

Themenschwerpunkt QUEST

(Centre for Quantum Engineering
and Space-Time Research)
at the PTB

Zum Geleit

Aus den jüngsten Fortschritten in der Forschung zur Quantennatur von Licht- und Materiewellenfeldern ist das neue Gebiet des „Quantum Engineering“ entstanden. Quantum Engineering als die „ingenieurmäßige“ Beherrschung neuer Technologien, die auf der Quantenmechanik aufbauen, hat ganz neue Möglichkeiten in der Quantenmetrologie eröffnet. Dazu gehören Tests fundamentaler physikalischer Gesetze mit bisher unerreichter Genauigkeit mit unterschiedlichen raumzeitlichen Messgrößen. Die damit verbundenen neuartigen Quantentechnologien haben zu Atomuhren und Sensoren geführt, die hervorragend geeignet sind für Anwendungen in der weltumspannenden Geodäsie, Inertialsensorik, Navigation oder der lasergestützten Entfernungsmessung.

Schon immer hat sich die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in die Entwicklung der Präzisionsmesstechnik in einer Weise eingebracht, die über den gegenwärtigen Stand der Kunst hinausgeht. Über sehr viele Jahre hat die PTB dazu herausragende Kooperationspartner gefunden, wie die Institute der Fakultäten Mathematik und Physik und Geodäsie der Leibniz Universität Hannover (LUH) oder das Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert Einstein Institut, AEI), die Spitzenforschung im Quantum Engineering und den benachbarten Gebieten betreiben. Gleichzeitig erwies sich die enge Zusammenarbeit mit dem Laserzentrum Hannover (LZH) und dem Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) an der Universität Bremen als außerordentlich fruchtbar. Das Vorhandensein dieser starken Gemeinschaft war die notwendige Voraussetzung, dass QUEST – das Zentrum für Quantum Engineering und Raum-Zeit-Forschung – als Exzellenzzentrum an der Leibniz Universität Hannover eingerichtet werden konnte.

Daher ist es nur folgerichtig, dass QUEST die herausragende Expertise dieser Partner vereinigt, um den gemeinsamen Fundus des Wissens gemeinsam zu nutzen und damit auch die Forschung in der Region Hannover-Braunschweig zu stärken. Die zentrale Idee des Exzellenzclusters besteht darin, die vier Hauptforschungsgebiete Quantum Engineering, Quantensensorik, Raum-Zeit-Technologie und Schlüsseltechnologien zu vernetzen und viel versprechende Forschungsaktivitäten besonders an den Schnittstellen zwischen diesen Gebieten zu etablieren. Dazu soll die zukünftige Zusammenarbeit zwischen PTB, LUH, AEI, LZH und ZARM durch eine Vielzahl von Maßnahmen systematisch gezielt gestärkt werden, beispielsweise indem eine gemeinsame Professur und Forschergruppen auf dem Gelände der PTB eingerichtet werden.

In dieser Veröffentlichung erhält der Leser einen Überblick über die Partner in QUEST und die Forschungsaktivitäten der mit QUEST verbundenen Forschungsgruppen in der PTB.

Wir erhoffen uns vom neuen QUEST-Institut an der PTB, dass es die hohen Erwartungen mit führenden Beiträgen zu Wissenschaft und Technologie im Quantum Engineering und der Raum-Zeit-Forschung erfüllen kann. Dem Leser wünschen wir eine wissenschaftlich genussvolle Lektüre.

Professor Wolfgang Ertmer

Koordinator des Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST)

Professor Ernst O. Göbel

Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)

Fachorgan für Wirtschaft und Wissenschaft

Amts- und Mitteilungsblatt der
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

119. Jahrgang, Heft 2, Juni 2009

Inhalt

Themenschwerpunkt

QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) in der PTB

- *Stefan Pfalz*: Vorstellung des Exzellenzclusters QUEST 99
- *Fritz Riehle*: QUEST in der PTB 107
- *Ekkehard Peik und Andreas Bauch*: Wozu brauchen wir genauere Uhren? 112
- *Ekkehard Peik und Uwe Sterr*: Optische Uhren 123
- *Dirk Piester und Harald Schnatz*: Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken 131
- *Christian Lisdat und Christian Tamm*: Superstabile Laser 144
- *Piet O. Schmidt, Børge Hemmerling, Birgit Brandstätter, Daniel Nigg*: Quantenlogik für die Präzisionsspektroskopie 153
- *Uwe Sterr und Fritz Riehle*: Atominterferometrie 159

Recht und Technik

Prüfungen der staatlich anerkannten Prüfstellen 167

Amtliche Bekanntmachungen

(eigenes Inhaltsverzeichnis) 168

Zum Titelbild:

Der Exzellenzcluster QUEST wird im Rahmen der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern seit November 2007 gefördert. Im Rahmen von QUEST wird gegenwärtig ein neues Institut – das „QUEST-Institut an der PTB“ – eingerichtet, um neuartige Forschung in den Feldern Quantum

Engineering, Spektroskopie, Atomuhren und Übertragung von Zeitinformation zu ermöglichen. Das neue Institut arbeitet eng mit den PTB-Fachbereichen „Zeit und Frequenz“, „Quantenoptik und Längeneinheit“ und „Optische Technologien“ zusammen und wird auch von dort unterstützt.

Impressum

Die **PTB-Mitteilungen** sind metrologisches Fachjournal und amtliches Mitteilungsblatt der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. Als Fachjournal veröffentlichen die PTB-Mitteilungen wissenschaftliche Fachaufsätze zu metrologischen Themen aus den Arbeitsgebieten der PTB. Als amtliches Mitteilungsblatt steht die Zeitschrift in einer langen Tradition, die bis zu den Anfängen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (gegründet 1887) zurückreicht. Die PTB-Mitteilungen veröffentlichen in ihrer Rubrik „Amtliche Bekanntmachungen“ unter anderem die aktuellen Geräte-Prüfungen und -Zulassungen aus den Gebieten des Eich-, Prüfstellen- und Gesundheitswesens, des Strahlenschutzes und der Sicherheitstechnik.

Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74–76,
27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Internet: www.nw-verlag.de
E-Mail: info@nw-verlag.de

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Braunschweig und Berlin
Postanschrift:
Postfach 33 45, 38023 Braunschweig
Lieferanschrift:
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

Redaktion/Layout

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Dr. Dr. Jens Simon (verantwortlich)
Dr. Christian Tamm (wissenschaftliche
Koredaktion Themenschwerpunkt)
Gisela Link
Telefon: (05 31) 592-82 02
Telefax: (05 31) 592-30 08
E-Mail: gisela.link@ptb.de

Leser- und Abonnement-Service

Marina Kornahrens
Telefon: (04 71) 9 45 44-61
Telefax: (04 71) 9 45 44-88
E-Mail: vertrieb@nw-verlag.de

Anzeigenservice

Karin Drewes
Telefon: (04 71) 9 45 44-21
Telefax: (04 71) 9 45 44-77
E-Mail: info@nw-verlag.de

Erscheinungsweise und Bezugspreise

Die PTB-Mitteilungen erscheinen viermal jährlich. Das Jahresabonnement kostet 55,00 Euro, das Einzelheft 16,00 Euro, jeweils zzgl. Versandkosten. Bezug über den Buchhandel oder den Verlag. Abbestellungen müssen spätestens drei Monate vor Ende eines Kalenderjahres schriftlich beim Verlag erfolgen.

© Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2009

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.

Vorstellung des Exzellenzclusters QUEST

Stefan Pfalz¹

1 Der Exzellenzcluster QUEST

Der Exzellenzcluster QUEST (Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research) wird im Rahmen der Exzellenzinitiative von Bund und Ländern seit November 2007 gefördert. An dem Cluster sind sechs Institute der Leibniz Universität Hannover beteiligt sowie folgende externe Partner: Das *Albert-Einstein-Institut* (Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik), das *Laserzentrum Hannover e.V.*, die *Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig* und das *Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation* in Bremen.

Auf der Basis der hervorragenden Expertise aller QUEST-Partner in den Kernbereichen Quanten-Engineering und Raum-Zeit-Forschung setzen sich die QUEST-Forscher* ambitionierte Ziele: Sie möchten maßgeblich zur Beantwortung spannender, fundamentaler Fragestellungen der modernen Physik beitragen, indem sie schwerpunktmäßig neue Untersuchungsmethoden und Technologien mit bisher unerreichter Präzision entwickeln.

Bis heute kann keine abschließende Antwort auf eine Vielzahl grundlegender Fragen der Art „Wie hängt die Quantenmechanik mit der Gravitation zusammen?“ oder „Wie funktionierte der Urknall?“ gegeben werden. Es sind gerade diese Fragen, deren Beantwortung tiefgreifende Erkenntnisse der zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge verspricht. Somit erhoffen sich die Forscher, auf diesem Weg neue Horizonte der wissenschaftlichen Diskussion zu eröffnen und das Verständnis der fundamentalen Physik zu erweitern.

Beispielsweise werden von modernen Theorien zeitabhängige Variationen verschiedener Fundamentalkonstanten sowie Verletzungen des Einstein'schen Äquivalenzprinzips vorhergesagt. Bisher konnten diese Phänomene aufgrund unzulänglicher Präzision der Messmethoden nicht zweifelsfrei experimentell bestätigt (oder widerlegt) werden. Die QUEST-Forscher

arbeiten daher an neuartigen Konzepten wie transportablen und hochstabilen optischen Uhren mit hinreichender Genauigkeit, um die vorhergesagten Variationen messen zu können. Anhand der Messergebnisse können die zugrundeliegenden Theorien bestätigt oder verbessert werden, sodass neue Vorhersagen getroffen und Erkenntnisse gewonnen werden können.

QUEST legt besonderen Wert darauf, diesen Kreislauf tatkräftig zu unterstützen und die Technologieentwicklung mit der Forschung an modernen Theorien eng zu verzahnen. Die grundlegende Vorgehensweise des Clusters besteht darin, Synergieeffekte zwischen den Bereichen Quanten-Engineering und Raum-Zeit-Forschung zu fördern und zu nutzen, um gemeinsame Forschungsprojekte mit hohem Erfolgspotential zu realisieren.

2 Quanten-Engineering: Die gezielte Nutzung der Quantenstruktur von Licht und Materie

Die speziellen Eigenschaften des Laserlichts bilden die Basis einer Vielzahl moderner experimenteller Methoden. Beispielsweise erlaubt der Einsatz von Lasern die gezielte Manipulation innerer Freiheitsgrade atomarer und molekularer Systeme und ermöglicht Messungen auf der Quantenebene. Des Weiteren werden Laserinterferometer verstärkt in der Hochpräzisions-Messtechnologie verwendet, unter anderem auch zur Bestimmung extrem kleiner Längenänderungen (Gravitationswellendetektor).

Aufgrund der Welle-Teilchen-Dualität verhalten sich Atome und Moleküle unter bestimmten Bedingungen wie Wellenpakete, sogenannte Materiewellen. Daher liegt der Schluss nahe, dass die Konzepte der Laseroptik gewinnbringend auf die Materiewellenphysik übertragen werden können. In der Tat wurde die Interferometrie von Materiewellen bereits eindrucksvoll demonstriert. Materiewellen-Interferometer

* In diesem und den folgenden Artikeln werden Tätigkeits- und Funktionsbezeichnungen wie z. B. „Forscher“ und „Mitarbeiter“ geschlechtsneutral verwendet und gelten gleichermaßen für Frauen und Männer. (die Red.)

¹ Dr. Stefan Pfalz, Geschäftsführer, Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research, Leibniz Universität Hannover
E-Mail: stefan.pfalz@quest.uni-hannover.de

gelten seither als vielversprechende Systeme für die nächste Generation von Quantensensoren. Diese Forschungserfolge verdeutlichen das hohe Potential der Nutzung quantenmechanischer Eigenschaften in der Sensortechnologie. Daher planen die Forscher sogar, in Zukunft Atomlaser zu entwickeln und einzusetzen, die Materiewellen mit laserartigen Eigenschaften emittieren. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass das „Quanten-Engineering“ von Materiewellen – maßgeblich vorangetrieben durch die Entwicklung der Laserkühlung und der Fallentechnologie – eine treibende Kraft für neue Erkenntnisse in der Atomphysik und Quantenoptik darstellt. Die Möglichkeit, innere Freiheitsgrade von Atomen und zukünftig auch Molekülen bis hin zum Quantenlimit kontrollieren zu können, ist faszinierend und vielversprechend zugleich.

Wegweisende Fortschritte konnten in jüngster Zeit aber auch durch das Quanten-Engineering von Photonen erzielt werden. Der Einsatz von speziell präparierten Lichtfeldern (u. a. von gequetschtem Licht) in Gravitationswellendetektoren trägt entscheidend dazu bei, Längenänderungen in einem Verhältnis von 10^{-22} messen zu können. Diese Sensitivität ist notwendig, um die vorhergesagten Auswirkungen von Gravitationswellen zu beobachten.

Zusammengefasst bietet das Quanten-Engineering von Materie und Licht gemeinsam mit den Fortschritten der Raum-Zeit-Forschung die Chance, fundamentale physikalische Fragen zu beantworten und den Weg für zukünftige Forschungsvorhaben wie die Gravitationswellenastronomie oder neuartige Quantentechnologien zu ebnet.

3 Raum-Zeit-Forschung: Vom Urknall zu Einstein

Eine der größten Herausforderungen der modernen Physik besteht in der Vereinheitlichung zweier fundamentaler Theorien: Der Quantentheorie und der Gravitation. Beide Theorien sind in sich gut verstanden und anhand zahlreicher Experimente umfassend bestätigt. Die Zusammenführung der Theorien ist bisher allerdings nicht gelungen und stellt die Experten vor eine Vielzahl ungelöster Fragen.

Im Laufe der letzten dreißig Jahre haben Theoretiker eine Fülle von Konzepten entwickelt, die die Intuition mitunter stark strapazieren. Dazu gehören unter anderem die Stringtheorie mit zusätzlichen Raumdimensionen, die *loop quantum gravity*-Theorie und das Konzept der nicht-kommutativen Geometrie. Obwohl der endgültige Durchbruch bei der Entwicklung einer umfassenden Quantengravitationstheorie bisher nicht gelungen ist, sagen die meisten Theorien neuartige und spannende Raum-Zeit-Phänomene voraus. Neben der bereits erwähnten

Verletzung des Äquivalenzprinzips und der zeitabhängigen Variation der Fundamentalkonstanten werden auch Fluktuationen der Raum-Zeit-Geometrie, anomale Dispersionsrelationen, modifizierte Gravitation sowie ein Gravitationswellenhintergrund vorhergesagt.

Aufgrund der zahlreichen ungelösten Probleme aus verschiedenen Forschungsfeldern umfasst die QUEST-Forschung ein breites Themengebiet: Angefangen bei der reinen Quantengravitationstheorie über die Phänomenologie bis hin zu experimentellen Tests und geodätischen Anwendungen arbeiten QUEST-Wissenschaftler interdisziplinär an der Beantwortung der Fragen. Die charakteristische Stärke des Clusters liegt dabei in der bewusst installierten, synergetisch angelegten Verzahnung von Expertisen im Bereich der Raum-Zeit-Messverfahren. Neuartige Quantensensoren und hochpräzise Uhren werden zeitabhängige Veränderungen der Fundamentalkonstanten detektieren und gleichzeitig geodätische Messungen im Sub-Millimeter-Bereich stark vorantreiben, so dass die Erdmessung revolutioniert und Einsteins Gravitationstheorie überprüft werden kann. Darüber hinaus entwickeln und verwenden QUEST-Forscher geeignete Messtechnologien wie zum Beispiel LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*, ESA/NASA-Mission zur Installation eines Gravitationswellenobservatoriums im Weltraum) oder erweiterte erdbasierte Gravitationswellendetektoren, um die Vorhersagen der Quantenkosmologie mittels Gravitationswellen zu testen. Gleichzeitig wird damit die Forschung an Hochenergie-Beschleunigern komplementär ergänzt, so dass QUEST einen entscheidenden Beitrag vor allem im internationalen Kontext liefert.

4 QUEST: Gemeinsam sind wir stark

QUEST verbindet Quanten-Engineering und Raum-Zeit-Forschung so, dass sie sich gegenseitig stark bereichern. Die gemeinsame Expertise in QUEST ermöglicht es dem Cluster, alle bereits beschriebenen zentralen Fragestellungen mit hoher Erfolgsaussicht zu bearbeiten. Die Bereiche Quanten-Engineering und Raum-Zeit-Forschung bilden allerdings nicht allein das Rückgrat des Clusters, sondern arbeiten eng zusammen mit zwei weiteren zentralen Bereichen: „Quantensensoren“ und „Neuartige Technologien“.

Der Bereich „Quanten-Sensoren“ widmet sich hauptsächlich dem Einsatz der Laser- und Materiewellen-Interferometrie beispielsweise in Gravitationswellendetektoren oder zur hochpräzisen Messung langer Strecken. Des Weiteren stehen die Entwicklung von Inertialsensoren mit erheblich gesteigerter Genauigkeit, optischer Uhren sowie neuartiger, fundamentaler Sensor-konzepte basierend auf atomaren, molekularen und mesoskopischen Systemen im Vordergrund.

Besonderes Augenmerk wird dabei auf Transfer der grundlegenden Ergebnisse aus dem Bereich Quanten-Engineering in die konkrete Entwicklung neuartiger Technologien gelegt. Diese Technologien sind von grundsätzlicher Bedeutung für die Erforschung der Raum-Zeit-Phänomene und der exakten Beobachtung des Systems Erde. Die QUEST-Forscher erwarten sich von den neuen Sensorkonzepten eine signifikant verbesserte Leistungsfähigkeit und Genauigkeit. Dadurch werden neue Maßstäbe gesetzt im Bereich metrologischer Anwendungen zur absoluten Messung von physikalischen Effekten, die Raum und Zeit verformen. Letztlich ermöglicht der gezielte Einsatz von Methoden des Quanten-Engineering im Sensordesign die Untersuchung der grundlegenden Natur der Quantenmechanik mit bisher unerreichter Präzision.

Zur Realisierung der im Bereich „Quantensensoren“ entwickelten Konzepte werden robuste und stabile Technologien benötigt, die sehr speziellen Anforderungen genügen müssen und daher eine große Herausforderung an die Technologieentwicklung stellen. Genau diese Bauelemente werden im Bereich „Neuartige Technologien“ des Clusters entwickelt. Dazu zählen vor allem photonische Systeme wie neuartige Laserquellen, ultra-stabile und rauscharme optische Resonatoren sowie Frequenzkammgeneratoren. Zweifelsohne zählen die Entwicklung dieser Technologien, die Bereitstellung neuer Materialien sowie die Fertigung zuverlässiger Apparaturen beispielsweise für den Einsatz im Weltraum und auch in erdgebundenen Messvorhaben zu den spannendsten Feldern der angewandten Natur- und Ingenieurwissenschaften. Der Bereich „Neuartige Technologien“ bietet daher eine ideale Schnittstelle und Transferplattform zu der kommerziellen Entwicklung von Sensoren - ein Ziel, welches QUEST mit Nachdruck verfolgt. Insgesamt ist die Bereitstellung der notwendigen technologischen Innovationen ein zentraler Aspekt der QUEST-Forschung und hat weitreichende Auswirkung für alle Bereiche des Clusters.

Neben den vier zentralen Forschungsbereichen hat QUEST sieben „Task Groups“ gegründet. Die Task Groups sind bewusst als Querstrukturen zu den Forschungsbereichen angelegt und reagieren flexibel auf die Herausforderungen, die im Rahmen der Forschung in diesen Bereichen identifiziert werden. Die Aufgabe der Task Groups besteht darin, spezifische Forschungsvorhaben mit zentraler Bedeutung für QUEST durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Gruppen aus den verschiedenen Forschungsbereichen zu koordinieren und durchzuführen. Insgesamt stellen die Task Groups somit fachübergreifende „Werkbänke“ dar und bieten die Möglichkeit zur Realisierung der zukunftsorientierten Forschungsziele des Clusters.

5 QUEST: Spitzenbedingungen für Spitzenforschung

Die QUEST-Aktivitäten basieren auf einer international wettbewerbsfähigen Forschungsstruktur in Hannover, Braunschweig und Bremen. QUEST hat es sich zum Ziel gesetzt, diese Struktur in den Kernbereichen des Clusters weiter auszubauen. Neben finanzieller Unterstützung für notwendige Anschaffungen wie Großgeräte oder experimentelle Aufbauten investiert QUEST gezielt in Köpfe: Durch attraktive Programme und Angebote rekrutiert der Cluster Spitzenforscher in allen Ausbildungsstadien, um die Lehre und Forschung an den Standorten zu stärken. In diesem Zusammenhang wurden acht neue W2- und W3-Professuren eingerichtet, die speziell an den Schnittstellen zwischen den vier Forschungsbereichen angesiedelt sind. Nachwuchskräfte werden gezielt rekrutiert und gefördert durch die Installation von acht Nachwuchsgruppen sowie mehr als acht Forschungsgruppen mit attraktiver personeller und sachmittelbezogener Ausstattung. Darüber hinaus fördert QUEST die exzellente Ausbildung von Doktorandinnen und Doktoranden durch ein maßgeschneidertes, koordiniertes Stipendienprogramm.

6 Die QUEST-Partner

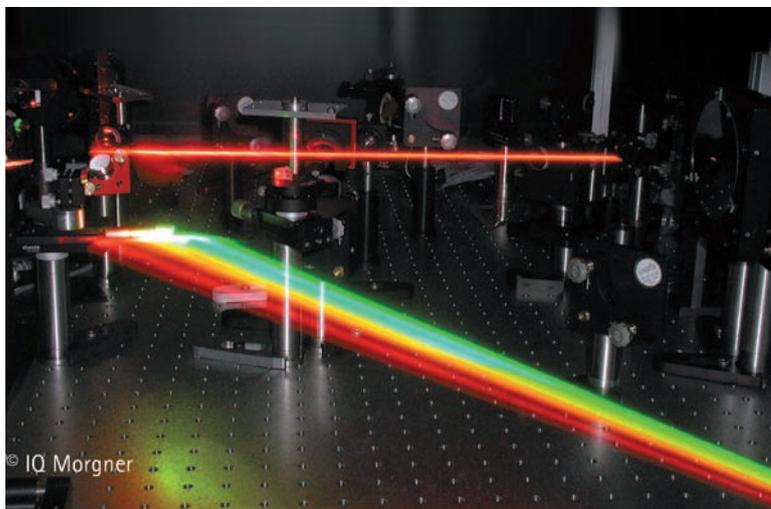
Eine der Stärken von QUEST ist die Einbindung sowohl universitärer als auch außeruniversitärer Einrichtungen in den Cluster. Neben sechs Instituten der Leibniz Universität Hannover (LUH) sind vier weitere Einrichtungen in Hannover, Braunschweig und Bremen beteiligt. Im Folgenden werden die Partner einzeln vorgestellt, beginnend mit den Instituten der LUH.

Institut für Quantenoptik (IQ):

Das IQ ist ein international anerkannter Leuchtturm in den Bereichen Materiewelleninterferometrie, Bose-Einstein-Kondensation, Quantenoptik und Ultrakurzzeit-Laserphysik. Folglich ist ein Großteil der Wissenschaftler am IQ an QUEST-Projekten beteiligt, hauptsächlich in den Forschungsbereichen Quanten-Engineering, Quanten-Sensoren und Neuartige Technologien. Beispielsweise werden die zur Zeit laufenden Experimente mit Bose-Fermi-Gasen erweitert, um Systemkorrelationen und ultrakalte Moleküle im Detail zu studieren. Weiterhin bringt das IQ die notwendige Expertise zu atomaren und molekularen Systemen in periodischen Potentialen ein, die eine entscheidende Bedeutung für die Entwicklung hochpräziser Quantensensoren hat – einer Kernaufgabe des Clusters. Die Ultrakurzzeit-Lasergruppe am IQ spielt eine entscheidende Rolle in allen Projekten zum Quanten-Engineering von ultrakurzen Pulsen,

Bild 1:

QUEST-Experten verstehen es meisterhaft, mit Licht zu arbeiten. Die Kontrolle, Manipulation und Formung von Laserpulsen bildet die Grundlage der Forschung in QUEST. Das Bild zeigt Licht in allen Spektralfarben, erzeugt von einem ultrakurzen Laserpuls nach dem Durchlauf einer photonischen Kristallfaser. (Foto: Uwe Morgner, IQ)



z.B. bei der Entwicklung von leistungsstarken Quellen für XUV-Harmonische. Darüber hinaus entwickelt diese Gruppe in enger Zusammenarbeit mit dem Laserzentrum Hannover e.V. und dem Albert-Einstein-Institut neuartige Lichtquellen und optische Technologien.

Institut für Gravitationsphysik (IGP):

Das IGP arbeitet eng mit dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) im Zentrum für Experimentelle Gravitationsphysik an der LUH zusammen. Das zentrale wissenschaftliche Ziel des Instituts besteht darin, die Gravitationswellenastronomie in erdgebundenen Systemen sowie im Weltall als Observationsmethode zu realisieren und zu etablieren. Das IGP ist führend an der LISA-Raumfahrtmission für Beobachtungen im Niederfrequenzbereich und an der Vorgängermission LISA-Pathfinder beteiligt.

Darüber hinaus betreibt das IGP den deutsch-britischen Gravitationswellendetektor GEO600. Dieses Laser-Interferometer in der Michelson-Konfiguration besitzt eine Armlänge von 600 m und befindet sich in der Umgebung von Ruthe nahe Hannover.

Bild 2:

Gravitationswellendetektor GEO600 in Ruthe nahe Sarstedt. Die beiden Arme sind in der Michelson-Konfiguration rechtwinklig zueinander angeordnet. (Foto: IGP)



Die Forschungsgebiete des IGP umfassen Fragestellungen der Quantenphysik (nicht-klassische Interferometrie, gequetschtes Licht, negative Dispersion ohne Absorption, Heisenberg-limit und Quantenrauschen), die Entwicklung von Kontrollsystemen (hochstabile Lasersysteme, aktive Schwingungsdämpfung und adaptive Optiken) sowie Themen der Gravitationsphysik (Weiterentwicklung des Gravitationswellendetektors, Analyse der Detektor-Sensitivität und Datenanalyse). Alle diese Aktivitäten spielen eine wichtige Rolle für viele QUEST-Projekte, vor allem für die Entwicklung der nächsten Generation von Gravitationswellen-Observatorien.

Institut für Theoretische Physik (ITP):

Das ITP kann eine langjährige Erfahrung in der Physik kondensierter Materie, der Quantenoptik und der mathematischen Physik (besonders in den Bereichen Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie) vorweisen.

Eine der Arbeitsgruppen am ITP hat sich auf die String-Theorie und die Quantisierung von Eich- und Gravitationstheorien spezialisiert. Diese Gruppe bringt ihre Kompetenz in der Theorie der Allgemeinen Relativität unter Verwendung spezialisierter mathematischer Formalismen in zahlreiche QUEST-Projekte ein, insbesondere bei der Untersuchung der Variation der Fundamentalkonstanten, phänomenologischer Signaturen und der String-Kosmologie. Eine weitere Gruppe des ITP bearbeitet die Themengebiete der ultrakalten atomaren Gase, der Atomoptik sowie der kalten Atome in optischen Gittern. Damit trägt diese Gruppe maßgeblich zum Erfolg nahezu aller QUEST-Vorhaben aus den Bereichen Quanten-Engineering und Quantensensoren bei. Beispielsweise basiert die Forschung an gekoppelten Quantensystemen oder die Entwicklung neuartiger Atominterferometer auf fortgeschrittenen theoretischen Modellen und Berechnungen, die vom ITP bereitgestellt werden.

Institut für Angewandte Mathematik (IfAM):

Die Forschungsprojekte am IfAM konzentrieren sich auf Fragestellungen der angewandten Natur- und Ingenieurwissenschaft. Die Gruppen am IfAM beschäftigen sich im speziellen mit der mathematische Modellierung, der numerischen Analyse sowie der Simulation und Optimierung natürlicher und technischer Prozesse. In den meisten Fällen werden diese Prozesse durch nichtlineare Differential- und Randintegralgleichungen beschrieben. Der Anwendungsbezug z.B. auf Probleme elastischer und plastischer Verformungen, Strömungen in porösen Medien, Wellenausbreitungsvorgänge, elektromagnetische Feldberechnungen und Betriebsoptimie-

rung in Wasser- und Gasnetzen spielt bei der Forschungsarbeit des IfAM eine herausragende Rolle.

Die Arbeitsgruppe „Numerische Analysis“ arbeitet eng mit dem ITP und der Datenanalyseguppe in QUEST zusammen, um effiziente Lösungen von Systemen partieller Differentialgleichungen sowie Integralgleichungen zu finden, insbesondere auf dem Gebiet der Schwerefeldbestimmung.

Institut für Erdmessung (IfE):

Die Forscher am IfE besitzen eine herausragende Expertise in den Bereichen der terrestrischen Gravimetrie sowie der regionalen Geoidbestimmung und der entsprechenden Kombination mit gravimetrischen Satellitendaten, wobei die enge Zusammenarbeit zwischen Theorie und Anwendung von zentraler Bedeutung ist. Das IfE ist eines der weltweit vier existierenden Zentren für *Lunar Laser Ranging* in der Vereinigung ILRS (*International Laser Ranging Service*), welches besonderes Augenmerk auf relativistische Effekte im Erde-Mond-System legt. In diesem Zusammenhang besteht eine Kooperation mit dem Geodätischen Observatorium Wettzell, welches nahezu alle geodätischen Technologien für Welt-raummessungen betreibt und damit maßgeblich zur Bestimmung des globalen Referenzrahmens und der Variationen der Erdbewegung beiträgt. Darüber hinaus werden zugehörige dynamische Prozesse im Erdsystem beobachtet, basierend auf Daten kürzlich durchgeführter Gravitationsfeld-Satellitenmissionen.

In Zusammenarbeit mit den QUEST-Arbeitsgruppen untersucht das IfE relativistische Effekte wie zeitabhängige Variationen der Gravi-

tationskonstante G mit Hilfe der Daten aus *Lunar Laser Ranging*-Messungen. Gleichzeitig werden vom IfE und den QUEST-Partnern Technologien für den zukünftigen Einsatz in geodätischen Hochpräzisionsmessungen auf der Erde sowie im Weltall entwickelt und getestet.

