen und einzelne Photonen. So lassen sich inzwischen kohärente Materiewellen, wie z. B. sogenannte Atomlaser, generieren, die dem Bereich der Atomoptik – vergleichbar des Einsatzes von Lasern in der Optik – ganz neue Möglichkeiten, insbesondere für hoch präzise Metrologie bieten. Als Beispiel sei hier die Atominterferometrie erwähnt.

Andererseits kommen inzwischen weitere Quanteneffekte und -prinzipien, wie z. B. die quantenmechanische Verschränkung oder die Superposition von Quantensystemen, wie beispielsweise die Überlagerung von atomaren Systemen, die sich (unbeobachtet) gleichzeitig an getrennten Orten befinden können, in den Fokus für neue Anwendungsbereiche wie die Quanteninformationsverarbeitung, Quantenkryptographie, Quantensensorik und -metrologie oder zukünftige Quantencomputer. Sie ermöglichen die sogenannte zweite „Quantenrevolution“.

Das enorme Innovationspotenzial solcher Entwicklungen ist in der jüngeren Vergangenheit auch von der Politik erkannt worden, sowohl auf der europäischen als auch den nationalen Ebenen. Insbesondere die britische Regierung hat dies früh erkannt und im Jahre 2013 ein beeindruckendes Förderprogramm initiiert. Als Teil eines nationalen 270-Millionen-Pfund-Investitionsprogramms zu Quantentechnologien hat sie in Erwartung einer Multi-Milliarden-Pfund-Industrie vier *Quantum Technology Hubs* eingerichtet: *Sensors and Metrology*, *Quantum Enhanced Imaging* (QuantIC), *Network Quantum Information Technologies* (NQIT) und *Quantum Communication Technologies* (Quantum Communications hub).

* Prof. Dr. Wolfgang Ertmer, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: ertmer@iqo.uni-hannover.de, <https://orcid.org/0000-0001-7912-5495>

Als die größten Anwendungsfelder hat die Regierung Quantenzeitgebersysteme (neue Atomuhren), Quantengravitationssensoren, Quantennavigationssysteme, sichere Quantenkommunikation, quantenbasierte Bildgebungsverfahren und Quantencomputer gesehen. Der Schwerpunkt der Forschungsförderung verfolgte in den, in einem harten Auswahlverfahren bestimmten, potenten Universitätsverbänden (*Hubs*) nicht die Förderung der Grundlagenforschung, sondern Innovationen in den anvisierten Anwendungsfeldern bei gleichzeitig früher Beteiligung der Industrie bzw. Wirtschaft. Hierfür mussten neue Kooperationsmodelle, insbesondere im PhD-Ausbildungsbereich, entwickelt werden, und die Managementabläufe in den *Hubs* erinnern eher an Prozesse in der Industrie als an die typischen Abläufe universitären Forschungsmanagements.

Auch in den Niederlanden ist recht früh, initiiert durch die Universität von Delft und die Forschungseinrichtung TNO, eine Forschungskollaboration für *Quantum Computing* und *Quantum Internet* gestartet worden: QuTech. Auch hier liegt das Hauptaugenmerk auf der Umsetzung der Quantentechnologie für anwendungsorientierte Innovationen.

Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass die niederländische Regierung als EU-Ratspräsidentschaft recht früh die Zeichen der Zeit erkannt hat und im Jahre 2016 das Thema in der Europäischen Kommission (EC) prominent eingebracht hat, um global in diesem neuen Feld konkurrenzfähig zu bleiben. Im April 2016 haben dazu ca. 3500 europäische Wissenschaftler ein Quanten-Manifest präsentiert, in dem die Forscher die Bedeutung und das enorme Potenzial der Quantentechnologie für die europäische Wirtschaft und Gesellschaft hervorhoben. Professor Tommaso Calarco hat hier als Vertreter der Wissenschaft, unterstützt von vielen sehr prominenten Wissenschaftlern, die Europäische Kommission davon überzeugen können, ein sogenanntes *Quantum Technologies Flagship* zu starten, ein Förderprogramm für einen Zeitraum von insgesamt 10 Jahren mit einem Budget von einer Milliarde Euro.

Die wesentlichen Ziele dieses Programms sind die exzellente Stellung der europäischen Quantenforschung auszubauen, die Industrie ebenfalls in diesem Bereich in eine Führungsposition zu bringen und – nicht zuletzt – die Attraktivität der EU hinsichtlich Forschung und Investitionen in der Quantentechnologie zu erhöhen. Als wesentliche Mission hat die EU die folgenden Felder identifiziert:

- Quantenkommunikation zur inhärent sicheren Datenübertragung für unsere Informationsgesellschaft Dank Quantenkryptographie und einem zukünftigen Quanteninternet,

- Quantencomputer zur Lösung von Problemen, die zurzeit mit den klassischen Computern nicht sinnvoll lösbar sind,
- Quantensimulation, um wichtige Probleme im Bereich Chemie, Materialwissenschaften, sowie in der fundamentalen Physik lösen bzw. simulieren zu können und
- Quantensensoren und -metrologie für bisher in der Auflösung, Empfindlichkeit und Genauigkeit unerreichte Sensorik und Metrologie.

Als Teil des Programms wird aber weiterhin Grundlagenforschung unterstützt, um bisher nicht erkannte Effekte oder unvorhergesehene Durchbrüche in der Forschung nicht zu verpassen.

Auch andere europäische Nationen haben inzwischen, ähnlich wie England und die Niederlande, entsprechende Programme aufgelegt und wollen hier sowohl die Forschung als auch die Industrie strategisch fördern.

In Deutschland hat sich ebenfalls relativ früh ein Konsortium namhafter Wissenschaftler für diesen Bereich engagiert und ein Grundlagenpapier QUTEGA – eine nationale Initiative zur Förderung der Quantentechnologien – im April 2017 beim BMBF eingereicht und von diesem akzeptiert. In der Folge sind in einem Auswahlverfahren drei Pilotprojekte identifiziert worden, in denen Forscher gemeinsam mit der Industrie erste Projekte aus den Quantentechnologien bearbeiten werden. Hierzu gehört auch das Projekt „opticlock“, in dem eine optische Einzelionen-Uhr für den Feldeinsatz entwickelt werden soll (siehe „Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik“ in diesem Heft). Verbundkoordinator ist hierbei TOPTICA Photonics AG; die wissenschaftliche Koordination liegt bei der PTB. Inzwischen hat die Bundesregierung ein Rahmenprogramm zur Quantentechnologie verabschiedet und fördert diese Arbeiten im Umfang von 650 Millionen Euro in der laufenden Legislaturperiode.

Im vorliegenden Doppelheft der PTB-Mitteilungen, dessen erstes Teilheft Sie lesen, geht es um „Quantentechnologie mit Atomen und Photonen“. Die PTB ist hier aufgrund ihres Auftrags und ihrer Erfahrung sowohl im Bereich Quantenoptik, Zeit und Frequenz als auch in der optischen Quantenmetrologie hervorragend positioniert, Ergebnisse und Ideen aus der Grundlagenforschung bis in die industrielle Anwendung zu begleiten und gleichzeitig die Grundlagen der Quantentechnologie weiter zu stärken.

Dieses Heft beginnt mit einem Beitrag zu optischen Resonatoren, die gewissermaßen das Schwungrad eines jeden optischen Frequenzstandards bilden. Hier sind in den letzten Jahren

wichtige Durchbrüche erzielt worden, welche diese sensiblen Apparaturen für Anwendungen feldtauglich machen könnten und gleichzeitig die Stabilität der Uhrenlaser zur Abfrage eines Frequenzstandards massiv verbessert haben. Der folgende Beitrag beleuchtet die Anwendungen optischer Frequenzstandards in der Geodäsie und für neuartige fundamentale Tests – ein hervorragendes Beispiel für die gegenseitige Befruchtung von Quantentechnologie und Grundlagenforschung. Der abschließende Beitrag zu neuen Frequenzstandards stellt sowohl neuartige Ansätze zum Aufbau von Frequenzstandards auf Basis von Vielteilchensystemen gespeicherter Ionen vor als auch vielversprechende Spezies für den Einsatz in zukünftigen Frequenzstandards, wie zum Beispiel optische Kernübergänge oder hochgeladene Ionen.

Ultrastabile Laser

Uwe Sterr*

1. Einleitung

Mit der Erfindung des Lasers im Jahr 1960 steht eine Lichtquelle zur Verfügung, die im Prinzip eine fast perfekte kontinuierliche Lichtwelle aussenden kann. In der Praxis ist die Phase des Wellenzugs allerdings gestört – meist durch äußere Einflüsse, wie Vibrationen oder Temperaturfluktuationen, aber auch durch fundamentale Begrenzungen wie Quantenrauschen durch die spontane Emission von Photonen in den Laserresonator [Schawlow1958].

Im Licht eines typischen kommerziellen Lasers gerät der Wellenzug nach wenigen Mikrosekunden bis zu wenigen Millisekunden aus dem Takt. Diese sogenannte Kohärenzzeit t_c entspricht einer Linienbreite $\Delta\nu = 1/\pi \cdot t_c$ der Strahlung von einigen kHz bis zu MHz. Wegen der Größe der Lichtgeschwindigkeit ist trotz der kurzen Kohärenzzeit die Länge des kohärenten Wellenzugs sehr groß und liegt bei 300 m bis 300 km. Das ist deutlich größer als der Wegunterschied in üblichen Interferometern und hat daher zur großen Bedeutung des Lasers für die Längenmesstechnik geführt.

Allerdings gibt es noch viele weitere Anwendungen, für die die Kohärenzzeit eines normalen handelsüblichen Lasers bei weitem nicht ausreicht. Vor allem bei der Wechselwirkung mit gespeicherten Atomen und Ionen können Wechselwirkungszeiten von einigen zehn Sekunden erreicht werden, während derer die Laserstrahlung kohärent bleiben muss. Das findet Anwendungen in optischen Atomuhren (siehe „Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie“ in diesem Heft), Quantencomputern, Quantenkommunikation und Atominterferometern [Hogan2016]. Extreme Anforderungen an die Kohärenz werden auch in Gravitationswellendetektoren gestellt. So wird z. B. der geplante Gravitationsdetektor im Weltraum LISA eine Armlänge von 2,5 Millionen Kilometern haben. Daneben gibt es Anwendungen in der Radioastronomie (VLBI) bei kurzen Wellenlängen [Rioja2012], bei neuartigem Radar [Ghelfi2014], der Suche nach dunkler Materie [Derevianko2014] und zum Test fundamentaler physikalischer Theorien [Michimura2013].

Viele Arbeitsgruppen arbeiten daher intensiv daran, die Frequenzstabilität und damit die Kohärenzzeit der Laser durch verschieden Methoden immer weiter zu verbessern. Ähnlich wie bei den Uhren hat sich auch die Stabilität der besten Laser während der zurückliegenden Jahrzehnte stetig verbessert (Abbildung 1). Die wesentlichen Prinzipien und die Tricks werden im Folgenden näher vorgestellt.

* Dr. Uwe Sterr, Arbeitsgruppe „Längeneinheit“, PTB Braunschweig, E-Mail: uwe.sterr@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0001-5661-769X>

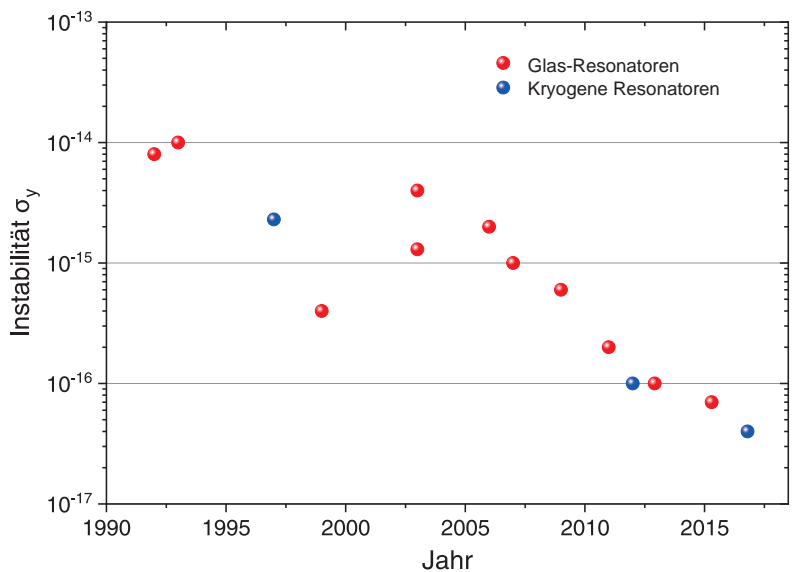


Abbildung 1: Entwicklung der Instabilität σ_y von ultrastabilen Lasern während der vergangenen 25 Jahre (S. Häfner, priv. Mitteilung)

1.1 Frequenzstabilisierung mit Resonatoren

Da der Laser selbst nicht einfach isoliert werden kann, geht man zur Verbesserung seiner Kohärenz einen anderen Weg, indem die Laserfrequenz elektronisch an eine stabile Referenzfrequenz angehängt wird. Im Prinzip können dazu schmale atomare oder molekulare Absorptionslinien in Gasen [Olson2016] oder Festkörpern [Cook2015] verwendet werden. Für die zurzeit besten Systeme werden jedoch evakuierte optische Fabry-Perot-Resonatoren als Referenz verwendet. Die Resona-

toren bestehen aus zwei gekrümmten Spiegeln mit geringer Transmission in einem festen Abstand L , zwischen denen das Licht hin- und her reflektiert wird. Es wird ausgenutzt, dass nur dann Licht im Resonator umlaufen kann, wenn genau ein Vielfaches der halben Wellenlänge zwischen die Spiegel passt. Das führt zu Resonanzen, die umso schärfer sind, je öfter das Licht hin- und herläuft. Bei den besten Resonatoren reflektieren die Spiegel $R = 99.9995\%$ des einfallenden Lichts und das Photon läuft im Mittel eine halbe Million Mal hin und her, bevor es absorbiert wird oder den Resonator wieder verlässt. Die Linienbreite dieser Resonanz ist $\Delta\nu = (c/2L) / F$ mit der Finesse $F = \pi/(1-R)$. Bei einer Finesse von 600 000 und typischen Resonatorlängen $L = 10$ cm entspricht das Breiten von wenigen kHz.

Für Laserlinienbreiten im Bereich weniger Millihertz muss die Abweichung der Laserfrequenz von der Resonatorfrequenz sehr empfindlich detektiert werden. Das Fehlersignal wird verstärkt dem Laser so zurückgeführt, dass die freilaufenden Frequenzfluktuationen unterdrückt werden. Da freilaufende Laser-Linienbreiten bis zu einigen hundert Kilohertz betragen, muss diese Regelung sehr schnell auf Frequenzänderungen des Lasers reagieren. Es wird daher meist das Pound-Drever-Hall-Verfahren [Drever1983] benutzt, dessen Reaktionszeit nicht durch die lange Speicherzeit des Lichts im Resonator limitiert ist. Es benutzt das vom Resonator reflektierte Licht, das sich aus der Interferenz des am Einkoppelspiegel reflektierten Lichts mit dem aus dem Resonator austretenden umlaufenden Lichtfeldes ergibt. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Feldern hängt von deren Verstimmung ab. Um diese Phase zu detektieren wird die Phase des eingestrahlt Lichts sinusförmig mit einer Frequenz oberhalb der Resonatorlinienbreite moduliert, und neben der ursprünglichen Trägerfrequenz werden symmetrische Modulationsseitenbänder erzeugt. Die Phasenverschiebung bei der Reflexion am Resonator führt zu einer Phasenverschiebung des resonanten Trägers, wogegen die nicht resonanten Seitenbänder ohne Phasenverschiebung reflektiert werden. Die Überlagerung von Träger und Seitenbändern im reflektierten Licht führt so zu einer synchronen Amplitudenmodulation, die von der Phasenverschiebung und damit von der Frequenzverstimmung des Lasers von dessen Resonanz abhängt. Nach einer phasenempfindlichen Gleichrichtung mit der Modulationsfrequenz ergibt sich ein dispersionsartiges elektrisches Fehlersignal, das verstärkt und gefiltert auf den Laser zurückgeführt wird. Mit diesem elektronischen Regelkreis wird die Laserfrequenz auf die Resonanz stabilisiert. Da die Modulationsfrequenz von einigen Megahertz weit oberhalb des Bereichs des technischen Amplitudenrauschens des Lasers liegt, ist das Rauschen

der Methode durch das Quanten- oder Schrotrauschen der detektierten Photonen gegeben. Selbst bei Lichtleistungen von wenigen Mikrowatt führt das jedoch nur zu Beiträgen zur Linienbreiten von weit unter einem Millihertz.

Von stärkerem Einfluss sind technische Unzulänglichkeiten. So sind Phasenmodulatoren nicht perfekt und erzeugen immer eine kleine zusätzliche Amplitudenmodulation. Ähnlich wirken sich unerwünschte Interferenzen durch Streulicht im optischen Strahlengang aus. Diese zeitlich schwankende Amplitudenmodulation verschiebt den Regelpunkt weg von der exakten Resonatoreigenfrequenz und verschlechtert die Frequenzstabilität. Bei den besten Systemen wird daher die Rest-Amplitudenmodulation des Lichts direkt vor der Einkopplung in den Resonator gemessen und in einem weiteren Regelkreis zu Null geregelt [Zhang2014].

1.2 Technische Einflüsse

Durch die elektronische Regelung folgt die Laserfrequenz der Eigenfrequenz des Resonators. Aber selbst dann kann die Laserfrequenz nur so stabil wie die Eigenfrequenz des Resonators ν_{Res} sein. Die relative Frequenzstabilität des Lasers ist $\Delta\nu_{\text{Res}} / \nu_{\text{Res}} = -\Delta L/L$, d. h. sie entspricht genau der relativen Stabilität der optischen Weglänge L zwischen den Resonatorspiegeln. Für eine relative Frequenzstabilität von 10^{-16} muss z. B. die Länge eines 10 cm langen Resonators auf 10^{-17} m konstant gehalten werden, was weniger als ein Hundertstel des Durchmessers eines Protons ($1,7 \times 10^{-15}$ m) beträgt. Die wesentlichen Einflussgrößen sind Temperatur, Vibrationen und Druckschwankungen.

Viele Resonatoren verwenden spezielle Gläser als Abstandshalter, die bei einer bestimmten Temperatur T_0 einen Nullpunkt ihres Ausdehnungskoeffizienten $\alpha(T) \approx a \cdot (T - T_0)$ besitzen (bei ULE®-Glas von Corning ist $a \approx 1,5 \cdot 10^{-9}/\text{K}^2$) und man versucht, den Resonator bei einer Temperatur T möglichst dicht bei T_0 zu betreiben. Trotzdem muss bei einer realistischen Abweichung von $T - T_0 \approx 50$ mK die Temperatur immer noch besser als $1,3 \mu\text{K}$ konstant gehalten werden, um weniger als 10^{-16} relative Frequenzfluktuationen zu erhalten.

Auch der Druck beeinflusst über den Brechungsindex die Frequenz des Resonators mit einer Sensitivität von $-3 \cdot 10^{-9}/\text{Pa}$. Entsprechend muss auch der Restdruck des Vakuums auf besser als $3 \cdot 10^{-8}$ Pa konstant sein.

Sehr hohe Anforderungen werden an die Vermeidung von mechanischen Störungen gelegt. Jede Kraft, die auf den Resonator einwirkt, führt zu mechanischen Deformationen und damit zu Längenänderungen. Für einen zylindrischen Abstands-

halter aus Glas von 10 cm Länge und 5 cm Durchmesser führt bereits eine Kraft von 13 Nanonewton (der Gewichtskraft von 1,3 μg , etwa ein Hundertstel eines Sandkorns) auf die Enden des Resonators zu einer relativen Längenänderung von 10^{-16} . Über die Halterung des Resonators, z. B. durch Auflage auf vier Punkten, können solche Kräfte leicht auf den Resonator einwirken. So kann die thermische Ausdehnung der Halterung bereits die Resonatorlänge ändern. Noch störender sind Kräfte, die durch Vibrationen auf den Resonator einwirken. Mit kommerziellen Vibrationsisolationssystemen liegen die verbleibenden Vibrationsamplituden bei ca. 1 μg (g ist hier die Fallbeschleunigung) und die Kräfte am oben angegebenen Resonator (Masse $m=0,5$ kg) angreifenden Kräfte bei 5 μN . In den letzten Jahren ist es gelungen, die Einflüsse dieser Kräfte auf den Resonator mit Finite-Elemente-Methoden zu berechnen. Durch Ausnutzung von Symmetrien und Optimierung der Resonatorgeometrie konnte erreicht werden, dass diese Kräfte den Resonator nur so verformen, dass dabei der Spiegelabstand nicht beeinflusst wird [Notcutt2005, Nazarova2006].

1.3 Fundamentale Begrenzungen

Sind alle diese technischen Störungen ausgeschaltet, verbleibt ein fundamentaler Effekt: Bei einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts führt die thermische Bewegung der Atome in den Bestandteilen des Resonators zu Fluktuationen der optischen Resonatorlänge. Nach dem Fluktuations-Dissipations-Theorem sind die Fluktuationen proportional zur Temperatur und zum mechanischen Dissipationsfaktor ϕ . So ist bei Spiegelsubstraten aus Gläsern mit niedrigem Ausdehnungskoeffizient bereits das Rauschen des Spiegelsubstrats dominierend, sodass Spiegelsubstrate aus Quarzglas ($\phi \approx 10^{-8}$) verwendet werden. Zur Kompensation deren hoher thermischer Ausdehnung werden häufig auf die Rückseite Ringe aus ULE optisch kontaktiert [Legero2010]. In Resonatoren mit Abstandshaltern aus ULE oder Silizium liefert dann die nur wenige μm dicke hochreflektierende Spiegelschicht aus amorphen dielektrischen Materialien (z. B. SiO_2 und Ta_2O_5) durch ihre hohen mechanischen Verluste den weitaus größten Beitrag zu den Fluktuationen der optischen Resonatorlänge [Numata2004, Kessler2012].

Die Längenfluktuationen δL durch die Spiegeloberfläche tragen umso weniger zu den relativen Längenänderungen $\delta L/L$ bei, je länger der Resonator ist. Eine Möglichkeit zur Verringerung des Rauschens ist daher die Verwendung eines langen Resonators. So verwenden die Gruppen am NIST in Boulder, USA Resonatoren mit 30–40 cm Länge. In der PTB haben wir einen 48 cm langen Resonator für die Sr-Gitteruhr aufgebaut, der im folgenden Kapitel im Detail vorgestellt wird.

Eine andere Möglichkeit ist der Betrieb der Resonatoren bei niedrigen Temperaturen. So gibt es Resonatoren, die bei 1,9 K [Wiens2014], 4 K [Nagel2013] oder 124 K [Kessler2012] betrieben werden. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Jun Ye am JILA/NIST in Boulder, USA wurden an der PTB zwei Systeme basierend auf Silizium-Resonatoren mit 21 cm Länge bei 124 K aufgebaut [Matei2017].

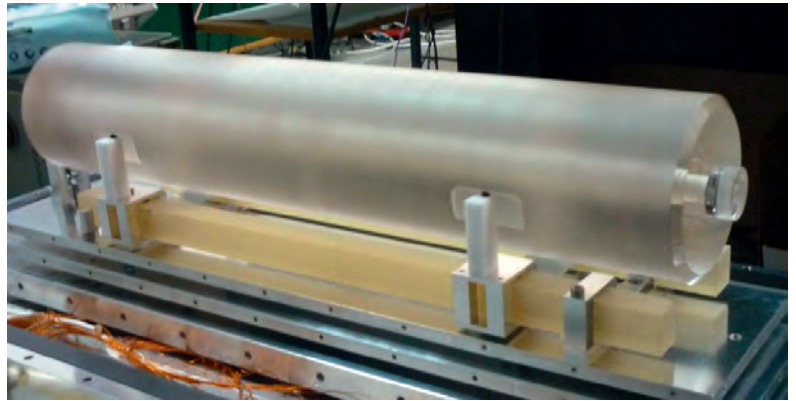


Abbildung 2: Foto des 48 cm Resonators [Häfner2015] für die Strontium-Gitteruhr der PTB

2. Praktische Realisierungen

2.1. Lange Resonatoren bei Raumtemperatur

Lange Resonatoren sind vorteilhaft für ein geringes thermisches Rauschen. Sie stellen allerdings erhöhte Anforderungen an die Temperaturstabilität und an die Unterdrückung der Vibrationen. Beim System der PTB [Häfner2015] wird ein 48 cm langer ULE-Abstandshalter mit einem Durchmesser von 9 cm verwendet, der horizontal in vier Ausschnitten auf kleinen Elastomer-Kugeln (Viton) aufliegt (Abbildung 2). Zur guten Temperaturstabilität ist der Resonator im Vakuum von drei konzentrischen Wärmeschilden umgeben, von denen das äußere aktiv temperaturstabilisiert wird. Zusätzlich wird die Temperatur der Aluminium-Vakuumkammer elektronisch stabilisiert. Die verbleibenden Temperaturschwankungen des Resonators betragen weniger als 120 μK über mehrere Tage.

Die Position der Kugeln wurde durch Finite-Element-Modellierung so optimiert, dass die Längenänderungen durch Vibrationen minimiert werden. Die genaue Position der Kugeln wurde experimentell durch Messung der Vibrations sensitivität in Abhängigkeit von der Kugelposition bestimmt.

Dabei wurde beobachtet, dass verbleibende Asymmetrien durch die überbestimmte Lagerung auf vier Punkten zu schlechter Reproduzierbarkeit der Messungen führte. Deshalb wurde die Lage-

rung so modifiziert, dass zwei der Auflagepunkte über eine Wippe verbunden sind. Damit werden die Auflagekräfte symmetrisiert und eine gute Reproduzierbarkeit erreicht, die es gestattet, eine letzte Optimierung durch Verschieben der Kugeln durchzuführen. Es wurde so eine Empfindlichkeit auf Beschleunigungen von unter $2 \cdot 10^{-10}/g$ erreicht. Mit all diesen Maßnahmen konnte eine Frequenzinstabilität von $\sigma_y(\tau) \leq 10^{-16}$ für Mittelungszeiten τ zwischen 1 s und 1000 s erreicht werden (Abbildung 9).

2.2 Kryogene Silizium-Resonatoren

Gegenüber Gläsern bietet Silizium mehrere Vorteile: es hat eine sehr geringe mechanische Dissipation ϕ , eine um einen Faktor drei höhere Steifigkeit und als einkristallines Material keine alterungsbedingte Längenänderung. Der Nulldurchgang des Ausdehnungskoeffizienten liegt bei 124 K, was technisch aufwendiger zu erreichen ist. Die niedrige Temperatur reduziert aber auch das thermische Rauschen. Bei dem in Kooperation mit dem JILA in Braunschweig aufgebauten System wird ein 21 cm langer Resonator in einer Doppel-Kegel-Geometrie verwendet, der an einem zentralen Ring auf drei Punkten aufliegt (Abbildung 3). Die Geometrie wurde mit Finite-Elemente-Rechnungen auf minimale Vibrationsempfindlichkeit optimiert. Außerdem lässt sich die Empfindlichkeit aufgrund der kristallinen Anisotropie von Silizium durch Rotieren des Resonators um seine vertikale Achse noch experimentell minimieren.

Abbildung 3:
Silizium-Resonator
und vibrations-
unempfindliche
Halterung



Der Resonator ist in einer Ultrahochvakuum-Kammer innerhalb zweier Kühlschilder montiert. Das äußere Kühlschild wird durch kaltes Stickstoff-Gas, das aus einem Flüssig-Stickstoff Vorratsgefäß verdampft wird, auf die Nulldurchgangstemperatur gekühlt (Abbildung 4). Durch Steuerung des Durchflusses wird die Temperatur aktiv geregelt, wobei die Fluktuationen unter einem mK liegen.

Mit dem System wurde eine Frequenzdrift von unter $5 \cdot 10^{-19}/s$ beobachtet, entsprechend -8 Hz pro Tag bei der optischen Frequenz von 200 THz [Hagemann2014]. Dieser Wert liegt um etwa drei Größenordnungen unter der typischen Drift eines Resonators mit Glas-Abstandshalter bei Raumtemperatur.

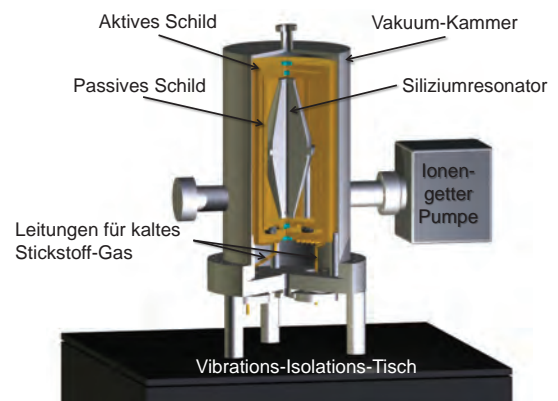


Abbildung 4:
Vakuumsystem mit Kühlsystem

Zur Charakterisierung und Optimierung wurden zwei möglichst gleiche Systeme (Si 2 und Si 3) aufgebaut (siehe Abbildung 5). In einem Vergleich konnte eine Stabilität von $\sigma_y(\tau) = 4 \cdot 10^{-17}$ für Mittelungszeiten zwischen 0,8 Sekunden und mehreren zehn Sekunden erreicht werden [Matei2017] (Abb. 9). Die typische Linienbreite des Schwingungssignals zwischen den beiden, unabhängig auf die Resonatoren stabilisierten Lasern betrug nur ca. 10 mHz (Abbildung 6).

2.3 Transportable Resonatoren

Neben den High-End-Systemen für optische Uhren werden zunehmend ultrastabile Laser benötigt, die transportabel sind und auch unter widrigen Umgebungsbedingungen arbeiten. Das betrifft transportable optische Uhren (siehe „Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie“ in diesem Heft), Weltraumanwendungen für Uhren und Gravitationswellendetektoren, sowie höchstauflösende Spektroskopie und die Mikrowellenerzeugung. Die bisher vorgestellten Halterungen sind für diese Anwendungen nicht geeignet, da die Resonatoren nur lose aufliegen, um die wirkenden Kräfte zu minimieren. Deshalb

wurden Resonatorgeometrien entwickelt, die auch mit größeren Kräften festgehalten werden können und so auch starke Vibrationen und Stöße beim Transport überstehen, ohne sich zu bewegen und die optische Justage zu zerstören. So wurden z. B. kugel- [Leibrandt2011] und würfelförmige [Webster2011] Resonatoren verwendet.

Für die transportable Gitteruhr der PTB wurde ein Konzept entwickelt, das auf eine ganze Reihe von Resonatorabmessungen anwendbar ist [Sterr2011, Chen2014]. Es beruht darauf, die angreifenden Kräfte in Komponenten senkrecht zu Symmetrieebenen des Resonators zu zerlegen und diese Kräfte jeweils in der entsprechenden Symmetrieebene angreifen zu lassen. So kann gleichzeitig der Resonator zuverlässig festgehalten werden, während die Kräfte aufgrund der Symmetrie nicht die Länge ändern. Abbildung 7 links zeigt ein solches System mit einem 12 cm langen ULE-Resonator [Häfner2015a].

Der Resonator befindet sich in einer Vakuumkammer in Größe eines Schuhkartons ($40 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$, Abb. 7 rechts). Sowohl die Temperatur des äußeren Wärmeschildes im Vakuum als auch die Kammer selbst werden aktiv stabilisiert, sodass der Resonator in der Nähe der Nulldurchgangstemperatur betrieben wird. Durch die hohe Temperaturkonstanz und die vibrationsunempfindliche Lagerung wird eine Instabilität von $\sigma_y(\tau) = 4 \cdot 10^{-16}$ zwischen einer und hundert Sekunden erreicht, die dicht am thermischen Rauschen liegt.

3. Anwendung für optische Uhren

Hochstabile Laser mit langen Kohärenzzeiten erlauben die Abfrage von Atomen und Ionen mit langer Wechselwirkungszeit und damit kleiner aufgelöster Linienbreite, was die Bestimmung der Linienmitte verbessert und die Stabilität der Uhr erhöht. Fluktuationen des Lasers in Verbin-

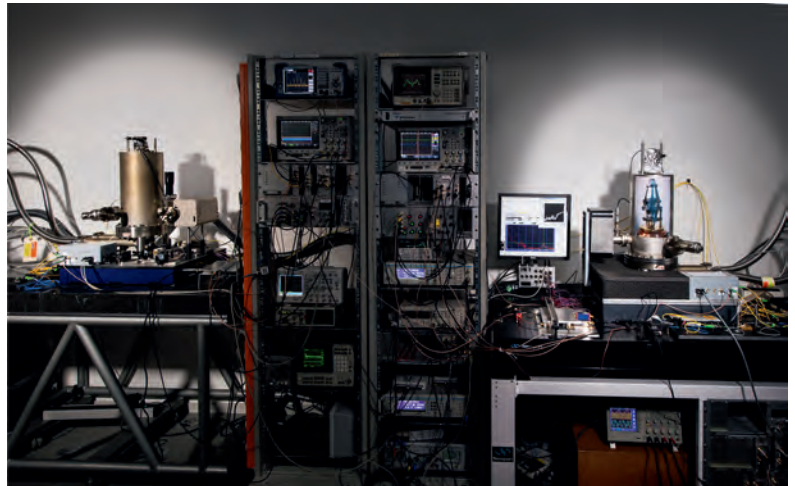


Abbildung 5: Die zwei kryogenen Siliziumsysteme der PTB (links Si 2, rechts Si 3). Im späteren Betrieb werden die beiden Aufbauten durch Einhausungen vor akustischen Störungen und Luftzug geschützt.

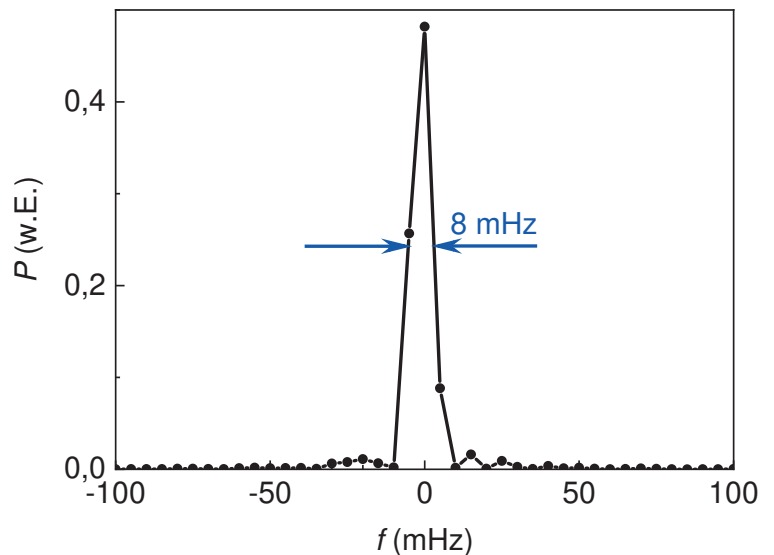


Abbildung 6: FFT-Spektrum des Schwebungssignals zwischen den beiden, mit Silizium-Resonatoren stabilisierten Lasersystemen (Hanning Fensterfunktion, Frequenzauflösung 7,2 mHz)

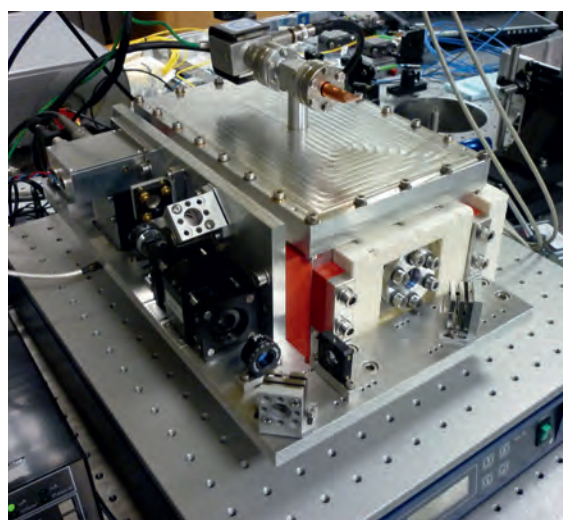
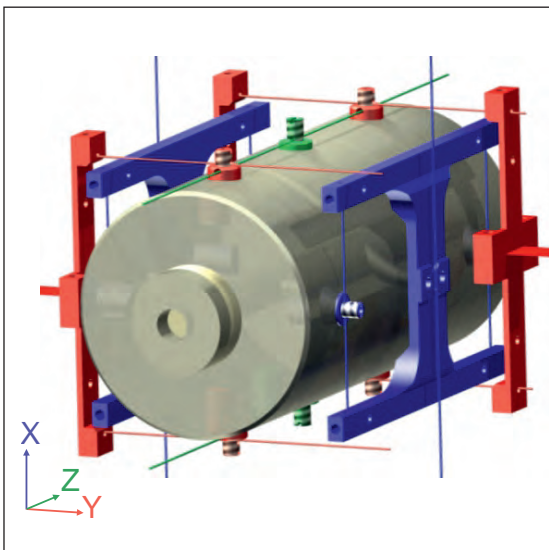


Abbildung 7: Design des Referenzresonators der transportablen Strontium-Gitteruhr. Der Resonator wird von Stahlseilen gehalten, die jeweils senkrecht zu den Symmetrieebenen angreifen (symbolisiert durch gleiche Farben). Ein Hebelmechanismus verhindert Zwangskräfte durch eine Überbestimmung. Rechts: Temperaturstabilisierte Vakuumkammer, montiert auf einem Vibrations-Isolationstisch.

dung mit einer diskontinuierlichen Abfrage der atomaren Resonanz, wie sie in allen Atomuhren mit lasergekühlten Atomen auftritt, führen dazu, dass das atomare Signal nicht die komplette Information über die mittlere Laserfrequenz liefert. Die fehlende Information führt selbst bei einer sehr rauscharmen Abfrage der Atome dazu, dass die Instabilität der Uhr verschlechtert wird [Dick1987]. Dieser sog. Dick-Effekt führt etwa bei 50 % Tastverhältnis zu einer Instabilität in Größenordnung der Allan-Abweichung bei der Abfragezeit.

Mit unseren Si-Resonator-stabilisierten Lasern waren wir in der Lage, dieses Rauschen zu reduzieren und die Instabilität der Uhren zu verbessern, was zu deutlich verkleinerten statistischen Unsicherheiten beim Vergleich von Uhren und bei der Evaluierung von systematischen Verschiebungen führte. Allerdings arbeiten diese hoch-

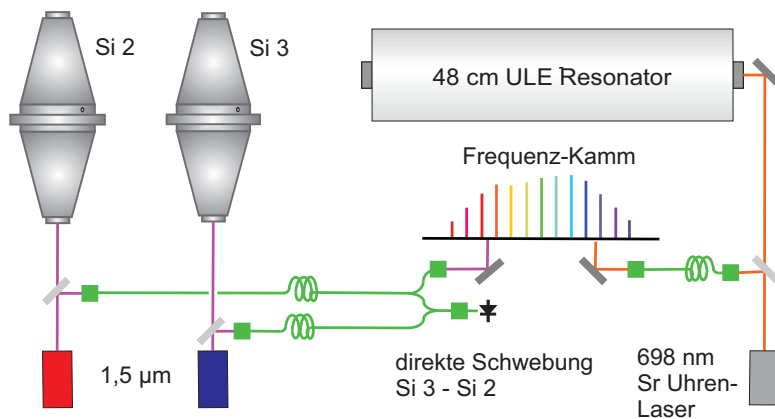


Abbildung 8: Aufbau zum Vergleich dreier ultrastabiler Laser basierend auf Silizium-Resonatoren Si 2 und Si 3 bei 1,5 µm sowie eines Lasers bei 698 nm basierend auf einem langen ULE-Resonator

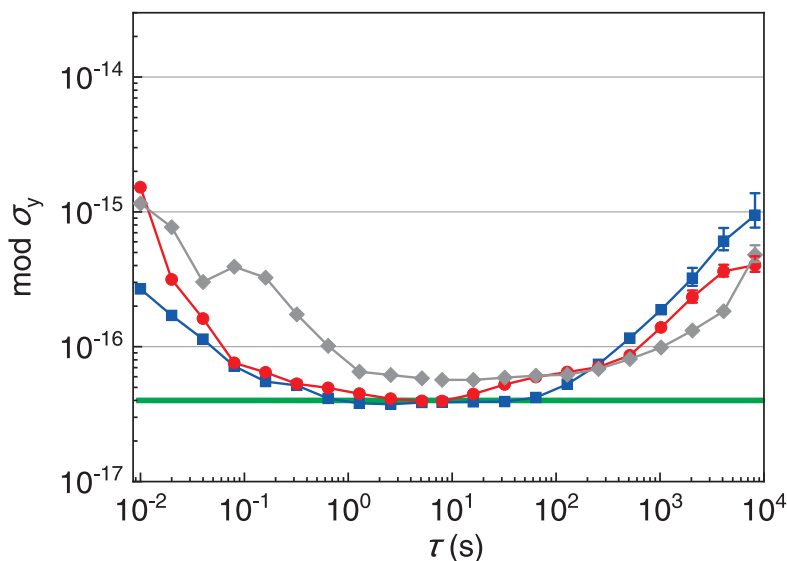


Abbildung 9: Aus dem Dreiervergleich berechneten individuelle Instabilitäten σ_y der Laser als Funktion der Mittelungszeit τ . Die grüne Linie entspricht dem thermischen Rauschen (Rot: Si 2, Blau: Si 3, Grau: 48 cm ULE-Resonator).

stabilen Laser bei einer Wellenlänge von 1,5 µm, während die optischen Uhren stabiles Licht bei ganz anderen Wellenlängen benötigen, wie z. B. 698 nm bei der Sr-Gitteruhr. Es muss daher die Stabilität auf die Wellenlänge der Abfragelaser der jeweiligen Uhr transferiert werden, ohne die Qualität zu verschlechtern. Zur Übertragung der Stabilität werden Femtosekunden-Laser verwendet (Abb. 8). Das Spektrum eines solchen Lasers besteht aus einem Kamm optischer Frequenzen, deren Abstände durch die Wiederholrate des Lasers gegeben ist. Dieser Kamm kann als Transferszillator benutzt werden, um Laser in weit auseinanderliegenden Wellenlängenbereichen zu vergleichen und phasenstarr aneinander anzubinden [Hagemann2013].

Damit wird die hochstabile Frequenz des Silizium-stabilisierten Lasers allen optischen Uhren der PTB zur Verfügung gestellt. Durch aktive Längens Stabilisierung aller beteiligten Glasfaserverbindungen und eine konsequente Vermeidung nicht kompensierter optischer Weglängen konnten wir inzwischen die zusätzlichen Fluktuationen durch den Frequenzkamm auf weniger als 10^{-17} bei einer Sekunde reduzieren.

4. Ausblick

4.1 Kristalline Beschichtungen und Mikrostrukturen

Alle hier vorgestellten Resonatoren sind durch das thermische Rauschen der Spiegel begrenzt. Dieses Rauschen ist auch bei Gravitationswellendetektoren im mittleren Frequenzbereich begrenzend, sodass schon lange nach besseren Materialien mit kleinen mechanischen Verlustkoeffizienten gesucht wird. Zurzeit am aussichtsreichsten sind kristalline Bragg-Reflektoren aus GaAs/AlGaAs [Cole2013, Cole2016]. Wir haben inzwischen Spiegelpaare auf Silizium-Substraten getestet, die eine Finesse von $F = 400\,000$ bei 124 K Betriebstemperatur erreicht haben. Ein Upgrade eines 124-K-Si-Resonators wird gerade durchgeführt, und wir erwarten mit diesen Spiegeln eine Verringerung des thermischen Rauschens auf $1 \cdot 10^{-17}$. Auch mit mikrostrukturierten Silizium-Gitterstrukturen sollten sich hohe Reflektivitäten bei geringem thermischen Rauschen erreichen lassen [Brückner2010, Dickmann2018]. Für ultrastabile Laser wurden sie allerdings bisher noch nicht verwendet.

4.2 Resonatoren bei tiefen Temperaturen

Ebenso kann der Betrieb bei tiefen Temperaturen das thermische Rauschen weiter reduzieren, der Aufwand nimmt allerdings stark zu. Um einen kontinuierlichen Betrieb über Wochen zu erreichen kommen nur geschlossene Pulsrohr- oder

Gifford-McMahon-Kühler in Frage, deren starke Vibrationen aufwendig vom Resonator ferngehalten werden müssen. Am JILA wurde in Zusammenarbeit mit der PTB ein 6 cm langer Si-Resonator bei 4 K betrieben [Zhang2017]. Der Kaltkopf wurde über Kupferdrähte vibrationsarm mit der Resonator-Plattform verbunden, die auf einem

separaten, aktiv vibrationsisolierten Tisch stand. Noch mit dielektrischen Spiegeln wurde eine Instabilität von $1 \cdot 10^{-16}$ erreicht. Zukünftig sollen hier auch kristalline Spiegel eingesetzt werden, bei einem 21 cm langen Resonator läge das thermische Rauschen bei ca. $1 \cdot 10^{-18}$.

Beschreibung der Frequenzstabilität

Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Laserfrequenz $\nu(t)$ werden verschiedene Größen verwendet. Eine Möglichkeit ist das dem zeitlichen Verlauf zugeordnete Leistungsspektrum der Frequenzfluktuationen $S_\nu(f)$. Im Spektrum führen periodische Störungen der Laserfrequenz zu einem lokalen Maximum bei dieser Frequenz der Störung. Weit verbreitet ist weißes Frequenzrauschen, entsprechend einem konstanten Spektrum, bzw. sogenanntes Flicker-Rauschen mit $1/f$ -Verlauf, wie es durch das Brownsche thermische Rauschen in Resonatoren erzeugt wird. Einem „Random Walk“ würde ein $1/f^2$ -Verlauf entsprechen.

Zur Beschreibung der Stabilität eines Oszillators mit mittlerer Frequenz ν_0 im Zeitbereich wird meist die Allan-Abweichung $\sigma_y(\tau)$ verwendet. Sie beschreibt die mittleren Fluktuationen aufeinanderfolgender, über einen Zeitraum τ gemittelter Frequenzwerte $\nu_\tau^{(i)}$:

$$\sigma_y(\tau)^2 = 1/(2\nu_0^2) \langle (\nu_\tau^{(i+1)} - \nu_\tau^{(i)})^2 \rangle.$$

Die Abhängigkeit von der Mittelungszeit erlaubt es, verschiedene Einflüsse zu unterscheiden, wie z. B. kurzzeitige Fluktuationen durch Akustik oder langsame Frequenzänderungen durch Temperaturschwankungen.

Für praktische Anwendungen des Lasers wird oft die Kohärenzzeit benutzt. Sie beschreibt die Zeit, während der die Phase des Lichtfeldes hinreichend wenig von ihrem vorhergesagten Wert abweicht. Oft verwendet man maximale Abweichungen von einem Radian. Ändert sich die mittlere Frequenz, wie z. B. bei Flicker-Rauschen, so ist diese Größe nicht eindeutig bestimmt, sondern hängt davon ab, wie die langsame Änderung der Mittenfrequenz berücksichtigt wird [Matei2017].

Eine weitere Größe ist die Linienbreite, d. h. die spektrale Breite des elektromagnetischen Leistungsspektrums. Während für weißes Frequenzrauschen aufgrund der stationären mittleren Laserfrequenz diese Größe eindeutig definiert ist ($\Delta\nu = \pi S_\nu$), ist bei Flicker-Rauschen und noch mehr bei einem Random Walk der Frequenz, die mittlere Frequenz nicht mehr konstant, sondern entfernt sich mit zunehmender Beobachtungszeit immer mehr vom Anfangswert. Es kann daher nur noch eine von der Beobachtungszeit abhängige Linienbreite angegeben werden. Da bei kurzen Beobachtungszeiten t_{obs} die Linienbreite durch die Fourierbreite $\propto 1/t_{\text{obs}}$ gegeben ist und bei langen Beobachtungszeiten die Linienbreite aufgrund der Schwankungen der mittleren Frequenz zunimmt, existiert ein Minimum, das als praktische Linienbreite bezeichnet werden kann [Matei2017].

Danksagung

Zu den hier vorgestellten Ergebnissen haben viele derzeitige und ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der PTB beigetragen. Besonders danken möchte ich Dan Matei, Thomas Legero, Sebastian Häfner, Fritz Riehle, Robin Weyrich und Erik Benkler.

Die Ergebnisse zu den Silizium-Resonatoren sind Ergebnis einer fruchtbaren Zusammenarbeit mit Kolleginnen und Kollegen aus dem JILA/NIST, Boulder, besonders beigetragen haben Jun Ye, Wang Zhang, Lindsey Sonderhouse und John M. Robinson. Für die Zusammenarbeit bei den kristallinen Spiegeln danke ich Garret Cole (Crystalline Mirror Solutions).

Die Arbeiten wurden durch die DFG über den Exzellenzcluster QUEST, SFB DQ-mat, sowie von der EU in EMPIR OC18 unterstützt.

Literatur

- [Brückner2010] F. Brückner, D. Friedrich, T. Clausnitzer, M. Britzger, O. Burmeister, K. Danzmann, E.-B. Kley, A. Tünnermann, R. Schnabel, *Realization of a monolithic high-reflectivity cavity mirror from a single silicon crystal*, Phys. Rev. Lett. **104**, 163903 (2010)
- [Chen2014] Q.-F. Chen, A. Nevsky, M. Cardace, S. Schiller, T. Legero, S. Häfner, A. Uhde, U. Sterr, *A compact, robust, and transportable ultra-stable laser with a fractional frequency instability of 10^{-15}* , Rev. Sci. Instrum. **85**, 113107 (2014)
- [Cole2013] G. D. Cole, W. Zhang, M. J. Martin, J. Ye, M. Aspelmeyer, *Tenfold reduction of Brownian noise in optical interferometry*, Nature Photonics **7**, 644 (2013)
- [Cole2016] G. D. Cole, W. Zhang, B. J. Bjork, D. Follman, P. Heu, C. Deutsch, L. Sonderhouse, J. Robinson, C. Franz, A. Alexandrovski, M. Notcutt, O. H. Heckl, J. Ye, M. Aspelmeyer, *High-performance near- and mid-infrared crystalline coatings*, Optica **3**, 647 (2016)
- [Dick1987] G. Dick, *Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards*, Proceedings of 19th Annual Precise Time and Time Interval Application and Planning Meeting, p. 133 (1987)
- [Dickmann2018] J. Dickmann, S. Kroker, *Highly reflective low-noise etalon-based meta-mirror*, Phys. Rev. D **98**, 082003 (2018)
- [Drever1983] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, H. Ward, *Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator*, Appl. Phys. B **31**, 97 (1983)
- [Ghelfi2014] P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, A. Capria, S. Pinna, D. Onori, C. Porzi, M. Scaffardi, A. Malacarne, V. Vercesi, E. Lazzeri, F. Berizzi, A. Bogoni, *A fully photonics-based coherent radar system*, Nature **507**, 341 (2014)
- [Häfner2015] S. Häfner, S. Falke, C. Grebing, S. Vogt, T. Legero, M. Merimaa, C. Lisdat, U. Sterr, *Fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity*, Opt. Lett. **40**, 2112 (2015)
- [Häfner2015a] S. Häfner, *Ultrastabile Lasersysteme für Weltraum- und Boden-Anwendungen, Dissertation*, Leibniz Universität Hannover (2015)
- [Hagemann2013] C. Hagemann, C. Grebing, T. Kessler, S. Falke, N. Lemke, C. Lisdat, H. Schnatz, F. Riehle, U. Sterr, *Providing 10^{-16} short-term stability of a $1.5 \mu\text{m}$ laser to optical clocks*, IEEE Trans. Instrum. Meas. **62**, 1556 (2013)
- [Hagemann2014] C. Hagemann, C. Grebing, C. Lisdat, S. Falke, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, J. Ye, *Ultra-stable laser with average fractional frequency drift rate below $5 \cdot 10^{-19}/\text{s}$* , Opt. Lett. **39**, 5102 (2014)
- [Hogan2016] J. M. Hogan, M. A. Kasevich, *Atom-interferometric gravitational-wave detection using heterodyne laser links*, Phys. Rev. A **94**, 033632 (2016)
- [Kessler2012] T. Kessler, T. Legero, U. Sterr, *Thermal noise in optical cavities revisited*, J. Opt. Soc. Am. B **29**, 178 (2012)
- [Kessler2012] T. Kessler, C. Hagemann, C. Grebing, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, M. J. Martin, L. Chen, J. Ye, *A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity*, Nature Photonics **6**, 687 (2012)
- [Legero2010] T. Legero, T. Kessler, U. Sterr, *Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors*, J. Opt. Soc. Am. B **27**, 914 (2010)
- [Leibrandt2011] D. R. Leibrandt, M. J. Thorpe, M. Notcutt, R. E. Drullinger, T. Rosenband, J. C. Bergquist, *Spherical reference cavities for frequency stabilization of lasers in non-laboratory environments*, Opt. Express **19**, 3471 (2011)
- [Matei2016] D. G. Matei, T. Legero, C. Grebing, S. Häfner, C. Lisdat, R. Weyrich, W. Zhang, L. Sonderhouse, J. M. Robinson, F. Riehle, J. Ye, U. Sterr, *A second generation of low thermal noise cryogenic silicon resonators*, J. Phys.: Conf. Ser. **723**, 012031 (2016)
- [Matei2017] D. G. Matei, T. Legero, S. Häfner, C. Grebing, R. Weyrich, W. Zhang, L. Sonderhouse, J. M. Robinson, J. Ye, F. Riehle, U. Sterr, *$1.5 \mu\text{m}$ lasers with sub-10 mHz linewidth*, Phys. Rev. Lett. **118**, 263202 (2017)
- [Michimura2013] Y. Michimura, N. Matsumoto, N. Ohmae, W. Kokuyama, Y. Aso, M. Ando, K. Tsubono, *New limit on Lorentz violation using a double-pass optical ring cavity*, Phys. Rev. Lett. **110**, 200401 (2013)
- [Nagel2013] M. Nagel, K. Möhle, K. Döringshoff, S. Schikora, E. V. Kovalchuk, A. Peters, *Ultra-stable cryogenic optical resonators for tests of fundamental physics*, Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (CPT'13), Bloomington, Indiana, June 17–21, (2013)

- [Nazarova2006] T. Nazarova, F. Riehle, U. Sterr, *Vibration insensitive reference cavity for an ultranarrow-linewidth laser*, Appl. Phys. B **83**, 531 (2006)
- [Notcutt2005] M. Notcutt, L.-S. Ma, J. Ye, J. L. Hall, *Simple and compact 1-Hz laser system via an improved mounting configuration of a reference cavity*, Opt. Lett. **30**, 1815 (2005)
- [Numata2004] K. Numata, A. Kemery, J. Camp, *Thermal noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities*, Phys. Rev. Lett. **93**, 250602 (2004)
- [Rioja2012] M. Rioja, R. Dodson, Y. Asaki, J. Hartnett, S. Tingay, *The impact of frequency standards on coherence in VLBI at the highest frequencies*, Astron. J. **144**, 121 (2012)
- [Schawlow1958] A. L. Schawlow, C. H. Townes, *Infrared and optical masers*, Phys. Rev. **112**, 1940 (1958)
- [Sterr2011] U. Sterr, *Frequenzstabilisierungsvorrichtung*, Patent DE 10 2011 015 489 (2011)
- [Webster2011] S. Webster, P. Gill, *Force-insensitive optical cavity*, Opt. Lett. **36**, 3572 (2011)
- [Wiens2014] E. Wiens, Q.-F. Chen, I. Ernsting, H. Luckmann, U. Rosowski, A. Nevsky, S. Schiller, *Silicon single-crystal cryogenic optical resonator*, Opt. Lett. **39**, 3242 (2014)
- [Zhang2014] W. Zhang, M. J. Martin, C. Benko, J. L. Hall, J. Ye, C. Hagemann, T. Legero, U. Sterr, F. Riehle, G. D. Cole, M. Aspelmeyer, *Reduction of residual amplitude modulation to 10^{-6} for frequency-modulation and laser stabilization*, Opt. Lett. **39**, 1980 (2014)
- [Zhang2017] W. Zhang, J. M. Robinson, L. Sonderhouse, E. Oelker, C. Benko, J. L. Hall, T. Legero, D. G. Matei, F. Riehle, U. Sterr, J. Ye, *Ultrastable silicon cavity in a continuously operating closed-cycle cryostat at 4 K*, Phys. Rev. Lett. **119**, 243601 (2017)

Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie

Christian Lisdat¹, Jürgen Müller², Piet O. Schmidt³

1. Einleitung

Die Messung von Zeit durch Uhren spielt seit Jahrtausenden eine wichtige Rolle zur Strukturierung des Tagesablaufs. Mit der Weiterentwicklung von Uhren haben sich darüber hinaus immer neue Anwendungen erschlossen, wie z. B. seit dem 18. Jahrhundert durch präzise und robuste mechanischen Uhren in der Schiffsnavigation bis zur Synchronisierung von Telekommunikationsnetzwerken und der Entwicklung der Satellitennavigation mit Mikrowellen-Atomuhren seit einigen Dekaden [Jespersen1999]. Die neueste Generation von optischen Uhren ist das Ergebnis einer langjährigen Entwicklung von Quantentechnologien zur Kontrolle der Bewegung und der internen atomaren Zustände [Ludlow2015]. Sie erlauben Messungen mit bis zu 18 Stellen Genauigkeit und zählen damit zu den genauesten Messgeräten überhaupt.