Institut für Festkörperphysik (IFKP):

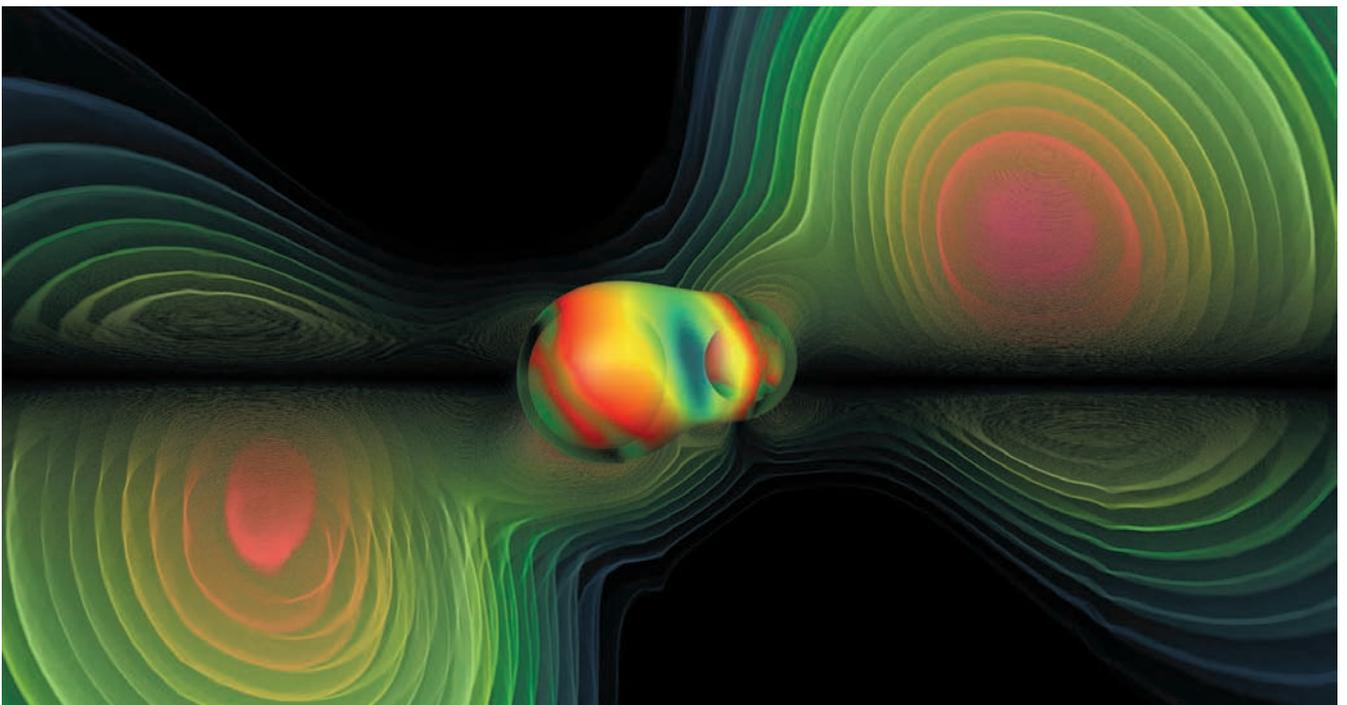
Die Abteilung Nanostrukturen am IFKP ist langjährig und erfolgreich tätig im Bereich niedrigdimensionaler Halbleitersysteme und beschäftigt sich dabei hauptsächlich mit physikalischen Effekten in Quantentrögen und Quantenpunkten. Am IFKP werden sowohl Transportphänomene als auch optische Eigenschaften studiert, wobei gekoppelte Systemen und Spinphänomene im Vordergrund stehen. Insgesamt bilden Anregung, Manipulation und Detektion von definierten Quantenzuständen dabei die Hauptaktivitäten der Abteilung Nanostrukturen.

Auf dieser Basis erweitert das IFKP seine Tätigkeit im Rahmen von QUEST in Richtung zusammengesetzter Quantensysteme, wobei vor allem die Kopplung von Festkörperphysik und kalten Atomgasen im Vordergrund steht. In diesem Zusammenhang entwickelt das IFKP integrierte Quantensysteme bestehend aus Halbleiterbauteilen und atomaren Gasen.

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut, AEI):

Die Forschung am AEI ist fokussiert auf die Ergründung der Einsteinschen Relativitätstheorie. Dazu gehören auch die Erweiterungen und Anwendungen der Relativitätstheorie in der mathematischen Physik, der Quantengravitation, der astrophysikalischen Relativität, der Gravi-

Bild 3:
Simulation der Struktur von Gravitationswellen, die infolge einer Kollision zweier schwarzer Löcher emittiert werden. Berechnungen wie diese untermauern die experimentelle Forschung in QUEST, die sich der Entwicklung hochpräziser Technologie zur Detektion von Gravitationswellen widmet. (Bild: Werner Bengert)



tationswellenastronomie, der Datenanalyse und der Kosmologie. Das Institut ist sowohl mit den theoretischen Gruppen in Potsdam angesiedelt als auch mit den experimentellen Gruppen in Hannover. Das AEI ist weltweit das größte Institut, welches sich ausschließlich dem gesamten Spektrum der Gravitationsphysik widmet.

Neben den beiden experimentellen AEI-Gruppen in Hannover beteiligen sich auch die drei Theoriegruppen in Potsdam – Geometrische Analyse der Gravitation, Astrophysikalische Relativität und Quantengravitation – maßgeblich an der QUEST-Forschung, vornehmlich in den Bereichen Gravitation und Raum-Zeit-Theorie. Eine der Hauptaufgaben des AEI ist der Betrieb und die Weiterentwicklung des Gravitationswellendetektors GEO600 in Ruthe.

Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH):

Das LZH ist ein gemeinnütziges Institut in Hannover, das Forschung, Entwicklung und Beratung im Bereich der Lasertechnik durchführt. Das LZH verfügt über eine 20-jährige Erfahrung im Bereich moderner Lasersysteme, der Materialbearbeitung sowie geodätischer Anwendungen von Lasersystemen. Das LZH hat 270 Mitarbei-

ter und ist damit das größte Laserforschungsinstitut in Deutschland. Neben der engen Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover ist das LZH auch an internationalen Kooperationen im Bereich der Lasertechnik sowie an verschiedenen nationalen und europäischen F&E-Programmen beteiligt, insbesondere an Projekten der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

In diesem Zusammenhang führt das LZH auch industrieorientierte Projekte für kleine, mittelständische und große Unternehmen aus einem breiten Spektrum der Industrielandschaft durch. Die gezielte Entwicklung von anwenderspezifischen Lösungen und der Technologietransfer bilden ein wichtiges Standbein des LZH, so dass Forschungsergebnisse zielgerichtet in industrielle Produkte überführt werden können.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB):

Die PTB in Braunschweig ist das nationale Metrologieinstitut der Bundesrepublik Deutschland. Die PTB bietet wissenschaftliche und technische Dienste an und ist dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unterstellt. Gegründet wurde das Institut im Jahr 1887 als Physikalisch-Technische Reichsanstalt. Heutzutage verfügt die PTB über eine Gesamtbelegschaft von 1350 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an den beiden Standorten Braunschweig und Berlin.

Die PTB führt Grundlagenforschung und Entwicklung im Bereich der Metrologie durch, um die ihr durch mehr als 60 Gesetze und Regelungen aufgetragenen Aufgaben erfüllen zu können. Zu diesen Aufgaben gehören die Bestimmung von Naturkonstanten, die Realisierung, Überwachung und Verbreitung der Einheitenstandards gemäß dem internationalen Einheitensystem, Sicherheitstechnik, Metrologie-Dienstleistungen für gesetzlich geregelte Bereiche und für die Industrie sowie der Technologietransfer. Die PTB ist insbesondere für die Expertise im Bereich der Atomuhren und die Beiträge zur Zeit- und Frequenzmetrologie weltweit bekannt. Die PTB bietet zahlreiche Kalibrationsdienste für Messaufgaben an, die Firmen und andere Institutionen nicht mit der erforderlichen Präzision durchführen können.

Die PTB engagiert sich nachhaltig an vorderster Front der Forschung und Entwicklung im Bereich Metrologie. Ein prominentes Beispiel sind die Aktivitäten zur Neudefinition verschiedener physikalischer Basiseinheiten. Die Fortschritte, die bereits für das Meter durch die Rückführung auf die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum erreicht wurden, stehen für andere Basiseinheiten noch aus.

Bild 4:
Höchste Präzision für die Kontrolle von Licht. Am LZH werden optische Komponenten und Beschichtungen beispielsweise in der hier gezeigten Beschichtungsanlage entwickelt und in QUEST-Technologien eingesetzt.
(Foto: LZH)



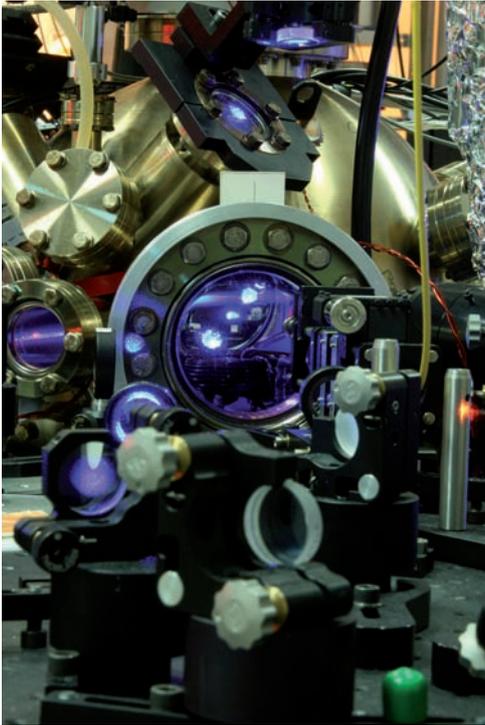


Bild 5:

Das Herzstück einer optischen Uhr, wie sie an der PTB entwickelt wird. Eine durch Laserlicht angeregte und gekühlte Wolke von Strontium-Atomen ist hier gefangen in einer Magnetfalle. Die Möglichkeit der präzisen Kontrolle und Manipulation von ultrakalten Atomen öffnet neue Forschungsfelder im Rahmen des Quanten-Engineering. (Foto: Chr. Lisdat, PTB)

Die PTB arbeitet sehr eng mit QUEST zusammen, um neue Forschungsfelder zu begründen und zu intensivieren, die bisher weder an der PTB noch der LUH mit der hinreichenden Tiefe bearbeitet werden konnten.

Zentrum für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM):

Das ZARM ist ein wissenschaftliches Institut im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen. Sein zentrales Großlabor ist der 146 m hohe Fallturm, in dem für erdgebundene Experimente eine ca. fünf Sekunden andauernde Schwerelosigkeit höchster Qualität erreicht werden kann. Ein zentrales Interessengebiet und Tätigkeitsfeld des ZARM ist die Grundlagenphysik: Die ZARM-Forscher führen hochpräzise Gravitationsexperimente durch, entwickeln Technologien für die Weltraumforschung und engagieren sich in der Planung sowie Durchführung von Experimenten im Weltraum, beispielsweise zur relativistischen Gravitation.

Die Forschungsaktivitäten des ZARM sind sehr stark in einem internationalen Kooperationsnetzwerk eingebunden. Diese Aktivitäten umfassen die Konstruktion von Kleinsatelliten, hochgenaue Lageregelung von wissenschaft-

lichen Satelliten, die Entwicklung von Navigationssystemen bis hin zu fundamentalphysikalischen Experimenten wie dem Test des Äquivalenzprinzips.

Das ZARM ist einer der Partner der französischen Mission MICROSCOPE (*Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence*), die einen Test des Äquivalenzprinzips im Weltraum durchführt. Darüber hinaus beteiligt sich das ZARM an der LISA- und der LISA Pathfinder-Mission der ESA/NASA. Das ZARM hat kürzlich in enger Zusammenarbeit mit anderen Instituten in der Bundesrepublik ein neues Forschungsfeld zur Entwicklung von Inertialsystemen basierend auf der Atominterferometrie und der Bose-Einstein-Kondensation begründet.



Bild 6:

Der Fallturm am ZARM in Bremen mit einer Höhe von 146 m. Hier kann für bis zu fünf Sekunden eine experimentelle Umgebung unter Bedingungen des freien Falls erzeugt werden. (Foto: ZARM)

QUEST in der PTB

Fritz Riehle¹

1 Historische Entwicklung und Aussichten

Seit vielen Dekaden gehört die PTB zu den führenden nationalen Metrologieinstituten in der Welt mit vielen gesetzlichen Aufgaben. Unter anderem wurde ihr die Verantwortung für die Bereitstellung und Verteilung der gesetzlichen Zeit in Deutschland durch das Einheiten- und Zeitgesetz übertragen [1]. Die PTB kann ihre diesbezüglichen Verpflichtungen nur dann in bestmöglicher Weise erfüllen, wenn sie sich dauerhaft in der angewandten und grundlegenden Forschung beispielsweise in den Gebieten Uhren der Zukunft, neuartige Methoden der Zeit- und Frequenzverteilung und verwandte Technologien engagiert. Ein solcher Fall für neue Herausforderungen ist das zukünftige Satellitennavigationssystem Galileo, das zum weitreichenden Nutzen der deutschen und europäischen Volkswirtschaft und Industrie wissenschaftlich unterstützt und weiterentwickelt werden muss.

Mit ihrem Vertrag vom 15. Juli 2005 haben die deutschen Bundes- und Länderministerien eine „Exzellenzinitiative“ begründet, um die Wissenschaft in Deutschland auf eine nachhaltige Weise durch Förderung der Spitzenforschung in Universitäten und wissenschaftlichen Einrichtungen zu unterstützen. Aufbauend auf einer nachgewiesenen herausragenden wissenschaftlichen Kompetenz auf internationalem Niveau unterstützt dieses Programm substantiell den Erhalt und die Erweiterung von Exzellenz an Universitäten und deren Kooperation mit externen Forschungsinstituten wie der PTB.

Obwohl die Forschung an der PTB zur sogenannten Ressortforschung [2] gehört, arbeitet die PTB seit vielen Jahren eng in einer fruchtbaren strategischen Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover zusammen. Die Forschungsergebnisse, die beispielsweise im Sonderforschungsbereich 407, „Quantenlimitierte Messprozesse mit Atomen, Molekülen und Photonen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) erzielt wurden, haben mit zu einer ingenieurmäßigen Beherrschung der Quantenphysik beigetragen. In Zukunft können diese neuartigen



Bild 1:
Das QUEST-Institut an der PTB ist im Max-von-Laue-Bau auf dem Campus der PTB in Braunschweig untergebracht.

Technologien des „Quantum Engineering“ vielfältig genutzt werden: Dazu gehört unter anderem die Beantwortung drängender Fragen der modernen Physik durch den Test fundamentaler physikalischer Gesetze. Dazu gehören auch die Bestimmung von räumlichen und zeitlichen Messgrößen mit bisher unerreichter Genauigkeit sowie die Entwicklung von Quantensensoren für die Navigation und die weltraum- und bodengestützte Ermittlung und Überwachung wichtiger Messgrößen der Erde.

Die erzielten Ergebnisse in Zusammenhang mit zukunftsgerichteten Vorschlägen für die Forschungsorientierung und strukturelle Entwicklung der Leibniz Universität [3] führten letztendlich zur Einrichtung des Exzellenzclusters „Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research“ (QUEST) an der Leibniz

¹ Dr. Fritz Riehle, Abteilung „Optik“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
E-Mail: fritz.riehle@ptb.de



Bild 2:
Die Leiter der drei neu gegründeten Forschergruppen von QUEST an der PTB. Von links: Prof. Piet O. Schmidt (Institut für Experimentelle Quantenmetrologie), Dr. Tanja E. Mehlstäubler (Nachwuchsforschergruppe zu Quantensensoren mit kalten Atomen und Ionen) und Dr. Thomas Kessler (Forschungsprojekt zu Sub-Hertz-Lasern und neuartigen optischen Resonatoren).

Universität Hannover gemeinsam mit den Partnern, die bereits im vorherigen Beitrag vorgestellt wurden.

2 Das QUEST-Institut an der PTB

Im Rahmen des Exzellenzclusters QUEST wird ein neues Institut – das „QUEST-Institut an der PTB“ – eingerichtet, um neuartige Forschung in den Feldern Quantum Engineering, Spektroskopie, Atomuhren und Zeitverteilung zu ermöglichen. Das neue Institut wird gemeinsam unterstützt durch die Leibniz Universität im Rahmen von QUEST und durch die PTB unter dem Schirm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und es kann daher auf die Ressourcen beider Institutionen zurückgreifen. Das neue Institut arbeitet eng mit den PTB-Fachbereichen „Zeit und Frequenz“, „Quantenoptik und Längeneinheit“ und „Optische Technologien“ zusammen und wird auch von dort unterstützt. Wissenschaftler in diesen Fachbereichen tragen zu QUEST als „Principal Investigators“ in den jeweiligen Bereichen bei. Das neue Institut wurde im Max-von-Laue-Bau auf dem Campus der PTB Braunschweig eingerichtet (Bild 1).

Im Rahmen von QUEST wurden neue Forschergruppen geschaffen, die in der PTB angesiedelt und durch die DFG für die Dauer von QUEST gefördert werden (Bild 2). Sie bestehen aus einer Professur für „Experimentelle Quantenmetrologie“, die den Kern des neuen Instituts bildet, einer Nachwuchsforschergruppe zu „Quantensensoren mit kalten Atomen und Ionen“ und einem Forschungsprojekt „Sub-Hertz-Laser und neuartige optische Resonatoren“. Nach der Förderperiode wird die Professur durch PTB und BMWi verstetigt. Die geplanten Hauptforschungsstränge in den drei Gruppen sollen im Folgenden näher dargestellt werden.

2.1 QUEST-Professur „Experimentelle Quantenmetrologie“

Die Arbeit dieser Gruppe wird sich vorzugsweise auf neuartige Technologien für die Präzisionsspektroskopie konzentrieren, deren Potential für neue Anwendungen bei weitem noch nicht ausgenutzt ist, beispielsweise für eine weitere Steigerung der Genauigkeit von Mikrowellen- und optischen Uhren. Zwei dieser neuartigen Technologien sind die direkte Spektroskopie mit Frequenzkämmen und Spektroskopie mit den Methoden der Quantenlogik. Die direkte Frequenzkammspektroskopie nutzt die Spektrallinien, die in exakt gleichem Frequenzabstand in einem optischen Femtosekundenlaser erzeugt werden, direkt für spektroskopische Untersuchung von atomaren oder molekularen Systemen.

Die Methoden der Quantenlogik, die ursprünglich für zukünftige Quantenrechner mit gespeicherten Ionen entwickelt wurden, werden nun für die Spektroskopie von Ionen eingesetzt. Mit Hilfe dieser Methoden kann ein sogenanntes Logik-Ion mit experimentell bequemen Eigenschaften genutzt werden, um ein anderes Ion mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften zu manipulieren, zu kontrollieren und abzufragen. Ein besonderer Vorteil dieser Technologie ergibt sich dabei dadurch, dass das zu untersuchende Ion keine optischen Übergänge besitzen muss, die für die Laserkühlung und den Nachweis der Anregung geeignet sind. Im Ergebnis können und sollen nun ganz neue Klassen von Atomen und Molekülen untersucht werden, die bisher spektroskopisch gar nicht oder nur schwer zugänglich waren [4].

Die Quantenlogikspektroskopie wird ebenfalls ausgenutzt werden um eine optische Atomuhr auf der Basis eines extrem schmalen Übergangs in einem einzelnen Aluminiumion zu entwickeln mit der Aussicht, damit die weltbeste Atomuhr zu schaffen. Dazu wird es notwendig sein, die Technologien für superstabile Laser aufzunehmen, die bereits in der PTB entwickelt wurden [5] und ihre Weiterentwicklung im neuen QUEST-Forschungsprojekt so weiter zu betreiben, wie es weiter unten beschrieben wird.

2.2 Nachwuchsforschergruppe „Quantensensoren mit kalten Atomen und Ionen“

Diese Forschergruppe wird sich im Wesentlichen der Entwicklung von optischen Atomuhren mit vielen Ionen und von atominterferometrischen Sensoren annehmen.

Die Frequenzstabilität der besten optischen Uhren mit einzelnen Ionen ist gegenwärtig durch das sogenannte Quantenprojektionsrauschen bei der Abfrage des Uhrenübergangs und die beobachtete Linienbreite des Übergangs

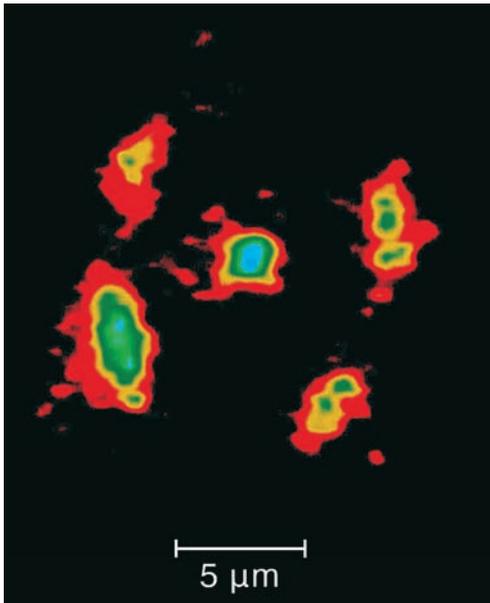


Bild 3:
Fluoreszenz von fünf lasergekühlten Yb⁺-Ionen in einer Hochfrequenzfalle (blau: hohe Intensität; grün und rot graduell niedrigere Intensität). Optische Atomuhren mit mehr als einem Ion benötigen neue Technologien, um alle Ionen im feldfreien Gebiet der Ionenfalle zu halten, wo ihre Übergangsfrequenz nicht durch Störungen verschoben wird.

begrenzt, die typischerweise bei etwa 10 Hz liegt. Die Linienbreitenbegrenzung ist entweder durch die natürliche atomare Linienbreite oder durch die Dauer der kohärenten Wechselwirkungszeit des Ions mit dem Laser gegeben, die unter anderem dadurch begrenzt ist, dass das Ion sich aufheizt. Eine verbesserte Stabilität ist eine wichtige Voraussetzung, um die Genauigkeit der Uhren überprüfen und verbessern zu können. Allerdings wäre auf dem gegenwärtigen Stand der Stabilität eine Messzeit von etwa 100 Tagen erforderlich, um eine Evaluierung mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-18} zu erreichen, was das zukünftig angestrebte Ziel bei der Entwicklung optischer Uhren ist.

In diesem Forschungsprojekt soll daher die Stabilität von Uhren durch Verwendung von zehn bis hundert Ionen verbessert werden, was den relativen Beitrag des Quantenprojektionsrauschens im atomaren Resonanzsignal verringert. Neben der Entwicklung neuer Fallenstrukturen geht die Entwicklung zu Ionen mit $^1S_0 - ^1P_0$ -Uhrenübergängen, die unempfindlich gegenüber elektrischen Feldgradienten sind, die von Nachbarionen erzeugt werden (Bild 3).

Die Verfügbarkeit von Uhren mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-18} wird schlussendlich zu hochempfindlichen Messgeräten führen, die z.B. den Höhenunterschied im Gravitationspotential der Erde mit einer Genauigkeit von 1 cm bestimmen können. Zur Zeit ist das Geoid der Erde mit einer Unsicherheit von

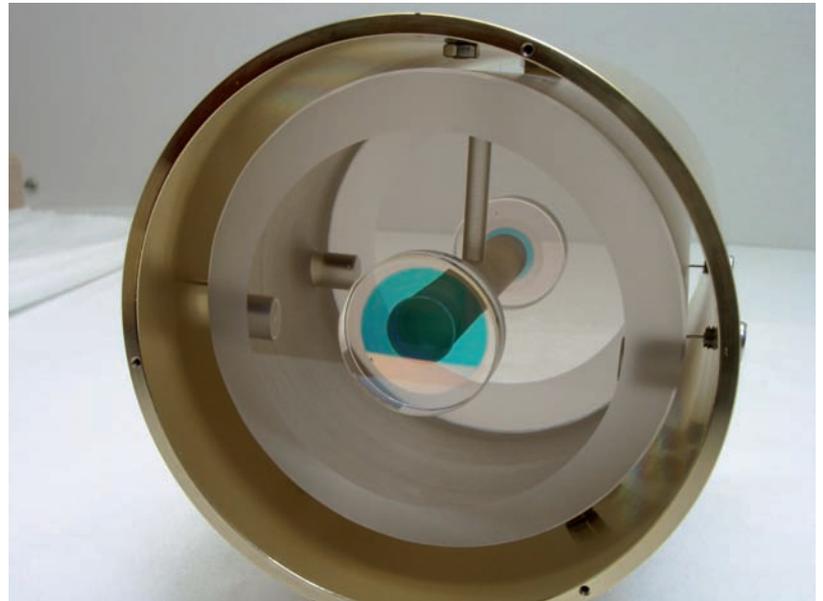


Bild 4:
Optischer Resonator, der als Referenz eines ultrastabilen Lasers benutzt wird, in einer in der PTB entwickelten schwingungsunempfindlichen Aufhängung.

30 ... 50 cm bekannt. In einem nächsten Schritt könnten solche Uhren beispielsweise die direkte Verschiebung von tektonischen Platten überprüfen, als Ergänzung zu den heute gebräuchlichen radioastronomischen Methoden. Eine andere Gruppe von quantenbasierten Sensoren, deren Technologie eng mit der der Uhren verknüpft ist, kann eine dazu komplementäre geodätische Information liefern: Sensoren auf der Basis lasergekühlter Atominterferometer können als Messgeräte für Beschleunigung, Rotation, Gravitation und Gravitationsgradienten eingesetzt werden.

Mit QUEST werden interdisziplinäre Kooperationen zwischen Ingenieuren, die sich mit der Entwicklung von Navigationssystemen beschäftigen, Geodäten und Forschern auf dem Gebiet der lasergekühlten Atome stimuliert, und dies wird zur Entwicklung neuartiger Sensoren für die Geowissenschaften und die Navigation führen. Die Nachwuchsforschergruppe beabsichtigt, hier ihre Expertise bei der Manipulation kalter Atome und der höchst genauen Messtechnik mit Atominterferometern einzubringen.

2.3 Forschungsprojekt „Sub-Hertz-Laser und neuartige optische Resonatoren“

Die besten optischen Uhren übertreffen die besten Mikrowellenuhren im Hinblick auf die erreichte Genauigkeit und Stabilität. Für eine weitere Verbesserung der optischen Uhren ist allerdings zu beachten, dass deren Kurzzeitstabilität durch die Frequenzstabilität der Laser



Bild 5:
Das neue QUEST-Institut an der PTB im Max-von-Laue-Bau (1) befindet sich in der Nähe von Paschen- (2), Giebe- (3), und Kopfermann-Bau (4), in denen jeweils Arbeitsgruppen der PTB an Neutralatomuhren, Einzelionenuhren sowie primären Atomuhren und Zeitverteilung arbeiten.

begrenzt wird, die zur Abfrage des atomaren Übergangs – als „Pendel“ der Atomuhr – Verwendung finden. Laser mit höchstmöglicher Frequenzstabilität sind auch unverzichtbar bei der höchstauflösenden Spektroskopie, in Atominterferometern, bei fundamentalen Tests der Physik und für interferometrische Messungen in zukünftigen Raumfahrtmissionen wie dem Gravitationswelleninterferometer LISA.

Um die beste Frequenzstabilität zu erreichen, wird die Frequenz des Lasers üblicherweise auf eine schmale Resonanzlinie eines optischen Resonators stabilisiert. In seiner einfachsten Form besteht der Resonator aus zwei höchstreflektierenden Spiegeln, die auf einem stabilen Abstandshalter befestigt sind (Bild 4). Die Frequenzstabilität des so stabilisierten Lasers wird durch die Stabilität der Resonatorlänge bestimmt [5]. Bis vor kurzem wurden in vielen Experimenten die störendsten Längenänderungen durch niederfrequente seismische und akustische Schwingungen verursacht, die über die Befestigung des Resonators zu quasistatischen Kräften führen, die den Resonator deformieren und seine Länge ändern. Dieses Problem ist in einer weltweiten Anstrengung durch verschiedene Forschergruppen – unter anderen der PTB [6] – angegangen und gelöst worden, indem spezielle Befestigungsmethoden entwickelt wurden, die sehr unempfindlich gegenüber Vibrationen sind. Gegenwärtig ist die Frequenzstabilität der besten Laser letztendlich durch thermische Längenfluktuationen der Resonatoren begrenzt. Die Fluktuationen werden durch die Brownsche Bewegung der Moleküle des Resonatormaterials angeregt. Dieses thermische Rauschen stellt ein ernsthaftes Problem für die zukünftige Entwicklung ultrastabiler Laser dar, und ohne seine Lösung ergäbe sich ein gravierendes Hindernis für die weitere Entwicklung der oben angesprochenen Zukunftsfelder. Im Forschungsprojekt wird man sich daher mit hoher Priorität darauf konzentrieren, das Problem des thermischen

Rauschens zu lösen. Überdies sollen Resonatoren entwickelt werden, die in transportablen optischen Uhren auf der Erde und für bestimmte Weltraummissionen eingesetzt werden sollen.

3 QUEST und die Arbeitsgruppen der PTB

Das neue QUEST-Institut liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Arbeitsgruppen der PTB, die auf eng verwandten Gebieten forschen: Primäre Atomuhren und Zeitverteilung im Kopfermann-Bau, Einzelionenuhren und Siliziumtechnologie im Giebe-Bau sowie Quantenoptik und Neutralatomuhren im Paschen-Bau (Bild 5).

Es ist zu erwarten, dass die starke Wechselwirkung und enge Integration von Arbeitsgebieten und Forschern zu einer gemeinsamen Forschungsstruktur führt, in der die PTB und QUEST zum Wohl beider Partner langfristig zusammenarbeiten können.

Die Ziele der PTB-Forschung in den Gebieten Frequenznormale, Uhren und Zeit- und Frequenzverteilung überlappen stark mit Forschungszielen von QUEST. Das führte zwangsläufig dazu, dass einige PTB-Wissenschaftler in QUEST als „Principal Investigators“ agieren. So leiten Forscher der PTB beispielsweise die in QUEST eingerichteten Task Groups „Transportable ultrastabile Uhren“ und „Variation von Fundamentalkonstanten“. Die erste Task Group stellt die Antwort auf die Herausforderung dar, dass optische Uhren den besten Mikrowellenuhren zukünftig immer stärker überlegen sein werden. Mit der Aussicht, bald Uhren mit um Größenordnungen verbesserter Frequenzstabilität und Genauigkeit zu haben, ist es zwingend erforderlich sicherzustellen, dass diese neuen Möglichkeiten nicht nur auf einige wenige Institute wie die PTB beschränkt bleiben. Ganz im Gegenteil werden optische Uhren mit weiter verbesserten Eigenschaften dann in vielfältiger Weise zur Erreichung der gesetzten Ziele in der Quantenmetrologie, bei der Unterstützung von Raumfahrtmissionen oder in der Präzisionsgeodäsie gebraucht. Die Task Group „Transportable ultrastabile Uhren“ soll für diese Zwecke ein mobiles optisches Frequenznormal entwickeln, dessen Stabilität und Genauigkeit wie bei den stationären optischen Uhren ebenfalls die der gegenwärtig besten Mikrowellennormale übertrifft. Transportable optische Uhren sollen ebenfalls für Vergleiche zwischen weit voneinander entfernten optischen Uhren eingesetzt werden sowie zum Test und zur Verbesserung neuartiger Technologien für Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken wie beispielsweise optische Glasfaserverbindungen [7].