Das Prinzip einer Uhr besteht darin, die Anzahl der Zyklen eines periodischen Vorgangs (Referenzoszillator) ab einem bestimmten Zeitpunkt zu zählen. Als Referenzoszillator wurden in der Vergangenheit die Erdrotation ($\sim 1/86\,400\text{ s} \approx 0,000\,116\text{ Hz}$), die Schwingung eines Pendels ($\approx 1\text{ Hz}$), eines Schwingquarzes ($\approx 10\text{ kHz}$) oder die Schwingung von elektromagnetischen Wellen ($\approx 10\text{ GHz}$) genutzt. Gemeinsam ist diesen, dass die Schwingungen direkt gezählt werden konnten. In Atomuhren dient als Referenz die Schwingung, die dem ungestörten Übergang zwischen zwei ausgesuchten atomaren Niveaus entspricht. Übergänge in Atomen eignen sich deshalb besonders gut als Referenz, da alle Atome einer Sorte identisch sind und sich Atome in Fallen gut von ihrer Umgebung isolieren lassen. Daher ist die Sekunde des internationalen Einheitensystems seit 1967 definiert als „das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entspricht“ [SI2014]. Im Zusatz wird genauer spezifiziert, dass diese Definition für ein Caesium-Atom in

Ruhe und bei einer Temperatur von 0 K gilt, um Frequenzverschiebungen durch Bewegung, Kollisionen zwischen Atomen oder Temperaturstrahlung auszuschließen. Die Historie, die zu dieser Definition der Sekunde geführt hat, wurde bereits ausführlich in [Stenger2017] diskutiert.

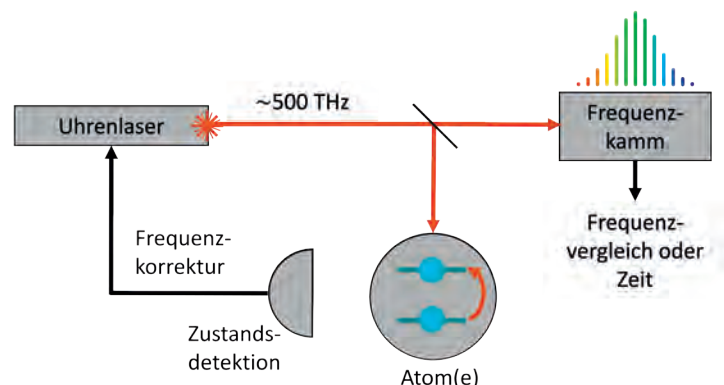
Die Frequenz der Cs-Uhren liegt im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums. Alternativ werden bei den sogenannten optischen Atomuhren Übergänge im sichtbaren (optischen) Spektralbereich verwendet. Die jeweilige Frequenz wird durch periodisches Abfragen einzelner oder mehrerer Atome mit einem Schwungradoszillator bestimmt, wie z. B. einer Mikrowellenquelle oder einem Laser (siehe Abbildung 1). Die Frequenz des Schwungradoszillators wird dabei so korrigiert, dass sie möglichst gut mit der atomaren Übergangsfrequenz übereinstimmt und stellt das Referenzsignal dar, dessen Zyklen gezählt werden. Die optischen Uhren unterscheiden sich von anderen Uhren dadurch, dass ihre Pendelschwingung mit einer Frequenz von einigen 100 THz so schnell ist, dass sie nicht mehr direkt gezählt werden kann. Erst durch die Entwicklung von Femtosekunden(fs)-Frequenzkämmen [Hänsch2006, Hall2006] konnte ein einfaches „optisches Getriebe“ bereitgestellt werden, das die genaue Teilung der optischen Frequenz in einen elektronisch zählbaren Bereich ermöglichte (siehe „Ultrastabile Laser“ in diesem Heft). Oft wird auch dann von einer Uhr gesprochen, wenn lediglich Frequenzverhältnisse gemessen werden, nicht jedoch die Anzahl der Zyklen ab einem bestimmten Zeitpunkt gezählt werden.

1 PD Dr. Christian Lisdat, Arbeitsgruppe „Optische Gitteruhren“, PTB Braunschweig, E-Mail: christian.lisdat@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0002-4705-8854>

2 Prof. Dr.-Ing. Jürgen Müller, Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: mueller@ife.uni-hannover.de, <https://orcid.org/0000-0003-1247-9525>

3 Prof. Dr. Piet O. Schmidt, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: piet.schmidt@quantummetrology.de, <https://orcid.org/0000-0003-0773-5889>

Abbildung 1: Prinzip einer optischen Uhr



Die Qualität der Uhren lässt sich anhand von zwei Kriterien messen: der systematischen Unsicherheit und ihrer Frequenzstabilität, die die statistische Messgenauigkeit beeinflusst. Die systematische Unsicherheit gibt an, wie gut die realisierte Frequenz (korrigiert um bekannte Frequenzverschiebungen) der (ideal) ungestörten Übergangsfrequenz entspricht. Dabei ist problematisch, dass man letztere nicht kennt und für kein System mit 18 Stellen Genauigkeit berechnen kann. Daher müssen alle möglichen Einflüsse auf die Uhr untersucht werden, die zu einer Frequenzverschiebung führen können. Zur Überprüfung dieser Abschätzungen sind Vergleiche von Uhren unabdingbar.

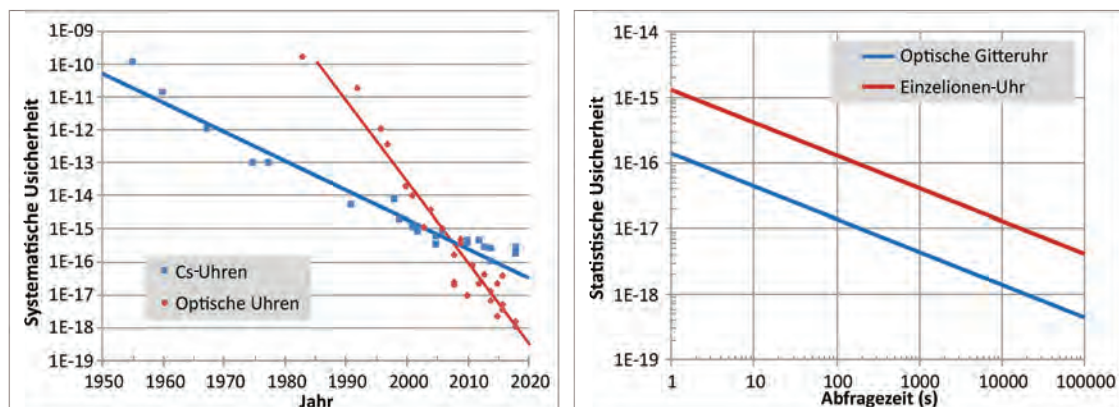
Die Frequenzstabilität der Uhr ist ein Maß für die Größe der möglichen Fluktuationen der Messergebnisse innerhalb einer bestimmten Mittelungszeit, d. h., je kleiner die Instabilität desto schneller kann eine bestimmte Auflösung erreicht werden. Sie skaliert unter anderem mit der Linienbreite des Übergangs und invers mit der Übergangsfrequenz und der Wurzel aus der Anzahl der abgefragten Atome. Dies ist einer der Gründe, warum wichtige Fortschritte in der Entwicklung von Uhren in der Vergangenheit Hand in Hand mit einer Erhöhung der Oszillationsfrequenz der Referenz einhergegangen sind. So konnten z. B. Einflüsse auf die Referenzfrequenz mit immer höherer Auflösung charakterisiert werden. Auch die systematische Unsicherheit wird tendenziell beim Übergang zu optischen Uhren mit Übergangsfrequenzen von bis zu $f_0 = 10^{15}$ Hz verbessert, da viele der atomaren Eigenschaften der Zustände, wie z. B. die Empfindlichkeit auf externe elektrische und magnetische Felder und die damit verbundenen Frequenzverschiebungen Δf ungefähr gleich bleiben, die relative Frequenzverschiebung $\Delta f/f_0$ durch die höhere Übergangsfrequenz f_0 jedoch abnimmt. Aus diesem Grund haben Uhren, die auf optischen Übergängen in Atomen basieren, inzwischen Mikrowellenuhren sowohl in statistischer als auch in systematischer Unsicherheit um zwei Größenordnungen überholt [Ludlow2015] (siehe Abbildung 2).

Dies wurde durch eine Reihe an quantentechnologischen Entwicklungen möglich, die es uns inzwischen erlauben, einzelne Atome beinahe ungestört im Vakuum in Ionenfallen bzw. optischen Fallen einzufangen und mithilfe von Laserstrahlung nahe an den Bewegungsgrundzustand zu kühlen. Die Lokalisierung der Atome durch Laserkühlung und den starken Einschluss in einer Falle ist eine wichtige Voraussetzung für Spektroskopie ohne Frequenzverschiebungen durch den mit der Bewegung der Atome verbundenen Dopplereffekt.

Uhren, die Messungen mit bis zu 18 Stellen erlauben, besitzen eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten. Neben Anwendungen in der Grundlagenforschung, wie z. B. der Überprüfung von physikalischen Theorien (siehe „Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik“ in diesem Heft), eröffnen sich auch völlig neue Anwendungen. Eine dieser Anwendungen ist im Zusammenspiel mit der genauen Übertragung optischer Frequenzen die Bestimmung von Höhenunterschieden über weite Distanzen für die Geodäsie. Nach Einsteins Relativitätstheorie zeigt jede Uhr ihre sogenannte „Eigenzeit“ an, die vom lokalen Gravitationspotential und der Geschwindigkeit der Uhr auf der rotierenden Erde abhängt. Beide Effekte führen dazu, dass man in einem Vergleich zwischen zwei Uhren einen relativen Gangunterschied von ca. 10^{-16} pro Meter Höhendifferenz der Uhren beobachtet (siehe Kasten). Aktuelle geodätische Höhensysteme sind auf Meereshöhe (das sogenannte Geoid) referenziert und basieren auf einer Kombination aus Satellitenmessungen und erdbasiertem Nivellement (siehe Abschnitt Geodäsie). Als völlig neuartige, alternative Methode können durch den Vergleich optischer Uhren mit einer relativen Ungenauigkeit von 10^{-18} Höhenunterschiede von einem Zentimeter über weite Distanzen bestimmt werden.

Um diese neue Methode der Höhenmessung mit Uhren, oft „relativistische Geodäsie“ genannt [Mehlstäubler2018, Denker2018, Müller2018], zu etablieren, müssen eine Reihe von Herausforderungen gelöst werden. So muss z. B. die systematische Unsicherheit auf einem Niveau von 10^{-18} routinemäßig erreicht und durch Vergleichsmessungen

Abbildung 2:
(a) Historische Entwicklung der (abgeschätzten) systematischen Unsicherheiten für Cs- und für optische Uhren. (b) Erreichte statistische Unsicherheit für eine Einzelionen-Uhr und eine optische Gitteruhr, die mit einem Ensemble von einigen tausend Atomen betrieben wurde.



verifiziert werden. Transportable Uhren mit der Leistungsfähigkeit aktueller Laboruhren müssen entwickelt werden, und die erforderliche Mittelungszeit für Auflösungen von 10^{-18} muss weiter reduziert werden, um dynamische Effekte im Erdsystem beobachtbar zu machen. Um diese Ziele zu erreichen, gibt es unterschiedliche Ansätze für optische Uhren mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen.

2. Optische Ionenuhren

Geladene Atome können in einer Kombination aus statischen und dynamischen elektrischen Feldern einer Ionenfalle gefangen werden [Ghosh1996, Paul1990]. Das Wechselspiel zwischen der Bewegung der Ionen und den viel schneller oszillierenden elektrischen Kräften auf das Ion führt zu einem dreidimensionalen harmonischen Einschluss. Je nach Anordnung der elektrischen Felder kann die Falle entweder ein einzelnes Ion (sphärische Falle) oder eine ganze Kette (lineare Falle) an Ionen einfangen.

Wie bei allen Atomuhren hängt die erreichbare systematische Unsicherheit von den Eigenschaften der verwendeten atomaren Spezies ab. Statische und dynamische Magnetfelder führen zu einer Aufspaltung von magnetischen Unterniveaus, die genau bestimmt werden muss. Unterschiedliche elektrische Polarisierbarkeit oder Quadrupolmomente der beiden Uhrenniveaus führen zu Frequenzverschiebungen durch elektrische Wechselfelder bzw. Feldgradienten. Die thermische Schwarzkörperstrahlung führt bei den meisten Spezies ebenfalls zu signifikanten Linienverschiebungen. Mit speziellen Abfrageschemata und Mittelungsstrategien können viele dieser Frequenzverschiebungen eliminiert oder zumindest stark reduziert werden [Ludlow2015, Zanon-Willelte2018]. Einzelionenuhren basierend auf Sr^+ , Ca^+ , Hg^+ und dem Quadrupol- (E2) und Oktupol-Übergang (E3) in Yb^+ wurden erfolgreich demonstriert [Ludlow2015]. Dabei wurde beispielsweise für die Yb^+ -E3-Uhr eine systematische Unsicherheit von $3,2 \cdot 10^{-18}$ abgeschätzt [Huntemann2016]. Eine wichtige Voraussetzung für die Auswahl von geeigneten Uhrenkandidaten ist die Möglichkeit zur Laserkühlung. Allerdings wurden bereits in den 1980ern Uhrenkandidaten, wie z. B. Al^+ oder In^+ identifiziert [Dehmelt1981], die sich durch vorteilhafte atomare Eigenschaften auszeichneten, jedoch keinen Laserkühlübergang besaßen. Diese Herausforderung kann durch das gleichzeitige Fangen eines Uhren-Ions und eines Kühl-Ions in einer linearen Ionenfalle überwunden werden, da die starke Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Ionen die Laserkühlung des Kühl-Ions an das Uhren-Ion vermittelt. Zudem kann durch Einsatz von Techniken aus der Quanteninformationsverarbeitung der

interne Zustand des Uhren-Ions nach der Uhrenabfrage mit einer Reihe an Laserpulsen auf das Kühl-Ion übertragen und dort effizient nachgewiesen werden [Schmidt2005, Rosenband2008]. Dies wurde erstmals für die Kombination Al^+ und Be^+ demonstriert. Die sogenannte Al^+ -Quantenlogik-Uhr wurde auf $8 \cdot 10^{-18}$ systematische Unsicherheit evaluiert, dominiert durch Frequenzverschiebungen aufgrund der relativistischen Dopplerverschiebung aus der Restbewegung des Ions [Chou2010]. Weitere Uhrenkandidaten, die mit dieser Quantenlogik-Spektroskopie untersucht werden können und besondere Eigenschaften im Hinblick auf Tests fundamentaler Physik besitzen, werden im Beitrag "Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik" dieses Heftes diskutiert.

Im Hinblick auf transportable Uhren, wie sie für die Geodäsie benötigt werden, haben Ionenuhren den Vorteil einer geringen systematischen Unsicherheit, eines vergleichsweise kompakten Aufbaus und eines sehr geringen Bedarfs an Laserleistung. So wurde eine transportable $^{40}\text{Ca}^+$ -Uhr mit einem Volumen von knapp über $0,5 \text{ m}^3$ und einer abgeschätzten Unsicherheit von $7,8 \cdot 10^{-17}$ demonstriert [Cao2017]. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Quantentechnologie-Pilotprojekts „opticlock“ [OptiClock] wird in einem industriegeführten Konsortium ein Demonstrator einer Yb^+ -E2-Uhr für Anwender entwickelt. Eine transportable Al^+ -Uhr mit Ca^+ als Kühl-Ion mit dem Potenzial für zentimetergenaue Auflösung von Höhenunterschieden ist an der PTB in Entwicklung [Hannig2018].

Der wohl größte Nachteil von Einzel-Ionen-Uhren ist ihre hohe Instabilität aufgrund nur eines einzelnen abgefragten Atoms mit derzeit bis zu $\text{ca. } 10^{-15} / \sqrt{\tau}$, wobei τ die Mittelungszeit in Sekunden ist. Damit wird eine statistische Messunsicherheit von 10^{-18} erst nach etwas weniger als zwei Wochen Mittelungszeit erreicht. Uhrenlaser mit längerer Kohärenzzeit (siehe „Ultrastabile Laser“ in diesem Heft) würden längere Abfragezeiten erlauben und könnten diese Unsicherheit um eine und die Mittelungszeit um zwei Größenordnungen reduzieren [Leroux2017, Peik2006]. Alternativ werden an der PTB auch Konzepte basierend auf Multi-Ionen-Uhren verfolgt, die eine ähnliche Verbesserung der Unsicherheit versprechen, möglicherweise jedoch technisch einfacher umzusetzen sind. Details hierzu finden sich im Beitrag „Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik“ dieses Heftes.

3. Optische Gitteruhren

Durch die gleichzeitige Abfrage einiger hundert oder tausend neutraler Atome bieten optische Gitteruhren ein hervorragendes Signal-zu-Rausch-

Verhältnis, was wiederum zu einer niedrigen Instabilität der Uhren und kurzen Mittelungszeiten führt. Es wurden bereits Werte im mittleren $10^{-17} / \sqrt{\tau}$ demonstriert [Schioppo2017], die statistische Messunsicherheiten von $1 \cdot 10^{-18}$ oder Höhenauflösungen von 1 cm in einer Stunde ermöglichen.

Wie bereits eingangs beschrieben, ist die Speicherung der Atome eine notwendige Voraussetzung für hochgenaue optische Uhren. Gleichzeitig darf aber die Wechselwirkung des Atoms mit dem Fallenfeld nicht zu unkontrollierbaren Frequenzverschiebungen des Referenzübergangs führen. In Erdalkali-ähnlichen Elementen bietet sich die Möglichkeit, eine optische Dipolfalle bei einer bestimmten Wellenlänge zu betreiben, bei der die Polarisierung des Atoms durch den Dipolfallenlaser in beiden Zuständen des Referenzübergangs in erster Ordnung gleich ist. Der Übergang erfährt somit keine Frequenzverschiebung und die Uhr verliert nicht an Genauigkeit [Katori1999]. Wird die Dipolfalle als Stehwelle ausgeführt (einem optischen Gitter), erlaubt das Interferenzmuster den starken Einschluss, der für die Doppler-freie Abfrage der Atome notwendig ist. Das Konzept der Gitteruhr kann mit einer Reihe von Elementen umgesetzt werden. Meistens werden Sr und Yb verwendet, aber auch Hg, Mg oder Cd werden eingesetzt [Ludlow2015].

Da die Atome im Normalfall bei der Detektion nach der Abfrage des Referenzübergangs aus der im Vergleich zu Ionen flachen Falle verlorengehen, führt das Nachladen der Falle mit lasergekühlten Atomen zu signifikanten Totzeiten, während denen die Laserfrequenz nicht mit den Atomen überwacht wird. Sie führen zu einer Verringerung der Uhrenstabilität aufgrund von nichtdetektiertem Laserrauschen [Dick1988]. Durch die verbesserten Kohärenzzeiten der Abfragelaser (siehe Beitrag 2 in diesem Heft) von mehreren Sekunden fallen Totzeiten gegenüber den Abfragezeiten inzwischen weniger ins Gewicht, und Uhreninstabilitäten von ca. $1 \cdot 10^{16} / \sqrt{\tau}$ werden erreicht [Hinkley2013, AlMasoudi2015, Nicholson2015]. Werden Atome alternierend in zwei Aufbauten präpariert, können ihre Abfragen verschachtelt werden, und die mit der Totzeit verbundene Degradierung der Stabilität wird vermieden. Auf diesem Weg wurden sogar Instabilitäten von $6 \cdot 10^{-17} / \sqrt{\tau}$ erreicht [Schioppo2017].

Durch die hohen Stabilitäten der Uhren wurden die Untersuchung eines Teils der systematischen Unsicherheiten und deren Validierung durch Uhrenvergleiche vereinfacht. Ein weiterer Fortschritt wurde durch das verbesserte Verständnis der Hauptstörung von Sr- und Yb-Gitteruhren erreicht, nämlich der Frequenzverschiebung durch die Wechselwirkung mit dem thermischen Strahlungsfeld der Umgebung. Die niedrigsten

Unsicherheiten liegen jetzt im Bereich von $2 \cdot 10^{-18}$ [Nicholson2015, McGrew2018], lokale Vergleiche zweier Yb-Uhren belegten ihre Unsicherheit auf diesem Niveau [McGrew2018].

Leider gehen die Laserkühlung neutraler Atome und ihre Speicherung in optischen Gittern mit einem relativ komplexen optischen Aufbau einher. Trotzdem wurde der robuste Betrieb über längere Zeiträume berichtet [Lodewyck2016, Hill2016]. Die Komplexität des Aufbaus stellt auch erhöhte Anforderungen an die Entwicklung transportabler Gitteruhren. Mit dem langfristigen Ziel einer Anwendung im Weltraum wird der Aufbau einer Sr-Gitteruhr von einem europäischen Konsortium verfolgt [Bongs2015, Origlia2016]. Die PTB entwickelt ebenfalls eine transportable Sr-Uhr [Vogt2016, Koller2017], die in einem klimatisierten Transportanhänger betrieben werden kann. Dieser Aufbau wurde für erste Demonstrationsexperimente zur relativistischen Geodäsie eingesetzt [Grotti2018] und verspricht Höhenauflösungen von ca. 10 cm.

4. Geodäsie

Eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie ist die Bereitstellung eines physikalischen Höhensystems, das auf das Schwerefeld der Erde bezogen ist. Aktuelle Realisierungen haben Genauigkeiten zwischen einigen Zentimetern und wenigen Dezimetern, während für viele Anwendungen Subzentimeter-Genauigkeit angestrebt wird. Höhensysteme sind Referenzsysteme in vertikaler Richtung. Wir benötigen sie etwa in der Wasserwirtschaft (z. B. zur Realisierung von Wasserleitungen über große Entfernungen), dem Planungs- und Ingenieurwesen (etwa beim Bau von großen Tunneln und Brücken) oder in der, im Rahmen der aktuellen Klimadebatte immer stärker geforderten, globalen geowissenschaftlichen Erdbeobachtung (z. B. zur Überwachung von relativen Meeresspiegelvariationen) [Gerlach2017]. Der Bezug zum Schwerefeld ist deswegen notwendig, damit immer gewährleistet ist, dass Wasser von oben nach unten fließt, also von einem Ort geringeren Schwerepotentials (der höher liegt) zu einem Ort mit größerem Schwerepotential (der also niedriger ist). Präzise Uhren können genau solche Potentialunterschiede unter Ausnutzung der Einsteinschen Relativitätstheorie messen (siehe Kasten).

Um nun so ein physikalisches Höhensystem zu realisieren, muss die Höhe entsprechend definiert sein, und man benötigt die zugehörige Referenzfläche, bezüglich derer die Höhe gemessen wird. Die Höhenbezugsfläche, das Geoid, entspricht näherungsweise der mittleren Meeresoberfläche in Ruhe, die man sich gedanklich unter den Kontinenten fortgesetzt vorstellen kann. Diese Fläche ist durch einen konstanten Schwerepotentialwert

Relativität und Zeit

Die von Albert Einstein aufgestellte Allgemeine Relativitätstheorie unterscheidet nicht streng zwischen Zeit und Ort, sondern verknüpft beide zu einer gemeinsamen Raumzeit, deren Form durch Massen beeinflusst wird. Eine Konsequenz der Theorie ist, dass der Verlauf der Zeit von der Position des Betrachters und seiner Bewegung in der Raumzeit abhängt. Jede Uhr tickt entsprechend ihrer „Eigenzeit“. Wenn Uhren in unterschiedlichen Gravitationspotentialen verglichen werden, tickt eine Uhr nahe einer großen Masse langsamer als eine weit entfernte Uhr im potentialfreien Raum, die eine „Koordinatenzeit“ realisiert.

Beide Systeme sind durch eine Koordinatentransformation verknüpft, die für kleine Massen wie die unserer Erde das Raumzeitintervall ds der Uhr mit den Koordinaten (x, y, z) und der Koordinatenzeit t verbindet:

$$ds^2 \approx (1 - 2|U|/c^2) c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Hier ist c die Lichtgeschwindigkeit und U das Newton'sche Gravitationspotential der Erde. Die Eigenzeit der Uhr ergibt sich aus $d\tau = ds/c$; das Verhältnis von Eigen- und Koordinatenzeit ist folglich

$$\frac{d\tau}{dt} = \sqrt{1 - \frac{2|U|}{c^2} - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{|U|}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} = 1 + \frac{\Delta f}{f_0}$$

und skaliert wie die relative Änderung $\Delta f/f_0$ der in beiden Systemen beobachteten Uhrenfrequenz. Der Beitrag mit dem Quadrat der Geschwindigkeit $v^2 = (dx^2 + dy^2 + dz^2) / dt^2$ wird als relativistischer Dopplereffekt, der Term U/c^2 als relativistische oder Gravitationsrotverschiebung bezeichnet.

Eine auf der Erde ruhende Uhr erfährt aufgrund der Erdrotation einen von der geografischen Breite ihrer Position abhängigen relativistischen Dopplereffekt. Dieser kann nicht von der relativistischen Rotverschiebung unterschieden werden, sodass ein Schwerepotential Φ definiert wird, das beide Beiträge beinhaltet. Äquipotentialflächen von Φ dienen in der Geodäsie als Höhenreferenzflächen (siehe „Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie“). Die Differenz der Schwerepotentiale zweier Orte kann mit dort stationierten, genauen Uhren aus ihrem Frequenzunterschied Δf ermittelt werden.

charakterisiert (siehe Abbildung 3). Das Geoid kann man großräumig aus Satellitenbeobachtungen, etwa aus den Daten der GRACE- und GOCE-Missionen, berechnen. Für eine hohe räumliche Auflösung müssen terrestrische Schweremessungen ergänzt werden [Denker2013].

Weltweit gibt es hunderte verschiedener lokaler und regionaler Höhensysteme – oft an Ländergrenzen gebunden. Diese wurden klassischerweise mittels großräumiger Nivellements – also der relativen geometrischen Höhenübertragung von Punkt zu Punkt entlang ausgewählter Profile – und Schwerekorrekturen [Torge2012] erzeugt und per Definition an ein Höhendatum, also etwa einen Meerespegel wie z. B. Amsterdam, angehängt.

Da die diversen Meerespegel aufgrund lokaler Abweichungen, z. B. durch die Meeresströmungen, überall unterschiedlich sind, kommt es zu Versätzen im Dezimeter-Bereich zwischen den Höhensystemen. Durch die Nivellements, deren Fehler entfernungsabhängig anwachsen, sind die Höhensysteme zudem großräumig geneigt oder anderweitig systematisch „verbogen“. Man hat dadurch Höhenfehler im Zentimeterbereich über einige hundert Kilometer.

Als zweite Gruppe – neben den schwerefeldbezogenen Höhen – gibt es sogenannte geometrische Höhen, die man etwa aus Beobachtungen mittels GNSS gewinnen kann. Deren Höhenreferenz ist die Oberfläche des mittleren Rotationsellipsoids

der Erde. Das heißt, die geometrische Höhe hängt davon ab, wie man die Größe des Ellipsoids festlegt und wie man es bezüglich der Erdoberfläche orientiert. Solche geometrischen Höhensysteme können also nicht gewährleisten, dass Wasser immer „von oben nach unten fließt“, da der physikalische Bezug fehlt. In Abbildung 3 wird der Zusammenhang zwischen physikalischen und geometrischen Höhen illustriert.

Uhrmessungen können nun hervorragend dazu genutzt werden, lokale und regionale Höhensysteme zu vereinheitlichen und systematische Abweichungen innerhalb von Höhensystemen zu beseitigen. Sie können auch genutzt werden, um Realisierungen des Geoids zu verbessern und Diskrepanzen zwischen gravimetrisch und geometrisch bedingten Realisierungen von Höhensystemen aufzulösen [Denker2018, Müller2018].

Kombiniert man Schwerepotential-Messungen von Uhren mit Beobachtungen, die Ableitungen des Potentials liefern, also etwa Schwerebeschleunigungen mit Gravimetern oder Gradientenmessungen, lassen sich Signalanteile (Atmosphäre, Grundwasser, Dichteanomalien, Hohlräume, etc.) trennen, da die diversen Observablen unterschiedlich sensitiv bezüglich der Schwerestörungen sind [Bondaescu2015].

eines Wasserstoffmasers auf einer Rakete mit einer Flughöhe von 10 000 km [Vessot1980].

Mit relativen Unsicherheiten von im besten Fall wenigen 10^{-16} konnten Mikrowellenuhren zwar Einsteins Theorie testen, sie aber nicht sinnvoll für die Geodäsie ausnutzen: Die entsprechende Höhenauflösung von ca. 1 m war zu etablierten Methoden in der Geodäsie nicht konkurrenzfähig. Optische Atomuhren versprechen jetzt aber Messungen mit Zentimeter-Genauigkeit und könnten relevante Beiträge zu Höhennetzwerken leisten. Um diesen Schritt zu gehen, müssen aber sowohl die Methoden der Frequenzübertragung als auch die Uhren selbst auf diesem Genauigkeitsniveau validiert sein. Andernfalls verfälschen unerkannte Frequenzoffsets der Uhren die Bestimmung der Höhendifferenz zwischen ihnen. Speziell für einzelne optische Uhren in voneinander weit entfernten Instituten ist dies keine einfache Aufgabe. Die Folge ist, dass bisher meist die Geodäsie einen Beitrag zur Frequenzmetrologie liefert und nicht umgekehrt. Die Uhren in unterschiedlichen Instituten werden mit hoher Genauigkeit verglichen und die Ergebnisse um die von geodätischer Seite beigesteuerte relativistische Rotverschiebung korrigiert, um den Gleichtakt der Uhren zu überprüfen [Yamaguchi2011, Lisdat2016, Takano2016].

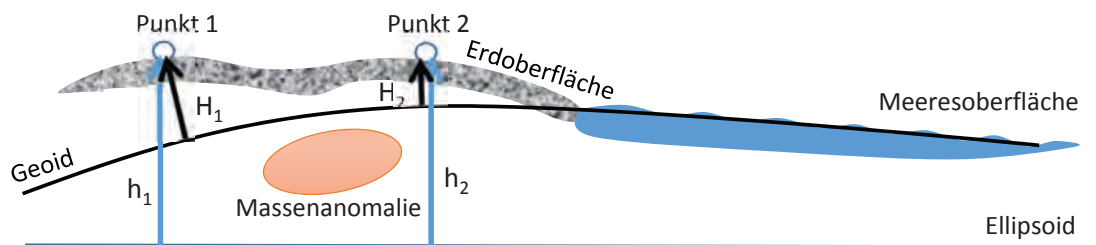


Abbildung 3: Die Form des Geoids (also der physikalisch definierten Höhenbezugsfläche) wird durch die tatsächliche Massenverteilung in und auf der Erde bestimmt. Das Geoid hat daher einen nicht-konstanten Abstand zum rein geometrischen Ellipsoid, das von Massen-anomalien unbeeinflusst bleibt. Obwohl die ellipsoidischen Höhen h_1 und h_2 gleich sind, würde in diesem Beispiel das Wasser von Punkt 1 zu Punkt 2 fließen, da die physikalische (im Schwerfeld) definierte Höhe H_1 größer ist als H_2 .

5. Demonstrationsexperimente zur Geodäsie mit Uhren

Die Auswirkungen der Einsteinschen Relativitätstheorie auf den Verlauf der Zeit wurden schon in den frühen 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts mit Uhren nachgewiesen. Kommerzielle Cs-Uhren wurden in Flugzeugen transportiert und die von ihnen gemessene Eigenzeit mit stationären Referenzuhren verglichen. Die beobachteten Gangunterschiede entsprachen genau den Vorhersagen der Theorie [Hafele1972a, Hafele1972b]. Mitte desselben Jahrzehnts gelang dann der bisher genaueste Test der Gravitationsrotverschiebung durch die Beobachtung der Frequenzänderung

Durch den Einsatz transportabler Uhren kann dieses Problem zumindest teilweise umgangen werden. Der transportable Aufbau kann gegen die Referenzuhr validiert werden, bevor er zu seinem Einsatzort überführt wird. In diesem Szenario muss dann „nur“ sichergestellt werden, dass die transportierte Uhr auch nach den Störungen der Reise mit gleicher Genauigkeit betrieben und evaluiert werden kann wie beim lokalen Vergleich. Darüber hinaus erlaubt dieses Vorgehen eine erheblich höhere Flexibilität in der Auswahl der Messpunkte, die allein durch die Notwendigkeit eines hochgenauen Frequenzlinks zur Referenzuhr begrenzt wird.

Allerdings haben transportable optische Uhren

einen hohen Komplexitätsgrad und Anfälligkeit der Aufbauten. Die erste vollständige Demonstration einer Potentialdifferenzmessung wurde von Grotti et al. (2018) [Grotti2018] mit der transportablen Sr-Gitteruhr der PTB durchgeführt. Zwar blieb die erreichte Genauigkeit von 18 m der Messung des Höhenunterschiedes von 1000 m deutlich hinter den geodätischen Möglichkeiten zurück, dafür wurden aber die oben genannten Randbedingungen der lokalen Validierung zusätzlich zum Vergleich der entfernten Uhren erfüllt.

Mit der Weiterentwicklung der optischen Uhren werden die Rekordergebnisse mit Unsicherheiten von wenigen 10^{-18} durch Vergleiche abgesichert werden. Das wachsende Vertrauen und die erhöhte Betriebssicherheit werden einfachere Kampagnen und Anwendungen in der Geodäsie ermöglichen. Es ist davon auszugehen, dass kommerzielle Produkte entwickelt werden, wie es beispielsweise in dem Projekt „opticklock“ [OptiClock] angestoßen wird. Damit werden dann einfacher zu bedienende Systeme verfügbar sein, die einen Betrieb mit hoher Verfügbarkeit außerhalb metrologischer Institute erlauben und damit Anwendungen nicht nur in der Geodäsie, sondern auch beispielsweise für die Synchronisierung weit ausgedehnter Daten- und Radioteleskop-Netzwerke erschließen werden [Clivati2017].

Literatur

- [AlMasoudi2015] A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, *Noise and instability of an optical lattice clock*, Phys. Rev. A **92**, 063814 (2015)
- [Bondaescu2015] R. Bondaescu, A. Schärer, A. Lundgren, G. Hetenyi, N. Houlié, P. Jetzer und M. Bondaescu, *Ground-based optical clocks as a tool to monitor vertical surface motion*, Geophysical Journal International **202**, 1770 (2015)
- [Bongs2015] K. Bongs, Y. Singh, L. Smith, W. He, O. Kock, D. Swierad, J. Hughes, S. Schiller, S. Alighanbari, S. Origlia, S. Vogt, U. Sterr, C. Lisdat, R. Le Targat, J. Lodewyck, D. Holleville, B. Venon, S. Bize, G. P. Barwood, P. Gill, I. R. Hill, Y. B. Ovchinnikov, N. Poli, G. M. Tino, J. Stuhler, W. Kaenders and the SOC2 team, *Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS*, C. R. Physique **16**, 553 (2015)
- [Cao2017] J. Cao, P. Zhang, J. Shang, K. Cui, J. Yuan, S. Chao, S. Wang, H. Shu, X. Huang, *A compact, transportable single-ion optical clock with $7.8 \cdot 10^{-17}$ systematic uncertainty*, Appl. Phys. B **123**, 112 (2017)
- [Chou2010] C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, T. Rosenband, *Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al^+ Optical Clocks*, Phys. Rev. Lett. **104**, 070802 (2010)
- [Clivati2017] C. Clivati, R. Ambrosini, T. Artz, A. Bertarini, C. Bortolotti, M. Frittelli, F. Levi, A. Mura, G. Maccaferri, M. Nanni, M. Negusini, F. Perini, M. Roma, M. Stagni, M. Zucco, D. Calonico, *A VLBI experiment using a remote atomic clock via a coherent fibre link*, Scientific Reports **7**, 40992 (2017)
- [Dehmelt1981] H. G. Dehmelt, *Coherent spectroscopy on single atomic systems at rest in free space II*, J. Phys. Colloq. **42**, C8–299–305 (1981)
- [Denker2013] H. Denker, *Regional gravity field modeling: theory and practical results*. In: Xu, G. (Hrsg.) Sciences of Geodesy – II. Innovations and Future Developments, 185–291, Springer, Berlin/Heidelberg (2013)
- [Denker2018] H. Denker, L. Timmen, C. Voigt, S. Weyers, E. Peik, H. S. Margolis, P. Delva, P. Wolf, G. Petit, *Geodetic methods to determine the relativistic redshift at the level of 10^{-18} in the context of international timescales: a review and practical results*, Journal of Geodesy **92**, 487 (2018)
- [Dick1988] G. J. Dick, *Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards*, Proceedings of 19th Annu. Precise Time and Time Interval Meeting, Redondo Beach, 1987, U.S. Naval Observatory, 133 (1988)
- [Gerlach2017] C. Gerlach, T. Gruber, R. Rummel, *Höhensysteme der nächsten Generation, Erdmessung und Satellitengeodäsie* (Hrsg. Rummel). Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von W. Freeden und R. Rummel. S. 349 (2017)
- [Ghosh1996] P. K. Ghosh, *Ion Traps*, 1 edition (Clarendon Press, 1996)
- [Grotti2018] J. Grotti, S. Koller, S. Vogt, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, H. Denker, C. Voigt, L. Timmen, A. Rolland, F. N. Baynes, H. S. Margolis, M. Zampaolo, P. Thoumany, M. Pizzocaro, B. Rauf, F. Bregolin, A. Tampellini, P. Barbieri, M. Zucco, G. A. Costanzo, C. Clivati, F. Levi, D. Calonico, *Geodesy and metrology with a transportable optical clock*, Nature Physics **14**, 437 (2018)
- [Hänsch2006] T. Hänsch, *Nobel Lecture: Passion for precision*, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297 (2006)
- [Hafele1972a] J. C. Hafele und R. E. Keating, *Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains*, Science **177**, 166 (1972)
- [Hafele1972b] J. C. Hafele und R. E. Keating, *Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains*, Science **177**, 168 (1972)
- [Hall2006] J. Hall, *Nobel Lecture: Defining and measuring optical frequencies*, Rev. Mod. Phys. **78**, 1279 (2006)
- [Hannig2018] S. Hannig, L. Pelzer, N. Scharnhorst, J. Kramer, M. Stepanova, Z. Xu, N. Spethmann, I. D. Leroux, T. E. Mehlstäubler, P. O. Schmidt, *Towards a Transportable Aluminium Ion Quantum Logic Optical Clock*, arXiv:1901.02250 (2019)

- [Hill2016] I. R. Hill, R. Hobson, W. Bowden, E. M. Bridge, S. Donnellan, E. A. Curtis, P. Gill, *A low maintenance Sr optical lattice clock*, J. Phys.: Conf. Ser. **723**, 012019 (2016)
- [Hinkley2013] N. Hinkley, J. A. Sherman, N. B. Phillips, M. Schioppo, N. D. Lemke, K. Beloy, M. Pizzocaro, C. W. Oates, A. D. Ludlow, *An atomic clock with 10^{-18} instability*, Science **341**, 1215 (2013)
- [Huntemann2016] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm, E. Peik, *Single-Ion Atomic Clock with $3 \cdot 10^{-18}$ Systematic Uncertainty*, Phys. Rev. Lett. **116**, 063001 (2016)
- [Jespersen1999] J. Jespersen und J. Fitz-Randolph, *From Sundials to Atomic Clocks*, Monograph **155** (National Institute of Standards and Technology, 1999). <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nistmonograph155e1999.pdf>
- [Katori1999] H. Katori, T. Ido, M. Kuwata-Gonokami, *Optimal Design of Dipole Potentials for Efficient Loading of Sr Atoms*, J. Phys. Soc. Jpn. **68**, 2479 (1999)
- [Koller2017] S. B. Koller, J. Grotti, S. Vogt, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, U. Sterr, C. Lisdat, *Transportable Optical Lattice Clock with $7 \cdot 10^{-17}$ Uncertainty*, Phys. Rev. Lett. **118**, 073601 (2017)
- [Leroux2017] I. D. Leroux, N. Scharnhorst, S. Hannig, J. Kramer, L. Pelzer, M. Stepanova, P. O. Schmidt, *On-line estimation of local oscillator noise and optimisation of servo parameters in atomic clocks*, Metrologia **54**, 307 (2017)
- [Lisdat2016] C. Lisdat, G. Grosche, N. Quintin, C. Shi, S. Raupach, C. Grebing, D. Nicolodi, F. Stefani, A. Al-Masoudi, S. Dörscher, S. Häfner, J.-L. Robyr, N. Chiodo, S. Bilicki, E. Bookjans, A. Koczwara, S. Koke, A. Kuhl, F. Wiotte, F. Meynadier, E. Camisard, M. Abgrall, M. Lours, T. Legero, H. Schnatz, U. Sterr, H. Denker, C. Chardonnet, Y. Le Coq, G. Santarelli, A. Amy-Klein, R. Le Targat, J. Lodewyck, O. Lopez, P.-E. Pottie, *A clock network for geodesy and fundamental science*, Nature Com. **7**, 12443 (2016)
- [Lodewyck2016] J. Lodewyck, S. Bilicki, E. Bookjans, J.-L. Robyr, C. Shi, G. Vallet, R. Le Targat, D. Nicolodi, Y. Le Coq, J. Guéna, M. Abgrall, P. Rosenbusch, S. Bize, *Optical to microwave clock frequency ratios with a nearly continuous strontium optical lattice clock*, Metrologia **53**, 1123 (2016)
- [Ludlow2015] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik, P. O. Schmidt, *Optical atomic clocks*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015)
- [McGrew2018] McGrew et al., Nature **564**, 87 (2018)
- [Mehlstäubler2018] T. E. Mehlstäubler, G. Grosche, C. Lisdat, P. O. Schmidt, H. Denker, *Atomic clocks for geodesy*, Rep. Prog. Phys. **81**, 064401 (2018)
- [Müller2018] J. Müller, D. Dirckx, S. M. Kopeikin, G. Lion, I. Panet, G. Petit, P. N. A. M. Visser, *High Performance Clocks and Gravity Field Determination*, Space Sci. Rev. **214**, 5 (2018)
- [Nicholson2015] T. L. Nicholson, S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti, B. J. Bloom, R. L. McNally, W. Zhang, M. D. Barrett, M. S. Safronova, G. F. Strouse, W. L. Tew, J. Ye, *Systematic evaluation of an atomic clock at $2 \cdot 10^{-18}$ total uncertainty*, Nature Com. **6**, 6896 (2015)
- [OptiClock] opticklock, <http://www.opticklock.de/info/>
- [Origlia2016] S. Origlia, S. Schiller, M. S. Pramod, L. Smith, Y. Singh, W. He, S. Viswam, D. Świerad, J. Hughes, K. Bongs, U. Sterr, C. Lisdat, S. Vogt, S. Bize, J. Lodewyck, R. Le Targat, D. Holleville, B. Venon, P. Gill, G. Barwood, I. R. Hill, Y. Ovchinnikov, A. Kulosa, W. Ertmer, E.-M. Rasel, J. Stuhler, W. Kaenders, *Development of a strontium optical lattice clock for the SOC mission on the ISS*, Proc. SPIE 9900–990003–990003–12 (2016)
- [Paul1990] W. Paul, *Electromagnetic traps for charged and neutral particles*, Rev. Mod. Phys. **62**, 531 (1990)
- [Peik2006] E. Peik, T. Schneider, C. Tamm, *Laser frequency stabilization to a single ion*, J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. **39**, 145 (2006)
- [Rosenband2008] T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, J. C. Bergquist, *Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place*, Science **319**, 1808 (2008)
- [Schioppo2017] M. Schioppo, R. C. Brown, W. F. McGrew, N. Hinkley, R. J. Fasano, K. Beloy, T. H. Yoon, G. Milani, D. Nicolodi, J. A. Sherman, N. B. Phillips, C. W. Oates, A. D. Ludlow, *Ultra-stable optical clock with two cold-atom ensembles*, Nature Photonics **11**, 48 (2017)
- [Schmidt2005] P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, D. J. Wineland, *Spectroscopy Using Quantum Logic*, Science **309**, 749–752 (2005)
- [SI2014] Organisation Intergouvernementale and de la Convention du Mètre, SI Brochure: *The International System of Units (SI)*, (2014)
- [Stenger2017] J. Stenger, J. Graf, A. Bauch, P. Whibberley, M. Lombardi, G. Beutler, C. Kiefer, E. Peik, *50 Jahre atomare Definition der Sekunde, 50 Years of the Atomic Definition of the Second*, PTB Mitteilungen **127**, 85 (2017)
- [Takano2016] T. Takano, M. Takamoto, I. Ushijima, N. Ohmae, T. Akatsuka, A. Yamaguchi, Y. Kuroishi, H. Munekane, B. Miyahara, H. Katori, *Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks*, Nature Photonics **10**, 662 (2016)

- [Torge2012] W. Torge, J. Müller, *Geodesy*, 4th edition, de Gruyter, Berlin/Boston (2012)
- [Vessot1980] R. F. C. Vessot, M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, R. Dechel, P. B. Eby, C. R. Baugher, J. W. Watts, D. L. Teuber, F. D. Wills *Test of relativistic gravitation with a space-borne hydrogen maser*, Phys. Rev. Lett. **45**, 2081 (1980)
- [Vogt2016] S. Vogt, S. Häfner, J. Grotti, S. Koller, A. Al-Masoudi, U. Sterr, C. Lisdat, *A transportable optical lattice clock*, J. Phys.: Conf. Ser. **723**, 012020 (2016)
- [Yamaguchi2011] A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Li, T. Ido, T. Takano, M. Takamoto, H. Katori, *Direct Comparison of Distant Optical Lattice Clocks at the 10^{-16} Uncertainty*, Appl. Phys. Express **4**, 082203 (2011)
- [ZanonWillette2018] T. Zanon-Willette, R. Lefevre, R. Metzдорff, N. Sillitoe, S. Almonacil, Marco Minissale, E. de Clercq, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, E. Arimondo, *Composite laser-pulses spectroscopy for high-accuracy optical clocks: a review of recent progress and perspectives*, Rep. Prog. Phys. **81**, 094401 (2018)

Neue Frequenznormale und Tests fundamentaler Physik

André P. Kulosa¹, Tanja E. Mehlstäubler², Ekkehard Peik³,
Piet O. Schmidt⁴, Andrey Surzhykov⁵

Die Fortschritte, die in den letzten Jahren in der Entwicklung von optischen Uhren erzielt wurden, sind spektakulär und es scheint bei den am weitesten fortgeschrittenen Systemen auch bisher keine harte Begrenzung der erreichbaren Genauigkeit in Sicht zu sein. Dennoch, oder vielleicht auch deswegen, hat sich ein großes Interesse entwickelt, noch weitere und andersartige Ansätze für Atomuhren zu erforschen und den Kreis der untersuchten physikalischen Systeme auszuweiten. Die experimentellen Methoden der Speicherung und Laserkühlung von Atomen und Ionen sind so weit entwickelt, dass sie erfolgreich auf immer größere Gruppen von chemischen Elementen angewandt werden konnten. Bei gespeicherten Ionen ermöglicht das Gleichgewicht aus Coulomb-Abstoßung und der einschließenden Kraft einer Ionenfalle die Bildung von stabilen Strukturen unterschiedlicher Ionen, die in ihren inneren und äußeren Freiheitsgraden bis in den Quantenbereich kontrolliert und damit für Frequenzmessungen höchster Präzision verwendet werden können. Die mit einer größeren Ionenzahl erreichbare höhere Stabilität soll in der Multi-Ionen-Uhr ausgenutzt werden, die im ersten Abschnitt dieses Artikels eingeführt wird. Anschließend werden zwei physikalische Systeme mit großem Potenzial für präzise Uhren vorgestellt: hochgeladene Ionen und der Atomkern Thorium-229, der eine optische Resonanzfrequenz besitzt. Neben der Aussicht auf neue Uhren sehr hoher Genauigkeit begründen auch die Möglichkeiten für Tests fundamentaler Physik das Interesse an diesem Forschungsgebiet. Hochpräzise Frequenzvergleiche sollen genutzt werden, um nach kleinen Abweichungen von den Vorhersagen der etablierten physikalischen Theorien zu suchen, hervorgerufen von erwarteten Effekten „Neuer Physik“, wie zum Beispiel einer zeitlichen Veränderung von Naturkonstanten oder einer Kopplung der Uhren an die rätselhafte „Dunkle Materie“. Die hier vorgestellten, neuen Systeme zeichnen sich durch besonders hohe Empfindlichkeiten für solche Tests aus. Der Vergleich physikalisch möglichst unterschiedlicher Uhren erhöht die Wahrscheinlichkeit, wirklich neue Effekte nachzuweisen, und wird es erlauben, sie von experimentellen Störungen zu unterscheiden.

1. Quantenuhren der Zukunft: Multi-Ionen-Uhren

Optische Uhren mit gespeicherten Ionen besitzen nach aktuellem Stand der Technik relative systematische Frequenzunsicherheiten, die im Bereich von wenigen $1 \cdot 10^{-18}$ liegen. Dies bedeutet eine Messpräzision von 18 Stellen hinter dem Komma, was Atomuhren basierend auf lasergekühlten Ionen zu den genauesten Apparaten macht, die je von Menschenhand entwickelt wurden. Die in diesen Experimenten verwendeten Ionenfallen speichern die positiv geladenen Teilchen durch eine Kombination aus Gleichspannungs- und Wechselspannungs-Feldern im Radiofrequenz(RF)-Bereich. Sie ermöglichen einen tiefen Einschluss (in der Größenordnung von 10^4 K) der Ionen, ohne dabei ihre elektronischen Energieniveaus in erster Näherung zu beeinflussen. Daraus resultiert die Möglichkeit, Ionen von externen Störungen abzuschirmen, was eine ideale Voraussetzung für Präzisionsspektroskopie darstellt. Eine fundamentale Limitierung, um mit der Uhrenunsicherheit in den 10^{-19} -Bereich vorzustoßen, ist derzeit nicht absehbar. Neben der Anwendung als hochstabile Frequenzreferenz können auch einige Gebiete der fundamentalen Forschung von diesen Genauigkeitsniveaus profitieren, z. B. die Suche nach „Neuer Physik“, die über das Standardmodell hinausgeht oder Tests auf mögliche Verletzungen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Stabile und reproduzierbare optische Uhren ebnet darüber hinaus auch den Weg für interdisziplinäre Anwendungen, wie z. B. die chronometrische Höhenvermessung in der Geodäsie (siehe Artikel "Optische Uhren und ihre Anwendung in der Geodäsie" dieses Heftes). Hier gibt ein Frequenzvergleich zweier, voneinander entfernter Uhren mittels relativistischer Zeitdilatation Aufschluss über ihren Unterschied im Gravitationspotential der Erde: Je weiter ein Beobachter vom Erdmittelpunkt entfernt ist, desto schneller vergeht die Zeit für ihn. Relative Frequenzunsicherheiten von 10^{-18} und besser ermöglichen eine Auflösung von Höhenunterschieden unter 1 cm auf der Erdoberfläche, was den Gebrauch von optischen Uhren als hochsensitive Quantensensoren nahelegt.

- 1 Dr. André P. Kulosa, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, E-Mail: andre.kulosa@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0003-0982-4113>
- 2 PD Dr. Tanja E. Mehlstäubler, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, E-Mail: tanja.mehlstaebler@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0003-3430-4689>
- 3 PD Dr. Ekkehard Peik, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, PTB Braunschweig, E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0001-6309-2975>
- 4 Prof. Dr. Piet O. Schmidt, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, Institut für Quantenoptik, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: piet.schmidt@quantummetrology.de, <https://orcid.org/0000-0003-0773-5889>
- 5 Prof. Dr. Andrey Surzhykov, Fundamental Physics for Metrology, PTB Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, E-Mail: andrey.surzhykov@ptb.de, <https://orcid.org/0000-0002-6441-0864>

1.1 Warum überhaupt Multi-Ionen-Uhren?

Ein Nachteil in der heutigen Generation von Atomuhren, die mit einem einzelnen Ion arbeiten, ist das geringe Signal-zu-Rausch-Verhältnis des einzelnen Quantenabsorbers, welches die erreichbare Kurzzeitstabilität während der Uhrenabfrage limitiert. Optische Atomuhren basierend auf lasergekühlten Ionen benötigen nach heutigem Stand der Technik Integrationszeiten von mehreren 10 bis 100 Tagen, um eine relative Frequenzauflösung von 10^{-18} zu erreichen. Dies entspricht dem derzeitigen Ziel für geodätische Messungen. Allerdings sind solch lange Integrationszeiten eher ein Hindernis für Messkampagnen im „freien Feld“. Eine Verbesserung der Kurzzeitstabilität von Ionen-basierten Frequenznormalen ist daher von entscheidender Bedeutung, um die gleiche Frequenzauflösung wesentlich schneller zu erreichen.

Eine Möglichkeit, die Stabilität von Atomuhren basierend auf Einzelionen zu verbessern, ist die Abfrage schmalere, atomarer Übergänge und die daraus resultierende Erhöhung des Gütefaktors $Q = f_0/\Delta f$ der aufgelösten Linie, wobei f_0 die Absolutfrequenz und Δf die Linienbreite des Uhrenübergangs darstellen. Dafür wird jedoch eine ausgezeichnete Stabilität des Uhrenlasers benötigt, was mit weiteren technischen Herausforderungen einhergeht: Um Fourier-limitierte Spektroskopie an Millihertz-breiten, atomaren Übergängen durchführen zu können, muss der Uhrenlaser eine Kurzzeit-Linienbreite ebenfalls im Millihertz-Bereich besitzen. Aufgrund der binären Information, die man bei Spektroskopie eines einzelnen Ions erhält, werden lange Integrationszeiten τ benötigt, um genügend Statistik zu erhalten, um den Laser auf das atomare Signal zu stabilisieren. Für die Auflösung eines Millihertz-breiten Uhrenübergangs und die Stabilisierung eines Lasers darauf mittels Standard-Spektroskopie, muss der Uhrenlaser beispielsweise eine Frequenzstabilität im unteren 10^{-17} -Bereich über mehrere Minuten aufweisen, um das Quantenprojektionsrauschen

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{2\pi f_0} \sqrt{\frac{1}{NT\tau}} \quad (1)$$

des Ions zu erreichen. N ist hier die Anzahl der spektroskopierten Atome und T die Wechselwirkungszeit der Uhrenabfrage. Dies ist keine leichte Herausforderung, besonders wenn kompakte oder feldtaugliche Instrumente eingesetzt werden. Im Bereich der Frequenzmetrologie wird derzeit ein enormer Aufwand betrieben, um die Limitierungen der Lokaloszillatoren hinsichtlich ihrer Stabilität weiter zu reduzieren, siehe Artikel "Ultrastabile Laser" in diesem Heft. Laser, die auf kryogene Resonatoren mit einem thermischen

Rausch-Limit von $\sigma = 4 \cdot 10^{-17}$ stabilisiert werden, zeigten kürzlich eine Phasen-Kohärenzzeit von ungefähr 16 Sekunden. Eine Ausdehnung der Uhrenabfrage zu längeren Kohärenzzeiten von mehreren Sekunden muss dabei Hand in Hand mit einer verbesserten Kontrolle der Ionenbewegung auf diesen Zeitskalen gehen, welche vor allem durch übermäßiges Heizen des Ions aufgrund von Rauschen des elektrischen Feldes, Mikrobewegung im RF-Potential und Hintergrundstöße beeinträchtigt wird.