Die Task Group „Variation von Fundamentalkonstanten“ nimmt sich der Untersuchung eines tiefgründigen Problems an. Die meisten

theoretischen Modelle, die die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenmechanik vereinigen wollen, sagen in der einen oder anderen Form zeitliche oder räumliche Variationen der Fundamentalkonstanten vorher. Diese Frage hat für die Metrologie einen hohen Stellenwert, da es gegenwärtig Bestrebungen gibt, die Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems Units (SI) auf Fundamentalkonstanten zurückzuführen [8]. Die Task Group wird ihre Aktivitäten auf die Untersuchung möglicher Veränderungen von drei fundamentalen Konstanten, der Gravitationskonstante, der Feinstrukturkonstante und dem Massenverhältnis zwischen Elektron und Proton richten. Laboruntersuchungen zur Konstanz der beiden letztgenannten Konstanten werden vom schnellen Fortschritt bei den optischen Uhren profitieren [9, 10]. Um ein robustes System von Frequenzvergleichen zu erhalten, wird die Task Group kontinuierlich weltweite Vergleiche zwischen den Frequenznormalen und Uhren von QUEST und anderen höchstgenauen Uhren koordinieren. Neben verbesserten Aussagen zu möglichen Variationen der Fundamentalkonstanten werden diese Ergebnisse auch eine hohe Relevanz erhalten, wenn es darum geht, die besten Kandidaten für eine zukünftige Neudefinition der SI-Sekunde zu finden.

4 Ausblick

Mit der PTB im Exzellenzcluster der Leibniz Universität Hannover und dem QUEST-Institut auf dem Campus der PTB in Braunschweig beginnt in mehrfacher Hinsicht eine neue Ära. Fünf wichtige Aspekte sollen hier erwähnt werden: Zum Ersten können im neuen Forschungsverbund mehrere neue für die Metrologie relevante Forschungsfelder in einer Tiefe und Breite verfolgt werden, die mit den begrenzten Ressourcen der PTB bisher nicht möglich war. Ein solches Feld ist die Nutzung der Atominterferometrie für Präzisionsmessungen [11]. Hier hat die PTB von Anfang an bemerkenswerte Beiträge geliefert und jetzt können die Arbeiten im Zusammenschluss mit anderen thematisch verwandten QUEST-Aktivitäten intensiviert werden. Zweitens sind im QUEST-Institut an der PTB die Ressortforschung und die universitäre Forschung in einer Weise miteinander verwoben, die viele Möglichkeiten zur gegenseitigen Befruchtung bietet. Drittens gibt es mit der Präsenz von QUEST in universitärer und Ressortforschung neue Wege, um zu Forschungsprogrammen beizutragen und diese in den nationalen, europäischen und internationalen Forschungs- und Raumfahrtorganisationen weiterzuentwickeln.

Viertens darf man erwarten, dass die neuartigen Quantum Engineering-Technologien, die sich in QUEST entwickeln, auch zu zukunftsweisenden Kooperationen mit Industriepartnern führen und dass sich hierbei neue Anwendungen auch kommerzieller Art ergeben werden. Fünftens ist zu erwarten, dass mit den einzigartigen Arbeitsbedingungen mit der vollen Unterstützung der Leibniz-Universität, der PTB und der anderen QUEST-Partner die besten Wissenschaftler in den relevanten Arbeitsgebieten angezogen werden können. Die neuen Personalstellen, die temporär durch den Exzellenzcluster und zusätzlich durch die PTB gefördert werden, werden damit deren Position besonders im Bereich der Zeit- und Frequenzmetrologie und der quantentechnologiebasierten Präzisionsmessungen stärken.

Literatur

- [1] Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung (Einheiten- und Zeitgesetz EinhZeitG); http://www.gesetze-im-internet.de/me_einhg/BJNR007090969.html
- [2] Ressortforschung bezeichnet die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der Ministerien der deutschen Bundesregierung und der Länder. Siehe z.B.: Konzept einer modernen Ressortforschung; http://www.bmbf.de/pub/konzept_ressortforschung.pdf
- [3] Für weitere Informationen siehe: <http://www.questhannover.de>
- [4] P. O. Schmidt, B. Hemmerling, B. Brandstätter, D. Nigg: „Quantenlogik für die Präzisionspektroskopie“ in dieser Ausgabe, S. 153.
- [5] C. Lisdat, C. Tamm: „Superstabile Laser“ in dieser Ausgabe, S. 144.
- [6] T. Nazarova, F. Riehle, U. Sterr: Vibration-Insensitive Reference Cavity for an Ultra-Narrow Laser. *Appl. Phys. B* 83, 531 (2006).
- [7] D. Piester, H. Schnatz: „Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken“ in dieser Ausgabe, S. 131.
- [8] Resolution 12 of the 23rd General Conference on Weights and Measures (2007): On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI); <http://www.bipm.org/utls/en/pdf/Resol23CGPM-EN.pdf>
- [9] E. Peik, A. Bauch: „Wozu brauchen wir genauere Uhren?“ in dieser Ausgabe, S. 112.
- [10] E. Peik, U. Sterr: „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123.
- [11] U. Sterr, F. Riehle: „Atominterferometrie“ in dieser Ausgabe, S. 159.

Wozu brauchen wir genauere Uhren?

Ekkehard Peik¹ und Andreas Bauch²

Bild 1:
Die Autoren tragen eine kommerzielle Cäsiumatomuhr. Im Hintergrund die Cäsium-Fontänenuhr CSF2 der PTB.

1 Unsere Fragestellung

Eine genaue Zeitmessung wird in einer enorm breiten Spanne von Anwendungen benötigt. Das einzige Messinstrument, das die meisten Menschen im täglichen Leben bei sich tragen, ist eine Uhr. Gelingt es einer Forschergruppe, Fortschritte in Richtung auf eine noch genauere Uhr anzukündigen, so kann sie sich des Interesses der Medien sicher sein. Es gelingt auch den Autoren immer wieder, Menschen mit der Genauigkeit z. B. der Atomuhren in der PTB zu beeindrucken. Aber dann kommt doch unweigerlich die Frage: Wozu das Ganze? Wir versuchen in diesem Aufsatz eine Motivation für diese Anstrengungen zu geben. Hierzu stellen wir technische Probleme und wissenschaftliche Fragestellungen vor, die Anregung zur weiteren Verbesserung von Uhren liefern. Wir zeigen, wo solche Uhren eingesetzt werden und versuchen auch klar zu machen, welche Eigenschaften der Uhren in der Praxis eine Rolle spielen und damit auch die Bewertung „gut, besser“ zu begründen.

2 Kenngrößen für die Qualität von Uhren

Genau und stabile Uhren und Frequenzreferenzen sind für eine Vielzahl von technischen, wissenschaftlichen und militärischen Anwendungen unverzichtbar. Für jede Art von Anwendung wird typischerweise ein Anforderungsprofil für das jeweils einzusetzende Referenznormal aufgestellt. Dabei geht es einmal um die Eigenschaften des Ausgangssignals, also die Kenngrößen Genauigkeit und Stabilität der Ausgangsfrequenz und ggf. auch die zulässigen kurzzeitigen Phasenschwankungen (*phase noise*). Andererseits ist es ganz üblich, dass Kriterien wie Größe, Masse und Leistungsaufnahme, dazu Zuverlässigkeit und Servicefreundlichkeit bei der Auswahl eine Rolle spielen und also auch diesbezüglich Anforderungen existieren. Daher erscheint es unangebracht, so alltägliche Begriffe wie „gut“ und „besser“ zu verwenden, um eine Uhr zu beschreiben, ohne zu erklären, wie man zu diesem Urteil gekommen ist.

Bild 1 zeigt eine kommerzielle Cäsiumatomuhr, die bei einem Anschaffungspreis von



ca. 70 000 €, einer Masse von 30 kg und einer Leistungsaufnahme von unter 100 W Normalfrequenzen (1 Hz, 5 MHz, 10 MHz, ggf. 2048 kHz) mit einer spezifizierten relativen Abweichung vom Nominalwert von weniger als $5 \cdot 10^{-13}$ und einer langzeitigen relativen Instabilität von weniger als $1 \cdot 10^{-14}$ liefert. Im Hintergrund von Bild 1 ist CSF2 zu erkennen, die zweite Cäsiumfontäne der PTB. Sie ist nicht transportabel und kann nur unter Laborbedingungen arbeiten. Neben den reinen Investitionskosten von ca. 350 000 € war (und ist) ein Team von Physikern und Ingenieuren nötig, sie zu entwickeln, aufzubauen und nun zu betreiben. So weit man heute vorhersehen kann, wird CSF2 die SI-Einheit Sekunde mit einer relativen Unsicherheit von weniger als $1 \cdot 10^{-15}$ realisieren und eine Langzeitinstabilität im Bereich von 10^{-16} aufweisen. Aber ist CSF2 „besser“ als die kommerzielle Uhr?

Die Ausgangsfrequenz von elektrischen Oszillatoren und Uhren unterliegt systematischen und statistischen Einflüssen, so dass sie normalerweise vom nominellen, gewünschten Wert abweichen wird. In der Literatur findet man eine

¹ Dr. Ekkehard Peik, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, PTB Braunschweig, E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de

² Dr. Andreas Bauch, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, PTB Braunschweig, E-Mail: andreas.bauch@ptb.de

Vielzahl von Darstellungen der entsprechenden Kenngrößen, ihrer Berechnung und Interpretation [1]. Wir halten es für angebracht, diese Größen kurz zu betrachten, bevor wir uns unserem eigentlichen Thema, den vielfältigen Anwendungen der Uhren zuwenden.

2.1 Frequenzinstabilität

Die quasi-sinusförmige Ausgangsspannung eines Frequenznormals wird beschrieben durch

$$V(t) = [V_0 + e(t)] \sin\{2\pi\nu_0 t + \varphi(t)\}, \quad (1)$$

wobei $V_0, \nu_0, \varphi(t)$ und $e(t)$ die nominelle Amplitude und Frequenz, sowie die momentanen Phasen- und Amplitudenschwankungen sind. Als weitere Größen führen wir die momentanen Phasenzeitschwankungen, $x(t) = \varphi(t)/(2\pi\nu_0)$, und die entsprechende relative Frequenzabweichung $y(t) = (d\varphi/dt)/(2\pi\nu_0)$ ein, die im Zeitbereich wie im Frequenzbereich analysiert werden können [1]. Hier soll nur die am weitesten verbreitete statistische Kenngröße für die relative Frequenzinstabilität diskutiert werden, die Allan-Varianz

$$\sigma_y^2(\tau) = \left\langle \left(\bar{y}_{k+1}(\tau) - \bar{y}_k(\tau) \right)^2 \right\rangle. \quad (2)$$

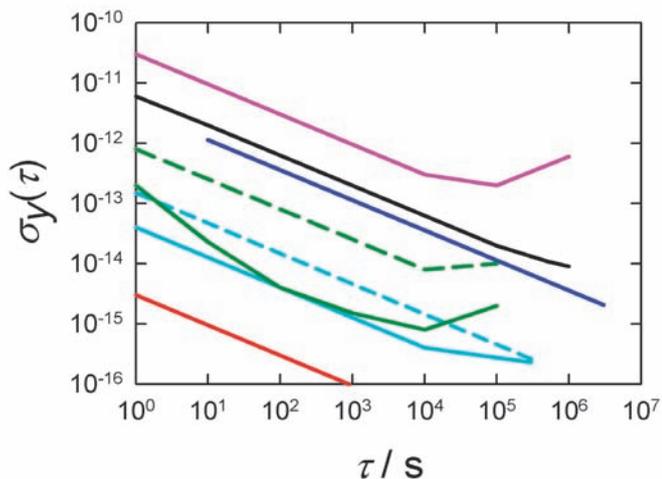
Wie der ebenfalls gebräuchliche Name „Paarvarianz“ andeutet, stellt sie das Mittel $\langle \rangle$ über aufeinander folgende Frequenzdifferenzen $\bar{y}(\tau)$ dar, die jeweils Mittelwerte über die Zeit τ darstellen und eine (idealerweise unendliche) zusammenhängende Messwertfolge ohne Totzeit repräsentieren. Für eine statistisch signifikante Aussage sollten mindestens zehn Messwerte vorliegen. Üblich ist eine doppelt-logarithmische Auftragung von $\sigma_y(\tau)$ als Funktion von τ . Bei dieser Darstellung kann man in vielen Fällen unterschiedliche Instabilitätsbeiträge anhand der Steigung des $\sigma_y(\tau)$ -Graphen identifizieren. Falls beispielsweise in einem Frequenznormal das Schrotrauschen der nachgewiesenen Atome die dominierende Rauschquelle darstellt, folgt daraus weißes Frequenzrauschen, und $\sigma_y(\tau)$ wird proportional zu $\tau^{-1/2}$ kleiner. In diesem Fall, der je nach Mittelungszeit durchaus häufig ist, stimmt $\sigma_y(\tau)$ mit der klassischen Standardabweichung des Datensatzes überein. In vielen Fällen beobachtet man Abweichungen vom $\tau^{-1/2}$ -Verhalten, weil beispielsweise interne Parameter der Uhr, die die Resonanzfrequenz ν_0 bestimmen, nicht hinreichend gut kontrolliert werden. Die klassische Standardabweichung würde in einem solchen Fall mit wachsender Mittelungszeit τ divergieren, während in der doppelt-logarithmischen $\sigma_y(\tau)$ -Darstellung lediglich die Steigung null oder positiv wird. In Bild 2 sind Beispiele für die erwartete oder registrierte Frequenzinstabilität von gebräuchlichen atomaren Frequenznormalen dargestellt.

2.2 Frequenzgenauigkeit

In Anlehnung an den englischen Sprachgebrauch (*accuracy*) verwenden wir den Begriff Frequenzgenauigkeit summarisch, um die Übereinstimmung zwischen dem tatsächlichen und dem nominellen Wert der Ausgangsfrequenz einer Atomuhr zu beschreiben. In Produktbeschreibungen der verschiedenen Uhrentypen wird üblicherweise ein Wertebereich angegeben, in dem die Ausgangsfrequenz der verschiedenen Exemplare zu erwarten ist, ohne dass der Anwender erfährt, welche Ursachen zu einer Abweichung zwischen tatsächlicher und nomineller Frequenz führen. Eine detaillierte Auflistung aller solcher Effekte wird dagegen im Unsicherheitsbudget einer primären Uhr erwartet. Das Gleiche gilt für Frequenznormale, die als „secondary representation of the second“ gelten (siehe Kapitel 3). Das Unsicherheitsbudget enthält die quantitative Abschätzung aller Effekte, die zu einer Abweichung der realisierten Übergangsfrequenz von der in ungestörten, ruhenden Atomen zu erwartenden führen. Da man die relevanten physikalischen Parameter und auch die theoretischen Beziehungen nur unvollkommen kennt, ist die Angabe jeder möglichen Frequenzabweichung mit einer Unsicherheit behaftet. Als Endergebnis ermittelt man eine kombinierte Unsicherheit. Ein Beispiel für ein derartiges Vorgehen findet man in [2] beschrieben.

Es zeigt sich in der Praxis, dass die beiden Größen Instabilität und Genauigkeit nicht völlig unabhängig voneinander sind. Einige systematische Effekte können nur bestimmt werden, indem die Uhrenfrequenz als Funktion des interessierenden Parameters mit Bezug auf ein stabiles Referenznormal gemessen wird. Dann aber kann die Instabilität die Beobachtung systematischer Veränderungen verdecken, und die benötigte unrealistisch lange Mittelungszeit kann eine Verbesserung der Genauigkeit verhindern. Ein Beispiel hierfür ist die Bestimmung der Frequenzverschiebung durch Stöße zwischen den Atomen in einer Fontänenuhr [3]. Um diese Situation zu

Bild 2: Relative Frequenzinstabilität $\sigma_y(\tau)$ verschiedener Atomfrequenznormale. Magenta: Rubidium-Normal, Standardwerte; schwarz: weit verbreitete Cäsiumatomuhr Symmetricom 5071A (Option hohe Stabilität); grün gestrichelt: passiver Wasserstoffmaser; grüne Linie: aktiver Wasserstoffmaser, Standardwerte; cyan: gemessene Instabilität der Fontänenuhren FO-2 des LNE-SYRTE und CSF1 der PTB (gestrichelt); blau: gemessenen Instabilität der PTB-Cäsiumuhren CS1 und CS2 im Vergleich über 8 Jahre; rot: erwartete Instabilität einer optischen Strontium-Gitteruhr (siehe [9]).



vermeiden, wird die größtmögliche Zahl von Effekten nicht durch direkte Frequenzmessung sondern durch theoretische Überlegungen oder die Messung von Hilfsgrößen bestimmt, die empfindlicher als die Uhrenfrequenz von dem betrachteten Parameter abhängen. Als Beispiel kann hier die Zeeman-Verschiebung genannt werden: Man bestimmt die Resonanzfrequenz einer in erster Ordnung vom Magnetfeld abhängigen Übergangsfrequenz des Atoms, um aus dem Ergebnis die nur in zweiter Ordnung abhängige Frequenzverschiebung des Uhrenübergangs zu berechnen.

3 Internationale Zeitskalen

Die Internationale Atomzeit (TAI, *Temps Atomique International*) und die Koordinierte Weltzeit (UTC) werden von der *Time, Frequency and Gravimetry Section* am Internationalen Büro für Maß und Gewicht (BIPM, *Bureau International des Poids et Mesures*) berechnet und verbreitet [4]. Die Skalen sind das Ergebnis einer weltweiten Zusammenarbeit von ca. 65 nationalen Metrologieinstituten und anderen Forschungseinrichtungen, die Atomuhren verschiedener Art betreiben. Jedes der Institute „k“ realisiert eine Annäherung an UTC, mit UTC(k) bezeichnet, die jeweils als Referenz für den Vergleich der einzelnen Uhren im Institut „k“ und für die Verbreitung von Zeit und Frequenz verwendet wird. Zeitvergleiche, wie sie in [5] beschrieben werden, liefern die Differenzen zwischen verschiedenen UTC(k)-Skalen. Die Verbreitung von UTC durch das BIPM geschieht durch die monatliche Publikation der Differenzen UTC-UTC(k) mit Werten für bestimmte Tage des zurückliegenden Monats.

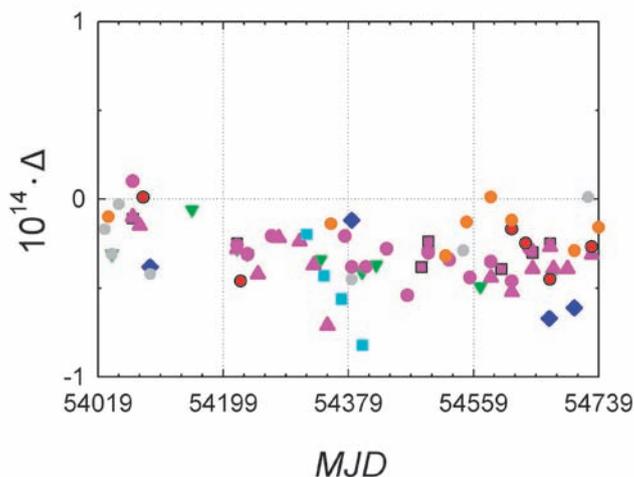
Was ist die Rolle genauer Uhren in diesem Prozess? Durch Kombination der Zeitvergleichsdaten und der Messwerte von etwa 300 weltweit verteilten Uhren wird mit dem Algorithmus ALGOS eine gemittelte „freie Atomzeitskala“ gewonnen. Der Algorithmus ist so ausgelegt, dass er zuverlässig eine für den Mittelungszeit-

raum von 30 Tagen optimierte stabile Zeitskala produziert. Hierzu werden den beitragenden Uhren bei der Mittelung statistische Gewichte zugewiesen, die sich aus dem Verhalten der Uhren während der zurückliegenden 12 Monate ergeben. In einem zweiten Schritt werden die Messwerte der deutlich kleineren Zahl von primären Uhren (die ja mit spezifizierter Unsicherheit die SI-Sekunde realisieren) dazu verwendet, um durch eine Steuerung mit langer Zeitkonstante aus der freien Zeitskala eine ebenso stabile aber genauere Skala zu gewinnen: die Zeitskala TAI. Gegenwärtig wird die SI-Sekunde mit der kleinsten Unsicherheit in den Metrologieinstituten realisiert, die Cäsiumfontänenuhren betreiben. In Bild 3 sind die Messwerte aller dieser Uhren relativ zu TAI – also relativ zu der bereits gesteuerten Zeitskala – dargestellt. Die TAI-Sekunde stimmt demnach mit der SI-Sekunde sehr gut überein. Die Zeitskala UTC als Basis aller Standardzeiten wird dann aus TAI durch Einführung der Schaltsekunden gewonnen – als letzter Schritt des gesamten Prozesses.

Die Entwicklung optischer Frequenznormale verlief in den letzten Jahren stürmisch und in [6] finden wir den klarsten Nachweis, dass die besten Systeme inzwischen die Cäsiumatomuhren in der Genauigkeit hinter sich gelassen haben. Daraus ergibt sich die Perspektive für eine mögliche Neudefinition der Sekunde, und es stellt sich die Frage, wie der dafür am besten geeignete atomare Übergang gefunden werden kann. Die Kategorie „secondary representation of the second“ wurde geschaffen [7], und die Messwerte und Unsicherheitsabschätzungen für entsprechend entwickelte Frequenznormale werden dokumentiert und bewertet. Gegenwärtig kommen nur Frequenznormale mit einer abgeschätzten Unsicherheit von unter $1 \cdot 10^{-14}$ in Betracht. Die bisher anerkannten Normale basieren auf einem Mikrowellenübergang in Rb und auf optischen Übergängen in den Ionen $^{88}\text{Sr}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$ und $^{171}\text{Yb}^+$ und im neutralen Atom ^{87}Sr [7, 8].

Optische Frequenznormale können dank der Entwicklung der Frequenzkamm-Technologie mit kleinerer Unsicherheit miteinander verglichen werden als gegenwärtig die SI-Sekunde selbst realisiert wird [5]. Diese Vergleiche können zeigen, ob die Reproduzierbarkeit der optischen Normale, die bisher nur intermittierend betrieben werden, die kleine abgeschätzte Unsicherheit bestätigt. In diesem Fall können sie als wertvolle Referenz für die Kontrolle der Stabilität von TAI dienen, selbst wenn die kleine Unsicherheit nicht direkt genutzt werden kann, da es sich nur um „secondary representations“ handelt.

Bild 3:
Vergleich von Fontänen-Atomfrequenznormalen mit TAI. Δ stellt die relative Abweichung der realisierten Zeiteinheit vom TAI-Skalenmaß während der jeweiligen Betriebszeit von typisch 20 bis 30 Tagen dar. Dargestellt sind Messwerte über zwei Jahre bis September 2008.
Blau: CSF1 (PTB); cyan: CsF1 (NPL, Teddington, UK); orange: F1 (NMIJ, Tsukuba, Japan); grün: F1 (NIST, Boulder, USA); grau: CsF1 (NICT, Tokio, Japan); rot: CSF1 (INRIM Turin, Italien); magenta: FO1 (Quadrate), FO2 (Dreiecke), FOM (Punkte), jeweils LNE-SYRTE, Paris, Frankreich.



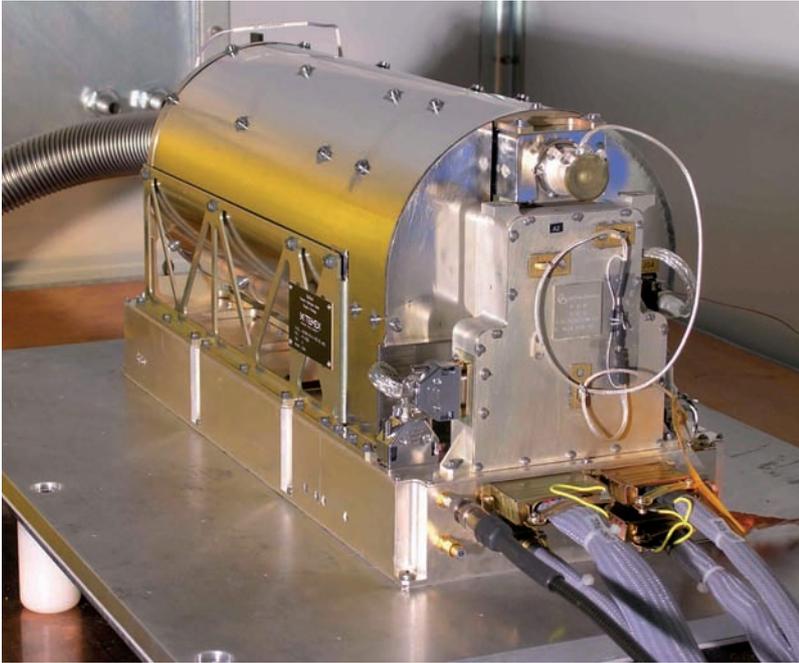


Bild 4:
Physics Package des für Galileo entwickelten passiven Wasserstoffmasers, das mit der von Selex Galileo (Mailand) entwickelten Electronics Package eine Einheit bildet. (Foto: SpectraTime, Neuenburg, Schweiz)

4 Uhren in der Navigation

Satellitennavigationssysteme (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*) sind ein Teil unseres Alltags geworden, und dieser Trend wird sich mit der selbstverständlichen Integration von Navigationsfunktionen in Mobiltelefonen und Automobilen fortsetzen. Die Funktion eines GNSS beruht auf der Messung von Signallaufzeiten zwischen mehreren mit Atomuhren ausgerüsteten Satelliten und dem Empfänger am Boden. Um die Rolle der Uhren hierbei zu verstehen, muss man etwas ins Detail gehen: Die vom Satelliten übermittelten Daten enthalten eine Vorhersage über die Abweichung der jeweiligen Satellitenuhr von der GNSS-Systemzeit und eine Vorhersage des Satellitenorbits, also seiner momentanen Position. Basierend auf Beobachtungsdaten von einem Netz von Monitorstationen werden diese Größen im GNSS-Kontrollzentrum berechnet und periodisch durch Kommunikation mit dem Satelliten aktualisiert. Die von einem GNSS-Empfänger erhaltenen Informationen erlauben abhängig vom Typ des verwendeten Empfängers, in Kombination mit den Messwerten der Ankunftszeit der Signale, sowohl Positionsbestimmung wie auch hochgenaue Zeitübertragung [10].

Die Architektur des Navigationssystems bestimmt seine Eigenschaften: Die Anzahl und geografische Verteilung der Monitorstationen, die Häufigkeit der Kommunikation Boden-Satellit, und – um zum Thema des Aufsatzes zu kommen – die Eigenschaften der Uhren in den Satelliten und in den Bodenstationen. Letztere bestimmen die Genauigkeit der Vorhersage der Uhrenstände und damit zu einem gewissen Teil auch die Positionierungsgenauigkeit.

4.1 Global Positioning System (GPS): gegenwärtiger Stand

Die GPS-Systemzeit wird durch Mittelung über alle Uhren im Raum- und Bodensegment gewonnen. Die GPS Monitorstationen sind mit kommerziellen Cäsiumatomuhren ausgestattet. Langzeitig wird die GPS-Zeit an die Realisierung der Koordinierten Weltzeit des United States Naval Observatory, UTC(USNO), angepasst. In den kürzlich gestarteten GPS-Satelliten werden drei Rubidium-Atomuhren mitgeführt. Ihr Betrieb in Folge gewährleistet, dass die Satelliten ihre Funktion länger als 7,5 Jahren erfüllen. Dafür werden die nicht idealen Eigenschaften der Uhren in Kauf genommen: Ihre Ausgangsfrequenz zeigt eine große zeitliche Drift und auch eine Änderung der Driftrate. Die relative Frequenzinstabilität ist mit $\sigma_y(1\text{ s}) \leq 3 \cdot 10^{-12}$ spezifiziert, und sie nimmt proportional zu $\tau^{-1/2}$ ab bis das Minimum von $\sigma_y \approx 2 \cdot 10^{-13}$ bei etwa einer Stunde Mittelungszeit erreicht ist (Bild 2). Analysiert man die Daten im Nachhinein und subtrahiert die Drift, so berechnet man eine 1-Tages-Instabilität von $\sigma_y(1\text{ d}) \approx 3 \cdot 10^{-14}$ für die besten Exemplare. Die Eigenschaften der a priori gleichartigen Satellitenuhren scheinen erheblich zu streuen, was für die Planung des Systems und für die Aufrechterhaltung des Betriebs eine Herausforderung darstellt [11].

4.2 Uhren für Galileo

Die finanziellen Aufwendungen für das europäische Satellitennavigationssystem *Galileo* sind – verglichen mit den Kosten von GPS – recht bescheiden. So ist es nicht verwunderlich, dass vergleichsweise konservative Spezifikationen für die Navigationsgenauigkeit aufgestellt wurden, die sich mit zwei Rubidiumatomuhren an Bord

Bild 5:
Beitrag der PTB zur Infrastruktur des *Galileo* Ground Segment: Dafür vorgesehene Cäsiumatomuhren werden von Michael Rost (PTB) geprüft. Der Geräteschrank rechts enthält das *Galileo System Time Realization Subsystem*. Die Arbeiten erfolgten im Auftrag von Kayser-Threde GmbH, München.



eines Satelliten erfüllen lassen. Die Uhren sollen eine Satelliten-Funktion von 20 Jahren gewährleisten. Sie sind bezüglich der Frequenzinstabilität ganz ähnlich wie die oben erwähnten GPS-Uhren spezifiziert, so dass die 2σ -Unsicherheit der Vorhersage der Uhrenstände am Ende eines 100-Minuten-Intervalls unter 4 ns liegt. Der Betrieb von zwei solcher Uhren an Bord des ersten *Galileo*-Test-Satelliten, GIOVE-A, hat gezeigt, dass sie die Spezifikation nahezu perfekt einhalten [13]. Zusätzlich werden die *Galileo*-Satelliten einen sogenannten „passiven Wasserstoffmaser“ an Bord haben, ein Frequenznormal, das bessere Eigenschaften verspricht als alle bisher im All betriebenen Normale. Dieser Atomuhrentyp (Bild 4) wurde wegen seiner geringeren Frequenzinstabilität bei der relevanten Mittelungszeit ($\sigma_y(\tau) < 1 \cdot 10^{-12} (\tau/s)^{-1/2}$ für $\tau \leq 10000$ s) ausgewählt. Seine Verwendung wird die Genauigkeit der Bahnbestimmung und Uhrenvorhersage verbessern. Seit April 2008 ist

ein solcher Maser auf dem Satelliten GIOVE-B in Betrieb. Erste Messergebnisse aus den Monaten Juni und Juli 2008 belegen seine herausragenden Eigenschaften [14].