Eine schnellere Anbindung des Uhrenlasers an das Atom und ein schnelleres Auslesen der Uhr mit hoher Genauigkeit kann u. a. mit neuen, phasensensitiven Abfrage-Schemata erzielt werden, in welchen mehrere Atomuhren-Ensembles in einer kaskadierten Abfrage verwendet werden, um die Phasenentwicklung des Uhrenlasers mit steigender Wechselwirkungszeit zu verfolgen. Das klassische Limit durch Quantenprojektionsrauschen kann bei der Abfrage mehrerer Atome durch Quantenkorrelationen überwunden werden, z. B. durch die Verwendung gequetschter Spin-Zustände [Ludlow2015]. Ionen-basierte Frequenznormale der nächsten Generation müssen daher künftig mit vielen Ionen betrieben werden, um von einer der genannten Techniken zu profitieren. Dies bedeutet aber, ein komplexes Vielteilchensystem von geladenen und miteinander wechselwirkenden Teilchen zu beherrschen.

Bereits eine klassische Uhrenabfrage von Multi-Ionen-Ensembles würde einen großen Sprung in Richtung höherer Stabilitäten von Frequenznormalen bedeuten. Gemäß Gleichung (1) mittelt die Stabilität von Frequenzmessungen gleichermaßen mit der Wurzel aus der Anzahl der Atome N und der Integrationszeit τ herunter, sodass eine Erhöhung der Ionenanzahl auf N eine Reduzierung der Integrationszeit auf $1/N$ ermöglicht. Konkret bedeutet dies z. B. dass 10 Ionen die gleiche Auflösung wie ein einzelnes Ion bereits nach einem Zehntel der Integrationszeit erreichen. Hier zeigt sich das hohe Potenzial neuer Multi-Ionen-Uhren für die Entwicklung neuer, ultra-stabiler und präziser Atomuhren mit gespeicherten Ionen. Diese ermöglichen es, mit kurzen Mittelungszeiten kompakte und ultra-stabile Referenzsysteme zu liefern, die für die Navigation und relativistische Geodäsie von hohem Nutzen sind.

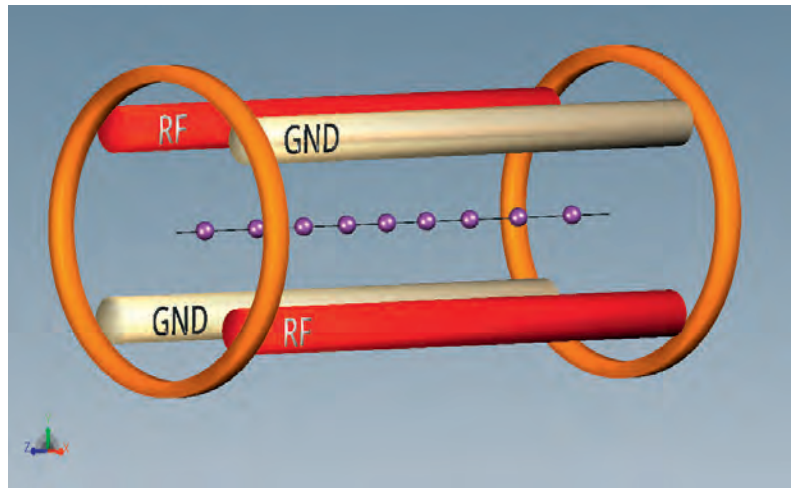
1.2 Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr

Befinden sich mehrere, lasergekühlte Ionen in der gleichen Falle, formieren sie sich zu Coulomb-Kristallen, wobei sich die Ionen in ihren Gleichgewichtspositionen an Orten eines verschwindenden, gemittelten elektrischen Feldes anordnen. Die Ladungen der benachbarten Teilchen verursachen jedoch Gradienten im elektrischen Feld,

die mit den Elektronenschalen benachbarter Ionen über deren Quadrupolmoment wechselwirken und somit eine Frequenzverschiebung im Uhrenübergang induzieren. Sofern nicht atomare Uhrenzustände mit einem verschwindenden Quadrupolmoment θ gewählt werden, liegen die resultierenden Frequenzverschiebungen bei Größenordnungen von 10 Hz. Ebenso führen statische Feldgradienten des Fallenpotentials oder Streufelder von Ladungen auf den Oberflächen von Isolatoren zu Frequenzverschiebungen in der gleichen Größenordnung.

Ferner verursachen räumlich ausgedehnte RF-Feldgradienten Frequenzverschiebungen, die präzise charakterisiert werden müssen. Betrachtet man all diese verschiedenen Effekte, stellt sich die fundamentale Frage, ob ein größeres Ensemble von Ionen überhaupt ausreichend gut kontrolliert werden kann, um relative Frequenzgenauigkeiten oder Langzeitstabilitäten im Bereich von 10^{-18} zu erreichen. Bisher wurden nur Frequenznormale basierend auf Mikrowellenübergängen in einer Wolke von Puffergas-gekühlten Ionen untersucht, die eine Langzeitstabilität von 10^{-15} erreicht haben.

Mögliche Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr sind In^+ , Al^+ , Yb^+ , Lu^+ und Th^{3+} (siehe Abschnitt 3). Charakteristisch ist bei diesen Elementen ein verschwindendes oder sehr geringes Quadrupolmoment. Dies geht einher mit Uhrenübergängen zwischen Zuständen, die sphärische Elektronenorbitale vorweisen, wie die $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ Interkombinationslinien in Zwei-Elektronen-Systemen. Ein verschwindendes Quadrupolmoment erlaubt es, ein weiteres Ion in der gleichen Falle zu speichern, welches zum sympathetischen Kühlen bzw. zur Uhrendetektion verwendet wird, ohne zu störenden Frequenzverschiebungen zu führen. Das Al^+ -Ion, das derzeit in vielen Forschungslaboren mittels Quantenlogik-Ansatz untersucht wird, erfüllt genau diese Bedingungen. Eine ähnliche Situation findet sich für das In^+ -Ion. Hier ist die direkte Detektion der Anregung auf dem $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ -Uhrenübergang möglich, da die $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_1$ -Interkombinationslinie dank relativistischer Effekte dafür hinreichend verbreitert ist. Das leicht skalierbare Detektionsschema und die Möglichkeit zur direkten Laserkühlung auf dem gleichen Übergang machen In^+ zum geeigneten Kandidaten für den Multi-Ionen-Ansatz. Uhrenspektroskopie auf dem $\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ -Übergang in $^{115}\text{In}^+$ wurde bereits erfolgreich demonstriert und wird gegenwärtig in Tokyo und Braunschweig hinsichtlich Uhrenbetriebs mit mehreren Ionen [Pyka2014] untersucht. Neben atomaren Zuständen mit sphärischen Elektronenorbitalen ist auch der Oktupol-Übergang zum stark abgeschirmten F-Zustand im Yb^+ -Ion ein möglicher Kandidat für den Multi-Ionen-Ansatz [Huntemann2012].



Auch wenn keine sphärischen Elektronenorbitale in den Zuständen des Uhrenübergangs vorliegen, wie es z. B. im Lu^+ -Ion der Fall ist, können diese atomaren Spezies geeignete Kandidaten für eine Multi-Ionen-Uhr sein. In diesem Fall betrachtet man innerhalb des Uhrenübergangs die möglichen Hyperfein-Übergänge ausgehend von einem bestimmten Magnetzustand m_F im Grundzustand. Eine Mittelung über alle diese Hyperfein-Übergänge führt zu einer Unterdrückung der Zeeman- und Quadrupolverschiebungen.

1.3 Entwicklung skalierbarer Ionenfallen an der PTB

Bei der Uhrenspektroskopie auf einem Genauigkeitsniveau von 10^{-18} spielt eine Vielzahl von systematischen Effekten eine entscheidende Rolle. Eine technische Herausforderung für die Nutzung von vielen Ionen ist das Design einer geeigneten Ionenfalle, die für das gefangene Ionen-Ensemble eine möglichst homogene Umgebung bietet. So ist zum Beispiel zu beachten, dass die angelegte Fallenanzugsspannung von ~ 1 kV nicht zu einer ungleichmäßigen Aufheizung der Fallenstruktur führt, da eine homogene thermische Umgebung entscheidend für den Beitrag der Schwarzkörperstrahlung zur Uhrenungenauigkeit ist. Ionenfallen für viele Ionen sind von ihrem Aufbau her im Allgemeinen komplexer und somit ist die Materialerwärmung noch kritischer als bei bisherigen Standard-Paul-Fallen.

In linearen RF-Ionenfallen wird durch das elektrische Wechselfeld ein starker Einschluss der Ionen radial um die Achse entlang des Zentrums der Elektroden erzeugt. Entlang der Achse wird die Falle durch zwei Elektroden mit einer abstoßenden Gleichspannung abgeschlossen, wie in Abbildung 1 dargestellt. Entlang dieser Fallenachse existiert eine RF-Knotenlinie, an der sich die Ionen eines linearen Coulomb-Kristalles an ihren Gleichgewichtspositionen anordnen.

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer linearen Paul-Falle. Der starke RF-Einschluss wird über vier Elektroden in Quadrupolanordnung generiert. Eine DC-Spannung, die an zwei End-Elektroden (hier als orange Ring dargestellt) angelegt wird, führt zu einem Einschluss der geladenen Ionen in axialer Richtung. Entlang dieser schwachen Fallenachse ordnen sich lineare Ionenketten in der RF-Knotenlinie (schwarz) an ihren Gleichgewichtspositionen an.

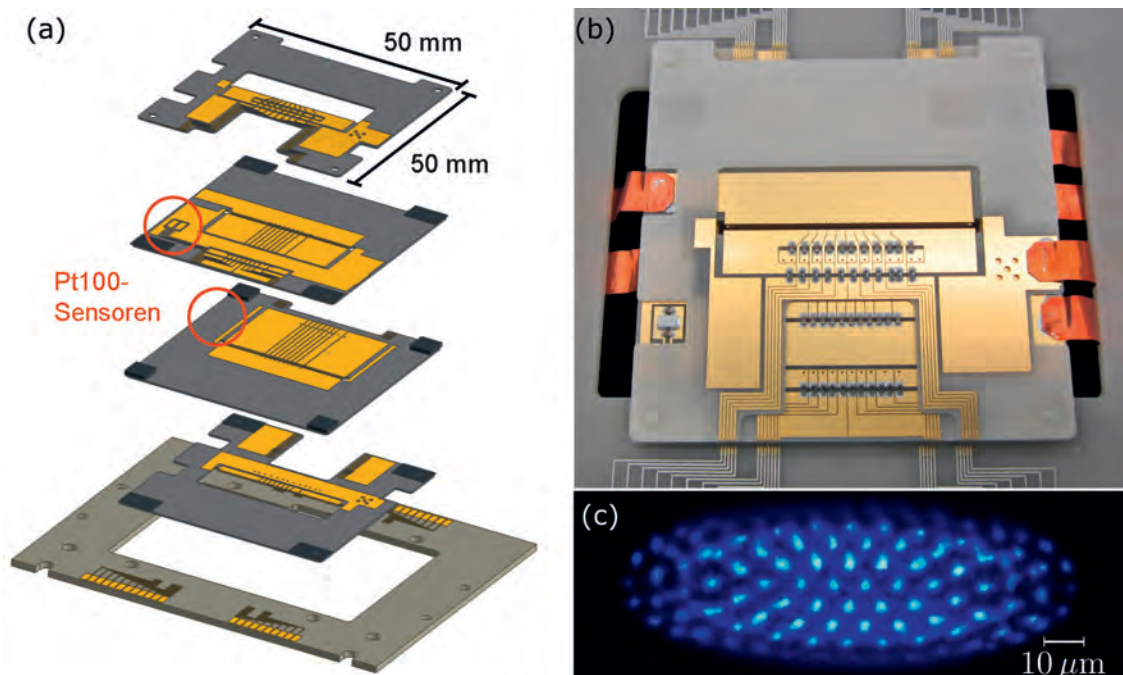
Ein weiterer, systematischer Effekt ist die Verschiebung der geladenen Ionen von der RF-Knotenlinie der Paul-Falle aufgrund von statischen, elektrischen Störfeldern. Dies führt zu kleinen Oszillationen mit der Frequenz der angelegten Fallenantriebsspannung, die als Mikrobewegung bezeichnet werden. Mikrobewegung verursacht nun Energie-Verschiebungen und Zeitdilatationen im Bereich von einigen Hz [Keller2015], sobald Ionen in einem 2D- oder 3D-Kristall die RF-Knotenlinie verlassen. Selbst lineare Ionenketten können durch eine imperfekte Elektroden-Geometrie sowie Effekte der endlichen Fallenstruktur residuellen RF-Feldern auf der Fallennachse ausgesetzt sein, was signifikante Frequenzverschiebungen in ausgedehnten Kristallen hervorrufen würde [Herschbach2012].

Das erste Konzept zur Erhöhung der Ionenanzahl für optische Uhrenspektroskopie stammt aus dem Jahr 2012 [Herschbach2012]. Hier war die Idee, systematische Verschiebungen zu reduzieren bzw. zu vermeiden, indem man sowohl Ionen-Kandidaten wählt, die eine intrinsisch geringe Sensitivität auf Feldgradienten besitzen, als auch Ionenfallen herzustellen, die eine Umgebung mit den geringsten, systematischen Verschiebungen bereitstellen und eine hohe Kontrolle der Ionenbewegung ermöglichen [Keller2015, Herschbach2012]. Das Design solcher Multi-Ionen-Fallen, die die gleichen exzellenten Umgebungsbedingungen wie für ein einzelnes Ion bereitstellen, stellt eine große, technische Herausforderung dar. In [Herschbach2012] wurde ein skalierbares Ionenfallen-Design vorgestellt, das eine lineare Anordnung von mehreren Ionenfallen ermöglicht. Etwa 10 Ionen können simultan in jedem Fallensegment gespeichert werden, wobei für jedes Ionen-Ensemble eine definierte und kontrol-

lierte Umgebung sichergestellt ist. Auf diese Weise können optische Frequenznormale mit mehreren 10 bis zu 100 Ionen betrieben werden, mit der Aussicht, die Mittelungszeit von Frequenzmessungen um bis zu zwei Größenordnungen zu reduzieren.

In einem mehrjährigen Entwicklungsprozess an der PTB entstand basierend auf dem Design der Prototyp-Falle eine neue, skalierbare Ionenfalle für die Verwendung in der Frequenzmetrologie. Diese ist komplett nicht-magnetisch und besteht aus laser-geschnittenen AlN-Keramik-Wafern mit Ti/Au-beschichteten Elektroden. Abbildung 2 zeigt eine dieser Fallen, zusammen mit einem Ionen-Coulomb-Kristall bestehend aus lasergekühlten $^{172}\text{Yb}^+$ -Ionen, der in dieser gefangen wurde. Diese Fallen-Plattform besteht, wie in (a) dargestellt, aus vier 380 μm dicken Wafern, die präzise aufeinander ausgerichtet werden. Das auf Leiterplatten basierende Design ermöglicht Skalierbarkeit und den Einsatz von symmetrisch geformten Elektroden mit Herstellungstoleranzen unter 10 μm . Zwei auf den Chips integrierte Pt100-Sensoren erlauben eine Auslesung der Temperatur während des Uhrenbetriebs, was essenziell für die Bestimmung der Uhrenunsicherheit aufgrund von Schwarzkörperstrahlung ist. Weitere Eigenschaften der neuen Ionenfalle sind optischer Zugang für Laserstrahlung aus allen drei Raumrichtungen, dedizierte Kompensationselektroden für 3D-Streufelder in jedem der einzelnen Fallensegmente, sowie Chip-integrierte RC-Filter nahe jeder Elektrode, um elektronisches Rauschen zu unterdrücken [Keller2019a]. In dieser Ionenfalle konnten bereits die Mikrobewegungsamplituden für einen Coulomb-Kristall mit 14 Yb^+ -Ionen mit sub-nm-Auflösung vermessen werden, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die resultierenden Frequenzver-

Abbildung 2:
Neue Präzisions-Ionenfalle aus AlN-Keramik. (a) Schematische Darstellung des Chip-Stapels bestehend aus vier Wafern. (b) Die einzelnen Wafer sind lasergeschnitten und erlauben einen skalierbaren Multi-Ionen-Uhrenbetrieb mit benachbarten Ensembles. Die Chips sind ausgestattet mit integrierter Filter-Elektronik. (c) EMCCD-Aufnahme eines großen Ionen-Coulomb-Kristalls (fluoreszierende Yb^+ -Ionen), der als hochstabile Frequenzreferenz dienen kann.



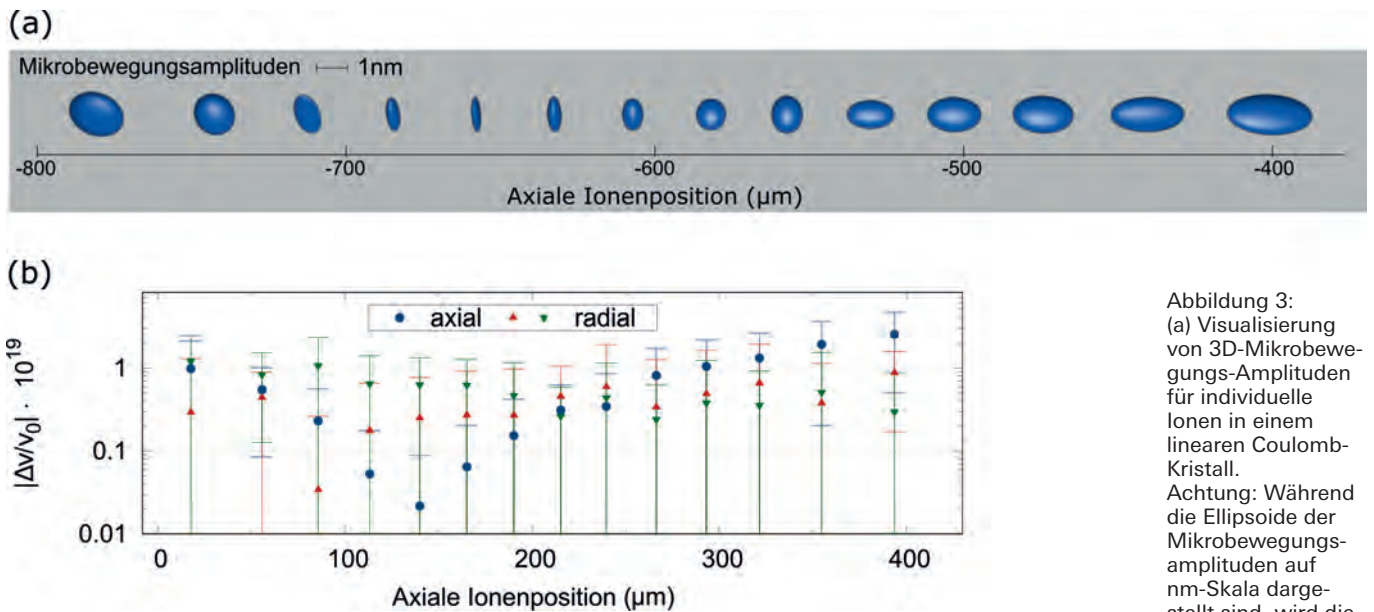


Abbildung 3:
(a) Visualisierung von 3D-Mikrobewegungs-Amplituden für individuelle Ionen in einem linearen Coulomb-Kristall. Achtung: Während die Ellipsoide der Mikrobewegungsamplituden auf nm-Skala dargestellt sind, wird die Ionenposition auf µm-Skala dargestellt.
(b) Die zugehörigen, relativen Frequenzverschiebungen aufgrund der Zeitdilatation für In^{91+} -Ionen mit atomarer Masse $m = 115$ au.

schiebungen aufgrund von Zeitdilatation liegen dabei im unteren 10^{-19} -Bereich [Keller2019a, Keller2019b]. Forschung an gefangenen Ionen in skalierbaren Fällen ist seit kurzem auch Bestandteil im BMBF-geförderten Industrieprojekt „Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“ (opticlock). Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer optischen Atomuhr basierend auf einem lasergekühlten Yb^{+} -Ion als Frequenzreferenz, die für Anwendungen als Ersatz eines Wasserstoffmasers eine Verbesserung der Stabilität und Genauigkeit um mindestens eine Größenordnung verspricht. Damit würde es möglich, optische Uhren auch außerhalb von spezialisierten Metrologieinstituten einzusetzen.

2. Struktur und Wechselwirkungen hochgeladener Ionen

Hochgeladene Ionen (engl. *highly charged ions*, HCIs) stellen heute ein einzigartiges Werkzeug zur Untersuchung vieler fundamentaler, aber wenig verstandener Probleme in verschiedenen Bereichen der modernen Wissenschaft dar. Im Bereich der Atomphysik dienen diese Ionen als natürliche „Laboratorien“ zur Erforschung von Systemen mit wenigen Elektronen, die den extrem starken elektromagnetischen Feldern der Kerne ausgesetzt sind. So erfährt ein Elektron, das sich im $1s$ -Grundzustand von (relativ leichtem) wasserstoffähnlichem Argon Ar^{17+} befindet, eine elektrische Feldstärke von etwa 10^{14} V/cm; ein Wert, der derzeit nur von den leistungstärksten Laseranlagen erreicht werden kann. Mit der weiteren Erhöhung der Kernladungszahl Z kann sich das elektromagnetische Feld innerhalb eines Ions dem „kritischen“ Bereich nähern, in dem das Quantenvakuum instabil wird und durch die Bildung von Elektron-Positron-Paaren „zerfallen“ kann. Unter diesen extremen Bedingungen unterscheidet sich die elektronische

Struktur der hochgeladenen Ionen drastisch von der „konventioneller“ neutraler Atome. Ionen mit nur wenigen Elektronen sind zum Beispiel sehr eng gebundene Systeme, deren Ionisationsenergie mit Z^2 skaliert und bei schweren Elementen wie U^{91+} bis zu 130 keV betragen kann. Dieselbe Z^2 -Skalierung gilt auch für Energien von Übergängen zwischen elektronischen Zuständen mit unterschiedlichen Hauptquantenzahlen n . Für hochgeladene Ionen können diese (Übergangs-)Energien im Röntgen- und sogar im γ -Strahlenbereich liegen, was einen deutlichen Unterschied im Vergleich zu den optischen und UV-Übergängen in leichten, neutralen Atomen bedeutet. Darüber hinaus kommen viele faszinierende Phänomene, die normalerweise in neutralen Systemen „versteckt“ sind, in hochgeladenen Ionen zur Geltung. Beispielsweise führt die Kopplung des Elektronenspins mit der Orbitalbewegung und dem Kernspin zu einer Fein- bzw. Hyperfeinaufspaltung von Ionenniveaus, die mit $\Delta E_{fs} \propto Z^4$ bzw. $\Delta E_{hfs} \propto Z^3$ skalieren. Für Ionen mit mittlerer und hoher Kernladungszahl Z ermöglichen $\Delta E_{fs} \propto \text{keV}$ und $\Delta E_{hfs} \propto \text{eV}$ so eine detaillierte Untersuchung von relativistischen sowie magnetischen Wechselwirkungen und sogar nuklearen Eigenschaften. Auch die quantenelektrodynamischen (QED) Effekte führen zu Energieverschiebungen $\Delta E_{\text{QED}} \propto Z^4$, die bei hochgeladenen Ionen stark ausgeprägt sind und bei sehr schweren Systemen einige hundert eV erreichen können. Das Studium der Struktur hochgeladener Ionen erlaubt es daher, unser grundlegendes Verständnis von atomaren Systemen im kritischen (und sogar überkritischen) Regime zu testen, über das uns noch immer detaillierte Kenntnisse fehlen.

Durch das Entfernen vieler Elektronen rücken die verbleibenden Elektronen näher an den Kern heran und die Polarisierbarkeit der Elektronenhülle sinkt. Dadurch sind HCIs besonders unempfind-

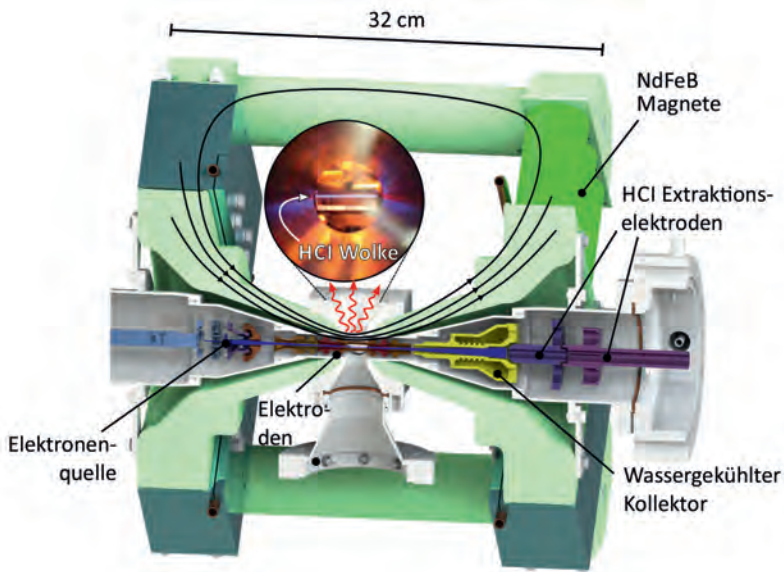


Abbildung 4: Kompakte Elektronenstrahl Falle (mini-EBIT). Das Magnetfeld von Permanentmagneten wird über ein Joch im Zentrum einer Vakuum-Umgebung konzentriert. Ein Elektronenstrahl wird von links durch das Zentrum der Falle beschleunigt und ionisiert injizierte Neutralatome, wie z. B. Argon zu Ar^{13+} . Diese Ionen werden vom Ionenstrahl zum Leuchten bei 441 nm angeregt (Bildeinsatz).

lich gegenüber Energieverschiebungen durch elektrische Felder und elektrische Feldgradienten. Als weitere Konsequenz der großen Spreizung der Energieniveaus in HCIs sind Energieverschiebungen in Magnetfeldern besonders linear, sodass sich diese Verschiebungen durch geschicktes Mitteln von Frequenzmessungen magnetischer Unterzustände eliminieren lassen. Mit diesen Eigenschaften besitzen HCIs die besten Voraussetzungen als Referenzen für optische Uhren mit hoher Genauigkeit [Kozlov2018].

Obwohl ein großer Teil der Materie im Universum hochgeladen vorkommt und in astronomischen Spektren nachgewiesen wurde, gibt es überraschend wenig hochaufgelöste spektroskopische Information aus Laborexperimenten. Erst 2011 wurde die wohletablierte Technik der Laserspektroskopie zum ersten Mal für hochgeladene Ionen eingesetzt [Mäckel2011]. Die Gründe hierfür liegen im bis vor kurzem vergleichsweise hohen apparativen Aufwand zur Erzeugung von hochgeladenen Ionen in sogenannten Elektronenstrahlfallen und der extrem hohen kinetischen Energie der Ionen in solchen Fallen, die zu großen Doppler-Linienverbreiterungen führen.

2.1 Erzeugung hochgeladener Ionen

Hochgeladene Ionen werden durch sukzessives Entfernen von Elektronen ausgehend von neutralen Atomen erzeugt. Da die Ionisierungsenergie quadratisch mit dem Ladungszustand skaliert, sind z. B. für die Erzeugung von U^{92+} -Energien von 130 keV erforderlich. Dies wird heute meist in Elektronenstrahlfallen (engl. *Electron Beam Ion Trap*, EBIT) erreicht. In diesen werden freie Elektronen durch thermische Emission in einer

Kathode mit einem Material geringer Elektronen-Austrittsarbeit erzeugt. Über eine Elektrodenanordnung werden die Elektronen zu einem Strahl gebündelt und auf die erforderliche Energie beschleunigt. Ein im Zentrum einer Hochvakuum-Apparatur konzentriertes Magnetfeld bündelt den Elektronenstrahl. In den Elektronenstrahl als Gas oder von einem Festkörper eingebrachte Atome oder Moleküle werden durch Stöße mit den Elektronen so lange ionisiert, bis die Ionisationsenergie die Beschleunigungsenergie der Elektronen übersteigt. Dabei führt die negative Raumladung der Elektronen zusammen mit in Elektronenstrahlrichtung angelegten elektrischen Potentialen zum Einschluss der hochgeladenen Ionen in einer Region mit einer radialen Abmessung von einigen 100 μm und einer axialen Länge von wenigen Zentimetern. Ohne Elektronenstrahl bleiben die HCIs im Magnetfeld gefangen. Während in den ersten Systemen kryogene supraleitende Magnete zum Einsatz kamen, wurde in jüngerer Zeit die Entwicklung einer kompakteren Generation von EBITs vorangetrieben, die auf Permanentmagneten basieren. Eine solche, in Zusammenarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg und der PTB entwickelten, EBIT ist in Abbildung 4 dargestellt. Sie ermöglicht die Erzeugung von hochgeladenen Ionen bis zu einer Ionisationsenergie von 10 keV. So konnte beispielsweise Xe^{37+} mit einer Beschleunigungsspannung von 3 kV erzeugt werden [Micke2018]. Typischerweise existiert in der EBIT eine Verteilung von Ladungszuständen, die durch die Raten der Erzeugung durch Elektronenstöße und Neutralisierung durch Elektronenrekombination oder Stöße mit dem neutralen Hintergrundgas gegeben ist. Durch die kontinuierliche Anregung über den Elektronenstrahl emittieren die in der EBIT gefangenen HCIs Fluoreszenzstrahlung aus hochangeregten Zuständen. Dieses Leuchten ist z. B. als blauer Schimmer im Foto in Abbildung 4 zu sehen.

2.2 Optische Spektroskopie in der Elektronenstrahl Falle

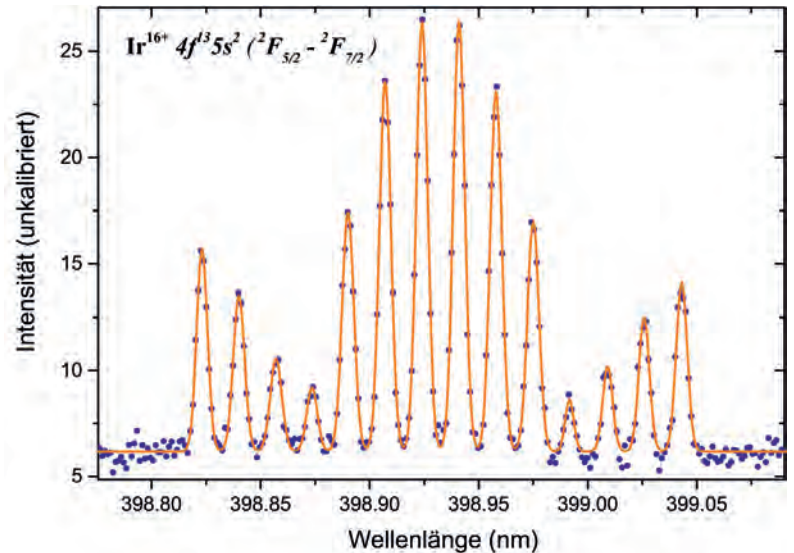
Über eine Abbildungsoptik mit hoher numerischer Apertur kann die von den HCIs in der EBIT emittierte Strahlung über hochauflösende Spektrometer untersucht und die beobachteten Spektrallinien können über Vergleiche mit theoretischen Rechnungen der Niveaustuktur des Ions identifiziert werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 5 für einen optischen Übergang in Ir^{16+} zu sehen, der in der Heidelberg-EBIT mit einem hochauflösenden Spektrometer aufgenommen wurde. Die Auflösung der Übergänge ist durch die Dopplerverbreiterung bei einer mittleren kinetischen Energie von einigen 10 eV limitiert. Geringere Energien von bis zu 6 eV sind durch Verdampfungskühlen

aus der Falle bei abgeschaltetem Elektronenstrahl erreicht worden. Hierbei wird die Potentialbarriere der Falle abgesenkt, sodass besonders hochenergetische HCIs die Falle verlassen und die restlichen Ionen über Stöße zu einer geringeren Temperatur thermalisieren. Kombiniert mit laserinduzierter Fluoreszenzspektroskopie ist es gelungen, einen Feinstrukturübergang in Ar^{13+} bei einer Wellenlänge von 441 nm mit nur 16 Hz Linienbreite auf ca. 300 MHz genau aufzulösen [Mäckel2011].

2.3 Hochaufgelöste Laserspektroskopie am Horizont

Die EBIT mit ihren starken Feldern und der hohen kinetischen Energie der HCIs von vielen eV bietet keine ideale Umgebung für hochaufgelöste Spektroskopie, wie man sie mit Auflösungen von einigen 10^{-15} von einzelnen einfach geladenen Ionen kennt [Huntemann2016]. Der Schlüssel hierfür liegt in der Kühlung der Bewegung und damit Lokalisierung der Ionen in Fallen, die rückstoßfreie Spektroskopie erlauben. In diesen Fällen ist die Oszillationsfrequenz der Ionen größer als die Photonenrückstoßenergie, sodass keine zusätzliche Verschiebung bei der Absorption oder Emission von Photonen auftritt. Typischerweise werden solche Experimente in Paul-Fallen durchgeführt [Ludlow2015]. Speziell bei HCIs müssen für solche Untersuchungen jedoch exzellente Vakuumbedingungen von weniger als 10^{-14} mbar Restgasdruck herrschen, um Ladungstransfer durch Stöße mit Restgasmolekülen zu minimieren, die zu einem Verlust des HCI führen würden. Solche Bedingungen können nur in einer 4 K kalten kryogenen Umgebung erreicht werden, in der alles Restgas ausfriert. Vor kurzem wurde in einer Zusammenarbeit zwischen dem MPIK und der PTB ein Demonstrationsexperiment in einer derartigen Apparatur durchgeführt, bei dem HCIs gepulst aus einer EBIT durch Absenken der axialen Fallenspannung extrahiert, abgebremst und mit einer kinetischen Energie von unter einem eV in eine lineare Paulfalle injiziert wurden. In der Paul-Falle befand sich ein Ionenkristall aus mehreren hundert lasergekühlten Be^+ -Ionen, der die schnellen hochgeladenen Ionen über ihre starke elektrostatische Kopplung abgebremst und in den Kristall gekühlt hat [Schmöger2015]. Abbildung 6 zeigt jeweils ein Ar^{13+} -Ion zusammen mit mehreren bzw. einem einzelnen lasergekühlten Be^+ -Ion in einer linearen Paul-Falle. Aus der Bewegung der Be^+ -Ionen konnte eine Temperatur für die Ar^{13+} -Ionen von 221(26) mK abgeschätzt werden. Das ist eine Reduktion der kinetischen Energie um mehr als sieben Größenordnungen und vermutlich das kälteste im Labor erzeugte HCI.

Inzwischen wurde eine verbesserte Version dieses Experiments in Zusammenarbeit mit dem MPIK in Heidelberg an der PTB aufgebaut, mit dem Ziel, eine kryogene sowie vibrations- und



magnetfeld-arme Umgebung für Laserspektroskopie höchster Präzision bereitzustellen [Micke2019].

In diesem Aufbau befindet sich eine lineare Paul-Falle (Abbildung 7), die Fallenfrequenzen von mehreren Megahertz und damit rückstoßfreie Spektroskopie erlaubt [Leopold2019].

Die Falle ist über ca. 1 m lange vibrationsentkoppelte Kupferrohre mit dem Kältekopf eines geschlossenen Kühlsystems für 4 K verbunden. Die Apparatur ist mit einer kompakten EBIT (siehe Abbildung 4) und einer entsprechenden Abbremsungseinheit ausgestattet.

Abbildung 5: Hochaufgelöstes optisches Spektrum eines Übergangs in Ir^{16+} mittels Elektronenanregung in der EBIT [Bekker2017]. Die breit gespreizte magnetische Unterstruktur ist ein Resultat des hohen Magnetfelds von 8 T in der EBIT.

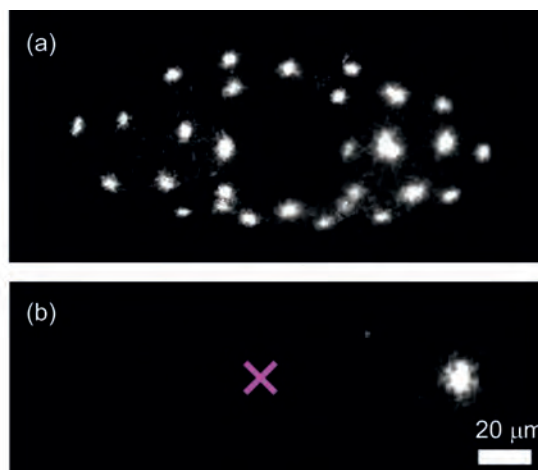


Abbildung 6: Kalte hochgeladene Ionen. (a) Ein einzelnes Ar^{13+} -Ion in einem Kristall aus lasergekühlten Be^+ -Ionen. (b) Einzelnes Ar^{13+} an der Stelle des pinkfarbenen Kreuzes zusammen mit einem Be^+ -Ion ([Schmöger2015])

Es wurden bereits Be^+ -Ionen gefangen und mittels sogenanntem Raman-Seitenbandkühlen in den Bewegungsgrundzustand der Falle gekühlt. Kürzlich konnten Ar^{13+} -Ionen von der EBIT in die Paulfalle geladen und dort von den Be^+ -Ionen gekühlt werden. Nach der Präparation eines 2-Ionen-Kristalls aus $\text{Ar}^{13+}/\text{Be}^+$ kann der $P_{1/2} - P_{3/2}$ -Feinstrukturübergang bei 441 nm in Ar^{13+} mit einem hochstabilen Laser abgefragt werden. Über eine Folge von Laserpulsen kann der interne Zustand vom Ar^{13+} -Ion auf das Be^+ -Ion übertragen und dort detektiert werden. Mit dieser sogenann-

ten Quantenlogik-Spektroskopie [Schmidt2005] steht ein universelles Verfahren für die Spektroskopie von vielen verschiedenen HCI-Spezies zur Verfügung. Damit sollen in Zukunft experimentell die eingangs erwähnten Fragen zur Konstanz von Naturkonstanten oder zu Nichtlinearitäten in der Isotopieverschiebung untersucht werden.

3. Von der Atomuhr zur Kernuhr

Während bei den hochgeladenen Ionen wichtige Eigenschaften durch Extrapolation von Ionen in niedrigeren Ladungszuständen vorhergesagt werden können, stößt die Idee einer „Kernuhr“ in einen noch weitgehend unerforschten Parameterbereich vor. Anstelle eines Übergangs in der Elektronenhülle eines Atoms, soll bei der Kernuhr ein elektromagnetischer Übergang im Atomkern die Referenzfrequenz definieren [Peik2015]. Es geht hierbei nicht um radioaktive Zerfallsprozesse, wie sie für geologische oder archäologische Datierungen verwendet werden, sondern um Gamma-

mit abstimmbaren Lasern und den Methoden der optischen Frequenzmessung erreicht werden. Dies ist eine direkte Folge der im Kern stärker lokalisierten Ladungen. Glücklicherweise ist aber ein Atomkern bekannt, der sich für die Realisierung einer optischen Kernuhr anbietet. Es handelt sich um das Thoriumisotop mit der Massenzahl 229, kurz Th-229, das einen ungewöhnlich niederenergetischen Übergang besitzt. Die Eigenschaften dieses Atomkerns haben die Entwicklung des Konzepts der optischen Kernuhr motiviert und stehen heute im Mittelpunkt des experimentellen Interesses in diesem sich entwickelnden Arbeitsgebiet.

3.1 Der Atomkern Thorium-229

Th-229 scheint ein einzigartiges Objekt der Kernphysik zu sein; der einzige bekannte Kern, der einen angeregten Zustand (ein Isomer) im Bereich von optischen Photonen besitzt. Th-229 entsteht aus dem Alphazerfall von Uran-233 und ist selbst ebenfalls instabil gegen Alphazerfall mit einer Halbwertszeit von etwa 7900 Jahren. Wegen ihrer im Vergleich zum Alter der Erde kurzen Halbwertszeiten, sind U-233 und Th-229 nicht in irdischen Mineralien zu finden, können aber relativ einfach in Kernreaktoren aus dem häufig vorkommenden Th-232 erzeugt werden. Die Niveaustruktur von Th-229 wurde seit den 1970er-Jahren in der Gruppe von C. Reich in den USA untersucht [Helmer1994]. Dabei wurde festgestellt, dass die niedrigsten Anregungszustände zu zwei Rotationsbanden gehören. Der Kern bildet zwei etwas unterschiedlich geformte, entlang einer Achse verlängerte Ellipsoide, die mit unterschiedlichen Drehimpulsen rotieren können, und so jeweils eine regelmäßige Folge von Energieniveaus ergeben. Die beiden Zustände des jeweils niedrigsten Drehimpulses (die Bandenköpfe) konnten jedoch spektroskopisch nicht getrennt werden. Aus diesem Verständnis der Struktur des Kerns folgte daher zwangsläufig, dass er zwei unterschiedliche und gleichzeitig energetisch sehr nah beieinander liegende Zustände besitzen muss. Der energetisch tiefer liegende bildet den Grundzustand des Kerns, der höher liegende das Isomer. Aus Gammaspektroskopie von höherenergetischen Übergängen innerhalb der Rotationsbanden wurde die Übergangsenergie zwischen den beiden Bandenköpfen anfangs als etwa 3,5 eV angegeben. Nach einer weiteren, unabhängigen Messung mit einem speziellen Gammadetektor höherer Energieauflösung wurde 2007 der Wert 7,8 ($\pm 0,5$) eV veröffentlicht [Beck2007], der bis heute als gültig angesehen wird, allerdings noch nicht bestätigt oder präzisiert werden konnte. Der Übergang zwischen beiden Zuständen sollte unter Absorption oder Emission von magnetischer Dipolstrahlung im ultravioletten Spektralbereich mit einer natür-

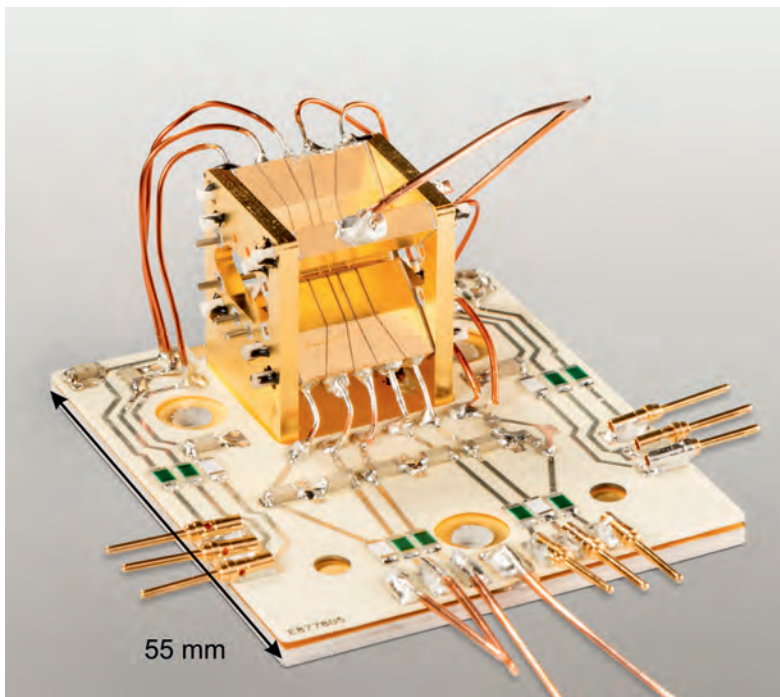


Abbildung 7: Kryogene lineare Paul-Falle für rückstoßfreie Spektroskopie von hochgeladenen Ionen

strahlung, die aus einer Änderung der Anordnung der Protonen und Neutronen im Kern resultiert. Da diese durch die starke Kernkraft viel enger gepackt und stärker gebunden sind, als die Elektronen in der Atomhülle, sind die entsprechenden Übergangsfrequenzen von der Wechselwirkung mit der Umgebung, z. B. mit elektrischen Feldern, viel weniger beeinflussbar. Daraus resultiert die Erwartung, mit einer Kernuhr eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Genauigkeit zu erreichen. In praktisch allen bekannten Fällen liegen die Übergangsfrequenzen von Gammastrahlung allerdings im hochenergetischen Bereich, etwa 10.000-mal höher als die optischen Frequenzen, die heute

lichen Linienbreite von unter einem Millihertz erfolgen.

Das experimentelle Resultat dieser extrem niedrigen Kern-Anregungsenergie im Bereich der Energien von atomaren Valenzelektronen hat eine Reihe von theoretischen Arbeiten und Vorschlägen motiviert, da man hier erstmals ein System identifiziert hatte, bei dem Kopplungen zwischen dem Atomkern und der Elektronenhülle eine wichtige Rolle spielen. So wurde vorhergesagt, dass sich in Abhängigkeit von der elektronischen Umgebung des Th-229-Kerns, d. h. ob er sich in einem neutralen Atom, einem positiven Ion, Molekül, in einem Metall oder Isolator befindet, sehr unterschiedliche Lebensdauern für den angeregten Kernzustand ergeben [Matinyan1998, Tkalya2003]. Bildlich betrachtet ist der Atomkern eine sehr schlechte Antenne für Licht, da er mit einer Größe von einigen 10^{-15} m viel kleiner als die Wellenlänge ist, die hier im Bereich von 10^{-7} m liegt. Wenn die Möglichkeit dafür gegeben ist, ist es daher viel wahrscheinlicher, dass der Kern seine Anregungsenergie auf ein Elektron der Hülle überträgt, anstatt sie als Photon abzustrahlen. Dies ist insbesondere in Metallen oder Festkörpern der Fall, wenn freie oder nur schwach gebundene Elektronen vorhanden sind. Sind die Elektronen dagegen so stabil gebunden, dass sie durch die Kernanregungsenergie von etwa 7,8 eV nicht freigesetzt werden können, ist dieser schnellere Zerfallskanal geschlossen, der angeregte Kern muss ein Photon emittieren und kann anschließend mit einem Laser wieder angeregt werden. Diese für die optische Uhr gewünschte Situation sollte bei allen positiven Thorium-Ionen und auch bei Th-dotierten Festkörpern mit hoher Bandlücke der Fall sein. Eine solche Abhängigkeit einer Zerfallsrate von der Umgebung des Kerns ist in der Kernphysik höchst ungewöhnlich, da meist die Energie von Kernübergängen um Größenordnungen oberhalb der Energien der Hüllenelektronen liegt.

3.2 Th-229 als Basis einer optischen Uhr

Das Konzept einer auf Th-229 basierenden optischen Kernuhr wurde an der PTB entwickelt und 2003 veröffentlicht [Peik2003]. Der Vorschlag für eine Uhr höchster Präzision basiert auf einem lasergekühlten, gespeicherten Th^{3+} -Ion und hat einige Gemeinsamkeiten mit bereits bekannten optischen Uhren mit gespeicherten Ionen. Der wesentliche Vorteil einer Kernuhr in Bezug auf die systematische Unsicherheit liegt darin, dass sich von äußeren elektrischen oder magnetischen Feldern verursachte Frequenzverschiebungen vermeiden lassen, wenn man die Laseranregung des Kernübergangs in einem hierfür geschickt gewählten elektronischen Zustand vornimmt

[Peik2003, Campbell2012]. Hierbei spielen insbesondere Symmetrieeigenschaften und Drehimpulse der Elektronenhülle eine Rolle. Die Unempfindlichkeit der Übergangsfrequenz gegenüber elektrischen Feldern ist praktisch von großem Interesse, da damit auch experimentell schwer kontrollierbare Effekte wie Stöße mit Restgasmolekülen oder der Einfluss der thermischen Umgebungsstrahlung abgedeckt sind. Die elektronische Niveaustuktur von Th^{3+} ist gut bekannt, und man findet dort Zustände, die die gewünschten vorteilhaften Eigenschaften für die Kernanregung haben. Die Laseranregung eines Übergangs in der Elektronenhülle kann verwendet werden, um den Zustand des Kerns auszulesen, ohne ihn zu beeinflussen: Die beiden Kernzustände (Grundzustand und Isomer) unterscheiden sich im Wert des Kernspins und der magnetischen und elektrischen Momente und prägen damit jedem Zustand der Hüllenelektronen eine charakteristische Hyperfeinstruktur auf, die über Laserspektroskopie selbst bei nur einem einzelnen Ion eindeutig identifiziert werden kann. Dieses Signal kann zur Stabilisierung der Frequenz des Laseroszillators, der die Kernübergänge resonant anregen soll, genutzt werden.

Ein zweites, komplementäres Konzept für eine Kernuhr beruht auf Laserspektroskopie in Festkörpern. Während Resonanzen in der Elektronenhülle beim Übergang vom freien Atom zu Festkörpern zu Bändern verbreitert werden, ist dies bei Kernresonanzen nicht der Fall. Vielfältig genutzt wird dies in der Mößbauerspektroskopie, wo Gammaübergänge in einem Festkörper durch eine radioaktive Quelle desselben Kerns angeregt werden. Durch Relativbewegung zwischen Quelle und Absorber wird über den Dopplereffekt eine äußerst hohe Frequenzauflösung erreicht. Bei Th-229 könnte man eine Art Laser-Mößbauer-Spektroskopie erreichen, und die radioaktive Quelle durch einen kohärenten abstimmbaren Laser ersetzen. Während in den heutigen, optischen Uhren maximal nur etwa eine Million Atome abgefragt werden, ließe sich in einer Festkörper-Kernuhr die Atomzahl leicht um 10 Größenordnungen steigern und damit ein starkes Signal aus einem kleinen Volumen erhalten.

3.3 Experimente zur optischen Kernspektroskopie

Wegen dieser starken Motivation wurde und wird ein Nachweis für eine direkte optische Kernanregung von Th-229 weltweit von mehr als 10 Gruppen mit unterschiedlichen Methoden gesucht [Peik2015, VonDerWense2018] – bisher ohne Erfolg. Der Wechsel von der Gammaspectroskopie mit einer Energieauflösung von einigen Elektronenvolt zur Laserspektroskopie mit einer Auflösung von einigen Megahertz (oder darunter)

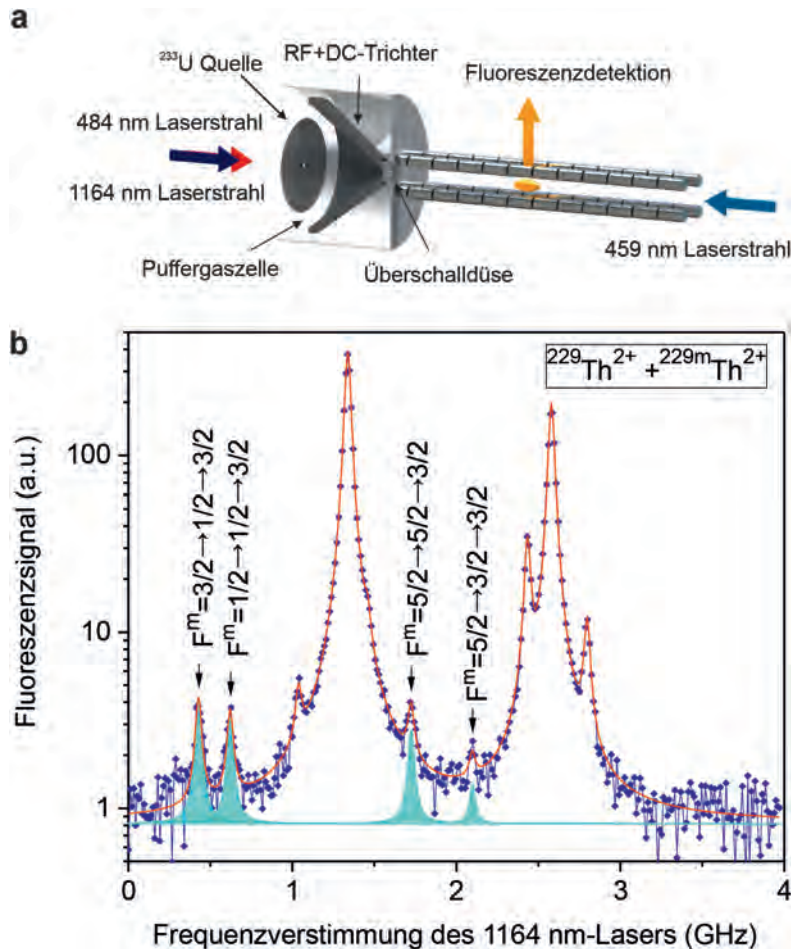


Abbildung 8:
a) Experiment zur Laserspektroskopie von gespeicherten Th^{2+} -Rückstoßionen aus dem Zerfall von U-233.

b) Das Spektrum zeigt die Hyperfeinstruktur eines elektronischen Übergangs mit mehreren Linien des Th^{2+} Kerngrundzustands und zusätzlichen Resonanzen (cyan hinterlegt) des Anteils von etwa 2 % Kernen im isomeren Zustand. Die Auswertung erlaubt die Bestimmung wichtiger Eigenschaften des Isomers (siehe [Thielking2018])

lässt einen Suchbereich von vielen Größenordnungen offen. Die schmalbandige Kernresonanz gleicht der sprichwörtlichen Nadel im Heuhaufen. Erschwert wird die Situation dadurch, dass bei Experimenten mit größeren Th^{229} -Proben (man verwendet 10^{12} bis 10^{16} Kerne) immer auch ein Untergrund an Lumineszenzphotonen aus radioaktiven Zerfällen auftritt, der das gesuchte schwache Fluoreszenzsignal einer Laseranregung des Kerns überlagert. Dies hat bereits zu mehreren Veröffentlichungen über eine scheinbare Beobachtung der Kernresonanz in der wissenschaftlichen Literatur geführt, die sich bei genauerer Untersuchung als falsch erwiesen haben. Mit verbessertem Verständnis der Probleme und neu entwickelten Detektoren sollte eine Lösung dieses Problems aber in der absehbaren Zukunft erreichbar sein. Dies wäre ein lange erwarteter Durchbruch, der dann den Weg zu Präzisionsexperimenten hin zur Kernuhr öffnen würde.

Die wichtigsten experimentellen Resultate der letzten Jahre über das Th^{229} -Isomer stammen aus Rückstoßkernen aus dem Alphazerfall von U-233. Hierfür muss der Th^{229} -Kern nicht aktiv angeregt werden, sondern er wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 % gleich im angeregten Zustand erzeugt. Da die Emission des energiereichen Alphateilchens eine Rückstoßenergie von etwa 80 keV auf den frisch erzeugten Th^{229} -Kern

überträgt, kann dieser, wenn der Zerfall in einer dünnen Schicht von U-233 stattfindet, von dort als freies Thorium-Ion ins Vakuum emittiert werden. In einem Experiment an der Ludwig-Maximilians-Universität München konnte 2015 erstmals nachgewiesen werden, dass ein Teil dieser Ionen tatsächlich eine zusätzliche innere Energie trägt, nämlich die Anregungsenergie des Isomers [VonDerWense2016]. Es war der erste direkte Nachweis des angeregten Kernzustands, auch wenn sich der Wert der Anregungsenergie daraus noch nicht präzise bestimmen ließ. Zusammen mit der PTB wurde das Experiment um Laserspektroskopie der Thorium-Ionen erweitert (s. Abbildung 8). Dazu wurden die Rückstoß-Ionen in Puffergas abgebremst und in einer Ionenfalle gespeichert. Die Analyse der Hyperfeinstruktur von zwei Übergängen in Th^{2+} hat es erstmals ermöglicht, wesentliche Eigenschaften des Isomers mit denen des Th^{229} -Kerngrundzustands zu vergleichen: das magnetische Moment und die Form (Quadrupolmoment) und Größe der Ladungsverteilung der Protonen im Kern [Thielking2018]. Wie theoretisch vorhergesagt, ändert sich die Ladungsverteilung beim Übergang zwischen Isomer und Grundzustand nur wenig. Die magnetischen Momente unterscheiden sich dagegen deutlich. In einem stark vereinfachten Bild lässt sich das Isomer als die Anregung eines äußeren Neutrons beschreiben, dass mit einer etwa birnenförmigen Anordnung der restlichen Neutronen und Protonen in Wechselwirkung steht. Weitere, noch präzisere Messungen der Hyperfeinstruktur werden notwendig sein, um die Struktur dieses ungewöhnlichen Kerns vollständiger zu beschreiben.