Für das *Galileo*-Bodensegment wurden kommerziell erhältliche Uhren zur Realisierung der *Galileo*-Systemzeit (GST) ausgewählt: Cäsiumatomuhren vom Typ 5071A des Herstellers Symmetricom (USA) und aktive Wasserstoffmaser. GST wird als elektrisches Signal (nicht nur in Form einer synthetischen Zeitskala auf Papier) redundant in zwei *Precise Timing Facilities* (PTF) erzeugt werden [15]. Am Aufbau einer PTF ist die PTB beteiligt und hat dafür zwei Subsysteme entwickelt, die in Bild 5 zu sehen sind.

Für die zukünftige Betriebsphase von *Galileo* kann man sich innovativere Konzepte zur Erzeugung von GST vorstellen. So könnte GST als Mittel über die 30 passiven Maser in den Satelliten und den Uhren im Bodensegment erzeugt werden. Auch hat die Europäische Raumfahrtagentur ESA Studien für die Konzeption einer Weiterentwicklung von *Galileo* in Auftrag gegeben. Darin soll u. a. untersucht werden, inwieweit „bessere“ Satelliten- und Bodenuhren die Genauigkeit der Navigation fördern würden. Kürzlich publizierten Moudrak et al. Ergebnisse einer Untersuchung, in der sie annehmen, dass kontinuierlich betriebene optische Uhren mit einer relativen Frequenzinstabilität von $\sigma_y(\tau) \approx 10^{-16}$ für $10^4 \text{ s} < \tau < 10^6 \text{ s}$ wahlweise in den Satelliten und / oder am Boden eingesetzt werden [16]. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die Verwendung im Satelliten eine Verringerung der Zeit-Vorhersageunsicherheit auf < 0.1 ns zur Folge hätte und dass trotz dieser signifikanten Verbesserung die Navigationsunsicherheit nur um 50% reduziert würde. Diese Studie wird zur Zeit ausgeweitet und verfeinert, um die Einflüsse von Messrauschen, Signalausbreitung und Signalverarbeitung im Empfänger möglichst realistisch zu berücksichtigen.

Bild 6:
Fundamentalstation Wettzell des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie in Wettzell, mit einer Vielzahl von Instrumenten zur Beobachtung der Erde und ihrer Rotationsparameter. (Bild: BKG, Frankfurt)



5 Die Erde in Veränderung

In der internationalen geodätischen Forschung wurde vor kurzem die Errichtung des *Global Geodetic Observation System* (GGOS) vereinbart [17]. Die Motivation hierzu war vielfältig: Die Schlagworte „Klimawandel“ und „Tsunami“ sind in aller Munde, doch nur ein sehr detailliertes Verständnis unserer Erde und eine Messung einer Vielzahl von Größen in SI-Einheiten mit entsprechender langzeitiger Vergleichbarkeit von Messungen erlaubt es, verlässliche Aussagen, Prognosen und Handlungsanweisungen für Politik und Gesellschaft zu geben. Die Errichtung des GGOS schließt den Aufbau einer Anzahl von sogenannten Fundamentalstationen ein. Ein Beispiel hierfür ist die Fundamentalstation Wettzell des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG). In dieser Station (Bild 6) hat das BKG praktisch alle geodätischen Beobachtungstechniken zur Verfügung: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Laser-Entfernungsmessung zu Satelliten und zum Mond, eine Erdmagnetfeld-Messeinrichtung und eine lokale Schwerkraftmessung.

Alle diese Messeinrichtungen sind mit einer lokalen Zeitbasis verknüpft und verwenden externe Frequenzreferenzen. So werden zum Beispiel bei VLBI an zwei weit voneinander entfernten Orten die Phasendifferenzen zwischen der von einem Quasar empfangenen elektromagnetischen Welle und dem lokalen Frequenznormal registriert. Mit dem Abstand der Antennen wächst die Auflösung bei der Untersuchung der Eigenschaften der Quellen, doch das ist im Kontext von geodätischem VLBI von untergeordneter Bedeutung: Hier geht es um die Bestimmung der Orientierung der Basislinie zwischen den beiden Teleskopen relativ zu dem von Quasaren aufgespannten erdunabhängigen Referenzsystem. Hieraus gewinnt man unmittelbar als Parameter der Erdrotation die Zeitskala UT1 (*Universal Time 1*) und die Polkoordinaten. Bei jeder Datenauswertung müssen zwei Zeit-artige Größen zusätzlich bestimmt werden, der Zeit- und der Gangunterschied zwischen den beiden lokalen Zeitreferenzen. Aktive Wasserstoffmaser werden in jeder VLBI-Station verwendet, so dass die größtmögliche Gangstabilität während der typischen Beobachtungsdauern von einigen Minuten erreicht wird. Eine Reduzierung des Messrauschens und die a-priori-Kenntnis des Gangunterschieds würden diese Messungen erleichtern oder überflüssig machen. Dies wäre möglich, wenn optische Uhren als lokale Zeitreferenzen dienen könnten.

Eine andere Anwendung genauer und stabiler Uhren wurde in einem zunächst unerwarteten Zusammenhang vorgeschlagen. Ein ungeöstes Problem in der Geodäsie ist die Verknüpfung der sehr genauen Positionierung mittels

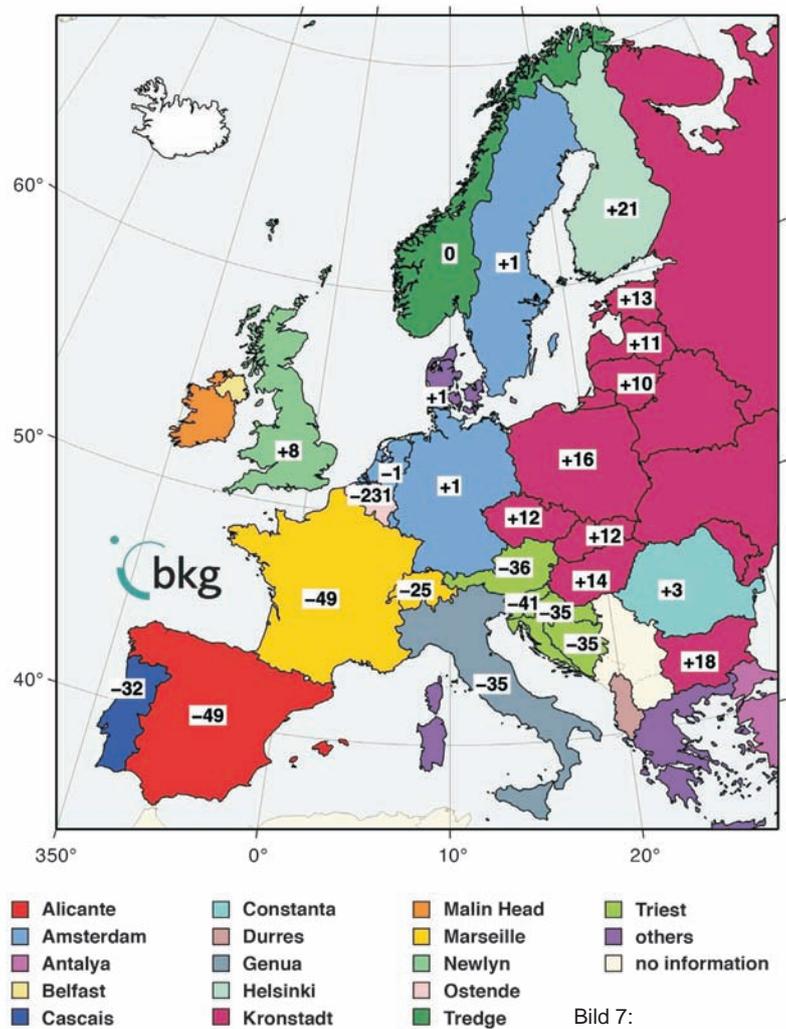


Bild 7: Transformationsparameter zwischen den europäischen nationalen Höhen Bezugssystemen und dem *Universal European Leveling System*. (Bild: BKG, Frankfurt)

GNSS in einem geometrisch definierten Referenzsystem mit den erdfesten Höhen Bezugssystemen. Die nationalen Höhenreferenzsysteme innerhalb Europas weisen an den nationalen Grenzen Sprünge im Dezimeterbereich auf (s. Bild 7). In einem ausgedehnten Kontinent wie Südamerika sind die Probleme noch größer und weniger gut erfasst. Der Vergleich von transportablen optischen Uhren mit einer stabilen ortsfesten Referenz würde die Bestimmung dieser Höhendifferenzen erlauben. Die Höhendifferenzen von Uhren, deren relative Genauigkeit und Stabilität bei 10^{-17} liegen, könnte man mit einer Unsicherheit von 10 cm bestimmen.

6 Tests der Grundlagen der Physik

Zeit ist eine der fundamentalen Dimensionen und gleichzeitig die Größe, die mit der höchsten Präzision gemessen werden kann. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Uhren und Frequenznormale eine wichtige Rolle bei quantitativen Tests der grundlegenden physikalischen Theorien gespielt haben. Die Entwicklung der Quantenmechanik schritt voran mit den Erfolgen der Theorie bei der Erklärung subtiler Eigenschaften atomarer Spektren und die relevanten experi-

mentellen Daten waren meist das Ergebnis von Frequenz- beziehungsweise Wellenlängenmessungen. Die heute am präzisesten bekannte Naturkonstante ist die Rydberg-Konstante (relative Unsicherheit: $6,6 \cdot 10^{-12}$). Dieses Ergebnis basiert im wesentlichen auf der Messung von Übergangsfrequenzen im Wasserstoffatom. Präzisionsexperimente mit berechenbaren Quantensystemen, wie einfachen Atomen oder einem einzelnen Elektron in einer magnetischen Falle, machen die Quantenelektrodynamik (QED) zur quantitativ am besten überprüften Theorie. Stetige Verbesserungen wurden dabei erreicht sowohl bezüglich der Genauigkeit der Messungen wie auch bei den umfangreichen Berechnungen von QED-Beiträgen höherer Ordnung. Die Experimente hierzu wurden meist in Universitätslaboratorien durchgeführt und die benötigte Frequenzreferenz wurde über Radiosignale oder mit Hilfe eines transportablen Primärnormals wie der Cäsiumfontänenuhr FOM vom LNE-SYRTE bereitgestellt [18]. Diese Uhr besitzt eine Unsicherheit, die mit den besten stationären Fontänenuhren vergleichbar ist, und sie kann innerhalb einiger Tage in einem geeigneten Labor in Betrieb genommen werden. Bild 8 zeigt FOM während eines Tests zur Vorbereitung der ACES-Mission (siehe unten).

Einer der präzisesten Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie ist noch immer die *Gravity Probe A*-Mission von 1976, bei der ein Wasserstoffmaser auf einer Rakete bis in eine Höhe von 10 000 km geschossen wurde [19]. Während des Flugs wurde seine Frequenz mit der eines Wasserstoffmasers am Boden verglichen. Dieses Experiment bestätigte die berechnete Gravitationsrotverschiebung mit einer relativen Unsicherheit von nur $1,4 \cdot 10^{-4}$ und die Kombination aus Rotverschiebung und relativistischem Dopplereffekt bis auf $7 \cdot 10^{-5}$. Mit der Verwendung neuerer Uhren mit lasergekühlten Atomen und einer längeren Beobachtungsdauer, die sich erreichen ließe, indem man die Uhr auf eine Erdumlaufbahn bringt, könnte man diesen Test wesentlich verbessern. Entsprechende Pläne werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Die relativistische Zeitdilatation konnte experimentell mit einer relativen Unsicherheit unterhalb von 10^{-7} bestätigt werden, indem optische Übergangsfrequenzen an schnellen Ionen in einem Speicherring gemessen wurden [20].

Weitere wichtige Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie kommen aus der präzisen Messung der Ankunftszeiten von Radiowellenpulsen, die von Millisekunden-Pulsaren in Doppelsternsystemen ausgesandt werden [21]. Diese Systeme sind einzigartige Testobjekte, um die Gravitation in starken Feldern zu untersuchen, und sie haben bereits einen indirekten Nachweis der Abstrahlung von Gravitationswellen ermög-

licht. Die Daten werden mit den größten verfügbaren Radioteleskopen aufgenommen, meist relativ zu einem Wasserstoffmaser, der über GPS mit UTC verglichen wird. Zeitweise wurde darüber spekuliert, ob Millisekunden-Pulsare über Zeiträume von einigen Jahren stabiler als Atomuhren sind [22]. Nach weiteren Verbesserungen der Stabilität der Atomzeitskalen kann dies heute nicht mehr aufrechterhalten werden. Würde man einen einzelnen Pulsar als Uhr einsetzen, wäre die Kurzzeitstabilität durch die geringe empfangene Signalstärke begrenzt und auf der Skala von einigen Jahrzehnten ist wegen der Präzession des Abstrahlungskegels sogar mit einem völligen Verschwinden des Signals zu rechnen. Dennoch ist die Beobachtung von Pulsaren eine der lohnendsten wissenschaftlichen Anwendungen für präzise Zeitmessung.

6.1 Suche nach „Neuer Physik“

Die stärkste Motivation für weitere quantitative Tests der grundlegenden physikalischen Theorien ergibt sich dadurch, dass diese Modelle nicht als das letzte Wort in der Beschreibung der Natur angesehen werden können, auch wenn sie bisher so erfolgreich aus allen Vergleichen mit Experimenten hervorgegangen sind. Der nach Ansicht vieler Physiker offensichtlichste Mangel ist das Fehlen einer einheitlichen Beschreibung der Gravitation und der anderen fundamentalen Kräfte und die daher unverstandene Verbindung zwischen Quantentheorie und Relativitätstheorie. Es besteht die Hoffnung, dass eines Tages ein Experiment eine signifikante Abweichung von den Vorhersagen der etablierten Theorien finden wird und dass dieses Ergebnis dann der Suche nach neuen Modellen eine Richtung weisen kann – ähnlich wie das Michelson-Morley-Experiment durch den Fehlschlag beim Nachweis des Äthers die Entwicklung der Relativitätstheorie stützte.

Viele der Ansätze zur Suche nach „neuer Physik“ konzentrieren sich auf mögliche Abweichungen von Einsteins Äquivalenzprinzip [23]. Dieses grundlegende Postulat der Relativitätstheorie trennt gewissermaßen die Schwerkraft von den anderen Kräften: Während erstere in die Metrik von Raum und Zeit verwoben ist, besagt das Äquivalenzprinzip, dass die Ergebnisse von nicht-gravitativen Experimenten unabhängig davon sind, wann und wo im Universum sie durchgeführt werden. Eine Konsequenz hieraus ist, dass die relativistischen Einflüsse auf den Gang von Uhren in einem Inertialsystem unabhängig davon sein müssen, welches Prinzip und welcher Oszillator der Uhr zugrunde liegt. Dies lässt sich testen, indem die Gravitationsrotverschiebung verschiedener Uhren miteinander verglichen wird. Die stärkste in einem irdischen Labor vorhandene Änderung des Gravitationspotentials wird im Jahresgang durch

den elliptischen Umlauf der Erde um die Sonne erzeugt. Den möglichen differentiellen Einfluss auf zwei unterschiedliche Uhren kann man als $\Delta f/f = (\beta_1 - \beta_2) \Delta\Phi/c^2$ ansetzen, wobei β_1 und β_2 zwei Uhren-spezifische Parameter sind. In der Allgemeinen Relativitätstheorie gilt $\beta_1 = \beta_2 = 1$ für alle Uhren. Die jährliche Änderung des Terms $\Delta\Phi/c^2$ beläuft sich auf $\pm 3,3 \cdot 10^{-10}$. Mehrere Vergleichsexperimente mit Cäsiumfontänen, Wasserstoffmasern und neuerdings auch optischen Uhren, wurden hierzu durchgeführt. Eine signifikante jährliche Änderung von $\Delta f/f$ wurde bisher nicht beobachtet und die strengste obere Grenze für $|\beta_1 - \beta_2|$ liegt zur Zeit bei $5,8 \cdot 10^{-6}$ [24].

Ein Thema, das in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erlangt hat, ist die Suche nach zeitlichen Veränderungen der Naturkonstanten. Ein solcher Effekt wird – zumindest qualitativ – von möglichen Modellen der Quantengravitation vorhergesagt, und auch er würde das Äquivalenzprinzip verletzen. Die Fragestellung ist von offensichtlicher Bedeutung für die Metrologie, da die Postulate der Universalität und Unveränderlichkeit der Naturkonstanten die Grundlage für die praktisch so erfolgreiche Verwendung von Quantennormalen bilden [25]. Im Jahr 2001 wurde von einer Gruppe von Astrophysikern eine Datenauswertung publiziert, die auf eine relative Änderung der Feinstrukturkonstanten α um etwa $6 \cdot 10^{-6}$ während der letzten 5 bis 10 Milliarden Jahre hindeutet [26]. Die Analyse beruht auf kleinen Verschiebungen in der Lage von Spektrallinien verschiedener Metallionen in interstellaren Wolken, die im Licht weit entfernter Quasare beobachtet werden. Seitdem haben mehrere Gruppen zusätzliche Daten aufgenommen und eine Vielzahl von Spektren untersucht. Die heutige Situation ist die einer ungelösten Kontroverse: einige Gruppen schließen eine Veränderung von α in der genannten Größenordnung aus, andere Beobachtungen scheinen auf sogar noch größere Veränderungen in einer anderen Naturkonstante, dem Massenverhältnis von Elektron und Proton hinzudeuten. Atomuhren sind sehr gut geeignet, um Laborexperimente zu dieser Fragestellung durchzuführen. Die Feinstrukturkonstante beeinflusst die atomaren Übergangsfrequenzen insbesondere bei schweren Atomen aufgrund relativistischer Beiträge zu den Zustandsenergien. Durch einen Frequenzvergleich zwischen verschiedenen atomaren Frequenzen über einen bestimmten Zeitraum kann daher auf mögliche Änderungen von α während dieser Zeit geschlossen werden. Daten mit der erforderlichen hohen Genauigkeit sind erst seit einigen Jahren von optischen Uhren verfügbar, aber mit einer relativen Unsicherheit von unter 10^{-15} erreichen diese Experimente für eine angenommene lineare Drift von α eine Empfindlichkeit, die die der astronomischen



Bild 8:
Die transportable Cäsium-Fontänenuhr FOM des LNE-SYRTE in einem Labor des CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) in Toulouse bei Vorbereitungen der ACES-Weltraummission. (Foto: LNE-SYRTE, Paris)

Beobachtungen übertrifft, die dafür aber einen kosmologischen Zeitraum überblicken. Alle bisherigen Uhrenexperimente sind im Einklang mit der Konstanz der Naturkonstanten und die daraus abgeleitete Grenze für $d\alpha/dt$ liegt aktuell im Bereich von einigen 10^{-17} pro Jahr [6].

Die beschriebenen Experimente zur Suche nach Verletzungen des Äquivalenzprinzips nutzen die jeweils höchste verfügbare Genauigkeit der Atomuhren aus und sie sind nur möglich, da es genaue Atomuhren verschiedenen Typs gibt, die auf unterschiedlichen atomaren Übergängen basieren. Bisher liefern die Experimente Nullresultate mit Unsicherheiten, die direkt von den Uhren bestimmt sind. Fortschritte in der Genauigkeit der Uhren werden hier also unmittelbar zu aussagekräftigeren Experimenten führen.

7 Uhren im Weltraum

Es gibt mindestens drei Gründe, die es nahe legen, Uhren im Weltraum zu betreiben:

- (i) Uhren sind unerlässlich für die Navigation, sowohl um Positionssignale für Benutzer auf der Erde zur Verfügung zu stellen (siehe oben), wie auch für die Bahnbestimmung der Raumsonden selber.
- (ii) Uhren können für die Untersuchung der Gravitation auf großen Längenskalen eingesetzt werden, wenn man sie in eine Erdumlaufbahn bringt oder auf interplanetaren Sonden platziert.
- (iii) Eine „Hauptuhr“ in einer Erdumlaufbahn könnte die Aufgabe vereinfachen, eine präzise terrestrische Zeitskala darzustellen und global zu verbreiten.

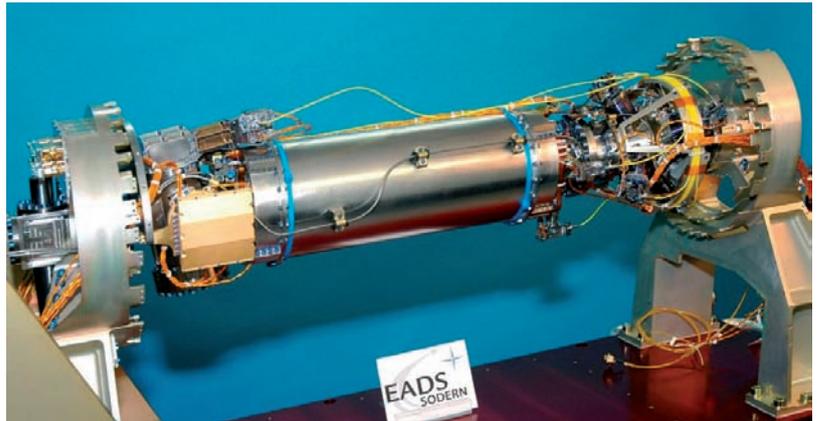
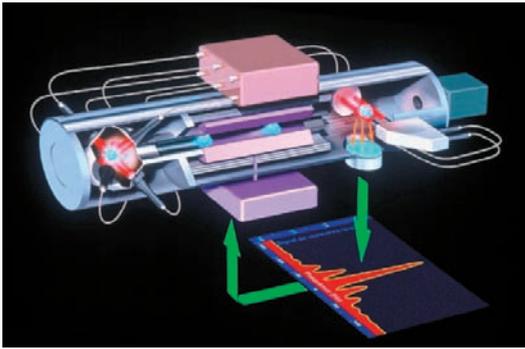
Für die Anwendung (i) stehen raumfahrtprobierte transportable Atomuhren zur Verfügung (s. Abschnitt 4). Idee (ii) ist die Motivation für einige laufende und vorgeschlagene Raumfahrtmissionen, von denen einige im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen. Das Ziel (iii) einer primären Uhr im Weltraum ist besonders

Bild 9:
Das Cäsium-Frequenznormal PHARAO. Die Zeichnung links zeigt die Regionen für das Erzeugen und den Nachweis kalter Cäsiumatome in einem Vakuumsystem. Während der freien Flugphase passieren die Atome einen Mikrowellenresonator zur Anregung der atomaren Resonanz. Mit zwei Laserstrahlen (rechts) wird anschließend die Besetzung der beiden Hyperfeinniveaus bestimmt. Die Fotografie rechts zeigt das Vakuumsystem von PHARAO ohne magnetische Abschirmung. Im vollständig montierten Zustand hat das System ein Volumen von 148 l und eine Masse von 44 kg. (Bild und Foto: ESA, Nordwijk)

anspruchsvoll, denn eine solche Uhr wird nur dann Akzeptanz finden, wenn ihre Unsicherheit und Zuverlässigkeit mit der der besten stationären Uhren in Laboratorien konkurrieren kann. Die Erdumlaufbahn dieser Uhr müsste zentimetergenau verfolgt werden, um die benötigten relativistischen Korrekturen anbringen zu können. Ein möglicher Vorteil hierbei ist es, dass das Gravitationspotential in der Umlaufbahn besser zu modellieren sein dürfte als auf der Erdoberfläche, wo es Schwankungen durch die Gezeiten und geologische und atmosphärische Veränderungen unterliegt.

Das am weitesten fortgeschrittene Projekt mit dem Ziel, eine Atomuhr höchster Präzision (10^{-16}) in eine Erdumlaufbahn zu bringen, ist ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*) [27], ein gemeinsames Projekt der European Space Agency (ESA) und des CNES mit einem geplanten Starttermin im Jahr 2013. ACES soll an der internationalen Raumstation ISS angebracht werden und enthält das Cäsium-Frequenznormal PHARAO und einen aktiven Wasserstoffmaser.

fahrtmissionen wurden daraufhin eingereicht, darunter 12 aus dem Bereich der Grundlagenphysik mit mehr oder weniger direktem Bezug zu Uhren. Eine der größeren dieser Studien ist SAGAS (*Search for Anomalous Gravitation with Atomic Sensors*), vorgeschlagen von mehr als 70 Wissenschaftlern unter der Federführung von P. Wolf vom LNE-SYRTE [28]. Das Konzept basiert auf der Kombination eines Beschleunigungssensors mit kalten Atomen mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}^2$, einer optischen Uhr mit einem gespeichertem Ion (relative Unsicherheit $1 \cdot 10^{-17}$) und einem Laser für die Zeitübertragung zur Erde und für die Navigation. Aufgebaut wird dieses Ensemble auf einer Raumsonde, die in einer Missionsdauer von 20 Jahren den äußeren Bereich des Sonnensystems (etwa 50 astronomische Einheiten AU) erreichen soll. Die Instrumente an Bord ergänzen sich, um empfindliche Messungen aller Aspekte der Gravitation durch ihre Auswirkung auf Uhren, Licht und den freien Fall von Testmassen zu ermöglichen. Die wissenschaftlichen Ziele



PHARAO (s. Bild 9) verwendet lasergekühlte Cs-Atome ähnlich wie in einer Cs-Fontäne, nutzt aber erheblich längere Wechselwirkungszeiten von einigen Sekunden, die durch den Betrieb in Schwerelosigkeit möglich werden. Die wissenschaftlichen Ziele liegen sowohl im Bereich von Grundlagenuntersuchungen, wie auch von Anwendungen in der Zeitübertragung oder in der Geodäsie: Tests der Relativitätstheorie sollen mit erhöhter Genauigkeit durchgeführt werden und Vergleiche zwischen entfernten Uhren auf der Erde werden präziser. Mit zwei Uhren hoher Genauigkeit kann hier eine neue Form „relativistischer Geodäsie“ erprobt werden, die auf einem Vergleich der Gravitationsrotverschiebung beruht und so Unterschiede im Gravitationspotential der Erde mit einer Höhenauflösung von 10 cm messbar macht (s. Abschnitt 5).

Im Jahr 2007 wurde von der ESA ein Aufruf für Vorschläge unter dem Titel „Cosmic Vision 2015–2025“ gestartet. 50 Konzepte für Raum-

beinhalten Tests der Rotverschiebung und der Zeitdilatation mit um 4 bis 5 Größenordnungen verbesserter Genauigkeit, eine Messung der Lichtablenkung bei Abdeckung der Sonde durch die Sonne mit 100fach verbesserter Genauigkeit und eine Suche nach Abweichungen vom Gravitationsgesetz auf großen Längenskalen mit einer Empfindlichkeit, die es erlauben soll, einen Effekt wie die Pioneer-Anomalie mit einer Unsicherheit von 1% innerhalb eines Jahres nachzuweisen. Die Pioneer-Anomalie ist eine bisher unerklärte zusätzliche Beschleunigung von $9 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$, die bei den Raumsonden Pioneer 10 und 11 bei Abständen von 20–50 AU beobachtet wurde.

In der ersten Auswahlrunde der ESA ist keine der vorgeschlagenen Missionen aus dem Bereich der Grundlagenphysik erfolgreich gewesen, teilweise aufgrund von Zweifeln, ob die benötigte technische Ausgereiftheit der Schlüsselkomponenten erreichbar wäre. Es ist zu hoffen,

dass das wissenschaftliche Potential, das in den Vorschlägen sichtbar wurde, nun gemeinsame Anstrengungen der Raumfahrtagenturen, der Forschungsinstitute und der Industrie in Gang setzt, um diese Situation zu verbessern.

8 Zusammenfassung

Die Genauigkeit von Cäsium-Atomuhren wurde um etwa einen Faktor 10 pro Jahrzehnt verbessert, seitdem die erste Uhr dieser Art 1955 in Betrieb ging. In den letzten Jahren haben optische Uhren nun die Führung in der Genauigkeit übernommen, basierend auf atomaren Spektrallinien im Bereich von sichtbarem Licht anstelle von Mikrowellen. In diesem Beitrag haben wir versucht darzustellen, in welchen Bereichen der Wissenschaft verbesserte Uhren benötigt werden, um beispielsweise die Gültigkeit der Relativitätstheorie, die Konstanz der Naturkonstanten und die Eigenschaften von Millisekunden-Pulsaren zu untersuchen. Diese Fragestellungen werden mit einer relativ kleinen Zahl von Uhren bearbeitet werden, anders als in Anwendungen des täglichen Lebens wie Satellitennavigation oder Netzwerksynchronisation. Hier sind die Anforderungen an verbesserte Uhren auch in Parametern wie Zuverlässigkeit, Größe und Energieverbrauch zu finden und wesentliche Entwicklungsanstrengungen werden in diese Richtungen unternommen. Die Realisierung einer Atomuhr „auf dem Chip“ erscheint durchaus möglich. Wie bei vielen sich schnell entwickelnden Technologien ist auch die Entwicklung neuer Uhren zum Teil von den Anforderungen neuer Anwendungen und zum Teil von reiner wissenschaftlicher Neugier getrieben. Einem innovativen Arbeitsgebiet tut es meistens gut, wenn eine Mischung aus beiden Motivationen vorhanden ist und sich entfalten kann.