4. Test fundamentaler Symmetrien der Natur

Nachdem die grundlegenden Eigenschaften und experimentellen Methoden der Untersuchung von einzel- und hochgeladenen Ionen diskutiert wurden, soll im Folgenden näher auf wissenschaftliche Anwendungen eingegangen werden. Neben der atomaren Struktur sind detaillierte Untersuchungen von Ionen in anderen Bereichen der heutigen Forschung, wie der Kern- und Astrophysik, der warmen und heißen dichten Materie oder auch den Tests des Standardmodells von Teilchen und Wechselwirkungen, sehr gefragt. Letzteres Thema erregt derzeit sowohl im Experiment als auch in der Theorie große Aufmerksamkeit. Dabei können hochgeladene Ionen eingesetzt werden, um die (Verletzungen von) fundamentalen Symmetrien der Natur zu untersuchen. So sind etwa Ionen mit nur wenigen Elektronen sehr empfindlich gegenüber Paritätsverletzungen, also Verletzungen der räumlichen Spiegelsymmetrie. Solche P-Verletzungen werden durch die schwache Wechselwirkung zwischen Kern und Elektronen

verursacht und führen zur Mischung von Ionen-niveaus entgegengesetzter Parität. Im Gegensatz zu neutralen Systemen ist der Mischkoeffizient in HCI's stark erhöht, da das Matrixelement des Hamiltonian der schwachen Wechselwirkung als Z^5 skaliert. Die Methoden zur Beobachtung dieser Mischung, basierend auf laserinduzierten Ein- und Zwei-Photonen-Übergängen, befinden sich derzeit in der Entwicklung [Surzhykov2011]. Diese Atomexperimente werden die Ergebnisse der hochenergetischen CERN-Messungen ergänzen und wahrscheinlich wertvolle und einzigartige Informationen über die schwache Wechselwirkung im Niedrigenergiebereich liefern. Neben dem führenden Teil der Paritätsverletzung in Atomen durch Z^0 -Bosonenaustausch zwischen Kern und Elektronen wird derzeit besonderes Augenmerk auf die schwache Wechselwirkung innerhalb der Kerne gelegt (siehe Abbildung 9). Diese Mischung zeichnet sich durch das sogenannte Anapolmoment aus, dessen Eigenschaften noch wenig verstanden sind. Der vielversprechendste Weg zur Messung dieser Konstanten ist die Beobachtung der Einzelphotonenübergänge zwischen den Hyperfein-niveaus hochgeladener Ionen [Ferro2011].

Über Tests der P-Verletzung hinaus gelten hochgeladene Ionen als sehr attraktive Kandidaten für die Untersuchung von CP-Verletzungen und für die Suche nach einer „Neuen Physik“ jenseits des Standardmodells. Das heißt, obwohl die Verletzung der kombinierten Paritäts- (P) und Ladungssymmetrien (C) durch das Standardmodell nicht verboten ist, reichen seine Vorhersagen nicht aus, um viele faszinierende Fragen zu klären, wie die der Materie-Antimaterie-Asymmetrie oder das Fehlen von CP-verletzenden Beobachtungen in der Quantenchromodynamik, der Beschreibung der starken Kernkraft. Es gibt eine Reihe von Erweiterungen des Standardmodells, die die Existenz noch unbekannter Teilchen und Wechselwirkungen und damit größere CP-Verletzungseffekte vorhersagen. In der Atomphysik würden diese Verletzungen ein permanentes, elektrisches Dipolmoment (EDM) von Teilchen erzeugen. Die Suche nach diesem permanenten EDM von Protonen, Neutronen und Elektronen erregt daher viel Aufmerksamkeit. Außerdem wurden erst kürzlich Experimente vor-

geschlagen, in denen das EDM des in wasserstoffähnlichen Ionen gebundenen Elektrons in elektrostatischen Speicherringen beobachtet werden kann [Bondarevskaya2011].

4.1 Tests der lokalen Lorentz-Invarianz

Nicht nur hochgeladene, sondern auch einzelgeladene Ionen spielen eine entscheidende Rolle für die Suche nach „Neuer Physik“. Atome im Allgemeinen sind ausgezeichnete Systeme, um z. B. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie auf mögliche Verletzungen zu testen. Ein Grundstein dieser Theorie ist die lokale Lorentz-Invarianz. Diese besagt, dass das Ergebnis eines Experimentes unabhängig von der Orientierung und der Geschwindigkeit seines Bezugssystems ist. Gemäß dem Standardmodell der Teilchenphysik sind alle Teilchen und Felder invariant unter Lorentz-Transformationen. Das Standardmodell beschreibt drei der vier fundamentalen Wechselwirkungen (elektromagnetische, schwache und starke) im Rahmen der Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie. Unser Verständnis von der vierten Wechselwirkung, die Gravitation, basiert jedoch auf der Allgemeinen Relativitätstheorie. Theorien, die eine Vereinigung aller fundamentalen Wechselwirkungen anstreben, sagen eine Verletzung der Lorentz-Symmetrie vorher.

Mit der sogenannten Erweiterung des Standardmodells (SME) existiert ein theoretisches Grundgerüst, welches eine systematische Untersuchung von möglichen Verletzungen der Lorentz-Symmetrie erlaubt. Die SME ist eine effektive Feld-Theorie, die den Formalismus des Standardmodells um jede mögliche Kombination der darin enthaltenen Felder erweitert, die nicht Term für Term Lorentz-invariant ist. Dabei bleiben jedoch alle anderen grundlegenden Eigenschaften der Theorie unangetastet. Die SME kann genutzt werden, um die niederenergetische Limitierung vieler verschiedener Theorien, die eine Lorentz-Verletzung vorher-sagen, zu beschreiben und enthält das Standardmodell als Grenzfall.

Die SME erlaubt es, eine Lorentz-Verletzung separat für alle Teilchen (z. B. Neutronen, Photonen, Elektronen) zu untersuchen. Um die

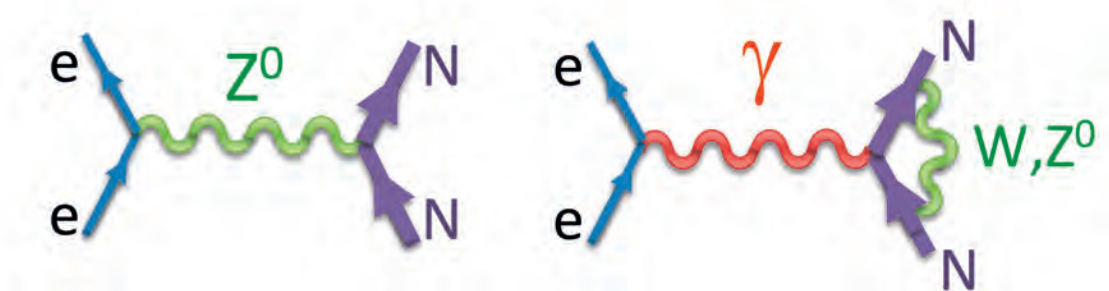


Abbildung 9: Die Paritätsverletzung in atomaren Systemen entsteht durch den Austausch eines Z^0 -Bosons zwischen Kern und Elektronenwolke (linkes Feynman-Diagramm), sowie durch die schwache Wechselwirkung zwischen Nukleonen (rechtes Feynman-Diagramm)

Lorentz-Symmetrie eines bestimmten Teilchens zu verifizieren, muss es mit einem Referenzsystem verglichen werden, da nur Unterschiede in deren Verhalten unter Lorentz-Transformation beobachtbar sind. Ein übliches Referenzsystem ist das Ruhesystem der Sonne. Zeitabhängige Lorentz-Transformationen von diesem in das Laborsystem führen aufgrund der Erdbewegung zu einer zeitlichen Variation der lokalen Messungen, falls die Lorentz-Symmetrie, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorausgesetzt wird, verletzt ist. Die wohl bekanntesten Tests der Lorentz-Symmetrie sind Michelson-Morley-ähnliche Experimente, die die Isotropie der Lichtgeschwindigkeit verifizieren [Michelson1887].

Ein analoger Test kann für den Elektronen-Sektor durchgeführt werden, wo die Ausdehnung der Elektronen-Wellenfunktionen im Atom von der Dispersionsrelation der Elektronen abhängt. Für ein atomar-gebundenes Elektron mit Impuls p kommt es zu einer geringfügigen Energieverschiebung, die davon abhängt, wie der Gesamtimpuls p bezüglich einer Quantisierungsachse im Laborsystem verteilt ist. Da die Erde rotiert, ist eine zeitliche Modulation der Elektronenenergie bei Verletzung der Lorentz-Symmetrie zu erwarten, die mit der Rotationsfrequenz korreliert ist. Labortests suchen daher nach Signalen mit einer Frequenz von $\omega_E = 2\pi/(23.93h)$, entsprechend der Dauer eines siderischen Tages (siehe Abbildung 10).

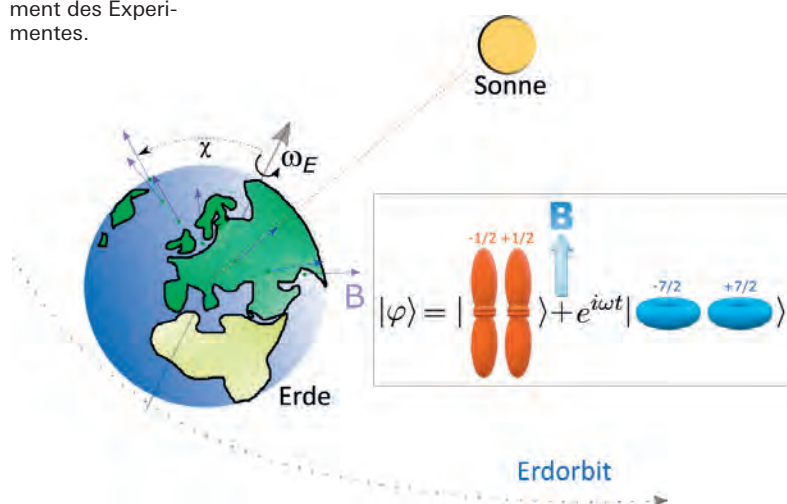
Um eine Verletzung der Lorentz-Invarianz mit Elektronen zu testen, kann also ein quantenmechanisches Analogon zum klassischen Michelson-Morley-Experiment betrieben werden, indem atomare Zustände miteinander interferiert werden, die eine möglichst unterschiedliche Elektronenimpuls-Verteilung entlang verschiedener Richtungen haben. Erste Experimente wurden hierzu mit neutralen Dysprosium-Atomen durchgeführt, mit denen eine mögliche Lorentz-Verletzung mit einer Unsicherheit von $2,2 \cdot 10^{-16}$ ausgeschlossen werden konnte. Eine Verbesserung um einen Faktor 100

konnte mit zwei verschränkten Kalzium-Ionen erzielt werden, sodass eine mögliche Lorentz-Verletzung für Elektronen bis zu einem Bereich von 10^{-18} auszuschließen ist. Eine weitere Verbesserung verspricht ein Test auf Lorentz-Verletzung mit Yb^+ -Ionen. Die tief im Atom lokalisierte 4f-Schale besitzt aufgrund ihrer großen kinetischen Energie eine hohe Sensitivität auf relativistische Effekte. Gerade der $4f^{13}6s^2 \ ^2F_{7/2}$ -Zustand in Yb^+ weist eine extrem lange Lebensdauer von mehreren Jahren vor, was für eine präzise Bestimmung der Energieverschiebungen von Vorteil ist. Erste Messungen mit den Atomuhren basierend auf einem lasergekühlten Yb^+ -Ion an der PTB konnten einen neuen Weltrekord für die Suche nach Lorentz-Verletzungen aufstellen und verbesserten die zuletzt veröffentlichte Sensitivität im Elektronen-Sektor um einen weiteren Faktor 100. Somit ist bis heute eine Verletzung der lokalen Lorentz-Invarianz bis zu einem Sensitivitätsbereich von 10^{-20} auszuschließen. Auch wenn dies bereits eine sehr präzise Eingrenzung darstellt, ist die Gültigkeit der Lorentz-Invarianz im Neutronen-Sektor um fast zehn Größenordnungen mehr gegeben.

4.2 Die Suche nach Dunkler Materie und Variationen von Naturkonstanten

Ein weiteres ungelöstes Problem der modernen Physik, das mithilfe hochgeladener Ionen effizient in Angriff genommen werden kann, ist das Wesen der Dunklen Materie. Die Suche nach den Teilchen der Dunklen Materie ist nicht nur für die Astrophysik und Kosmologie relevant, sondern auch wichtig für die Beantwortung der Frage, ob sich die fundamentalen Konstanten der Natur über Zeit und Raum verändern. Eine solche Variation würde zum Beispiel bedeuten, dass die Eigenschaften der Atome eines Elements in verschiedenen Teilen des Universums unterschiedlich sind, oder sich über die verschiedenen Entwicklungsstufen des Universums hinweg änderten. Eine Reihe von kosmologischen Theorien, sowie Theorien, die darauf abzielen, die Schwerkraft mit den drei anderen fundamentalen Kräften zu vereinen, sagen voraus, dass sich zumindest einige der Naturkonstanten im Laufe der Zeit durch die Kopplung zwischen einem skalaren Feld der Dunklen Materie und gewöhnlicher Materie verändern können. Nach den zeitlichen Schwankungen der Naturkonstanten kann im Labor durch hochpräzise Messungen mit Atom- und Kernuhren sowie Molekülen gesucht werden. Auch für hochgeladene Ionen wurden vielversprechende Methoden zur Beobachtung der Variation von Naturkonstanten vorgeschlagen [Safranova2014]. Der große Vorteil dieser Ionen ist, dass ihre Energiespektren durch Wahl der Kernladungszahl Z und ihres Ladungszustandes (d. h. der Anzahl der an den Kern gebundenen

Abbildung 10: Prinzip des Tests der Lorentz-Symmetrie: Ein vertikales Magnetfeld B definiert die Quantisierungsachse im Laborsystem. Da die Erde mit einer Winkelgeschwindigkeit von $\omega_E = 2\pi/(23.93 h)$ rotiert, ändert sich die Ausrichtung der Quantisierungsachse und somit die Ausrichtung der Elektronenorbitale gegenüber dem Ruhesystem der Sonne. Der Winkel χ entspricht dem Breitengradkomplement des Experimentes.

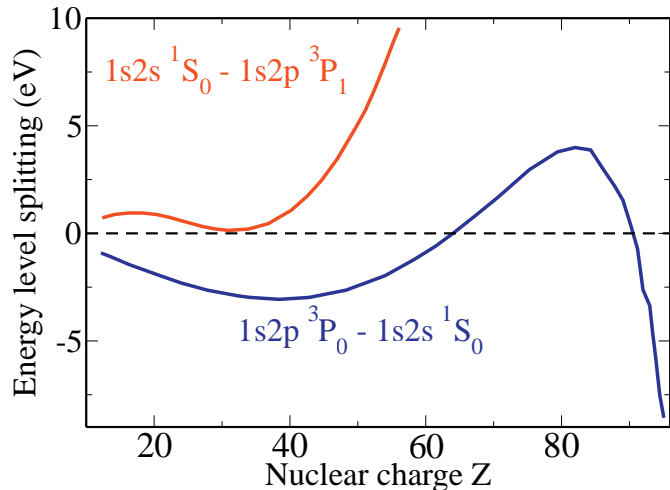


Elektronen) „fein abgestimmt“ werden können. Insbesondere lassen sich die Auswirkungen der Überschneidungen von ionischen Energieniveaus beobachten. Diese Überschneidungen – bei denen zwei unterschiedliche ionische Zustände bei fast gleicher Energie auftreten – können für viele Untersuchungen fundamentaler Phänomene genutzt werden. Beispielsweise sind die Niveaus $1s2s\ ^1S_0$ und $1s2p\ ^3P_0$ von heliumähnlichen Ionen für die Kernladungen $Z = 66$ und $Z = 92$ bekannt (siehe Abbildung 11). Bei diesen Kernladungszahlen ist die Energiedifferenz $\Delta E(2^1P_0 - 2^3P_0)$ sehr empfindlich gegenüber dem Wert der Feinstrukturkonstanten α . Hochpräzise Messungen von $\Delta E(2^1P_0 - 2^3P_0)$, basierend auf der Laserspektroskopie, sind derzeit in der Diskussion und können wertvolle Informationen über mögliche Veränderungen von α liefern.

Bei der Suche nach „Neuer Physik“ eröffnet auch die bereits diskutierte Kernuhr mit Th-229 neue Möglichkeiten für die physikalische Grundlagenforschung. Bei allen heutigen Atomuhren sind die Resonanzfrequenzen von der elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt und mit den Gesetzen der Quantenelektrodynamik zu beschreiben. Im Atomkern spielt hingegen die starke Wechselwirkung die dominierende Rolle. Fast alle Ideen zu „Neuer Physik“ gehen davon aus, dass die Beschreibung der Natur mit vier fundamentalen Kräften (elektromagnetisch, schwach, stark, gravitativ) nicht vollständig und nicht unveränderlich ist. Daher ist es für experimentelle Tests solcher Modelle besonders interessant, mit Th-229 eine Uhr zur Verfügung zu haben, die auf einer von Kombination von zwei der fundamentalen Kräfte beruht und die sich mit sehr hoher Präzision mit einer konventionellen Atomuhr vergleichen lässt.

4.3 Isotopenverschiebung als ein Prüfstand für Atomstrukturrechnungen

Messungen von Isotopenverschiebungen in hochgeladenen Ionen bieten sehr gute Möglichkeiten für Tests relativistischer und quantenelektrodynamischer (QED) Systeme mit wenigen Elektronen. Neben Untersuchungen von sehr schweren Ionen, die üblicherweise an Beschleuniger- und Speicherringanlagen durchgeführt werden, steht heute auch der niedrig-Z-Bereich im Mittelpunkt des Interesses. In diesem Bereich sind hochpräzise „table-top“-Experimente an Ionenfallen möglich, die wichtige Informationen über die Struktur von (relativ) einfachen Atomsystemen liefern. Von besonderem Interesse sind hier die elektrisch-dipol-verbotenen Übergänge in Ionen wie z. B.



der $1s^2 2s^2 2p\ ^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ Zerfall in Bor-ähnlichen Systemen [Zubova2016]. Da die Aufspaltung zwischen diesen beiden (Feinstruktur-)Niveaus rein relativistischer Natur ist und kein nicht-relativistisches Gegenstück aufweist, bietet der Übergang $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ ein perfektes Testfeld für die relativistischen und quantenelektrodynamischen (QED) Effekte in Systemen mit wenigen Elektronen. Tatsächlich werden die relativistischen und QED-Korrekturen in diesem Fall nicht durch die (oft dominierenden) nicht-relativistischen Beiträge verdeckt. Die relativ einfache elektronische Struktur der Bor-ähnlichen Ionen ermöglicht es, diese Korrekturen theoretisch mit hoher Genauigkeit zu analysieren. Daher können die Feinstrukturübergänge in Ionen genutzt werden, um die Leistungsfähigkeit und Machbarkeit moderner relativistischer Mehrkörper-Berechnungsansätze zu überprüfen. Insbesondere durch den Vergleich von experimentellen Daten und theoretischen Vorhersagen kann man QED-Effekte höherer Ordnung untersuchen, deren genaue Auswertung nach wie vor eine sehr komplizierte Aufgabe ist. Isotopenverschiebungen von Atomniveaus sind ein ideales Werkzeug für einen solchen Vergleich, da sie mit viel höherer Genauigkeit als absolute Energien berechnet werden können. Darüber hinaus können hochpräzise (experimentelle und theoretische) Analysen der Isotopenverschiebungsdaten wertvolle Informationen über besondere Kerneigenschaften liefern, die mit anderen Methoden weniger gut zugänglich sind. Die Kenntnis dieser Eigenschaften ist für die hochpräzise King-Plot-Analyse der Isotopenverschiebungsdaten unerlässlich. Eine solche Analyse wurde kürzlich als weiteres Werkzeug zur Suche nach einer „Neuen Physik“ jenseits des Standardmodells vorgeschlagen.

Abbildung 11: Aufspaltung der $2\ ^1S_0 - 2\ ^3P_0$ und $2\ ^1S_0 - 2\ ^3P_1$ Energieniveaus von heliumartigen Ionen als Funktion der Kernladungszahl

Literatur

- [Beck2007] B. R. Beck et al., *Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}Th* , Phys. Rev. Lett. **98**, 142501 (2007)
- [Bekker2017] H. Bekker, persönliche Mitteilung (2017)
- [Bondarevskaya2011] A. Bondarevskaya, A. Prozorov, L. Labzowskya, G. Plunien, D. Liesen und F. Bosch, *Theory of the polarization of highly charged ions in storage rings: Production, preservation, observation and application to the search for a violation of the fundamental symmetries*, Phys. Rep. **507**, 1 (2011)
- [Campbell2012] C. J. Campbell et al., *Single-ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place*, Phys. Rev. Lett. **108**, 120802 (2012)
- [Ferro2011] F. Ferro, A. Surzhykov und Th. Stöhlker, *Hyperfine transitions in He-like ions as a tool for nuclear-spin-dependent parity-nonconservation studies*, Phys. Rev. A **83**, 052518 (2011)
- [Helmer1994] R. G. Helmer, C. W. Reich, *An excited state of ^{229}Th at 3.5 eV*, Phys. Rev. C **49**, 1845 (1994)
- [Herschbach2012] N. Herschbach, K. Pyka, J. Keller und T. E. Mehlstäubler, *Linear Paul trap design for an optical clock with Coulomb crystals*, Appl. Phys. B **107**, 891 (2012)
- [Huntemann2012] N. Huntemann, M. Okhapkin, B. Lipphardt, S. Weyers, C. Tamm und E. Peik, *High-Accuracy Optical Clock Based on the Octupole Transition in $^{171}\text{Yb}^+$* , Phys. Rev. Lett. **108**, 090801 (2012)
- [Huntemann2016] N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, C. Tamm und E. Peik, *Single-Ion Atomic Clock with $3 \cdot 10^{-18}$ Systematic Uncertainty*, Phys. Rev. Lett. **116**, 063001 (2016)
- [Keller2015] J. Keller, H. L. Partner, T. Burgermeister und T. E. Mehlstäubler, *Precise determination of micromotion for trapped-ion optical clocks*, J. Appl. Phys. **118**, 104501 (2015)
- [Keller2019a] 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)
- [Keller2019b] J. Keller, D. Kalincev, T. Burgermeister, A. Kulosa, A. Didier, T. Nordmann, J. Kiethe und T. E. Mehlstäubler, *Optical clocks based on linear ion chains with high stability and accuracy*, Phys. Rev. Appl. **11**, 011002 (2019)
- [Kozlov2018] M. G. Kozlov, M. S. Safronova, J. R. C. López-Urrutia und P. O. Schmidt, *Highly charged ions: optical clocks and applications in fundamental physics*, Rev. Mod. Phys. **90**, 045005 (2018)
- [Leopold2019] T. Leopold, S. A. King, P. Micke, A. Bautista-Salvador, J. C. Heip, C. Ospelkaus, J. R. C. López-Urrutia, und P. O. Schmidt, *A cryogenic radio-frequency ion trap for quantum logic spectroscopy of highly charged ions*, arXiv:1901.03082 (2019)
- [Ludlow2015] A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye, E. Peik und P. O. Schmidt, *Optical atomic clocks*, Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015)
- [Mäckel2011] V. Mäckel, R. Klawitter, G. Brenner, J. R. Crespo López-Urrutia und J. Ullrich, *Laser Spectroscopy on Forbidden Transitions in Trapped Highly Charged Ar^{13+} Ions*, Phys. Rev. Lett. **107**, 143002 (2011)
- [Matinyan1998] S. Matinyan, *Lasers as a bridge between atomic and nuclear physics*, Phys. Rep. **298**, 199 (1998)
- [Michelson1887] A. A. Michelson und E. W. Morley, *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*, Am. J. Sci. **34**, 333 (1887)
- [Micke2018] P. Micke, S. Kühn, L. Buchauer, J. R. Harries, T. M. Bücking, K. Blaum, A. Cieluch, A. Egl, D. Hollain, S. Kraemer, T. Pfeifer, P. O. Schmidt, R. X. Schüssler, C. Schweiger, T. Stöhlker, S. Sturm, R. N. Wolf, S. Bernitt und J. R. Crespo López-Urrutia, *The Heidelberg compact electron beam ion traps*, Review of Scientific Instruments **89**, 063109 (2018)
- [Micke2019] P. Micke, J. Stark, S. A. King, T. Leopold, T. Pfeifer, L. Schmöger, M. Schwarz, L. J. Spieß, P. O. Schmidt, und J. R. C. López-Urrutia, *Closed-cycle, low-vibration 4 K cryostat for ion traps and other applications*, arXiv:1901.03630 (2019)
- [Peik2003] E. Peik und Chr. Tamm, *Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in ^{229}Th* , Europhys. Lett. **61**, 181 (2003)
- [Peik2015] E. Peik und M. Okhapkin, *Nuclear clocks based on resonant excitation of γ -transitions*, Comptes Rendus Physique **16**, 536 (2015)
- [Pyka2014] K. Pyka, N. Herschbach, J. Keller und T. E. Mehlstäubler, *A high-precision segmented Paul trap with minimized micromotion for an optical multiple-ion clock*, Appl. Phys. B **114**, 231 (2014)
- [Safronova2014] M. S. Safronova, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum, U. I. Safronova, S. G. Porsev und M. G. Kozlov, *Highly Charged Ions for Atomic Clocks, Quantum Information, and Search for α variation*, Phys. Rev. Lett. **113**, 030801 (2014)
- [Schmidt2005] P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist und D. J. Wineland, *Spectroscopy Using Quantum Logic*, Science **309**, 749 (2005)
- [Schmöger2015] L. Schmöger, O. O. Versolato, M. Schwarz, M. Kohnen, A. Windberger, B. Piest, S. Feuchtenbeiner, J. Pedregosa-Gutierrez, T. Leopold, P. Micke, A. K. Hansen, T. M. Baumann, M. Drewsen, J. Ullrich, P. O. Schmidt und J. R. C. López-Urrutia, *Coulomb crystallization of highly charged ions*, Science **347**, 1233 (2015)
- [Surzhykov2011] A. Surzhykov, P. Indelicato, J. P. Santos, P. Amaro und S. Fritzsche, *Two-photon absorption of few-electron heavy ions*, Phys. Rev. A **84**, 022511 (2011)

- [Thielking2018] J. Thielking et al., *Laser spectroscopic characterization of the nuclear-clock isomer ^{229m}Th* , Nature **556**, 321 (2018)
- [Tkalya2003] E. V. Tkalya, *Properties of the optical transition in the ^{229}Th nucleus*, Phys. Uspekhi **46**, 315 (2003)
- [VonDerWense2016] L. von der Wense et al., *Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition*, Nature **533**, 47 (2016)
- [VonDerWense2018] L. von der Wense, B. Seiferle und P. G. Thirolf, *Towards a ^{229}Th -based nuclear clock*, Measurement Techniques **60**, 1178 (2018)
- [Zubova2016] N. A. Zubova, A. V. Malyshev, I. I. Tupitsyn, V. M. Shabaev, Y. S. Kozhedub, G. Plunien, C. Brandau und Th. Stöhlker, *Isotope shifts of the $2p_{3/2}-2p_{1/2}$ transition in B-like ions*, Phys. Rev. A **93**, 052502 (2016)

Aktuelles aus der OIML (Internationale Organisation für das Gesetzliche Messwesen)

Bericht über die 53. Sitzung des CIML in Hamburg

Roman Schwartz¹, Peter Ulbig², Susanne Ludwig³

Oberstes Ziel der 1955 gegründeten *Organisation Internationale de Métrologie Légale* (OIML) mit 128 Mitgliedstaaten ist es, die Vielzahl der nationalstaatlichen Rechtsvorschriften und messtechnischen Prüfungen von Messgeräten international zu harmonisieren, für die gegenseitige Anerkennung von Prüfergebnissen in den Mitgliedsländern zu sorgen und damit technische Handelshemmnisse im Sinne der WTO (*World Trade Organization*) abzubauen. Betroffen sind viele eichpflichtige Messgeräte, wie zum Beispiel Waagen, Zapfsäulen, Gas-, Wasser- und Elektrizitätszähler, aber auch Längenmessgeräte, Geschwindigkeitsmessgeräte zur Verkehrsüberwachung und Taximeter.