Literatur

- [1] Standard definitions of physical quantities for fundamental frequency and time metrology. IEEE-Std 1189–1988 (1988).
- [2] A. Bauch, B. Fischer, T. Heindorff, R. Schröder: Performance of the PTB reconstructed primary clock CS1 and an estimate of its current uncertainty. *Metrologia* 35, 829(1998).
- [3] R. Wynands, S. Weyers: Atomic fountain clocks. *Metrologia* 42, S64 (2005).
- [4] B. Guinot, F. Arias: Atomic time-keeping from 1955 to the present. *Metrologia* 42, S20 (2005).
- [5] Siehe "Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken" in dieser Ausgabe, S. 131.
- [6] T. Rosenband et al.: Frequency ratio of Al⁺ and Hg⁺ single-ion optical clocks: metrology at the 17th decimal place. *Science* 319, 1808 (2008).
- [7] P. Gill, F. Riehle: On secondary representations of the second. Proc. 20th European Frequency and Time Forum (Braunschweig 2006), S. 282.
- [8] <http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CCTF17.pdf>
- [9] Siehe „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123.
- [10] Global Positioning System: theory and applications, vol. 1 and 2. Hrsg.: B. W. Parkinson and J. J. Spilker jr., in: Progress in Astronautics and Aeronautics vol. 163, Am. Inst. of Aeronautics and Astronautics (1996).
- [11] J. Oaks, J. A. Buisson, M. M. Largay: A summary of the GPS constellation clock performance. Proc. 29th Ann. PTTI, S. 119 (2007).
- [12] A positioning system Galileo; strategic, scientific and technical stakes, Académie de Marine, Bureau des Longitudes, Académie nationale de l'Air et de l'Espace (Paris 2003).
- [13] J. Hahn et al.: GIOVE-A apparent clock assessment and results. Proc. 39th Ann. PTTI, S. 95 (2007).
- [14] Q. Wang, P. Mosset, F. Droz, P. Rochat, G. Busca: Verification and optimization of the physics parameters of the onboard Galileo passive hydrogen maser. Proc. 38th Ann. PTTI, S. 81 (2006); P. Waller et al.: In-Orbit Performance Assessment of GIOVE Clocks. Proc. 40th PTTI (2008).
- [15] S. Bedrich et al.: Design and performance of the precise timing facility for Galileo. Proc. 22nd European Frequency and Time Forum (Toulouse 2008).
- [16] A. Moudrak, H. Klein, B. Eissfeller: Future Time, Opportunities for using optical clocks in GNSS systems. Inside GNSS (Sept./Oct. 2008), 45.
- [17] H. Drewes: Science rationale of the Global Geodetic Observing System (GGOS). In: Dynamic Planet, Internat. Ass. Of Geodesy Symposia vol. 130, Hrsg.: P. Tregoning, C. Rizos, Springer (Berlin 2007) S. 703.
- [18] M. Fischer et al.: New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements. *Phys. Rev. Lett.* 92, 230802 (2004).
- [19] R. F. C. Vessot, M. W. Levine: A test of the equivalence principle using a space-borne clock. *J. Gen. Rel. and Grav.* 10, 181 (1979).
- [20] S. Reinhardt et al.: Test of relativistic time dilation with fast optical atomic clocks at different velocities. *Nature Physics* 3, 861 (2007).
- [21] I. H. Stairs: Testing General Relativity with Pulsar timing. *Living Rev. Relativity* 6, (2003); <http://www.livingreviews.org/lrr-2003-5>

- [22] *J. H. Taylor*: Millisecond Pulsars: Nature's most stable clocks. *Proc. IEEE* 79, 1054 (1991).
- [23] *C. M. Will*: Theory and experimentation in gravitational physics (rev. ed.), Cambridge University Press (Cambridge 1993).
- [24] *T. M. Fortier* et al.: Precision atomic spectroscopy for improved limits on variation of the fine structure constant and local position invariance. *Phys. Rev. Lett.* 98, 070801 (2007).
- [25] Siehe „Quantenlogik für die Präzisions-spektroskopie“ in dieser Ausgabe, S. 153.
- [26] *J. K. Webb* et al.: Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant, *Phys. Rev. Lett.* 87, 091301 (2001).
- [27] *Ch. Salomon* et al.: Cold atoms in space and atomic clocks: ACES. *C. R. Acad. Sci. Paris, t. 2, Série IV*, 1313 (2001).
- [28] *P. Wolf* et al.: Quantum physics exploring gravity in the outer solar system: The SAGAS project. *Experimental Astronomy* 23, 651 (2009).

Optische Uhren

Ekkehard Peik¹ und Uwe Sterr²

1 Einleitung

Die sehr präzise Zeit- und Frequenzmessung spielt eine große Rolle bei Experimenten zu Grundlagen der Physik und in Anwendungen des täglichen Lebens wie Navigation und Telekommunikation. Historisch waren die großen Fortschritte in der Genauigkeit der Zeitmessung (s. Bild 1) immer mit der Einführung eines neuen Typs von Uhren verbunden, der bei einer höheren Taktfrequenz arbeitete: Mechanische Uhren ticken im Bereich von 1 Hz, Quarzuhren verwenden mechanische Schwingungen bei einigen 10 kHz und die ersten Atomuhren basierten auf Mikrowellenübergängen im Bereich 1–10 GHz. Nun steht ein weiterer Generationswechsel bevor: die Einführung der „optischen Uhr“, die bei der Frequenz von sichtbarem oder ultraviolettem Licht von ungefähr 10^{15} Hz arbeitet. Damit ist die Aussicht verbunden, die relative Genauigkeit von Atomuhren um einen Faktor 100 bis 1000 zu verbessern. Die höhere Frequenz erlaubt es, schneller festzustellen, welche Stabilität eine Uhr hat, d. h. inwieweit sie in einem gegebenen Zeitintervall die gleiche Anzahl von „Ticks“ produziert. Ist die Uhr stabil, kann auch eine Aussage über ihre Unsicherheit gemacht werden. Bei einer Atomuhr läuft dies stets auf die Frage hinaus, wie präzise sie die Übergangsfrequenz eines unter idealisierten Bedingungen beobachteten, also ungestörten und ruhenden Atoms wiedergibt.

Mit der hohen Frequenz waren aber auch zwei der wesentlichen Schwierigkeiten verbunden, die es auf dem Weg zu einer optischen Uhr zu überwinden galt: Erstens dürfen sich in einer präzisen Atomuhr die taktgebenden Atome während der Wechselwirkung nur um weniger als eine Wellenlänge der abfragende Strahlung bewegen, um die Dopplerverschiebung zu vermeiden. Zweitens müssen die Perioden der atomaren Übergangsfrequenz zählbar sein. Dies ist Grundvoraussetzung für eine präzise Messung und die Realisierung einer Zeitskala. Offensichtlich sind diese Kriterien für Mikrowellen einfacher zu erfüllen als im optischen Spektralbereich. Cäsiumuhren (Übergangsfre-

quenz 9,19 GHz), auf denen die Realisierung der Sekunde im internationalen Einheitensystem (SI) beruht [1], und Wasserstoffmaser (1,42 GHz) waren daher seit den 1950er Jahren bei präzisen Messungen von Zeit und Frequenz dominierend. Erst in den letzten Jahren ist es gelungen, mit op-

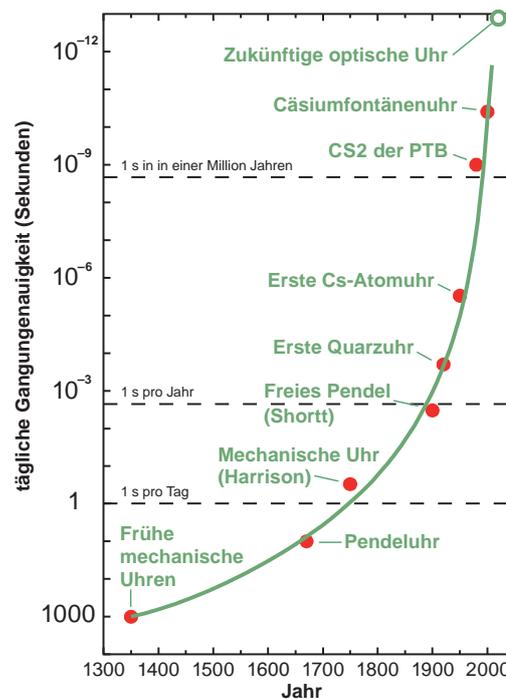


Bild 1:
Historische Entwicklung
der Genauigkeit von
Uhren

tischen Uhren höhere Stabilität und Genauigkeit zu demonstrieren. Möglich wurde dies durch die Anwendung der Laserkühlung und das Fangen der Atome in Fallen [2, 3], durch die Entwicklung von Lasern mit Kohärenzzeiten von bis zu 1 s und durch die Erfindung des optischen Frequenzkamm-Generators [4], der das fehlerfreie Zählen einer Laserfrequenz erlaubt.

2 Aufbau einer optischen Uhr

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer optischen Atomuhr. Die gefangenen neutralen Atome oder Ionen legen mit einer ihrer Absorptionslinien die Referenzfrequenz f_0 fest. Diese möglichst ungestörte Linie wird mit dem Licht

¹ Dr. Ekkehard Peik, Fachbereich „Zeit und Frequenz“, PTB Braunschweig, E-Mail: ekkehard.peik@ptb.de

² Dr. Uwe Sterr, Arbeitsgruppe „Quantenoptik mit kalten Atomen“, PTB Braunschweig, E-Mail: uwe.sterr@ptb.de

eines sehr frequenzstabilen „Uhrenlasers“ mit der Frequenz f abgefragt. Abhängig von der Verstimmung zwischen Laserfrequenz und der atomaren Absorptionsfrequenz ändert sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom angeregt wird. Bei den modernen Uhren geht der Abfrage eine Phase der Laserkühlung voraus. Die Absorptionssignale werden daher nicht kontinuierlich, sondern zyklisch wenige Male pro Sekunde beobachtet. Mit Hilfe dieses Absorptionssignals soll die Laserfrequenz genau auf der Mitte der Absorptionslinie gehalten werden. Dazu wird die Laserfrequenz abwechselnd etwas oberhalb und unterhalb der Resonanz eingestrahlt. Ist dabei die Absorption unterschiedlich, bedeutet dies eine Abweichung der mittleren Laserfrequenz von der Mitte der atomaren Referenzlinie, und die Laserfrequenz wird entsprechend korrigiert.

Der optische Frequenzkamm-Generator übernimmt die Aufgabe des „Uhrwerks“, das die Laserfrequenz von etwa 10^{15} Hz auf zählbare Frequenzen herunterteilt. Elektronisch können diese optischen Frequenzen nicht verarbeitet und geteilt werden, so dass bis vor wenigen Jahren noch aufwendige, hintereinander geschaltete Frequenzvervielfacher benutzt wurden, um optische Frequenzen mit elektrisch zählbaren zu vergleichen [5]. Durch die Erfindung des optischen Frequenzkamm-Generators (Nobelpreis 2005 für T. Hänsch und J. Hall [4]) ist der Vergleich jetzt deutlich vereinfacht. Das Verfahren beruht darauf, dass das Spektrum bestimmter Kurzpuls-Laser aus einem breiten Kamm von Frequenzen besteht, deren Abstand genau der Puls-wiederholrate f_{rep} entspricht (Bild 3). Bei diesen Lasern zirkuliert ein Lichtpuls im Laserresonator und bei jedem Umlauf wird ein Teil des Pulses ausgekoppelt und der Verlust durch die Verstärkung im aktiven Medium wieder ausgeglichen. Aufgrund der Dispersion im Resonator ist die Gruppen- und die Phasengeschwindigkeit unterschiedlich, so dass zwar die Einhüllende des Pulses streng periodisch mit der Repetitionsrate f_{rep} emittiert wird, die Phase sich aber von Puls zu Puls ändert. Aus der Fourier-Zerlegung der Pulsfolge ergibt sich, dass dadurch der gesamte Frequenzkamm um die Schlupffrequenz f_{CEO} verschoben wird. Mit den beiden Frequenzen

f_{rep} und f_{CEO} , die im Hochfrequenzbereich liegen, ist die optische Frequenz f_m jeder Linie des Kammspektrums berechenbar:

$$f_m = m \cdot f_{\text{rep}} + f_{\text{CEO}}$$

Die Frequenz des Uhrenlasers ergibt sich dann über den Frequenzabstand zur nächsten Linie des Kammspektrums. Optische Kammgeneratoren sind inzwischen sehr zuverlässig und als optisches Uhrwerk so genau, dass sie nicht mehr die Genauigkeit der optischen Uhr begrenzen [6].

Eine wichtige Eigenschaft einer Uhr ist die Stabilität ihrer Taktrate. Bei jeder Abfrage der Absorptionslinie tritt zusätzliches Rauschen auf, weil die Laserfrequenz statistisch durch Umgebungseinflüsse schwankt und die Reaktion der Atome fundamentale quantenmechanische Schwankungen aufweist. Durch dieses zusätzliche Rauschen stimmt die Laserfrequenz nie

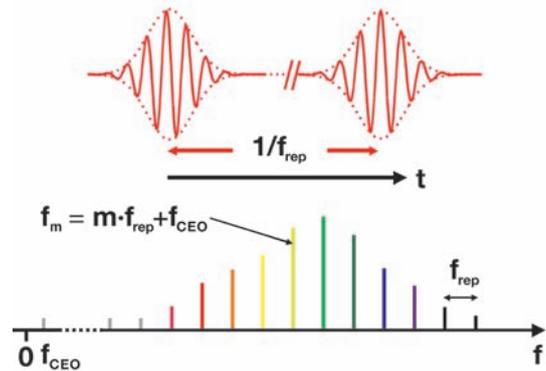


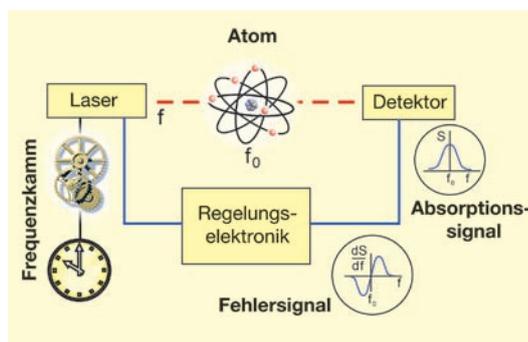
Bild 3: Pulsfolge eines Femtosekunden-Lasers (oben) und dazugehöriges Frequenzspektrum (unten)

perfekt mit der Absorptionsfrequenz der Atome überein und erst durch Mittelung vieler Messungen ergibt sich eine immer genauere Übereinstimmung beider Frequenzen. Die dazu erforderliche Zeit hängt vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis und von der aufgelösten Linienbreite ab.

Die relative Frequenzstabilität der besten Mikrowellen-Cäsiumatomuhren [1] beträgt bei einer Sekunde Mittelungszeit $\delta f/f \approx 1,6 \cdot 10^{-14}$. Sind die Schwankungen von Abfrage zu Abfrage unkorreliert, verbessert sich die Stabilität mit der Wurzel der Anzahl der Messungen. Um eine relative Stabilität von 10^{-17} zu erreichen, wäre daher eine Mittelungszeit von etwa 12 Tagen erforderlich.

Damit ist jedoch noch nicht sichergestellt, dass die Frequenz auch wirklich mit der ungestörten Frequenz der Atome übereinstimmt. Mögliche Verschiebungen können z.B. durch den Doppler-Effekt aufgrund einer Bewegung der Atome hervorgerufen werden. Auch elek-

Bild 2: Prinzipieller Aufbau einer optischen Uhr



trische oder magnetische Felder oder Stöße der Atome können die Frequenz verändern. Die Entwicklung immer besserer Uhren erfordert also die Kunst, diese Einflüsse immer weiter zu reduzieren oder sie zumindest sehr genau zu kennen und korrigieren zu können. Hier hilft die höhere Frequenz der optischen Uhren, da bei vielen dieser Effekte die Größe der Frequenzverschiebung nahezu unabhängig von der Absolutfrequenz ist und damit bei steigender Frequenz relativ gesehen immer weniger stört.

Da auch die absolute Linienbreite bei einer festen Beobachtungsdauer unabhängig von der Arbeitsfrequenz ist, wird auch die Stabilität der optischen Uhren entsprechend höher sein. Damit können viele der möglichen systematischen Verschiebungen durch Variation der Umgebungsbedingungen viel schneller gemessen werden. Bei den zur Zeit besten optischen Uhren liegt die Stabilität bei 10^{-15} in einer Sekunde, so dass für eine auf 17 Stellen genaue Messung nur noch circa 3 Stunden gemittelt werden muss.

2.1 Linienbreiten atomarer Absorptionslinien

Die Eigenschaften einer optischen Uhr werden entscheidend bestimmt durch die Eigenschaften der als Referenz benutzten atomaren Absorptionslinie. Atome besitzen Energiezustände, die unter anderem durch die Bahndrehimpulse und den Eigendrehimpuls der Elektronen und des Atomkerns charakterisiert sind. Übergänge zwischen den Energieniveaus sind im Allgemeinen mit der Absorption oder Emission von Lichtquanten verbunden.

Die sogenannte natürliche Linienbreite Δf der Strahlung ergibt sich durch die Fourier-Transformierte einer mit der Lebensdauer Δt gedämpften Schwingung gemäß

$$2\pi \cdot \Delta f \cdot \Delta t = 1 .$$

Bei „erlaubten“ optischen Übergängen beträgt die typische Lebensdauer des angeregten Niveaus etwa 10 Nanosekunden und entspricht damit einer natürlichen Linienbreite von 16 MHz.

Man unterscheidet zwischen „erlaubten“ und „verbotenen“ Übergängen. Da das Photon einen Eigendrehimpuls von $1 \cdot \hbar$ besitzt, sind aufgrund der Drehimpulserhaltung als elektrische Dipolstrahlung nur solche Übergänge erlaubt, bei denen sich der Bahndrehimpuls der Elektronenhülle um nicht mehr als \hbar ändert. Alle anderen Übergänge werden als „verboten“ bezeichnet. Beispielsweise kann das Photon in Multipolstrahlung höherer Ordnung auch einen Bahndrehimpuls tragen. Wegen der im Vergleich zur Wellenlänge geringen Größe der Atome werden Absorptions- und Emissionsprozesse mit zunehmender Multipolordnung aber immer unwahrscheinlicher. Im optischen Spektralbe-

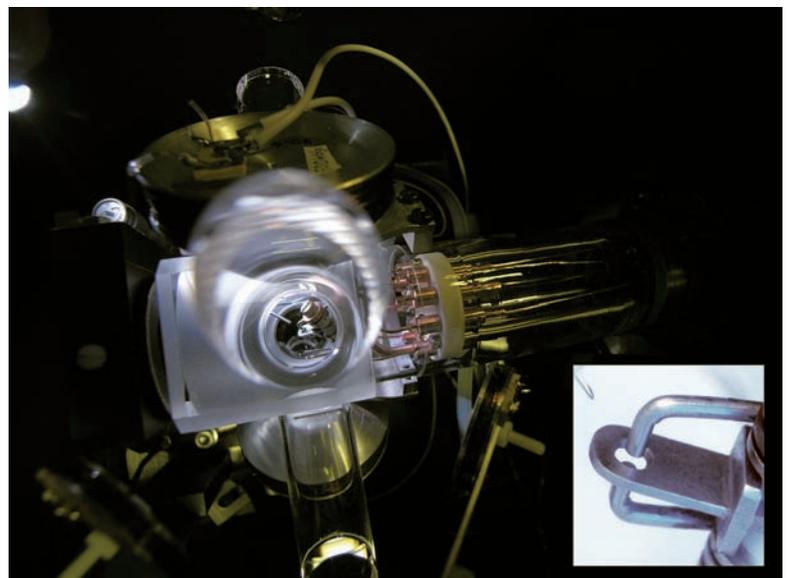
reich besitzt ein elektrischer Quadrupolübergang typischerweise eine Lebensdauer im Bereich von 100 ms beziehungsweise eine Linienbreite im Bereich einiger Hertz.

Ist der Drehimpuls in beiden Zuständen gleich Null, so kann aufgrund der Drehimpulserhaltung gar kein Photon emittiert werden. Erst durch die Wechselwirkung mit weiteren Feldern wie beispielsweise dem Magnetfeld des Atomkerns oder einem externen Magnetfeld kann der Drehimpuls bereitgestellt werden. Im Idealfall sind die beobachteten Linienbreiten durch die Wechselwirkungszeit begrenzt. Bei der Cs-Fontänenuhr ist die Wechselwirkungszeit durch den freien Fall im Gravitationsfeld der Erde auf ca. 1 s begrenzt; die Atome bewegen sich dabei auf einer Parabel mit 1 m Scheitelhöhe. Für optische Uhren ist dieses Fontänenprinzip wegen der viel kleineren Wellenlänge nicht geeignet. Um trotzdem lange Wechselwirkungszeiten und dadurch kleine Linienbreiten zu erreichen, speichern die neuen optischen Uhren neutrale Atome oder Ionen in elektromagnetischen Feldern.

3 Optische Uhr mit einem gespeicherten Ion

Die Anforderung an die Lokalisierung lassen sich bei Ionen sehr gut erfüllen, denn ein Ion besitzt mit seiner Ladung gewissermaßen einen

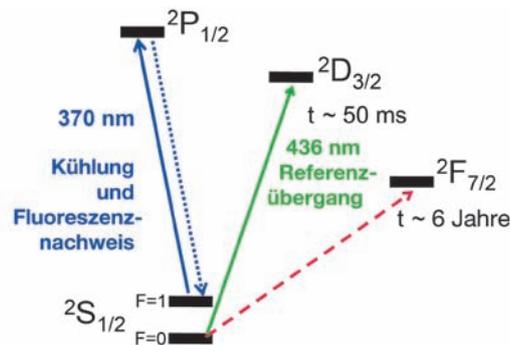
Bild 4:
Paul-Falle, die an der PTB für die optische Uhr mit Yb^+ verwendet wird. Im Zentrum der Glas-Vakuumpumpe sind die Elektroden der Falle zu sehen (vergrößertes Teilbild). Die Ringelektrode hat einen Durchmesser von 1,4 mm. (Fotos: PTB/Okerland-Archiv)



Griff, über den Kräfte ausgeübt werden können, ohne die innere Niveaustuktur wesentlich zu stören. Dies gilt insbesondere für die untersten Energieniveaus von positiven Ionen, die hier betrachtet werden. Die Paul-Falle [2] ermöglicht es, ein einzelnes Ion im feldfreien Sattelpunkt eines oszillierenden Quadrupolpotentials zu halten. Bei den in optischen Uhren eingesetzten Fallen beträgt die Tiefe des erzeugten Potentialtopfs typischerweise einige Elektronenvolt – etwa das Hundertfache der thermischen En-

ergie bei Raumtemperatur – so dass die Ionen über lange Zeiten stabil gespeichert bleiben. An der PTB wurde bereits über 16 Monate lang mit demselben $^{171}\text{Yb}^+$ -Ion experimentiert. Bereits mit der einfachsten Methode der Laserkühlung lässt sich die kinetische Energie des Ions in den Millikelvinbereich absenken. Hierfür genügt ein einziger, etwas unterhalb der Resonanzfrequenz abgestimmter Laserstrahl. Durch den Dopplereffekt absorbiert das in der Falle schwingende Ion Photonen bevorzugt in der Halbperiode, in der es dem Laser entgegenläuft. Der damit verbundene Strahlungsdruck dämpft die Bewegung des Ions. Mit dieser so genannten Dopplerkühlung wird die Bewegungsamplitude in der Falle auf einige zehn Nanometer reduziert und somit eine gute Lokalisierung auf der Skala der optischen Wellenlänge erreicht. Mit weitergehenden Methoden der Laserkühlung kann das Ion auch bis in den Schwingungsgrundzustand der Falle gekühlt werden, so dass Lokalisierung und Bewegung bis zu der von der quantenmechanischen Unschärferelation gesetzten Grenze kontrolliert sind.

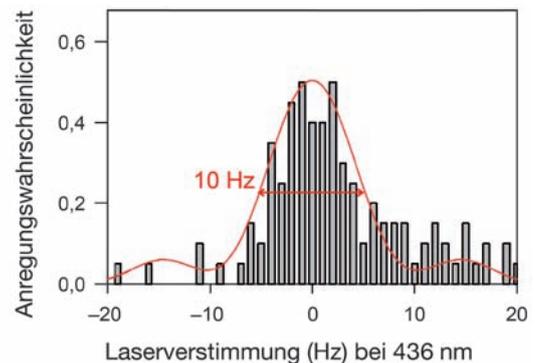
Bild 5:
Vereinfachtes Niveauschema von $^{171}\text{Yb}^+$ (links) mit dem Kühlübergang bei 370 nm und dem Referenzübergang der Uhr bei 436 nm. Rechts: Anregungsspektrum des Referenzübergangs mit einer Linienbreite von 10 Hz und einer spektralen Auflösung $f/\Delta f$ von $7 \cdot 10^{13}$. Die rote Kurve zeigt die für ideale Bedingungen erwartete Anregungswahrscheinlichkeit.



Für den Betrieb der optischen Uhr wird ein Doppelresonanzverfahren verwendet, bei dem mit zwei Lasern zwei Übergänge vom Grundzustand aus angeregt werden. Ein „erlaubter“ Übergang ermöglicht die Laserkühlung und die Beobachtung der Fluoreszenz des Ions. Bei einem elektrischen Dipolübergang mit einigen Nanosekunden Lebensdauer des angeregten Zustands kann das Ion innerhalb weniger Millisekunden nachgewiesen werden. Der zweite Übergang, der Referenzübergang der Uhr, ist ein „verbotener“ Übergang zu einem metastabilen Niveau. Eine Anregung in dieses Niveau verhindert die weitere Streuung von Photonen auf dem Kühlübergang. Diese setzt erst wieder ein, nachdem das Ion in den Grundzustand zurückgekehrt ist. Die vorangehende Dunkelphase liefert somit ein sicheres Signal für die Anregung des Ions auf dem Referenzübergang. Um eine Frequenzverschiebung dieses Übergangs durch das Licht des Kühllasers zu vermeiden, werden Referenz- und Kühlübergang abwechselnd angeregt.

Ein einzelner Messzyklus mit einem Ion liefert also nur eine 1-bit-Information (die Anregung ist entweder erfolgt oder nicht) und hat so, wenn die Abfrage in der Flanke der Spektrallinie bei einer Anregungswahrscheinlichkeit von 50% erfolgt, auch nur ein Signal-Rausch-Verhältnis von Eins. Mit einer kontinuierlichen Folge solcher Messungen ist es aber möglich, eine Uhr zu realisieren, die selbst in der Kurzzeitstabilität den besten Cäsiumuhren etwa zehnmal überlegen ist: Erfolgt die Abfrage nämlich innerhalb 1 Sekunde mit einer Auflösung von 1 Hz bei einer Frequenz von 10^{15} Hz, so entspricht dies bereits einer Stabilität von 10^{-15} .

Die Stärke des Konzepts der Einzelionen-Uhr liegt in der Einfachheit: Ein ruhendes Atom im Ultrahochvakuum erlaubt die präzise Kontrolle aller (erwünschten oder störenden) Wechselwirkungen mit der Außenwelt. Auch Stöße mit dem Restgas können als Einzelereignisse registriert und der entsprechende Zeitabschnitt von der Erzeugung des Regelsignals der Uhr ausgeschlossen werden. Die grundlegenden Ideen der Einzelionen-Uhr – Speicherung eines



Ions in der Paul-Falle, Laserkühlung und die Doppelresonanzspektroskopie – wurden bereits in den 1970er Jahren von Hans Dehmelt vorgeschlagen [2]. 1978 wurde dann erstmals die Speicherung und Kühlung eines einzelnen Ions im Experiment gezeigt. Heute arbeiten weltweit etwa ein Dutzend Gruppen in diesem Bereich. Bemerkenswert ist hierbei die Vielfalt der untersuchten Elemente, die Ca^+ , Sr^+ , Al^+ , In^+ , Hg^+ und Yb^+ umfasst. Alle diese Kandidaten haben spezielle Vor- und Nachteile und es gibt bisher keinen Konsens darüber, welches Ion das „beste“ optische Frequenznormal ermöglichen wird. Das angestrebte Ziel wurde ebenfalls bereits von Dehmelt formuliert, nämlich eine relative Unsicherheit im Bereich von 10^{-18} .

Mit dem $^{171}\text{Yb}^+$ -Ion arbeitet die Gruppe an der PTB [7] und auch das britische National Physical Laboratory. Ein vereinfachtes Niveauschema dieses Ions mit dem Kühlübergang $2S_{1/2} - 2P_{1/2}$ und dem Referenzübergang $2S_{1/2} - 2D_{3/2}$ ist in Bild 5 zu sehen. Die beiden Übergangswellenlängen im blauen bzw. ultravioletten Spektral-

bereich können durch Frequenzverdopplung von Halbleiterlasern erreicht werden. Da das D-Niveau sich im Bahndrehimpuls um $2\hbar$ vom Grundzustand unterscheidet, ist ein elektrischer Dipolzerfall nicht möglich. Es zerfällt unter Aussendung von elektrischer Quadrupolstrahlung und besitzt eine Lebensdauer von 51 ms. Damit ergibt sich für den Referenzübergang eine natürliche Linienbreite von 3,1 Hz. Das Isotop ^{171}Yb besitzt einen Kernspin von $\frac{1}{2}\hbar$ und somit einen Grundzustand mit verschwindendem Gesamt-

Wechselwirkung mit dem Kernspin kann aber ein schwacher Zerfall möglich werden und man erhält eine schmale Resonanzlinie. Deren Frequenz wird nur sehr wenig durch äußere Felder beeinflusst und ist daher als Basis eines Frequenznormals besonders gut geeignet. Das Al^+ -Ion wird am NIST, dem Metrologieinstitut der USA, untersucht [8]. Eine Besonderheit ist hier, dass dieses Ion keinen mit heutiger Lasertechnik erreichbaren Kühlübergang besitzt. Das oben beschriebene Doppelresonanzschema

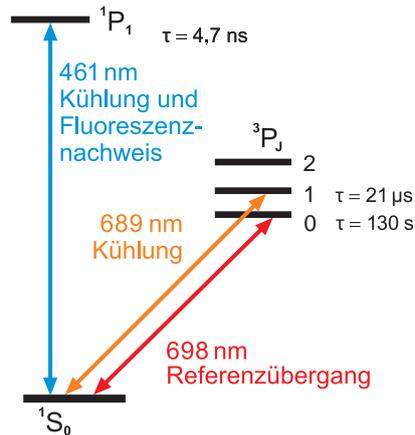
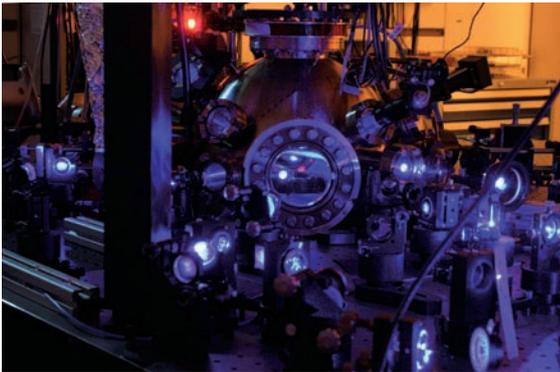


Bild 6: Vakuumkammer der Strontium-Gitteruhr der PTB (links). Die gefangenen Atome sind als blau leuchtender Fleck im Innern der Kammer zu erkennen. Rechts: Ausschnitt aus dem Niveauschema des Strontiumatoms mit den für die Uhr relevanten Absorptionslinien

drehimpuls, der es erlaubt, eine Komponente des Referenzübergangs anzuregen, die gegen magnetfeldabhängige Frequenzverschiebungen durch den linearen Zeeman-Effekt immun ist.

Bild 5 zeigt rechts ein Anregungsspektrum des Referenzübergangs $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{D}_{3/2}$ von $^{171}\text{Yb}^+$, bei dem der 436 nm-Laser mit 90 ms-Pulsen eingestrahlt wurde. Man erhält eine von dieser Pulsdauer bestimmte Linienbreite von 10 Hz, entsprechend einer Liniengüte $f/\Delta f$ von $7 \cdot 10^{13}$. Für jeden Datenpunkt wurde über 20 Anregungszyklen gemittelt. Das im Spektrum sichtbare Rauschen resultiert überwiegend aus der Zählstatistik. Die maximale Anregungsrate von etwa 50% ist bereits durch den Zerfall des D-Zustands während des Anregungspulses begrenzt, so dass es auch nicht hilfreich wäre, für eine geringere Linienbreite noch längere Anregungspulse zu verwenden. Eine Besonderheit von Yb^+ ist ein noch unter dem D-Niveau liegendes F-Niveau, das nur durch Oktupolstrahlung zerfallen kann und daher eine extrem lange Lebensdauer von etwa 6 Jahren besitzt. Dieser Übergang würde es erlauben, die Linienbreite bis zu der durch die Laserlinienbreite gesetzten Grenze weiter zu verringern.

Eine andere Art von verbotenen Übergang wird bei Al^+ , bei In^+ und auch in den optischen Gitteruhren (s. u.) verwendet. Hier ist sowohl im Grundzustand $^1\text{S}_0$ wie auch im ersten angeregten Zustand $^3\text{P}_0$ der Elektronendrehimpuls gleich Null. Aufgrund der Drehimpulserhaltung ist ein solcher Übergang in allen Multipolordnungen des Strahlungsfeldes verboten. Durch

ist daher nicht anwendbar und man verwendet eine aufwändigere aber auch sehr flexible Technik, die aus dem Bereich der Quantenlogik entlehnt ist: Ein Al^+ -Ion wird gemeinsam mit einem „Kühlion“ (in diesem Fall Be^+) in einer Falle gespeichert und die Kühlung und der Zustandsnachweis geschieht durch die gekoppelte Schwingungsbewegung der beiden Ionen und die Laseranregung des Be^+ -Ions [9, 10].

Die zuverlässigste Weise, Aussagen über Stabilität und Genauigkeit von neuen, verbesserten Uhren zu erhalten, ist ein Vergleich von mindestens zwei unabhängigen Systemen. An der PTB wurden dazu zwei Yb^+ -Fallen aufgebaut. Tatsächlich stimmten beide Realisierungen der Übergangsfrequenz von 688 THz bis auf eine Differenz von 0,26 Hz überein. Die Differenz ist nicht signifikant, sondern liegt im Rahmen der relativen Unsicherheit der Messung von $6 \cdot 10^{-16}$ [7]. Mit diesem Experiment lassen sich innerhalb weniger Minuten Frequenzverschiebungen im Bereich von 10^{-15} nachweisen, die von äußeren Einflüssen an einem der beiden Ionen hervorgerufen werden. Mit einer Cäsiumuhr wäre dafür ein halber Tag erforderlich. Am NIST wurden kürzlich zwei Uhren miteinander verglichen, die auf unterschiedlichen Ionen (Al^+ und das dem Yb^+ ähnliche Hg^+) basieren. Da beide Uhren genauer als Cäsiumuhren sind und die Differenzfrequenz hier nicht Null ist, ist eine Angabe des Vergleichsergebnisses in der SI-Einheit Hertz nicht mehr optimal. Als Ergebnis der Messung lässt sich aber das Frequenzverhältnis als reine Zahl angeben. Diese wurde mit einer Unsicher-

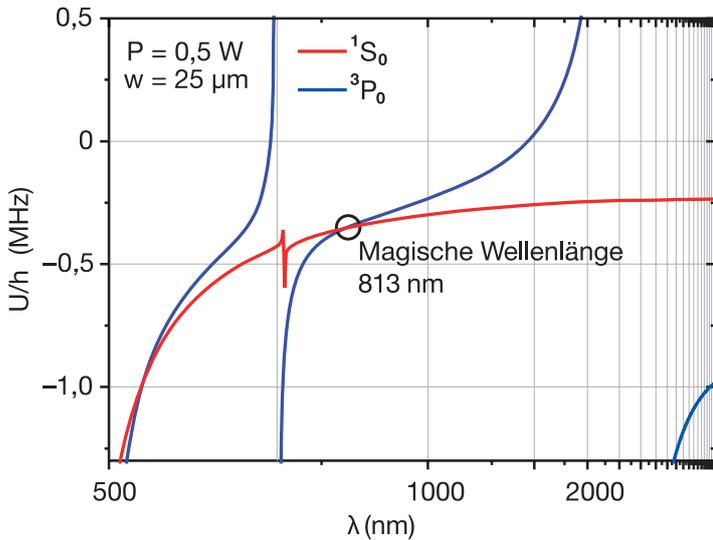


Bild 7:
Verschiebung der beiden
Energieniveaus des
Referenzübergangs einer
Sr-Gitteruhr als Funktion
der Wellenlänge des
Fallenlasers

heit von nur $5 \cdot 10^{-17}$ bestimmt [9]. Keine andere messbare Größe in der Natur ist mit derartig vielen signifikanten Stellen bekannt.

4 Optische Gitteruhren

Bei einzelnen Ionen ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis dadurch begrenzt, dass nur ein Teilchen abgefragt wird. Werden gleichzeitig viele Ionen in einer Paul-Falle gespeichert, führt ihre elektrische Wechselwirkung zu einer Verschlechterung der Lokalisierung. Bei neutralen Atomen ist die gegenseitige Störung viel geringer.

Auf neutrale Atome wirken in einem homogenen elektrischen Feld keine Kräfte. Das Feld kann aber den positiv geladenen Atomkern und den negativen Ladungsschwerpunkt der Elektronenhülle gegeneinander verschieben und so ein elektrisches Dipolmoment d induzieren, das proportional zum angelegten Feld E ist: $d = \alpha \cdot E$. Das induzierte Dipolmoment wechselwirkt mit dem äußeren Feld mit einer Energie

$$U = -\frac{1}{2} \cdot d \cdot E = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot E^2,$$

die im inhomogenen Feld zu einer auf das Atom wirkenden Kraft führt. Ein Dipolmoment wird nicht nur durch ein elektrostatisches Feld, sondern auch durch das Wechselfeld eines intensiven Lasers induziert. Dabei ist der Betrag und das Vorzeichen der Wechselwirkungsenergie von der Lage der Laserfrequenz relativ zu atomaren Resonanzen abhängig. Analog zu einem klassischen getriebenen Oszillator ist der atomare Dipol unterhalb der Resonanz in Phase mit dem angelegten Feld, darüber aber in Gegenphase. Im ersten Fall wird das Atom in Bereiche hoher Feldstärke gezogen, im zweiten Fall in Bereiche niedriger Feldstärke. Im Gegensatz zur Speicherung eines Ions in einer Paul-Falle ist die Wechselwirkungsenergie im Allgemeinen für die beiden atomaren Zustände des Referenzübergangs unterschiedlich, so dass die Übergangsfrequenz durch das Fallenfeld verschoben wird.

Je nach Energiezustand des Atoms tragen verschiedene Übergänge zum Wechselwirkungspotential bei. Bild 7 zeigt dies für die beiden Zustände des Referenzübergangs der Strontium-Uhr. Die Wellenlängenabhängigkeit des Grundzustandspotentials (rot) ist durch die starke Absorptionslinie bei 462 nm bestimmt, die des oberen Zustands durch Absorptionslinien in höher angeregte Niveaus bei 690 nm und 2300 nm. Beide Kurven schneiden sich bei ca. 813 nm – der so genannten „magischen Wellenlänge“. Bei dieser Wellenlänge können die Atome durch inhomogene Felder in den Bereichen hoher Feldstärke gespeichert werden, ohne dass die Frequenz des Referenzübergangs verschoben wird.

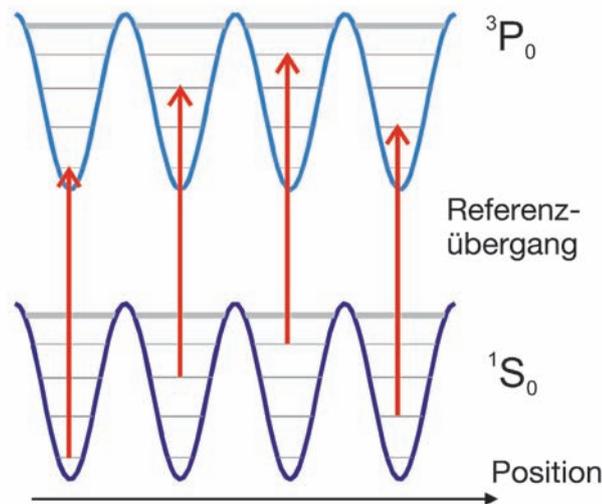
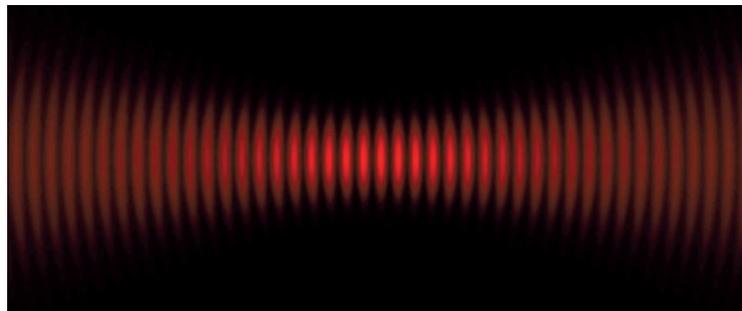
Die Dopplerverschiebung wird – wie bei den Ionenfallen – unterdrückt, wenn die Bewegung der Atome in Richtung des Abfragelasers auf deutlich weniger als eine Wellenlänge eingeschränkt ist. Das dazu notwendige steile Fallenpotential kann durch Interferenz mehrerer Laserstrahlen erzeugt werden. Im einfachsten Fall reicht hierzu ein in sich zurückreflektierter Laserstrahl. In dem resultierenden Stehwellenfeld wechseln sich dunkle Bereiche und solche maximaler Intensität mit einer Periode der halben Wellenlänge ab – ein so genanntes optisches Gitter (Bild 8). Die Anwendung dieser speziellen optischen Gitter bei einer magischen Wellenlänge für optische Uhren wurde 2001 von H. Katori vorgeschlagen [11]. Die Potentialminima, in denen Atome gespeichert werden, liegen im Bereich der höchsten Intensität der Stehwelle. Senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Fallenlaserstrahlen hat das Potential aufgrund der Fokussierung der Strahlen eine Ausdehnung im Bereich von $100 \mu\text{m}$. Da das Potential auf dem induzierten Dipolmoment beruht, ist die Potentialtiefe viel geringer als in Ionenfallen. Typische Potentialtiefen entsprechen einer Temperatur von $100 \mu\text{K}$, so dass die Atome zum Einfang mittels Laserkühlung auf wenige Mikrokkelvin abgekühlt werden müssen. Zudem reicht schon ein Stoß mit einem heißen Molekül des Restgases aus, um ein Atom aus der Falle herauszustoßen. Die Speicherzeit der Atome im Ultrahochvakuum (10^{-8} Pa) beträgt daher nur wenige Sekunden, und für jeden Abfragezyklus müssen neue Atome geladen werden.

Für diesen Typ optischer Uhren sind – ähnlich dem oben erwähnten Al^+ – besonders Atome mit zwei Valenzelektronen geeignet, bei denen Übergänge zwischen dem Grundzustand (Elektronenspins antiparallel ausgerichtet) und dem niedrigsten Triplettzustand (Elektronenspins parallel) ausgenutzt werden. Beide Zustände besitzen einen Gesamtdrehimpuls von $J = 0$. Für optische Gitteruhren werden zur Zeit Magnesium, Strontium, Ytterbium und Quecksilber untersucht.

Die zur Zeit besten dieser Uhren arbeiten mit ^{87}Sr [11,12] und werden in Boulder, Paris, Tokio, Florenz und an der PTB untersucht. Ihr Referenzübergang $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ liegt bei 698 nm und die Lebensdauer des angeregten Zustands beträgt 130 s, entsprechend einer natürlichen Linienbreite von 1,2 mHz (Bild 6). Strontiumatome werden in einem Ofen im Ultrahochvakuum verdampft, mit Laserlicht auf dem erlaubten $^1\text{S}_0 - ^1\text{P}_1$ -Übergang bei 461 nm abgebremst und in einer magnetooptischen Falle auf eine Temperatur von wenigen Mikrokkelvin abgekühlt. In einem optischen Gitter mit der „magischen Wellenlänge“ von 813 nm werden dann $10^3 - 10^4$ Atome gespeichert; pro Potentialminimum entspricht das etwa 10–100 Atomen.

Wichtig für den Betrieb einer Gitteruhr ist eine genaue Bestimmung der magischen Wellenlänge. Dazu wird die Leistung des Fallenlasers verändert und durch Vergleich mit einem Referenzlaser die entsprechende Verschiebung des Referenzübergangs gemessen. Da bei der magischen Wellenlänge die Leistungsabhängigkeit ihr Vorzeichen wechselt, ist so eine sehr genaue Einstellung möglich. Die Empfindlichkeit der Referenzfrequenz beträgt ca. 1 Hz pro Gigahertz Verstimmung des Gitterlasers. Durch Vergleich mit einer optischen Calcium-Atomuhr konnten verschiedene frequenzverschiebende Effekte genau untersucht werden. Damit wurde die relative Unsicherheit der untersuchten optischen Strontium-Uhr zu $1,5 \cdot 10^{-16}$ abgeschätzt [12]. Die

Bild 8:
Das einfachste optische Gitter entsteht durch einen in sich zurückreflektierten Laserstrahl. Schematische Intensitätsverteilung (oben) und Potentialverlauf mit Vibrationsniveaus (unten)



Durch Laserkühlung auf der schmalen Linie $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ mit 7 kHz Linienbreite können die Atome in der stark gebundenen Richtung in den quantenmechanischen Grundzustand gekühlt werden. In der schwächer gebundenen Richtung senkrecht zum Fallenlaserstrahl besetzen die Atome noch einige höhere Vibrationsniveaus. Weil die Bewegung aber senkrecht zur Richtung des Abfragelaserstrahls stattfindet, wird die Anregung des Referenzübergangs dadurch nicht beeinflusst. Trotz unterschiedlicher Aufbauten stimmen die Frequenzen der Sr-Gitteruhren in Boulder, Tokio und Paris auf besser als 2 Hz miteinander überein [13].

Stabilität betrug $2 \cdot 10^{-15}$ in einer Sekunde Mittelungszeit, begrenzt durch die Linienbreite des Abfragelasers.

Der größte Beitrag zur Unsicherheit der Sr-Uhr ist eine Verschiebung der Zustände durch Schwarzkörperstrahlung. Ihr Spektrum hat bei Raumtemperatur ein Maximum bei einer Wellenlänge von $10 \mu\text{m}$. Wie aus Bild 7 zu ersehen ist, ist im Bereich dieser Wellenlänge die Verschiebung der beteiligten Niveaus unterschiedlich. Aus einer genaueren Rechnung ergibt sich bei $T = 300 \text{ K}$ eine relative Frequenzverschiebung von $2 \cdot 10^{-15}$, die wegen der Unsicherheit der atomphysikalischen Parameter und der Messung der Temperaturverteilung in der Umgebung

der Atome nur näherungsweise korrigiert werden kann. Da der Effekt von der vierten Potenz der Temperatur abhängt, kann sein Beitrag zur Unsicherheit in Zukunft durch Kühlung der zentralen Teile des Fallenaufbaus auf kryogene Temperaturen stark verringert werden.

5 Ausblick

Wir haben Experimente beschrieben, die zeigen, dass optische Uhren hinsichtlich Stabilität und Genauigkeit den Atomuhren überlegen sind, die im Mikrowellenbereich arbeiten. Allerdings muss bemerkt werden, dass bisher die maximale kontinuierliche Betriebsdauer der optischen Uhren nur einige Tage beträgt und damit eine praktische Definition der Uhr als „etwas, das die Zeit anzeigt“ noch nicht vollkommen erfüllt ist. Cäsiumuhren machen seit über 40 Jahren die Sekunde zu der mit Abstand am genauesten realisierten SI-Basiseinheit und sie sind in vielen Anwendungen unentbehrlich. Kürzlich wurden die Einzelionen-Uhren mit Hg^+ , Yb^+ , Sr^+ und die Gitteruhr mit Sr vom Internationalen Komitee für Maß und Gewicht als so genannte „sekundäre Realisierungen der Sekunde“ empfohlen. Dies kann als ein erster Schritt in Richtung auf eine zukünftige Neudefinition der Sekunde mittels eines optischen Frequenznormals gesehen werden.

Kann man die eingangs geführte Argumentation „höhere Frequenz führt zu höherer Genauigkeit“ noch weiter extrapolieren, so dass es irgendwann in der Zukunft eine auf 10^{-21} genaue Uhr mit Röntgenstrahlung geben wird? Tatsächlich bieten elektromagnetische Kernübergänge (man denke an die Mößbauer-Spektroskopie) einige Vorteile für noch genauere Uhren, wenn auch die benötigten kohärenten Strahlungsquellen dafür noch fehlen.

Eine große Herausforderung stellt allerdings schon der Vergleich zweier räumlich getrennter Uhren mit einer Genauigkeit von 10^{-18} dar: eine Frequenzverschiebung dieser Größenordnung ergibt sich durch den Doppler-Effekt bereits bei einer Relativbewegung von einigen Mikrometern pro Tag oder durch die Gravitationsrotverschiebung bei einer Höhendifferenz von 1 cm im Schwerfeld der Erde. So können Uhren von reinen Zeitmessern zu empfindlichen Sonden für ihre relativistische Umgebung werden und weitere Anwendungsfelder erschließen [14].

Literatur

- [1] Siehe z. B.: *A. Bauch*: Zeitmessung mit Fontänen. *Physik in unserer Zeit* 32, 268 (2001); *R. Wynands, S. Weyers*: Atomic Fountain Clocks. *Metrologia* 42, 64 (2005).

- [2] *W. Paul*: Electromagnetic traps for charged and neutral particles. *Rev. Mod. Phys.* 62, 531 (1990); *H. Dehmelt*: Experiments with an isolated subatomic particle at rest. *Rev. Mod. Phys.* 62, 525 (1990).
- [3] *S. Chu*: The manipulation of neutral particles. *Rev. Mod. Phys.* 70, 685 (1998); *C. Cohen-Tannoudji*: Manipulating atoms with photons. *Rev. Mod. Phys.* 70, 707 (1998); *W. D. Phillips*: Laser cooling and trapping of neutral atoms. *Rev. Mod. Phys.* 70, 721 (1998).
- [4] *J. L. Hall*: Defining and measuring optical frequencies. *Rev. Mod. Phys.* 78, 1279 (2006); *T. W. Hänsch*: Passion for precision. *Rev. Mod. Phys.* 78, 1297 (2006).
- [5] *H. Schnatz, B. Lipphardt, J. Helmcke, F. Riehle, G. Zimmer*: First phase-coherent frequency measurement of visible radiation. *Phys. Rev. Lett.* 76, 18 (1996).
- [6] *P. Kubina, P. Adel, F. Adler, G. Grosche, T. W. Hänsch, R. Holzwarth, A. Leitenstorfer, B. Lipphardt, H. Schnatz*: Long term comparison of two fiber based frequency comb systems. *Opt. Express* 13, 904 (2005); *G. Grosche, B. Lipphardt and H. Schnatz*: Optical frequency synthesis and measurement using fibre-based femtosecond lasers. *Eur. Phys. J. D* 48, 27 (2008).
- [7] *T. Schneider, E. Peik, Chr. Tamm*: Sub-Hertz optical frequency comparisons between two trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions. *Phys. Rev. Lett.* 94, 230801 (2005).
- [8] *T. Rosenband et al.*: Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place. *Science* 319, 1808 (2008).
- [9] *P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, D. J. Wineland*: Spectroscopy using quantum logic. *Science* 309, 749 (2005).
- [10] Siehe „Quantenlogik für die Präzisions-spektroskopie“ in dieser Ausgabe, S. 153.
- [11] *M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, H. Katori*: An optical lattice clock. *Nature* 435, 321 (2005).
- [12] *A. D. Ludlow et al.*: Sr lattice clock at $1 \cdot 10^{-16}$ fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock. *Science* 319, 1805 (2008).
- [13] *S. Blatt et al.*: New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clocks. *Phys. Rev. Lett.* 100, 140801 (2008).
- [14] Siehe „Wozu brauchen wir genauere Uhren?“ in dieser Ausgabe, S. 112

Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken

Dirk Piester¹ und Harald Schnatz²

1 Einführung

Die am genauesten messbaren physikalischen Größen, Zeit und Frequenz, werden in nahezu allen Bereichen hochentwickelter Technik beispielsweise in der Form von präzisen zeitlichen Steuerungen oder als Referenzfrequenzen benötigt. So haben Verbesserungen in der Realisierung und Verteilung dieser Größen direkten Einfluss auf Innovation, Wissenschaft und Technik sowie nicht zuletzt auf das tägliche Leben; technische Anwendungen finden sich insbesondere in den Bereichen Kommunikation und Navigation. In Telekommunikationsnetzwerken, Militär- und Wissenschaftseinrichtungen und in den metrologischen Instituten werden heute hunderte von Atomuhren betrieben.

Ein Arbeitsschwerpunkt vieler nationaler Metrologieinstitute ist die Entwicklung neuer Atomuhren, die Erzeugung von Zeitskalen und die Verbreitung von Zeitinformation. In einem weltweiten Verbund dieser Institute tragen gegenwärtig etwa 250 Atomuhren zur Stabilität der internationalen Atomzeitskala TAI bei. Für die Einhaltung ihres Skalenmaßes, der SI-Sekunde, sind weltweit ein knappes Duzend Cäsium-Fontänenuhren im Einsatz. Sie haben eine relative Unsicherheit von weniger als 10^{-15} und in den nächsten fünf Jahren scheint eine weitere Verbesserung bis in den unteren 10^{-16} -Bereich möglich [1]. Im Gegensatz zu diesen „klassischen“ Atomuhren, die atomare Übergänge im Mikrowellenbereich als Referenz nutzen, basiert die neueste Generation von Uhren auf der Anregung von Referenzübergängen im optischen Spektralbereich durch Laser. Diese sogenannten „optischen Uhren“ können eine relative Genauigkeit besser als 10^{-17} und eine Kurzzeitstabilität (Allan-Standardabweichung) von $\sigma_y = 10^{-15} (\tau/s)^{-1/2}$ erreichen [2].

Abhängig von der Anwendung können Atomuhren ganz unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und die Techniken für die Übertragung und den Vergleich ihrer Signale müssen darauf abgestimmt sein. Einerseits werden dauerbetriebsfähige Anlagen für den Vergleich der weltweit verteilten, kontinuierlich arbei-

tenden Atomuhren benötigt. Andererseits werden Transferverbindungen mit extrem hoher Kurzzeitstabilität benötigt, um aussagekräftige Vergleiche zwischen optischen Uhren zu erhalten. Aufgrund dieser sehr unterschiedlichen Anforderungen werden gegenwärtig zwei komplementäre Ansätze verfolgt: Im weltweiten Netzwerk für den Vergleich von Atomuhren werden Mikrowellenverbindungen über Satellit verwendet und für die Vergleiche zwischen optischen Uhren Glasfaserverbindungen.

Für den Zeit- und Frequenzvergleich per Satellit gibt es gegenwärtig zwei Netzwerke: Eines verwendet das US-amerikanische *Global Positioning System* (GPS), das andere nutzt die Technik der Zwei-Weg-Zeit- und Frequenzvergleiche über geostationäre Telekommunikationssatelliten. Nachfolgend gehen wir zunächst kurz auf die GPS-gestützten Übertragungstechniken ein, um dann den gegenwärtigen Stand der Zwei-Weg-Technik genauer darzustellen. Abschließend diskutieren wir neue in der Entwicklung befindliche Verfahren, die die Stabilität der Zwei-Weg-Vergleiche deutlich verbessern sollen: Das *Atomic Clock Ensemble in Space* (ACES) und *Time Transfer by Laser Link* (T2L2). Diese für einen begrenzten Zeitraum ausgelegten Experimente dienen als Pilotprojekte für zukünftige satellitengestützte Zeit- und Frequenzübertragungssysteme.

Die Möglichkeit, Frequenzen über die ganze Breite des optischen Frequenzspektrums vergleichen zu können, ist von entscheidender Bedeutung für die Weiterentwicklung und Charakterisierung optischer Uhren. Im Grundsatz ist dieses Problem für lokale Vergleiche mit der Erfindung des Frequenzkammgenerators gelöst [3], mit dem Uhren heute mit einer relativen Unsicherheit im Bereich von 10^{-19} verglichen werden können [4]. Da aber keine der bisher realisierten optischen Uhren transportabel ist, würde ihre Weiterentwicklung enorm davon profitieren, verschiedene Systeme über Entfernungen bis zu 1500 km mit einer Auflösung von besser als 10^{-16} bei einer Mit-

¹ Dr. Dirk Piester, Arbeitsgruppe „Zeitübertragung“, PTB Braunschweig, E-Mail: dirk.piester@ptb.de

² Dr. Harald Schnatz, Arbeitsgruppe „Längeneinheit“, PTB Braunschweig, E-Mail: harald.schnatz@ptb.de

lungszeit von einem Tag zu vergleichen. Diese Ansicht wird auch durch eine Empfehlung des beratenden Komitees für Zeit und Frequenz (CCTF) des Internationalen Büros für Maß und Gewicht (BIPM) unterstützt [5]. Wir geben einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Entwicklung geeigneter Glasfaser-basierter Übertragungstechniken und beschreiben ein kürzlich durchgeführtes Experiment zur stabilen Übertragung einer optischen Trägerfrequenz (194 THz) von der PTB zum Institut für Quantenoptik (IQO) an der Leibniz Universität Hannover. Wir betrachten Entwicklungsmöglichkeiten für ein europäisches Glasfasernetzwerk für den Vergleich weit entfernter optischer Uhren und schließen mit einem Ausblick auf zukünftige Anwendungen hochgenauer Zeit- und Frequenzübertragungstechniken.

2 Uhrenvergleiche per Satellit

Messeinrichtungen für satellitengestützte Zeit- und Frequenzvergleiche gehören zur Grundausstattung jedes Zeitmetrologie-Labors. Diese Einrichtungen werden kontinuierlich betrieben und ermöglichen so, Stand- und Gangunterschiede von Atomuhren und Zeitskalen lückenlos über längere Zeiträume zu bestimmen. Sowohl GPS als auch Zwei-Weg-Verfahren werden für diese Frequenz- und Zeitskalenvergleiche verwendet, beispielsweise bei der eingangs beschriebenen Realisierung von TAI. Bei einer Mittelungszeit von einem Tag können Frequenzen mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-15} verglichen werden [6] und die Stände von Zeitskalen mit einer Unsicherheit von 1 ns [7].

2.1 Das Global Positioning System (GPS)

GPS ist zur Zeit das Standardverfahren für Zeit- und Frequenzvergleiche [8]. Das GPS-System besteht aus mindestens 24 Satelliten (31 im Oktober 2008), die sich auf drei Orbits mit einem Radius von 26 600 km bewegen, so dass praktisch an jedem Punkt auf der Erde mehr als vier Satelliten gleichzeitig über dem Horizont stehen. Jeder Satellit ist mit einer Cäsium- oder Rubi-

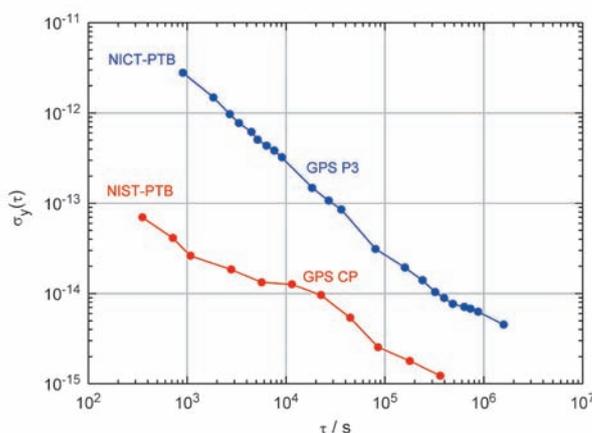
dium-Atomuhr ausgerüstet, die als Referenz für die zwei ausgesendeten Trägerfrequenzen dient (ca. 1600 MHz und ca. 1200 MHz). Diese sind mit Pseudozufallskodes phasenmoduliert, die für den jeweiligen Satelliten charakteristisch sind. Der so genannte *coarse acquisition code* moduliert den 1600 MHz-Träger mit einer Datenrate (*chip rate*) von 1 Mch/s, was einer Bandbreite von ca. 2 MHz entspricht. Der *precise code* hat eine Rate von ca. 10 Mch/s und wird auf beiden Trägern ausgesendet. Mit dem erstgenannten Kode wird die Navigationsinformation übertragen, eine Vorhersage des Satellitenorbits, ein Almanach der Satellitenkonstellation, eine Vorhersage der Satellitenuhren in Bezug auf die GPS-Systemzeit sowie ein Modell für die Ionosphäre [9]. Für Zeit- und Frequenzübertragungen werden die GPS-Signale empfängerseitig so dekodiert, dass ihre Ankunftszeit in Bezug auf eine lokale Referenzuhr bestimmt wird.

Falls die Positionen der Satelliten und Empfänger bekannt sind, können mit den Empfängern verbundene Uhren mit einer typischen Unsicherheit von 10 ns über den *coarse acquisition code* verglichen werden; der *precise code* ermöglicht eine Unsicherheit von 1 ns. Wird die Phase des Trägersignals ausgewertet, kann bei passender gewählter Mittelungszeit die Unsicherheit bis in den Bereich von 10 ps gesenkt werden [10]. Die jeweils tatsächlich erreichte Unsicherheit hängt natürlich noch von anderen Faktoren ab wie beispielsweise der Empfängergüte sowie der Vorhersagequalität der systematischen Messfehler: Die Laufzeit der Satellitensignale wird durch die Durchquerung der Ionosphäre und Troposphäre beeinflusst und sie kann sich auch durch Reflektionen im Umfeld der Empfangsantenne (z. B. Gebäude) ändern. Alle diese Einflüsse sind frequenzabhängig.

Für Zeit- und Frequenzvergleiche werden zwei Messkonfigurationen verwendet: In der klassischen *common view*-Konfiguration werden zwei Empfänger die Daten aus, die von demselben Satelliten zu einer bestimmten Zeit ausgesendet werden. Es ist offensichtlich, dass sich mit dieser Methode Einschränkungen ergeben, wenn der Abstand zwischen zwei Empfängern groß wird und so weniger Satelliten gemeinsam sichtbar sind. In der Praxis kann die maximale Entfernung mit ca. 10 000 km angesetzt werden. Mit dieser Methode werden die systematischen Fehler, die beide Empfänger betreffen, effektiv unterdrückt: Die Ungenauigkeit der Satellitenuhren und für kurze Entfernungen auch die Laufzeitänderungen durch atmosphärische Effekte.