Die OIML hat zurzeit 62 Mitgliedstaaten und 65 korrespondierende Mitgliedstaaten.

Die Inselrepublik Kiribati (Pazifik) ist seit diesem Jahr neues Korrespondierendes Mitglied.

Die 53. Sitzung des Internationalen Komitees für das gesetzliche Messwesen (CIML) fand vom 9. bis 12. Oktober in Hamburg statt. Das CIML tagt jährlich, wählt den Präsidenten und die beiden Vizepräsidenten, genehmigt den Strategie-, Prioritäten- und Aktionsplan, überwacht die technischen Arbeiten und das Internationale Büro für das gesetzliche Messwesen (BIML).

An der 53. CIML-Sitzung nahmen 182 Teilnehmer aus 51 Mitgliedstaaten und 17 korrespondierenden Mitgliedstaaten teil. Zur deutschen Delegation gehörten neben den o. g. Autoren auch Dr. Olaf Kühn, Direktor des Thüringer Landeamts für Verbraucherschutz, Herr Johann Fischer, Direktor des Landesamts für Mess- und Eichwesen Berlin-Brandenburg, sowie Frau Katharina Gierschke, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Darüber hinaus nahm Prof. Manfred Kochsiek als OIML-Ehrenmitglied und ehemaliger CIML-Präsident an den Sitzungen teil.

Alle Beschlüsse der 53. CIML-Sitzung können auf den Internetseiten der OIML aufgerufen werden [1, 2].

Die wichtigsten Entscheidungen und Entwicklungen werden nachfolgend vorgestellt.

1. Zusammenarbeit mit internationalen Partnerorganisationen (*Liaisons*)

Gute Kontakte bestehen zwischen der OIML und anderen internationalen Organisationen wie IEC (*International Electrotechnical Commission*), ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*), IAF (*International Accreditation Forum*), dem europäischen Herstellerverband für Waagen CECIP und dem Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM). Am Roundtable der regionalen Organisationen für gesetzliches Messwesen (RLMO) nahmen u. a. auch Vertreter von GSO (*Gulf Cooperation Council Standardization Organization*), GULFMET (*Gulf Association for Metrology*) teil.

Vor dem Hintergrund des neuen OIML-Zertifizierungssystems wurden die MoU (*Memoranda of Understanding*) mit IEC und ILAC/IAF aktualisiert.

2. Workshop *Legal Metrology in Practice in Zusammenarbeit mit der Eichdirektion Nord*

Im Zusammenhang mit dem Workshop *Legal Metrology in Practice*, der im Vorfeld der CIML-Sitzung stattfand, besuchten die Teilnehmer die Eichdirektion Nord, wo anschaulich die Eichung von Taximetern, Zapfsäulen, Abgasmessgeräten und Lagertanks für Mineralöl im Hamburger Hafen vorgeführt wurde.

¹ Hon.-Prof. Dr. Roman Schwartz, Vizepräsident der PTB, Präsident des „Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML)“

² Dr. Peter Ulbig, Abteilungsleiter „Gesetzliche und Internationale Metrologie“, PTB

³ Susanne Ludwig, Sekretariat zur Koordinierung der deutschen OIML-Mitarbeit, PTB

Bild 1 (links): Unterzeichnung des MoU (*Memorandum of Understanding*) mit IEC, vertreten durch Frans Vreeswijk, IEC-Generalsekretär und -Geschäftsführer

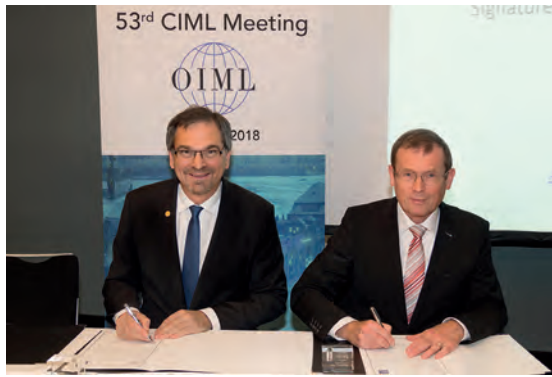


Bild 2 (rechts): Unterzeichnung des MoU mit ILAC/IAF, vertreten durch Merih Malmqvist Nilsson, ILAC-Vorsitzende, und Jianhua Xiao, IAF-Vorsitzender



3. CEEMS Workshop QI Toolkit

Ebenfalls im Vorfeld der CIML-Sitzung wurde ein Workshop zum Thema „Qualitätsinfrastruktur“ abgehalten, dessen Zielgruppe vor allem Staaten waren, deren metrologische Infrastruktur sich noch im Aufbau befindet. Ausgerichtet und begleitet wurde der Workshop von der Weltbank-Gruppe, des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) und der PTB. Es wurde ein neues *Toolkit* vorgestellt, mit dem sich sowohl anhand von Fragebögen die Qualität der messtechnischen Infrastruktur eines Landes einschätzen lässt, als auch weitere Entwicklungsschritte erarbeiten lassen. Der praktische Test dieses *QI Toolkit*s durch mehr als 100 Teilnehmer aus knapp 50 Staaten war ein voller Erfolg.

Bild 3: Während eines Workshops im Rahmen der OIML-Tagung erproben Teilnehmer eine Art Schnelltest, mit dem sich die Qualitätsinfrastruktur des eigenen Landes einschätzen lässt. Dieses sogenannte *QI Toolkit* wurde gemeinsam von der Weltbankgruppe und der PTB erarbeitet.



4. OIML-Publikationen

Wichtige neue Projekte wurden auf den Weg gebracht:

- Revision B 18 (*Framework for the OIML Certification System* (OIML-CS))
- Revision R 139 (*Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles*)
- Neues Dokument D 32 (*Guide for the application of ISO/IEC 17065 to assessment of certification bodies in legal metrology*)

Folgende neue Projekte wurden verabschiedet:

- Richtlinie über die Partikelzählung für Abgasmessgeräte
- Erweiterung der Richtlinie R 145 für Tonometer, Geräte zur Messung des Augendruckes, in die zukünftig auch kontaktfreie optische Geräte einbezogen werden sollen.

Alle aktuellen Fassungen der OIML-Publikationen stehen auf den OIML-Webseiten zum Download zur Verfügung [3].

5. OIML-Zertifizierungssystem (OIML-CS)

Das CIML verabschiedete die folgenden Empfehlungen des Management-Komitees (MC):

- OIML R 60:2000 und R 61:2004 bleiben im OIML-CS
- Erweiterung der Übergangsregelung in *Scheme A* für:
 - ▷ R 51, R 117 → 1.7.2019
 - ▷ R 46, R 137 → 1.1.2020
 - ▷ R 61, R 85, R 129 → 1.7.2020
 - ▷ R 21, R 50, R 75, R 99, R 106, R 107, R 126, R 134, R 139 → 1.1.2021
- Aufnahme neuer Messgerätekategorien in *Scheme B* am 1.1.2019 und *Scheme A* am 1.1.2021:
 - R 16, R 35, R 58, R 59, R 81, R 88, R 93, R 102, R 104, R 110, R 122, R 128, R 133, R 136, R 143, R 144, R 145, R 146
- *Transition Roadmap* und Umsetzung in der PTB (s. Tabelle im Anhang)

6. *Countries and Economies with Emerging Metrology Systems (CEEMS)*

Das CIML beschloss die Übertragung folgender Projekte in den Verantwortungsbereich des CEEMS:

- Revision von D 14 *Training and qualification of legal metrology personnel*
- Revision von D 19 *Pattern evaluation and pattern approval*

7. *Personalia und Ehrungen*

Anthony Donnellan (Australien) wurde mit Wirkung vom 1.1.2019 für fünf Jahre zum BIML-Direktor gewählt. Dr. Charles Ehrlich (USA) wurde mit sofortiger Wirkung zum ersten Vizepräsidenten des CIML für eine Amtszeit von sechs Jahren gewählt.

OIML-Medaillen für besondere Verdienste um das internationale gesetzliche Messwesen wurden an Anneke van Spronssen (Niederlande), George Teunisse (Niederlande) und den scheidenden Direktor des BIML, Stephen Patoray (USA), verliehen.

Einen *Letter of appreciation* für wichtige Beiträge zum internationalen gesetzlichen Messwesen

erhielten u. a. Roland Nater (CECIP) und Dr. Toshiyuki Takatsuji (Japan).

Der CEEMS Award (früher Auszeichnung für „exzellente Beiträge von Entwicklungsländern zum gesetzlichen Messwesen“) wurde dieses Jahr an Prof. Carlos Augusto de Azevedo (Brasilien) verliehen.

8. *Termine*

Die 54. CIML-Sitzung wird im Oktober 2019 in Bratislava, Slowakei, stattfinden. Gastgeberland für die 55. CIML-Sitzung und die 16. Internationale Konferenz 2020 wird China sein.

Weitere OIML-Veranstaltungen und Termine finden sich auf der OIML-Webseite unter [4].

9. Referenzen

- [1] <https://www.oiml.org/en> (letzter Aufruf: 21.11.2018)
- [2] <https://www.oiml.org/en/structure/ciml/pdf/54-ciml-resolutions-english.pdf> (letzter Aufruf: 21.11.2018)
- [3] <https://www.oiml.org/en/publications/introduction> (letzter Aufruf: 21.11.2018)
- [4] <https://www.oiml.org/en/events/calendar> (letzter Aufruf: 21.11.2018)



Bild 4:
Die Teilnehmer der 53. Sitzung des Internationalen Komitees für Gesetzliches Messwesen (CIML) stammten aus 70 Nationen

Bild 5:
Zu den Tagungsteilnehmern gehörten (1. Reihe von links nach rechts): Dr. Heike Litzinger, BMZ; Prof. Dr. Joachim Ullrich, Präsident der PTB; Dr. Marion Stoldt, Leiterin des PTB-Fachbereichs „Internationale Zusammenarbeit“; Gina Burger, BMZ; Dr. Barbara Siegmund, Leiterin der PTB-Arbeitsgruppe „Subsahara-Afrika“



Tabelle 1:
Transition Roadmap und geplante Umsetzung in der PTB

Seit 01.01.2018 im OIML-CS:	1/2018	1/2019	7/2019	1/2020	7/2020	1/2021
R 60 Load Cells	A	A	A	A	A	A
R 76 Non-Automatic Weighing Instruments	A	A	A	A	A	A
R 49 Water Meters	B	A	A	A	A	A
R 51 Automatic catchweighers	B	B	A	A	A	A
R 117 Liquids other than water	B	B	A	A	A	A
R 46 Active electrical energy meters	B	B	B	A	A	A
R 137 Gas meters	B	B	B	A	A	A
R 61 Automatic gravimetric filling instruments	B	B	B	B	A	A
R 85 Level gauges for stationary storage tanks	B	B	B	B	A	A
R 129 Multi-dimensional measuring instruments	B	B	B	B	A	A
R 21 Taximeters	B	B	B	B	B	A
R 50 Continuous totalizers	B	B	B	B	B	A
R 75 Heat meters	B	B	B	B	B	A
R 99 Vehicle exhaust emissions	B	B	B	B	B	A
R 106 Automatic rail-weighbridges		B	B	B	B	A
R 107 Discontinuous totalizers	B	B	B	B	B	A
R 126 Evidential breath analyzers	B	B	B	B	B	A
R 134 Weighing road vehicles in motion	B	B	B	B	B	A
R 139 Compressed gaseous fuel systems for vehicles	B	B	B	B	B	A

Empfangssystem für glasfasergeführtes ultrapräzises Frequenzsignal

Eine PTB-Erfindung ermöglicht die Übertragung des Signals eines ultrastabilen Single-Frequency-Lasers über große Entfernungen in normalen Telekommunikationsglasfasern. Die Erfindung löst das Problem des Anschlusses einer großen Anzahl von Kunden an eine einzige Faserstrecke. Die Erfindung stellt zugleich einen bedeutenden Schritt zur Übertragung des Zeitsignals einer optischen Uhr dar (Atomuhr aus der Steckdose).

Technische Beschreibung

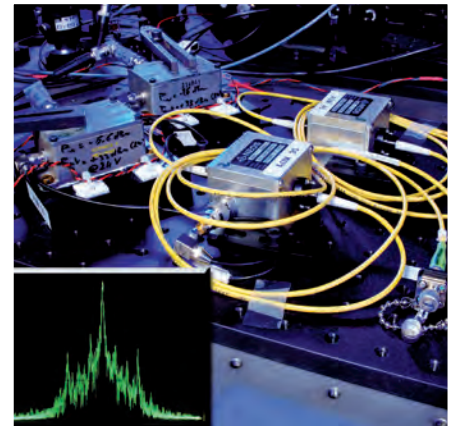
Eine optische Frequenz wird über eine lange Glasfaserleitung übertragen und kann jetzt – trotz der zu erwartenden Störungen in Phase, Mittenfrequenz und Polarisation – an jedem Ort der Leitung abgetastet und auf die Ursprungsfrequenz ν_0 des PTB-Normals rückgeführt werden. Dies gelingt, indem beide Signale, sowohl das vorwärtslaufende als auch das rückwärtslaufende, zu einem Schwebungssignal vereinigt werden. Ein nachfolgender einfacher, analoger Algorithmus erzeugt eine Korrekturfrequenz $\Delta\nu$. Ein akustooptischer Modulator (AOM) überlagert nun das gestörte Signal mit dieser Korrekturfrequenz und regeneriert das gewünschte PTB-Frequenzsignal ν_0 in hoher Präzision. Im Empfänger werden einfache Standardkomponenten der Telekommunikationstechnik eingesetzt. Nachfolgende Empfangsstationen werden durch die Auskopplung am Faserkoppler einer einzelnen Station nicht gestört. In Punkt-zu-Punkt-Experimenten ist die Übertragungstechnik über Wegstrecken von mehr als 100 km Länge nachgewiesen worden.

Wirtschaftliche Bedeutung

Empfänger dieser Art werden im Bereich der Lasertechnik bei der Kalibrierung von höchstauflösenden Spektrometern und der Feinabstimmung von lokalen Referenzlasern auf Empfängerseite benötigt. Kombiniert mit einem lokalen Frequenzkammgenerator können weitere präzise Frequenzen, auch im Mikrowellenbereich, erzeugt werden. Im Bereich der chemischen Analytik mit Höchstpräzisionslasern kann das System mittelbar zur Verifikation der Nachweisempfindlichkeit und Qualitätssicherung dienen.

Entwicklungsstand

Unter DE 10 2008 062 139 B4 wurde ein Patent erteilt.



Die Erfindung ermöglicht den Anschluss vieler Empfänger an eine einzige Glasfaserstrecke. Jeder Empfänger ist in der Lage, trotz Übertragungsstörungen das ursprüngliche hochpräzise Frequenzsignal zu regenerieren.

Vorteile:

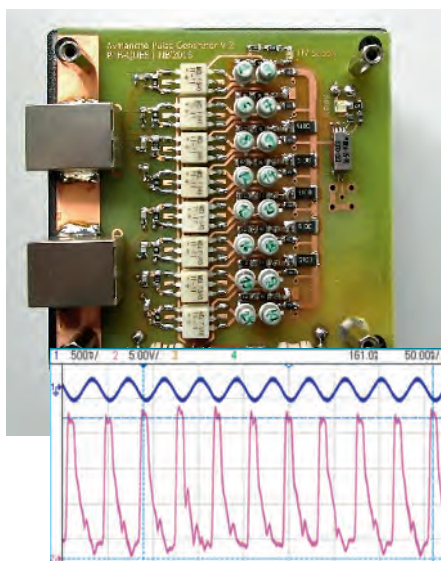
- Bereitstellung des Frequenzsignals mit einer Bandbreite um 1 Hz in einem normalen Glasfaserkabel über große Entfernungen
- Auf Normal rückführbar
- Mehrfache Abtastung an einem beliebigen Ort
- Verteilung des Frequenzsignals in lokalen Netzen über einige hundert Meter mit geringen Qualitätseinbußen

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: bernhard.smandek@ptb.de

Dr. Gesine Grosche
Arbeitsgruppe
Frequenzübertragung mit Glasfasern

PTB-Nummer 0222



Oben: Foto der Pulsgeneratorplatine.
Unten: Ausgangsspannung des Pulsgenerators in 50 Ω (rosa) und 25 MHz RF-Eingangssignal (blau).

Vorteile:

- Hohe Pulswiederholrate bei Spannungen im Bereich von mehr als 10 Volt
- Synchronisierbar auf HF-Signal
- Schaltungslösung beliebig skalierbar

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
und Patentreferent
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

PD Dr. Tanja E. Mehlstäubler
QUEST-Institut

Impulsgeneratorschaltung mit hoher Pulswiederholrate und Synchronisation auf ein externes HF-Signal

Für vielfältige Anwendungen in der Ansteuerung von z. B. elektrooptischen Geräten, wie Diodenlasern oder Pockelszellen, werden heutzutage Pulsgeneratoren benutzt, die sehr kurze Pulse (z. B. 10 ns) und Spannungen von mehreren 10–100 Volt erzeugen. Deren Wiederholrate ist derzeit auf einige MHz begrenzt. Die neue PTB-Erfindung erhöht durch einen speziellen Schaltungsaufbau die Pulswiederholrate erheblich: Mehrere identische Pulsgeneratoren werden in einer festen Abfolge periodisch eingesetzt und durch eine separate Einheit angesteuert. Außerdem ist eine Synchronisation auf ein externes Hochfrequenz-Signal möglich, das beliebig wählbar ist und auf die Phasenlage abgestimmt werden kann.

Technische Beschreibung

Für den neuen Schaltungsaufbau der PTB werden mehrere Bipolartransistoren kontrolliert im Lawinendurchbruchregime betrieben. Die dabei erzeugte Wärme (bzw. Verlustleistung) verteilt sich auf einzelne Impulsgeneratoren. Die durchschnittlich verbrauchte Leistung jedes Generators kann so auf einem sicheren Pegel gehalten werden, um eine hohe Gesamtpulswiederholrate zu erreichen. Auf diese Weise können Stromimpulse im Nanosekunden-Bereich bei höheren Spannungen von über 10 Volt erzeugt werden (s. Bild). Diese Schaltungslösung ist beliebig durch das Ergänzen von neuen Generatoren erweiterbar, um die gewünschte Pulswiederholrate zu erhalten.

Außerdem generiert die Schaltung Impulssequenzen, die mit einem externen Hochfrequenzsignal (HF-Signal) synchronisierbar sind. Das ermöglicht die Wahl von spezifischen FPGAs und einer internen zweiten Uhr.

Wirtschaftliche Bedeutung

Hohe Pulswiederholraten werden für vielfältige Anwendungen in der Ansteuerung von z. B. elektrooptischen Geräten, wie Diodenlasern, Pockelszellen, elektrooptischen Modulatoren oder aber auch Bildverstärkern, genutzt.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich getestet. Ein Funktionsmuster ist vorhanden. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, dieses Funktionsmuster in gemeinsamen Projekten weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

SQUID-basiertes Rauschthermometer zur Messung thermodynamischer Temperaturen im Tieftemperaturgebiet

Magnetfeld-Fluktuations-Thermometer (MFFT) sind SQUID-basierte Rauschthermometer, die bei tiefen Temperaturen (typisch unterhalb von 5 K) eingesetzt werden. Sie detektieren die Fluktuationen des Magnetfeldes an der Oberfläche eines elektrisch leitenden Körpers („Temperatursensor“), die mit den im Inneren fließenden, thermisch angeregten Strömen verknüpft sind. Durch den neuen, vollständig berechenbaren Sensor ist es erstmals möglich, mit dem pMFFT direkt thermodynamische Temperaturen zu messen, wodurch die sonst nötige Rückführung auf die internationalen Temperaturskalen ITS-90 und PLTS-2000 entfällt.

Technische Beschreibung

Das pMFFT besteht aus vier Hauptkomponenten: (1) einem metallischen Temperatursensor aus hochreinem Kupfer, (2) zwei planaren, gradiometrischen Detektionsspulen auf einem Si-Chip, die von zwei dc-SQUID-Stromsensoren ausgelesen werden (= SQUID-Gradiometer), (3) einer planaren Kalibrierspule auf einem Si-Chip, (4) einer 2-Kanal-SQUID-Elektronik. Der zentrale Bereich des Kupferkörpers im Inneren, über dem sich die Detektionsspulen befinden, bildet den eigentlichen Temperatursensor. Dort wird das thermische magnetische Flussrauschen über zwei unabhängige SQUID-Gradiometer gemessen und unter Verwendung der Kreuzkorrelationsmethode ausgewertet, was alle nicht-thermischen Rauschanteile reduziert. Mit bekannter Geometrie und elektrischer Leitfähigkeit des Sensors kann die Temperatur aus den Rauschspektren berechnet werden.

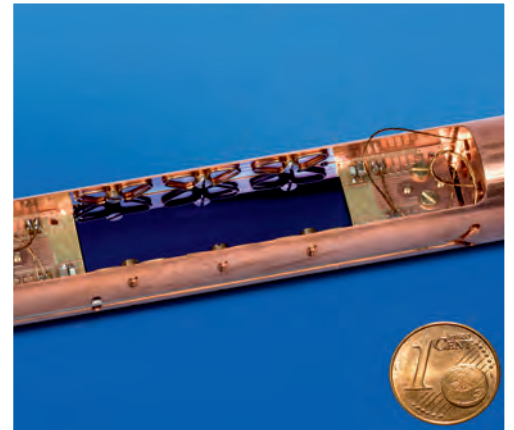
Wirtschaftliche Bedeutung

Sinnvoll ist der Einsatz des pMFFTs als Referenz-Thermometer bei tiefen Temperaturen (<1 K), insbesondere unterhalb von 10 mK. Es deckt dabei den gesamten Temperaturbereich von mindestens 0,9 mK bis 4,2 K ab. Durch die geringe Messunsicherheit ist es für metrologische Anwendungen geeignet. Das pMFFT trifft auf einen wachsenden Markt von Kryotechnik, basierend z. B. auf trockenen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischkryostaten mit vielfältigen Anwendungen (z. B. Strahlungs- und Teilchendetektoren, Quantencomputer, Grundlagenforschung).

Entwicklungsstand

pMFFTs der aktuellen, ersten Version sind in Betrieb und werden weiterhin erprobt. Weiterentwicklungen zur Reduzierung der relativen Messunsicherheit sind geplant.

Unter der Nummer DE 10 2014 011 670 B3 wurde ein Patent erteilt. Lizenzen für die Nutzung dieser neuen Methode sind verfügbar.



Innenansicht des primären MFFT aus hochreinem Kupfer. Beidseitig des zentralen, mit Federn befestigten Silizium-Chips mit den Detektionsspulen befindet sich jeweils ein Chipträger mit SQUID-Stromsensoren. Sichtbar sind jeweils nur deren Rückseiten.

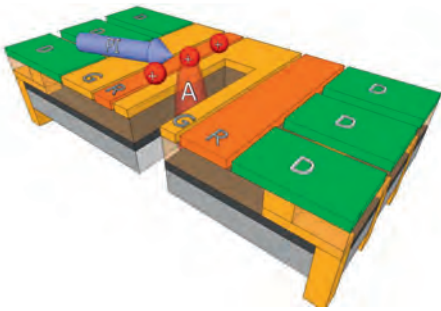
Vorteile:

- vollständige und einfache Berechenbarkeit des Thermometers
- thermisch robuster Temperatursensor, einfache Integration im Kryostaten
- zwei unabhängige Signalkanäle ermöglichen die Anwendung der Kreuzkorrelationsmethode als auch Konsistenzprüfungen
- Aufbau mit zwei Positionen für Spulen-Chips in frei wählbaren Abständen zum Temperatursensor, *in situ*-Kalibrierung der SQUID-Gradiometer

Ansprechpartner:

Dr. Bernhard Smandek
Beauftragter für Technologietransfer
Telefon: +49 531 592-8303
Telefax: +49 531 592-69-8303
E-Mail: bernhard.smandek@ptb.de

Dr. Alexander Kirste
Arbeitsgruppe Tieftemperaturskala



Mehrlagen (Atom) Ionenfalle mit integrierten Durchkontaktierungen und „Ladeloch“, durch das ein Atomstrahl (A) transmittiert wird. Aus diesem können einzelne Ionen von der Rückseite des Chips erzeugt werden.

Vorteile:

- Skalierbarer Aufbau für vielseitigen Einsatz
- Fangen von neutralen wie geladenen Atomen & Molekülen
- Robust im Ultrahochvakuum, Temperaturbereich von 4 K bis mehr als +250 °C

Ansprechpartner:

Andreas Barthel
Innovationsmanager
und Patentreferent
Telefon: +49 531 592-8307
Telefax: +49 531 592-69-8307
E-Mail: andreas.barthel@ptb.de

Dr. Amado Bautista-Salvador
Institut for
Experimental Quantum Metrology
(Quest)

Herstellung von mehrlagigen Atom- und Ionenfallen

Mikrostrukturierte Neutralatom- und Ionenfallen stellen eine Plattform für Quantensensoren dar und eignen sich zur Implementierung zukünftiger Quantencomputer. Sie speichern neutrale und geladene Atome (Ionen) über ihrer Oberfläche durch inhomogene magnetische oder elektrische Felder. Forscher der PTB haben mehrere Verfahren für die Herstellung von Schicht-Strukturen entwickelt, die den hohen Anforderungen von Mehrlagen-Atomfallen gerecht werden. Auf Grundlage dieser Verfahren ist die Vielfalt in Form, Funktionalität und Einsatzszenario dieser Mikrostrukturen sehr groß.

Technische Beschreibung

Eine wesentliche Voraussetzung, um die Anzahl der kontrollierten Atome und Qubits zu erhöhen, ist eine Mikrostruktur, welche das Anlegen einer entsprechenden Menge an Signalen ermöglicht, z. B. durch Integrierung von Mikrowellen-Leitungen. Dies erfolgt durch überlagerte Strukturen, ähnlich wie bei einer mehrlagigen Leiterplatte. Der PTB-Aufbau besteht aus einem Satz von dicken metallischen Leiter-schichten, die durch ein Dielektrikum voneinander getrennt sind und selektiv durch Durchkontaktierungen miteinander verbunden werden. Die Anzahl an metallischen Schichten ist im Prinzip unbegrenzt, da jede dieser Lagen eine hochgenaue globale Planarisierung aufweist. Der Prozess verwendet nur Materialien, die mit den strengen Anforderungen von Atom- und Ionenfallen durch das umgebende Ultrahochvakuum sowie mit Tieftemperatur-Betrieb kompatibel sind; weiterhin sind die Hochfrequenzeigenschaften der Strukturen hervorragend.

Wirtschaftliche Bedeutung

Das Verfahren ist auf den Gebieten der mikrostrukturierten Ionen- und Atomfallen, der Quanteninformationsverarbeitung und der Quantensensorik einsetzbar. Es eignet sich sowohl für die Herstellung großer Zahlen von Proben als auch für anwendungsspezifische Muster in Zusammenarbeit mit Dritten.

Entwicklungsstand

Das Verfahren wurde ausführlich in der PTB getestet. Erste Ionenfallen wurden auf Basis des Herstellungsverfahrens in der PTB produziert. Eine deutsche Patentanmeldung ist anhängig. Bei Interesse bieten wir Ihnen an, in gemeinsamen Projekten diese Erfindung zu einem individuellen Funktionsmuster weiterzuentwickeln oder direkt zu lizenzieren.

Impressum

Die PTB-Mitteilungen sind metrologisches Fachjournal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Die PTB-Mitteilungen stehen in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht.

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Postanschrift:

Postfach 33 45,
38023 Braunschweig

Lieferanschrift:

Bundesallee 100,
38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB

Prof. Dr. Christian Ospelkaus (wissenschaftlicher Redakteur)

Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)

Sabine Siems (Layout / Lektorat)

Telefon: (05 31) 592-82 02

Telefax: (05 31) 592-30 08

E-Mail: sabine.siems@ptb.de

Erscheinungsweise und Copyright

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und in allen anderen elektronischen Datenträgern.

Printed in Germany ISSN 0030-834X

Die fachlichen Aufsätze aus dieser Ausgabe der PTB-Mitteilungen sind auch online verfügbar unter:
doi: 10.7795/310.20180399



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, das nationale Metrologieinstitut, ist eine wissenschaftlich-technische Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**
Nationales Metrologieinstitut

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit

Telefon: 0531 592-3006
Fax: 0531 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de
www.ptb.de