Die *common view*-Bedingung entfällt, wenn statt der Satellitenuhren eine gemeinsame Zeitskala als Referenz verwendet wird. Eine geeignete sehr stabile Zeitskala (zur Zeit mit einer

Bild 1:
Instabilität (Allan-Standardabweichung als Funktion der Mittelungszeit) von interkontinentalen GPS-Frequenzvergleichen mit der PTB. Blau: Vergleich mit dem NICT (Japan) mittels *common view*-GPS mit Ionosphärenkorrektur durch Zweifrequenz-Empfang (P3-Verfahren [12]). Rot: Vergleich mit dem NIST (USA) mit Auswertung der Trägerphase (GPS-CP).



relativen Instabilität von 10^{-15} bei einer Mittelungszeit von einem Tag) wird über das Internet vom *International GNSS Service* (IGS) bereitgestellt. Bei Verwendung von Mehrkanalempfängern erlaubt die IGS-Zeit die Auswertung aller am jeweiligen Empfängerort sichtbaren Satelliten. Im Vergleich mit dieser so genannten *all in view*-Methode bietet die *common view*-Methode keine besonderen Vorteile. Interferenzen durch Reflektionen und Umgebungseinflüsse auf den Empfänger (z. B. Temperatur) bestimmen die mit der *all in view*-Methode erreichbare Unsicherheit.

Viele GPS-Empfänger können den *precise code* beider Sendefrequenzen dekodieren. Damit ist es möglich, die von der Ionosphäre verursachten Laufzeitänderungen näherungsweise zu korrigieren. Die auf diese Weise erreichte Stabilität zeigt der blaue Graph in Bild 1 am Beispiel eines internationalen Vergleichs [10].

Die besten Ergebnisse für GPS-basierte Frequenzvergleiche werden erzielt, wenn die Trägerphase der Satellitensignale ausgewertet wird. Damit kann ungefähr eine Größenordnung an Stabilität gewonnen werden (roter Graph in Bild 1) [11]. Die bisher verfügbare Auswertesoftware führt jedoch zu Phasensprüngen an den Tagesübergängen, die entfernt oder als zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag berücksichtigt werden müssen, wenn Uhren über eine längere Zeitspanne miteinander verglichen werden.

Ein aktuelles Entwicklungsgebiet liegt in der Kombination der Kode- und Träger-Informationen sowie der IGS-Zeitskala mit dem Ziel, auch echte Zeitübertragung mit der schon erreichten Stabilität der Frequenzübertragung zu ermöglichen. Ein viel versprechender Ansatz ist das so genannte *Precise Point Positioning*-Verfahren, das im Zusammenhang der Realisierung von TAI untersucht wird [12]. Die derzeit allgemein angenommene Unsicherheit für Zeitskalenvergleiche mittels GPS-Empfängern liegt im Langzeitbetrieb bei 5 ns und bietet somit noch Potenzial für Verbesserungen.

2.2 Zwei-Weg-Übertragung

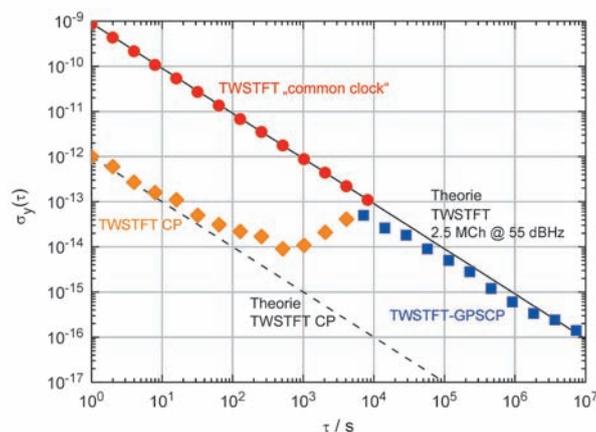
Zwei-Weg-Zeit- und Frequenzübertragung mit geostationären Satelliten (*Two-way satellite time and frequency transfer*, TWSTFT) ist die zweite Methode, mit der weit voneinander entfernte Atomuhren verglichen werden [13]. Der Hauptvorteil von Zwei-Weg-Methoden liegt darin, dass wegen der Reziprozität der Übertragung die Signallaufzeiten in erster Näherung nicht zur Vergleichsunsicherheit beitragen.

Für TWSTFT werden gegenwärtig hauptsächlich Kapazitäten von kommerziellen Satellitendiensten im Ku-Band (ca. 11 GHz – 14 GHz) sowie in einem Fall im X-Band (ca. 7 GHz – 8 GHz) verwendet. Zeitsignale werden ausgesendet, indem die Phase einer Pseudozufalls-

kode-Modulation mit dem Sekundenimpuls der lokalen Referenzuhr in Bezug gesetzt wird. Jede Station verwendet einen eigenen Kode und beim Empfang wird mit einer Zeitintervallmessung die Ankunftszeit des Signals relativ zur lokalen Uhr bestimmt. Einem Messplan folgend empfangen paarweise zwei Stationen das von der Gegenseite ausgesendete Signal und messen für eine bestimmte Dauer sekundlich die Ankunftszeiten. Die Standardabweichungen der zu vergleichenden Uhren werden entweder nach Abschluß der Meßsitzung und anschließendem Datenaustausch berechnet oder in Echtzeit durch die Übertragung der Messergebnisse über die Sendesignale.

In Bild 2 sind für einige TWSTFT-Tests die theoretisch erwarteten und erreichten Instabilitäten dargestellt. Um die Instabilität der Übertragungstechnik zu charakterisieren, müssen die Beiträge der beteiligten Uhren eliminiert werden. Dies ist möglich, indem zwei TWSTFT-Bodenstationen an einem Ort mit derselben Referenzuhr betrieben werden oder indem zwischen zwei getrennten Stationen parallel auch andere Übertragungsverfahren betrieben werden und die Differenzen der Vergleichsergebnisse ausgewertet werden. Entsprechende Daten sind in Bild 2 für den Vergleich zwischen GPS mit Messung der Trägerphase (CP) und TWSTFT dargestellt. Überraschenderweise ist hier die erreichte Stabilität sogar etwas besser als berechnet. Generell kann die Stabilität von TWSTFT durch eine Verbreiterung der Über-

Bild 2:
Instabilität (Allan-Standardabweichung als Funktion der Mittelungszeit) der Zwei-Weg-Zeitübertragungsverfahren TWSTFT und TWSTFT-CP (mit Trägerphasenmessung). Berechnungen und Messwerte beruhen auf TWSTFT-Signalen mit einer Chiprate von 2,5 Mch/s und einem nominellen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (link budget) von 55 dBHz.
Schwarze Linie: Berechnete TWSTFT-Instabilität.
Rote Punkte: Messungen zwischen zwei Bodenstationen mit gemeinsamer Referenzuhr.
Blaue Quadrate: Instabilität der Differenzen von TWSTFT- und GPS-CP-Daten bei einem Vergleich zwischen NIST (Colorado, USA) und PTB. Gestrichelte Linie: Berechnete Instabilität von TWSTFT-CP.
Orangefarbene Rauten: Gemessene TWSTFT-CP-Instabilität bei einem Vergleich zwischen USNO (Washington DC, USA) und PTB.



tragungsbandbreite weiter verbessert werden. Zur Zeit erhältliche TWSTFT-Modems können Chipraten bis zu 20 Mch/s verwenden. Diese werden allerdings wegen der deutlich höheren Transpondermiete zur Zeit nicht genutzt.

In Bild 2 sind außerdem erste Resultate eines TWSTFT-CP-Experiments zwischen dem United States Naval Observatory (USNO) in Washington DC (USA) und der PTB dargestellt. Dieses Verfahren hat das Potenzial für Frequenzvergleiche mit einer Instabilität von $\sigma_y(\tau) = 10^{-12} (\tau/s)^{-1}$. Wie in Bild 2 gezeigt, stimmen the-



Bild 3:
Geographische Verteilung aller Institute, die mit ihren Atomuhren zur internationalen Atomzeitskala TAI beitragen. Das jeweilige Symbol zeigt das beim Uhrenvergleich vorwiegend verwendete Verfahren an [17]. (Bild: BIPM)

oretische Vorhersage und Ergebnis für $\tau \leq 100$ s sehr gut überein [14]. Bei längeren Mittelungszeiten zeigt sich aber eine deutliche Verschlechterung, ein Zeichen dafür, dass hier andere Faktoren als Messrauschen die Stabilität limitieren. Dennoch konnte mit diesem ersten Experiment das hohe Entwicklungspotenzial von TWSTFT-CP gezeigt werden. Dieses Verfahren könnte auch für Vergleiche zwischen optischen Frequenznormalen attraktiv werden.

Die bei TWSTFT ausgenutzte Reziprozität der Übertragungswege gilt natürlich nur näherungsweise. Nicht vernachlässigbare nichtreziproke Änderungen der Signallaufzeit ergeben sich durch die Restbewegung des geostationären Satelliten, durch Laufzeitvariationen in den Bodenstationen und dem Satelliten sowie zu einem geringeren Anteil durch die etwas unterschiedlichen Sende- und Empfangsfrequenzen und die resultierenden unterschiedlichen Laufzeiten

in den Bodenstationen und im Satelliten werden durch sich ändernde Umgebungsbedingungen beeinflusst: Aufheizen des Satelliten durch die Strahlung der Sonne und wetterbedingte Temperatur- und Luftfeuchteänderungen in den Bodenstationen. Daher ist es für Bodenstationen empfehlenswert, möglichst viele der wichtigen Komponenten in einer klimatisch kontrollierten Umgebung unterzubringen. Dies gilt insbesondere für Weiterentwicklungen der TWSTFT-Methode.

2.3 Zeitübertragung für die internationale Zeitskala TAI

Das internationale Büro für Maß und Gewicht (BIPM) organisiert Uhren- und Zeitskalenvergleiche zwischen allen beteiligten Instituten in einem weltweiten Netzwerk. Dabei ist TWSTFT das bevorzugte Verfahren und es gewinnt mit zunehmender Zahl der teilnehmenden Bodenstationen weiter an Bedeutung [17]. In Bild 3 ist die derzeitige geographische Verteilung der Zeitmetrologie-Labors dargestellt, die mit ihren Uhren zur Atomzeitskala TAI beitragen. Die GPS-Zeitvergleiche bilden den weitaus größten Anteil und dienen außerdem als Reserve für die TWSTFT-Vergleiche. Seit der Einführung der *all in view*-Methode werden die Messdaten aller Labors auf einen zentralen Referenzpunkt bezogen. Diese Position nimmt zur Zeit die PTB ein.



Bild 4:
Bernd Blanzano von der TU Graz (links) und Jürgen Becker (PTB) justierten die Antenne der transportablen TWSTFT-Referenzstation der TU Graz während der letzten Kalibrierkampagne im September 2008. Die übrigen Antennen gehören zu den TWSTFT-Stationen der PTB.

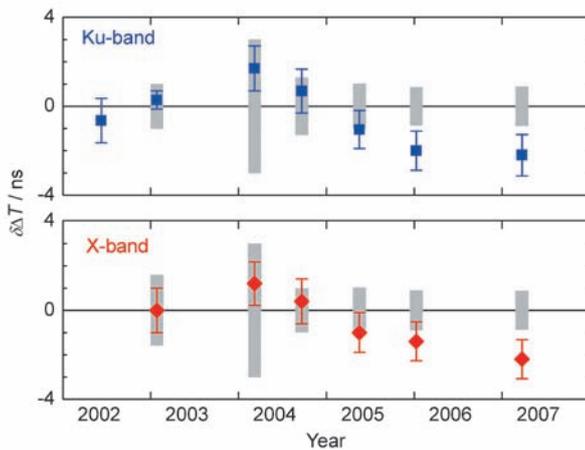


Bild 5:
In Kalibrierungen ermittelte differentielle Korrekturen für die beiden TWSTFT-Verbindungen (Ku-Band und X-Band) zum Vergleich der Zeitskalen von USNO und PTB. Die Fehlerbalken geben die Unsicherheiten der Kalibrierungen an. Die grauen Balken zeigen die aufgrund bekannter Störeffekte abgeschätzte Unsicherheit unmittelbar vor der Neukalibrierung.

Für kalibrierte GPS-Zeitvergleiche wird vom BIPM eine systematische Unsicherheit von 5 ns angenommen. Die Unsicherheit von Vergleichen mittels TWSTFT ist zur Zeit um einen Faktor 5 geringer. Die TWSTFT-Verbindungen zwischen einigen europäischen Labors und der PTB wurden mit Hilfe der transportablen TWSTFT-Station der Technischen Universität Graz wiederholt kalibriert (Bild 4). Teilnehmer der letzten Kampagne waren neben der PTB die TU Graz, NPL (Teddington, UK), OP (Paris, Frankreich), INRIM (Turin, Italien), METAS (Bern, Schweiz) und VSL (Delft, Niederlande). Bis jetzt wurde in jeder durchgeführten Kalibrierkampagne eine Unsicherheit im Bereich von 1 ns erreicht.

Erwähnenswert sind außerdem die Ergebnisse einer regelmäßigen Kalibrierung von zwei unabhängigen TWSTFT-Verbindungen im Ku-Band und X-Band zwischen USNO und PTB. Die in den einzelnen Kalibrierungen ermittelten differentielle Korrekturen sind in Bild 5 dargestellt. Für die Ku-Band-Verbindung beträgt der 5-Jahres-Mittelwert der Korrekturen $-0,46$ ns mit einer Standardabweichung von $1,43$ ns. Für die X-Band-Verbindung ergibt sich ein Mittelwert von $-0,50$ ns mit einer Standardabweichung von $1,26$ ns.

Die bisherigen Erfahrungen während dieser Kalibrierkampagnen zeigen, dass mit TWSTFT und den etablierten Messverfahren eine Zeitübertragungs-Unsicherheit von 1 ns gewährleistet werden kann. Die Reproduzierbarkeit der untersuchten Verbindungen liegt auf dem gleichen Niveau wie die abgeschätzte Unsicherheit. Aufgrund der hohen erreichbaren Genauigkeit wurde TWSTFT auch für das europäische Satellitennavigationssystem *Galileo* ausgewählt, um die beteiligten Bodensegmente zu

synchronisieren und die Differenz zwischen den *Galileo*- und GPS-Systemzeitskalen zu bestimmen.

2.4 T2L2 und ACES

Das Projekt T2L2 (*Time Transfer by Laser Link*) ist mit dem im Juni 2008 gestarteten Forschungs-satelliten Jason 2 geplant. Erste Experimente wurden bereits durchgeführt [18]. Das Konzept von T2L2 ähnelt dem der Laser-Telemetrie von Satellitenbahnen: Zum Vergleich von Atomuhren auf der Erde werden mit den zu vergleichenden Uhren synchronisierte Laserpulse zum Satelliten gesendet und von dort zurück reflektiert. Die entsprechenden Laufzeiten werden am Boden gemessen. Die Ankunftszeiten der Pulse am Satelliten werden relativ zu einer lokalen Uhr gemessen, die sich durch eine hohe Kurzzeitstabilität auszeichnet. Wie in Bild 6 dargestellt, beträgt die erwartete statistische Unsicherheit für Zeitvergleiche zwischen zwei terrestrischen Uhren ungefähr 1 ps bei einer Mittelungszeit von 1000 s. Damit würde dieses Verfahren eine ungefähr zehnmal höhere Stabilität ermöglichen als TWSTFT und GPS-CP. Allerdings ist wegen des niedrigen Orbitradius von 1300 km ein direkter (zeitgleicher) Vergleich über interkontinentale Entfernungen nicht möglich. Bei zeitlich versetzten Messungen wird die Vergleichsgenauigkeit durch die Instabilität der Satellitenuhr begrenzt.

ACES (*Atomic Clock Ensemble in Space*) ist ein Projekt der ESA, das darauf basiert, Atomuhren auf der internationalen Raumstation ISS in der dort herrschenden Mikrogravitationsumgebung zu betreiben. Die von den ACES-Atomuhren erzeugte Zeitskala wird mit einer hochstabilen Mikrowellenverbindung zur Erde übertragen.

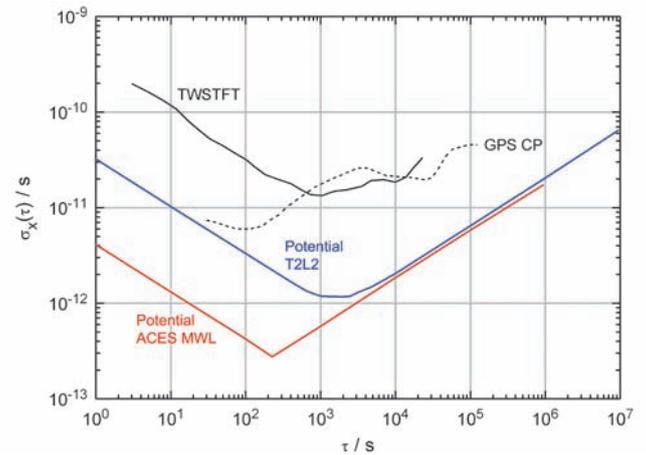


Bild 6:
Erwartete Instabilität σ_x (statistische Zeitabweichung als Funktion der Mittelungszeit) der Zeitübertragung durch Laserpulse im T2L2-Projekt und bei Nutzung der Mikrowellenübertragung zum ACES-Uhrenensemble auf der Internationalen Raumstation ISS [19]. Zum Vergleich sind typische Daten für Zeitübertragung mittels TWSTFT und GPS-CP dargestellt [18].

Die Übertragung erfolgt nach dem Zwei-Weg-Prinzip. Für die Signale von und zur ISS werden zwei Ku-Band-Kanäle mit Chipraten von 100 Mch/s verwendet. Mit einem zusätzlichen S-Band-Signal der ISS soll die Verzögerungszeit durch die Ionosphäre möglichst genau bestimmt werden [19]. Die erwartete Stabilität ist bei einer Mittelungszeit von 300 s besser als 300 fs (s. Bild 6). Mit dieser Mikrowellenverbindung wird es möglich sein, sowohl Uhren auf der Erde mit denen auf der ISS als auch Uhren auf der Erde miteinander zu vergleichen. Die hohe Stabilität der ISS-Uhren wird auch zeitlich versetzte Messungen mit einer Unsicherheit von weniger als 5 ps bei einer Mittelungszeit von 10^4 s ermöglichen.

3 Uhrenvergleiche per Glasfaser

Optische Uhren auf der Basis von lasergekühlten Atomen oder einzelnen Ionen erreichen gegenwärtig eine Kurzzeitstabilität im Bereich von $\sigma_y(\tau) \approx 10^{-15} (\tau/s)^{-1/2}$ [2]. Die bisher realisierten optischen Uhren sind nicht transportabel und sie benötigen eine Vergleichsmethode, die es erlaubt, die Instabilität der Uhren innerhalb von wenigen Minuten oder maximal einigen Stunden zu erreichen. Als Alternative zu Frequenzvergleichen per Satellit wird gegenwärtig die Nutzung optischer Verbindungen per Glasfaser intensiv untersucht [20]. Der beim Einsatz von Glasfasern in der Telekommunikation genutzte Wellenlängenbereich um $1.5 \mu\text{m}$ eignet sich besonders gut für die Überbrückung großer Entfernungen, da hier Signale mit geringstem Verlust übertragen werden können.

Einen Überblick über verschiedene Methoden für Frequenzvergleiche mittels Glasfaserverbindungen erhält man in [21]. Neben der Übertragung von Solitonen oder Femtosekundenlaserpulsen haben sich in letzter Zeit zwei andere Methoden etabliert: die Übertragung eines hochstabilen Hochfrequenzsignals durch Amplitudenmodulation einer optischen Trägerwelle [22] und die direkte Übertragung einer hochstabilen optischen Trägerfrequenz [23].

Mit der ersten Methode wurde über eine Strecke von 86 km eine relative Frequenzinstabilität im Bereich von 10^{-18} bei einer Mittelungszeit von einem Tag erreicht [24]. Für größere Entfernungen ergeben sich jedoch Probleme aufgrund der Signalabschwächung und der Dispersion der Glasfaser.

3.1 Übertragung einer optischen Trägerfrequenz

Die direkte Übertragung einer hochstabilen optischen Trägerfrequenz bietet den Vorteil, dass Stabilitätsverluste aufgrund der Konvertierung der Frequenz der optischen Uhr in den Hochfrequenzbereich und aufgrund von Verzerrungen

der übertragenen Modulation vermieden werden. Optische Uhren in weit voneinander entfernten Labors können miteinander verglichen werden, indem man die Strahlung eines schmalbandigen Dauerstrichlasers über eine Glasfaserverbindung in einem bereits bestehenden $1.5 \mu\text{m}$ -Telekommunikationsnetz überträgt und in beiden Labors die Frequenz dieses Transferlasers mit den lokalen optischen Uhren vergleicht. Mit Hilfe von Frequenzkammgeneratoren auf der Basis von Femtosekunden-Faserlasern kann das Frequenzverhältnis zwischen dem Transferlaser und der optischen Uhr auf relativ einfache Weise gemessen werden [25, 26]. In wenigen Stunden Messzeit kann ein solcher Frequenzvergleich eine relative Unsicherheit unter 10^{-17} erreichen [27].

Eine Bedingung für eine Übertragung mit großer Reichweite ist jedoch, dass die Kohärenzlänge des Laserlichts, das zur Übertragung verwendet wird, größer ist als die zu überbrückende Distanz. Anderenfalls limitiert das Frequenzrauschen des Lasers die Genauigkeit, mit der Änderungen der optischen Weglänge der Übertragungsstrecke während der Messung kompensiert werden können. Um die erforderliche Frequenzstabilität des Transferlasers (üblicherweise ein Faserlaser) zu gewährleisten, wird daher die lokale optische Uhr als Referenz benutzt.

Die Frequenz des Transferlasers lässt sich stabilisieren, indem man zunächst die Stabilität der optischen Uhr auf das Spektrum des Kammgenerators überträgt [2]. Anschließend nutzt man das Schwebungssignal zwischen Transferlaser und einer Mode des Kammspektrums, um den Laser auf den Kammgenerator und somit auf die optische Uhr zu stabilisieren.

Mit Femtosekunden-Faserlasern realisierte Kammgeneratoren überbrücken den Frequenzabstand zwischen den optischen Uhren, deren Frequenzen in der Regel im sichtbaren Bereich liegen, und dem im „Telekommunikationsfenster“ um $1.5 \mu\text{m}$ arbeitenden Transferlaser. Ohne aktive Stabilisierung weisen solche Kammgeneratoren allerdings ein erhebliches Phasenrauschen auf, das das Rauschen eines optischen Frequenznormalen um mehrere Größenordnungen übersteigen kann. Da sie außerdem nur eine Regelbandbreite von weniger als 100 kHz besitzen, ist es normalerweise schwierig, eine Frequenzstabilität unterhalb von $\sigma_y \approx 10^{-14} (\tau/s)^{-1/2}$ zu erreichen [28].

Um dieses Problem zu umgehen, wurde von H. Telle *et al.* ein Verfahren entwickelt, bei dem der Frequenzkammgenerator als Transferoszillator eingesetzt wird. Auf diese Weise lassen sich Laserfrequenzen in verschiedenen Spektralbereichen ohne Stabilitätseinbußen durch den Kammgenerator vergleichen [29]. Ein Frequenz-

vergleich zwischen weit entfernten optischen Uhren kann dann in drei Schritten erfolgen:

- (1) Die Frequenz des Transferlasers wird mittels Kammgenerator und einer optischen Uhr als Referenz stabilisiert. Die Laserfrequenz steht also in einem festen, genau bekannten Verhältnis zur optischen Uhr und hat die gleiche Frequenzstabilität.
- (2) Das Licht des Transferlasers wird als optisches Trägerfrequenzsignal über eine Singlemode-Glasfaserverbindung zum entfernten Labor übertragen.
- (3) Dort wird das Verhältnis zwischen der übertragenen Frequenz und der lokalen Uhr mit einem zweiten Kammgenerator gemessen.

Für die Demonstration von Schritt (1) wurde ein Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1545 nm auf einen Diodenlaser bei 871 nm stabilisiert. Dieser Laser wird als Uhrenlaser für das Yb⁺-Frequenznormal der PTB genutzt und hat eine Linienbreite von weniger als 10 Hz [2, 30]. Das Frequenzverhältnis zwischen der mittels Kammgenerator synthetisierten Frequenz des Faserlasers und der des Uhrenlasers konnte mit einer relativen Unsicherheit von $\approx 10^{-18}$ gemessen werden [31].

Schritt (2) wurde in Zusammenarbeit mit LNE-SYRTE (Paris) demonstriert. Hier wurde eine genau bekannte, hochstabile optische Frequenz über ein innerstädtisches Telekommunikationsnetzwerk übertragen [23] (siehe unten).

Für die Demonstration von Schritt (3) eignet sich ein optisches Frequenznormal mit Magnesiumatomen, das gegenwärtig am Institut für Quantenoptik (IQO) an der Leibniz Universität Hannover entwickelt wird. An einem thermischen Mg-Atomstrahl wurde bereits eine erste Frequenzmessung des $^1S_0 - ^3P_1$ -Interkombinationsübergangs durchgeführt [32]. Bisher wurden dafür eine transportable Cs-Atomuhr und ein GPS-stabilsierter Quarzoszillator als Referenz benutzt. Mit der Weiterentwicklung des Mg-Frequenznormals und seinem direkten Vergleich mit einem der optischen Frequenznormale der PTB mittels einer Glasfaserverbindung wird sich die Messgenauigkeit ganz erheblich steigern lassen.

3.2 Stabilisierung der optischen Weglänge

Ein grundsätzliches Problem aller Verfahren zur Frequenzübertragung mit Glasfasern ist die Beeinträchtigung der Stabilität durch Schwankungen der optischen Weglänge. Phasenfluktuationen der übertragenen optischen Trägerwelle werden beispielsweise durch geringfügige mechanische Beanspruchungen der Glasfaser und Änderungen der Umgebungstemperatur

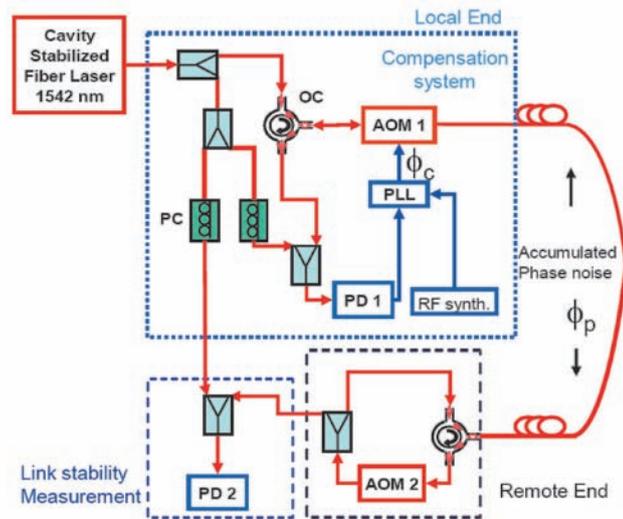


Bild 7: Aufbau einer aktiven Weglängenstabilisierung für Glasfaser-Übertragungsstrecken. AOM: Akusto-optischer Modulator; PD: Photodiode; PLL: Phasenregelkreis; PC: Polarisationssteller; OC: optischer Zirkulator; RF synth: HF-Synthesizer. Für Details siehe Text. (Bild: G. Santarelli, LNE-SYRTE)

verursacht. Bei Langstreckenübertragungen dominieren auf langen Zeitskalen die Fluktuationen, die von Temperaturänderungen in der Faser hervorgerufen werden. Andere niederfrequente Störungen wie z. B. Schwankungen der Polarisationsmodendispersion oder Temperaturänderungen im Messaufbau oder Geräten können ebenfalls zu einer Verschlechterung der Langzeitstabilität führen. Rauschquellen, die auf kürzeren Zeitskalen eine Rolle spielen, sind unter anderem thermisches und 1/f-Rauschen

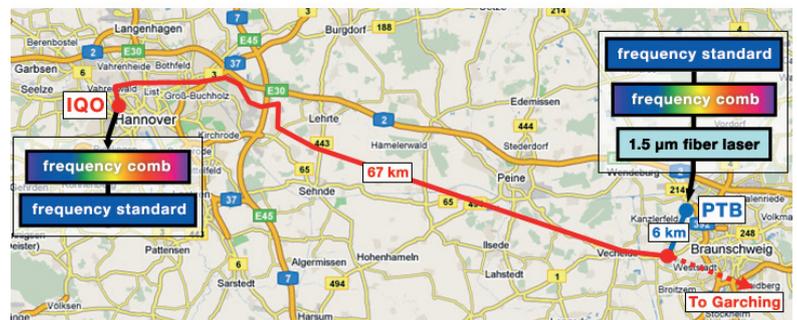


Bild 8: Vergleich optischer Frequenznormale zwischen dem Institut für Quantenoptik (IQO) der Leibniz Universität Hannover und der PTB über eine kommerzielle Glasfaserverbindung (rote Linie). Die gestrichelte Linie zeigt die im Aufbau befindliche Erweiterung nach Garching. In der PTB wird ein Faserlaser mit einer Wellenlänge bei 1,5 μm auf ein optisches Frequenznormal stabilisiert. Sein Licht wird mittels Glasfaser zum IQO übertragen und dort mit einem Frequenznormal mit lasergekühlten Magnesiumatomen verglichen. (Karte: Google Maps)

in Elektronikkomponenten, das Schrotrauschen der Photodetektion sowie Phasenrauschen, das in der Faser durch Konversion von Amplitudenrauschen entsteht.

Um eine hochstabile Frequenzübertragung über eine Glasfaser zu gewährleisten, muss das Phasenrauschen der Übertragungsstrecke typischerweise für alle Streckenlängen über 100 m durch aktive optische Weglängenstabilisierung unterdrückt werden.

Bild 7 zeigt das Schema einer zuerst von L. S. Ma *et al.* beschriebenen Anordnung zur aktiven Stabilisierung der Weglänge [33]. Auf der Senderseite wird ein Teil des Transferlaserlichts durch einen frequenzverschiebenden akustooptischen Modulator (AOM) zur Faserstrecke geschickt. Der AOM wird von einem spannungsgesteuerten Oszillator angesteuert, der als Stellelement eines Phasenregelkreises fungiert. Am Ausgang der Strecke wird ein Teil

des Laserlichtes wiederum frequenzverschoben und dann zur Senderseite zurückgeschickt. Das reflektierte Licht wird dort ein zweites Mal frequenzverschoben und mit dem Licht des Transferlasers überlagert. Die Interferenz führt zu einem Schwebungssignal, dessen Frequenz mit dem Phasenregelkreis auf einen HF-Referenzoszillator stabilisiert wird. Diese interferometrische Anordnung eliminiert auf der Empfangsseite das Phasenrauschen der Übertragungsstrecke.

Die zusätzliche Frequenzverschiebung des auf der Empfangsseite reflektierten Signals erlaubt die Unterscheidung des Nutzsignals von Störsignalen, die durch Rückstreuung in der Glasfaser hervorgerufen werden. Die Analyse des Schwebungssignals auf der Sendeseite ermöglicht eine *in loop*-Messung des verbleibenden Phasenrauschens. Für Testzwecke kann man die Empfangsseite nahe bei der Sendeseite aufbauen und so auch eine direkte *out of loop*-Messung der Stabilität der Faserstrecke durchführen (s. Bild 7).

3.3. Experimente

In unserer Zusammenarbeit mit dem LNE-SYRTE (Paris) benutzten wir eine bestehende Telekommunikations-Glasfaser Verbindung und eine optische Gitteruhr mit ^{87}Sr als Referenznormal [34]. Um den Empfang in einem entfernten Laboratorium zu simulieren, wurde die übertragene Frequenz über eine zweite Faser Verbindung zurück zur Sendeseite geschickt. Die daraus resultierende Streckenlänge von insgesamt 86 km wurde in einigen Experimenten mit Hilfe von aufgewickelter Glasfaser auf 211 km erweitert. In diesem Fall wurde der Transmissionsverlust (50 dB für die halbe Gesamtstrecke) mit einem Erbium-Faserverstärker ausgeglichen. Optische Uhr, Frequenzkammgenerator, Transferlaser und Weglängenstabilisierung wurden über Zeiträume von ungefähr 12 Stunden kontinuierlich betrieben. Mit der 86 km langen Faserstrecke wurde eine relative Frequenzstabilität von $\sigma_y(1\text{ s}) = 2,2 \cdot 10^{-15}$ erreicht. Nach einigen Stunden Mittelungszeit war die Instabilität kleiner als $5 \cdot 10^{-18}$. Die mittlere Frequenzabweichung zwischen Sendeseite und Empfangsseite betrug 3 mHz bei einer Meßunsicherheit von 4 mHz [23].

Im Folgenden wird eine Faser Verbindung beschrieben, die unlängst zwischen PTB und einem Labor des IQO an der Leibniz Universität Hannover aufgebaut wurde (Bild 8). Diese Verbindung ist Bestandteil eines größeren Netzwerkes, das in Zukunft optische Uhren der PTB und des IQO mit denen der Max-Planck-Institute in Erlangen (Institute of Optics, Information and Photonics, IOIP) und Garching (Max-Planck-Institut für Quantenoptik, MPQ) verbinden wird.

Die Fernleitungsnetze von Gasversorgungsunternehmen und lokalen Telekommunika-

tionsanbietern bieten ein erhebliches Potenzial für die Entwicklung einer flächendeckenden Infrastruktur für Glasfaser Verbindungen. Die Faserstrecken von Braunschweig nach Hannover und Garching wurden in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wissenschaftsnetz DFN, GasLINE (ein Anbieter von unbeschalteten Telekommunikations-Glasfaserkabeln deutscher Gasversorger) und EnBs (lokaler Anbieter für Energieversorgung und Telekommunikation) in Betrieb genommen. In einem Bündel kommerziell genutzter Glasfasern wurden zwei unbeschaltete Paare unseren Experimenten zugeordnet. Da beide Faserpaare im selben Bündel geführt werden, sind sie den gleichen Umwelteinflüssen ausgesetzt und haben nahezu identische Eigenschaften.

Die Faserstrecke von der PTB zum IQO ist ca. 73 km lang. Über das lokale EnBs-Netz wird unser Labor mit dem GasLINE-Fernleitungsnetz verbunden. Mit dieser Infrastruktur ist eine direkte Verbindung zum Rechenzentrum der Universität möglich, das etwa 400 m vom IQO entfernt ist. Eine hauseigene Faserverbindung sorgt dann für den Anschluss an das Mg-Frequenznormal im IQO.

Die benutzte kommerzielle Faser (Norm ITU-T G.652, Typ SMF-28) hat einen Brechungsindex $n = 1.4681$ bei 1550 nm Wellenlänge, eine Dämpfung von ≈ 0.23 dB/km, und eine chromatische Dispersion von ≈ 18 ps/(nm·km). Ein optisches Zeitbereichsreflektometer lieferte detaillierte Informationen über die Dämpfung und die Lage der 16 Spleiße und ca. 10 Steckverbindungen in der Faserstrecke. Um die Stabilität der Übertragungsstrecke zu untersuchen, wurden die beiden Fasern im IQO verbunden, so dass sich Sendeseite und Empfangsseite in demselben Labor der PTB befanden. Für diese 146 km lange Faserschleife wurde eine Dämpfung von 46 dB gemessen.

Das gemessene Phasenrauschspektrum dieser Übertragungsstrecke ist in Bild 9 gezeigt [35]. Ohne aktive Weglängenstabilisierung kann das gemessene Spektrum näherungsweise in der Form

$$S_{\phi}(f) \approx \left[\frac{100 \text{ Hz}}{f} \cdot \left(1 + \frac{f}{10 \text{ Hz}} \right)^{-2} + c \right] \text{ rad}^2 \text{ Hz}^{-1}$$

beschrieben werden, wenn man das ausgeprägte umgebungsbedingte Rauschmaximum bei $f \approx 15$ Hz vernachlässigt. Für Fourierfrequenzen $f \geq 100$ Hz nimmt das Phasenrauschen proportional zu $1/f^3$ ab, für $f \leq 10$ Hz entspricht die Frequenzabhängigkeit einem $1/f$ -Phasenrauschen. Der konstante Rauschsockel bei hohen Frequenzen wird durch das Rauschen des Detektionssystems bestimmt.

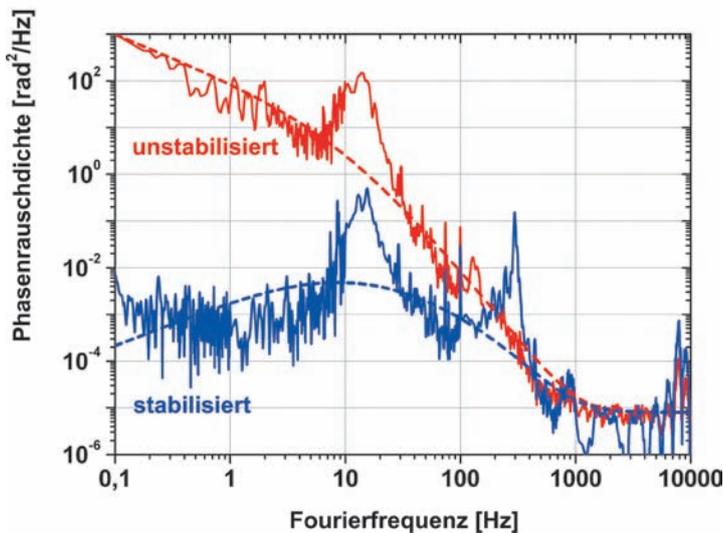


Bild 9:

Gemessene spektrale Phasenrauschdichte der 146 km langen Glasfaserstrecke PTB-IQO-PTB ohne Stabilisierung der optischen Weglänge (rot) und mit aktiver Stabilisierung (blau) [35]. Die rote gestrichelte Kurve zeigt den beobachteten asymptotischen Verlauf der Phasenrauschdichte bei hohen und niedrigen Frequenzen. Die blaue gestrichelte Kurve zeigt die für den asymptotischen Verlauf berechnete Unterdrückung des Phasenrauschens bei aktiver Weglängenstabilisierung (siehe Text).

3.4 Grenzen der Stabilität

Bei der aktiven Stabilisierung der Weglänge einer Glasfaserverbindung begrenzt die Laufzeit des Lichts in der Faser die erreichbare Phasenrauschunterdrückung, denn die Laufzeit bestimmt die maximale Regelbandbreite. Bei hohen Fourierfrequenzen außerhalb der Regelbandbreite wird das Phasenrauschen nicht unterdrückt. Die Abhängigkeit der erreichbaren Phasenrauschunterdrückung von der Fourierfrequenz f kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$S_{\phi}^{\text{out}}(f) = \frac{4\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{nL}{c}\right)^2 \cdot f^2 \cdot S_{\phi}^{\text{in}}(f) \quad \text{für } f < c/(nL).$$

Hier ist L die physikalische Länge der Übertragungsstrecke (einfacher Weg), n der Brechungsindex, c die Lichtgeschwindigkeit und S_{ϕ}^{in} das Phasenrauschen der unstabilisierten Verbindung [36].

Die gemessene Laufzeitverzögerung der Übertragungsstrecke PTB-IQO-PTB beträgt 1,4 ms. Damit ist die Regelbandbreite der Weglängenstabilisierung auf 350 Hz begrenzt. Wie Bild 9 zeigt, stimmt das gemessene Phasenrauschen der stabilisierten Strecke gut mit der berechneten Frequenzabhängigkeit der Phasenrauschunterdrückung überein. Bei Vernachlässigung des Rauschmaximums bei 15 Hz lässt sich die bei Frequenzübertragungen erreichbare Stabilität auf $\sigma_y(\tau) \approx 3 \cdot 10^{-15} (\tau/s)^{-1}$ abschätzen. Mit dem oben erwähnten Yb⁺-Uhrenlaser als Referenz konnten wir die Instabilität der übertragenen Frequenz relativ zur Sendeseite bestimmen: Die gemessene Instabilität ist $\sigma_y(\tau) = 2,5 \cdot 10^{-15} (\tau/s)^{-1}$ (Bild 10) [35].

Diese Messungen zeigen, dass es mit einer Glasfaserverbindung mit niedrigem Eigenrauschen möglich ist, dem Stand der Technik entsprechende optische Uhren [2] über Entfernungen von mehr als 100 km ohne Stabilitätsverlusten miteinander zu vergleichen.

Ähnliche Experimente wurden auch von anderen Arbeitsgruppen durchgeführt und kürzlich wurden Phasenrauschmessungen für drei weitere Verbindungen mit Streckenlängen von 40 km, 86 km und 120 km publiziert [36, 37, 38]. In einigen Fällen wurden die Streckenlänge mit Hilfe von aufgewickelten Fasern bis zu einer maximalen Länge von 250 km erweitert. Während die Rauscheigenschaften der 40 km- und 80 km-Strecken der bei uns untersuchten Verbindung sehr ähnlich sind, zeigt die 120 km lange Strecke bei $f = 1$ Hz ein um ca. 25 dB höheres Rauschen, das für hohe Fourierfrequenzen proportional zu $1/f^2$ abfällt.

Da $S_{\phi}^{\text{out}}(f)$ proportional zu $L^2 S_{\phi}^{\text{in}}(f)$ ist, nimmt die in Frequenzvergleichen erreichbare Stabilität der Übertragungsstrecke proportional zu $L (S_{\phi}^{\text{in}})^{1/2}$ ab. Da L durch die Anwendungssituation festgelegt ist, kann die Stabilität nur dadurch erhöht werden, dass die Übertragungsstrecke zur Erhöhung der Regelbandbreite in Teilstücke unterteilt wird und (oder) dass eine Faserverbindung mit niedrigem Eigenrauschen gewählt wird.

Hinsichtlich des Rauschniveaus bieten Glasfasern, die zusammen mit Ferngasleitungen verlegt sind, einige Vorteile: die unterirdische Verlegung führt zu einer starken Unterdrückung der täglichen Temperaturschwankungen und anderer Umgebungseinflüsse. Ein anderer Vorteil ist, dass Langstreckenverbindungen relativ einfach in passende Teilstücke unterteilt werden können, da der typische Abstand von Systemtechnikstationen ca. 80 km beträgt.

3.5 Ein zukünftiges europäisches Glasfasernetzwerk

Mit der Versuchsstrecke zwischen der PTB und dem MPQ in Garching haben wir jetzt die einzigartige Möglichkeit, die erste Langstreckenübertragung einer optischen Trägerfrequenz über

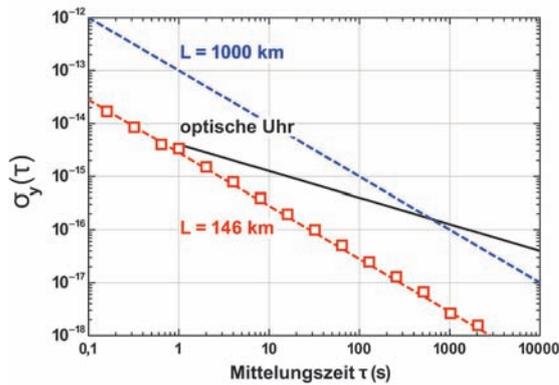


Bild 10: Gemessene relative Stabilität der übertragenen optischen Frequenz bei einer 146 km langen Glasfaserverbindung [35] (rote Quadrate) im Vergleich mit der Stabilität einer optischen Einzelionenuhr [2] (schwarze Linie) und der erwarteten Stabilität einer 1000 km langen Verbindung (gestrichelte blaue Linie).

eine Distanz von 900 km zu untersuchen. Damit erweitert sich die Streckenlänge in eine Größenordnung, die es ermöglichen würde, die hochstabilen und genauen Uhren in vielen europäischen Labors zu vergleichen. Die 900 km-Verbindung, die sich zur Zeit im Aufbau befindet, ist eine einzigartige Gelegenheit, moderne Systeme zur optischen Frequenzverteilung in realer Größe und unter typischen Umweltbedingungen zu untersuchen. Wir erwarten, dass dies zu neuen Anwendungen und bedeutenden Fortschritten in der gegenwärtigen Forschung führen wird.

Bei der vorgesehenen Streckenlänge muß die Dämpfung der Lichtwelle durch Verstärkerstufen kompensiert werden. Die Verstärker müssen bidirektional betrieben werden und die Kohärenz des Eingangssignals erhalten. Verstärker auf der Basis von Erbium-dotierten Glasfasern erfüllen diese Anforderungen und werden in Telekommunikationsnetzwerken häufig eingesetzt. Mit der Annahme einer typischen Dämpfung von 0,2 dB/km und einer Verstärkung von 20 dB – 30 dB pro Stufe ist ein Verstärkerabstand von 100 km ausreichend, um eine nahezu transparente optische Verbindung aufzubauen, wobei das zusätzliche Rauschen der kaskadierten Verstärker weniger als 10 dB beträgt [39].

Um die Stabilität einer Übertragungsstrecke von 1000 km abzuschätzen, nehmen wir im Folgenden an, dass das Phasenrauschspektrum der unstabilierten Strecke eine ähnliche Form wie das der PTB-Hannover-Strecke hat (s. Bild 9) und die spektrale Phasenrauschdichte $S_{\phi}^{\text{in}}(f)$ proportional mit der Länge der Strecke anwächst. In diesem Fall wäre das Phasenrauschen immer noch kleiner als in der in [38] untersuchten 120 km-Verbindung. Nimmt man als Abschätzung im ungünstigsten Fall ein Rauschniveau von $S_{\phi}^{\text{in}}(f) = 5 \cdot 10^4 \text{ Hz}^2 / f^2 \text{ rad}^2 \text{ Hz}^{-1}$ an, so ergibt sich mit aktiver Weglängenstabilisierung ein Restphasenrauschen in der Größen-

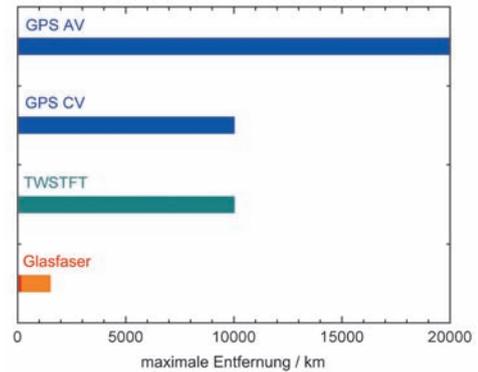


Bild 11: Überbrückbare Entfernungen für verschiedene Verfahren der Zeit- und Frequenzübertragung. Zur Zeit werden Glasfaserverbindungen bis zu Abständen von 250 km eingesetzt, Erweiterungen bis zu 1500 km sind geplant.

ordnung von $S_{\phi}^{\text{out}}(f) \leq 50 \text{ rad}^2 \text{ Hz}^{-1}$, was bei einer Beobachtungsbandbreite von 300 Hz einer Instabilität von $\sigma_y(\tau) \approx 1 \cdot 10^{-13} (\tau/\text{s})^{-1}$ bei Frequenzübertragungen entspricht.

Wie Bild 10 zeigt, wird die abgeschätzte Instabilität der 1000 km-Verbindung bereits für Mittelungszeiten $\tau > 1000 \text{ s}$ kleiner als die der zur Zeit besten optischen Uhren. Damit ist der Beitrag der Faserstrecke zur gesamten Instabilität nach einer Mittelungszeit von 3 Stunden vernachlässigbar. Auch mit dem hier angenommenen hohen Rauschpegel der Übertragungsstrecke würde ein Uhrenvergleich per Glasfaser die erwartete Stabilität eines TWSTFT-CP Vergleichs per Satellit (Bild 2) um eine Größenordnung übertreffen.

Für Europa ist daher die Verwendung optischer Fasern für den Vergleich optischer Uhren eine hervorragende Alternative zu satellitenbasierten Frequenzvergleichen.

Gegenwärtig ist die Verfügbarkeit unbeschalteter Glasfaserverbindungen kein prinzipielles Hindernis, allerdings sind die Mietkosten über einen Zeitraum von 5 bis 10 Jahre ein problematischer Aspekt. Die Suche nach Anbietern unbeschalteter Fasern, die den nationalen Metrologieinstituten einen Zugang zu einem europäischen Netzwerk ermöglichen und diese bei dem Aufbau nationaler Netze unterstützen, wird eine der wichtigsten Aufgaben in naher Zukunft sein.

Ausblick

Die maximal überbrückbare Entfernung ist ein wichtiges Kriterium beim Vergleich der Verfahren für hochgenaue Zeit- und Frequenzübertragung. In Bild 11 sind die gegenwärtigen (und zukünftig erwarteten) Maximalentfernungen für verschiedene Verfahren dargestellt. Das *all in view*-GPS-Verfahren nimmt hier eine Sonderstellung ein, denn damit können Uhren an nahezu beliebigen Orten auf der Erde verglichen

werden. Sowohl *common view*-GPS als auch TWSTFT sind auf Entfernungen von ca. 10 000 km begrenzt, denn beide am Vergleich beteiligten Seiten müssen denselben Satelliten über dem Horizont „sehen“ können. Im TAI-Netzwerk des BIPM ist die derzeit längste TWSTFT-Verbindung die zwischen dem NICT (Tokio, Japan) und der PTB. Wesentlich größere Entfernungen können nur mit Hilfe einer Relaisstation überbrückt werden, allerdings ist in diesem Fall das Rauschniveau durch die zusätzlichen Komponenten im Signalweg höher. Eine derartige Verbindung wird zur Zeit zwischen USNO (USA) und NICT (Japan) mit einer Relaisstation auf Hawaii aufgebaut. Sobald diese Verbindung besteht, existiert ein die Erde umfassender TWSTFT-Ring. Damit wird es möglich sein, zwischen jedem Paar der beteiligten Labors zwei voneinander unabhängige TWSTFT-Zeitvergleiche durchzuführen. Hier soll noch angemerkt werden, dass es speziell im asiatischen Raum eine zunehmende Anzahl von Zeitmetrologielabors gibt, die TWSTFT-Stationen betreiben und auch eine wachsende Anzahl von Labors, die mittels GPS ihre Uhren in TAI einbringen.

Trotz der schnellen Fortschritte bei Frequenzvergleichen über Glasfasern erwarten wir, dass auch in naher Zukunft die Streckenlänge dieser Verbindungen auf ungefähr 1500 km begrenzt sein wird. Es ist jedoch erkennbar, dass die Eigenschaften optischer Verbindungen und die Verfügbarkeit frequenzstabiler optischer Referenzsignale neue Entwicklungen in Forschung und Technik in Gang setzen werden. Zusammen mit der Frequenzkammgenerator-Technologie ermöglicht die Verteilung von frequenzstabilisiertem Licht bei 1.5 μm die Erzeugung von Normalfrequenzsignalen im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich mit beispielloser Stabilität ohne lokale Referenzuhr. Glasfaserverbindungen können eine optische Referenzfrequenz für die angewandte und Grundlagenforschung mit einer Genauigkeit und Stabilität zur Verfügung stellen, wie sie bisher nur in Metrologieinstituten und wenigen anderen Labors realisiert wird. Die Anwendungen erstrecken sich von einfachen Laserfrequenz-Kalibrierungen, Interferometrie und der ferngesteuerten Kalibrierung von Wellenlängennormalen bis zur Synchronisation und zeitlichen Steuerung von Teilchenbeschleunigern.

In Zukunft werden insbesondere Synchronisationssysteme für die nächste Generation von Linearbeschleunigern [40] und für große astronomische Antennensysteme wie das *Atacama Large Millimeter Array* [41] stark von Faserverbindungen profitieren, da hier eine rauscharme Frequenzverteilung mit geringstmöglichen Phasenfehlern benötigt wird. Die stabile Synchronisation durch die Übertragung einer

optischen Trägerfrequenz eröffnet auch neue Möglichkeiten für die VLBI-Astronomie (*Very Long Baseline Interferometry*) wie beispielsweise VLBI mit großer effektiver Apertur im optischen Wellenlängenbereich [42]. Für das *Deep Space Network* der NASA wurde ein Glasfasernetzwerk entwickelt, das von einem Wasserstoffmaser abgeleitete Referenzsignale für die Synchronisation der Antennen verteilt [43].

Die Einführung eines europäischen FaserNetzwerks für die Übertragung hochstabiler optischer Frequenzen wird die Zeit- und Frequenzmetrologie vorantreiben. Ein solches Netzwerk wird insbesondere auch unabhängige Stabilitätstests der Satelliten-Zeitübertragungsverfahren (siehe oben) und der entsprechenden Einrichtungen der Satellitennavigationssysteme GPS und *Galileo* ermöglichen [44].

Eine Reihe von Forschungsprogrammen der Grundlagenphysik werden von der Möglichkeit profitieren, weit entfernte Uhren über Glasfaserverbindungen ohne nennenswerten Verlust an Genauigkeit und Stabilität zu vergleichen. Prominente Beispiele hierfür sind Tests des Äquivalenzprinzips der Allgemeinen Relativitätstheorie und der zeitlichen Konstanz der Feinstrukturkonstante [44]. Die Fähigkeit, weit voneinander entfernte optische Uhren mit höchster Genauigkeit vergleichen zu können, ist natürlich auch eine Vorbedingung für eine mögliche Neudefinition der SI-Sekunde auf der Basis einer optischen Uhr.

Danksagung

Die Autoren danken den Mitarbeitern der PTB, die zu den hier dargestellten Ergebnissen beigetragen haben: A. Bauch, J. Becker, T. Feldmann, G. Grosche, T. Legero, B. Lipphardt, C. Lisdat, M. Misera, T. Polewka, M. Rost, E. Staliuniene, U. Sterr und O. Terra. Ebenso danken wir den Mitarbeitern anderer Zeitmetrologielabors für ihre Beiträge. Diese Arbeit wurde zum Teil im Rahmen des SFB 407 von der DFG unterstützt.

Literatur

- [1] Siehe z.B.: R. Wynands, S. Weyers: Atomic fountain clocks. *Metrologia* 42, S64 (2005).
- [2] Siehe „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123.
- [3] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, T. W. Hänsch: Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser. *Opt. Lett.* 24, 881 (1999).
- [4] L. S. Ma et al.: Optical frequency synthesis and comparison with uncertainty at the 10^{-19} level. *Science* 303, 1843 (2004).
- [5] CCTF recommendation CCTF-3 to the CIPM (2006 Meeting).

- [6] *A. Bauch et al.*: Comparison between frequency standards in Europe and the US at the 10^{-15} uncertainty level. *Metrologia* 43, 109 (2006).
- [7] *D. Piester, A. Bauch, L. Breakiron, D. Matsakis, B. Blanzano, O. Koudelka*: Time transfer with nanosecond accuracy for the realization of International Atomic Time. *Metrologia* 45, 185 (2008).
- [8] *J. Levine*: Time and frequency distribution using satellites. *Rep. Prog. Phys.* 65, 1119 (2002).
- [9] *Understanding GPS: Principles and Applications*. Hrsg.: E. Kaplan, C. J. Hegarty, Artech House (Norwood 2006).
- [10] *T. Gotoh, A. Kaneko, Y. Shibuya, M. Imae*: GPS Common View. *Journal of the NICT* 50, 113 (2003).
- [11] *C. Hackman, J. Levine, T. Parker, D. Piester, J. Becker*: A Straightforward frequency-estimation technique for GPS carrier-phase time transfer. *IEEE Trans. UFFC* 53, 1570 (2006).
- [12] *G. Petit, Z. Jiang*: Precise Point Positioning for TAI computation. *Int. J. Nav. Obs., Artikel-ID 562878* (2008).
- [13] *D. Kirchner*: Two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT): Principle, implementation, and current performance. In: *Review of Radio Sciences 1996-1999*, Oxford University Press (1999), S. 27.
- [14] *B. Fonville, D. Matsakis, A. Pawlitzki, W. Schäfer*: Development of carrier-phase-based two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT). *Proc. 36th PTTI Systems and Applications Meeting* (Washington DC, USA 2005), S. 149.
- [15] *T. E. Parker, V. Zhang*: Sources of instabilities in two-way satellite time transfer. *Proc. 2005 Joint IEEE International Frequency Control Symposium and PTTI Systems and Applications Meeting* (Vancouver, Kanada 2005), S. 745.
- [16] *D. Piester et al.*: Studies on instabilities in long-baseline two-way satellite time and frequency transfer (TWSTFT) including a troposphere delay model. *Proc. 39th PTTI Systems and Applications Meeting* (Long Beach, USA 2008), S. 211.
- [17] *E. F. Arias*: Time scales and relativity. *Proc. International School of Physics „Enrico Fermi“*, Course CLXVI in Metrology and Fundamental Constants, Hrsg.: T. W. Hänsch et al., IOS Press (Amsterdam, 2007), S. 367.
- [18] *J. Weick, E. Samain, P. Vrancken, P. Guillemot*: Prospective performance budget of the T2L2 experiment. *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium jointly with the 21st European Frequency and Time Forum* (Genf 2007), S. 312.
- [19] *A. Seidel et al.*: The ACES microwave link: instrument design and test results. *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium jointly with the 21st European Frequency and Time Forum* (Genf 2007), S. 1295.
- [20] *M. Amemiya et al.*: Time and frequency transfer and dissemination methods using optical fiber network. *IEEE Trans. FM* 126, 458 (2006).
- [21] *S. M. Foreman, K. W. Holman, D. D. Hudson, D. J. Jones, J. Ye*: Remote transfer of ultra-stable frequency references via fiber networks. *Rev. Sci. Instrum.* 78, 021101 (2007).
- [22] *F. Narbonneau et al.*: High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network. *Rev. Sci. Instrum.* 78, 064701 (2007).
- [23] *G. Grosche, B. Lipphardt, H. Schnatz, G. Santarelli, P. Lemonde, S. Bize, M. Lours, F. Narbonneau, A. Clairon, O. Lopez, A. Amy-Klein, C. Chardonnet*: Transmission of an optical carrier frequency over a telecommunication fiber link. *CLEO 2007 Technical Digest* (Baltimore, USA 2007). DOI: 10.1109/CLEO.2007.4452577
- [24] *O. Lopez et al.*: 86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer. *Eur. Phys. J. D* 48, 35 (2008).
- [25] *P. Kubina et al.*: Long term comparison of two fiber based frequency comb systems. *Opt. Express* 13, 904 (2005) und dort angegebene Quellen.
- [26] *H. Inaba et al.*: Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb. *Opt. Express* 14, 5223 (2006).
- [27] *J. Stenger, H. Schnatz, Chr. Tamm, H. R. Telle*: Ultraprecise measurement of optical frequency ratios. *Phys. Rev. Lett.* 88, 073601 (2002).
- [28] *E. Benkler, H. R. Telle, A. Zach, F. Tauser*: Circumvention of noise contributions in fiber laser based frequency combs. *Opt. Express* 13, 5662 (2005).
- [29] *H. R. Telle, B. Lipphardt, J. Stenger*: Kerr-lens mode-locked lasers as transfer oscillators for optical frequency measurements. *Appl. Phys. B* 74, 1 (2002).
- [30] Siehe „Superstabile Laser“ in dieser Ausgabe, S. 144.
- [31] *G. Grosche, B. Lipphardt, H. Schnatz*: Optical frequency synthesis and measurement using fibre-based femtosecond lasers. *Eur. Phys. J. D* 48, 27 (2008).
- [32] *J. Friebe et al.*: Absolute frequency measurement of the magnesium intercombination transition $^1S_0 - ^3P_1$. *Phys. Rev. A* 78, 033830 (2008).

- [33] *L. S. Ma, P. Jungner, J. Ye, J. L. Hall*: Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path. *Opt. Lett.* 19, 1777 (1994).
- [34] *R. Le Targat et al.*: Accurate optical lattice clock with ^{87}Sr atoms. *Phys. Rev. Lett.* 97, 130801 (2006).
- [35] *O. Terra, G. Grosche, T. W. Hänsch, R. Holzwarth, B. Lipphardt, K. Predehl, H. Schnatz*: Comparing optical frequency standards over a 146 km using a commercial Telecom fiber. (Manuskript in Vorbereitung)
- [36] *P. A. Williams, W. C. Swann, and N. R. Newbury*: High-stability transfer of an optical frequency over long fiber-optic links. *J. Opt. Soc. Am. B* 25, 1284 (2008).
- [37] *H. Jiang et al.*: Long-distance frequency transfer over an urban fiber link using optical phase stabilization. *J. Opt. Soc. Am. B* 25, 2029 (2008).
- [38] *M. Musha, F. L. Hong, K. Nakagawa, K. Ueda*: Coherent optical frequency transfer over 50 km physical distance using a 120 km long installed telecom fiber network. *Opt. Express* 16, 16459 (2008).
- [39] *T. Schneider*: *Nonlinear Optics in Telecommunications*. Springer Verlag (Berlin 2004).
- [40] *J. Frisch, D. Bernstein, D. Brown, and E. Cisneros*: A high stability, low noise rf distribution system. *Proc. IEEE Particle Accelerator Conference 2002*, 2, S. 816.
- [41] *W. Shillue*: Fiber distribution of local oscillator for Atacama Large Millimeter Array. *Proc. OFC/NFOEC 2008 (San Diego, USA 2008)*, S. 1; *B. Shillue*: ALMA Memo 443 (2002); <http://www.alma.nrao.edu/memos/>
- [42] *K. H. Sato et al.*: Application of phase-stabilized optical fiber in transmission of reference and IF signals in VLBI observation. *IEEE Trans. IM* 41, 385 (1992).
- [43] *M. Calhoun, S. Huang, R. L. Tjoelker*: Stable photonic links for frequency and time transfer in the Deep Space Network and antenna arrays. *Proc. IEEE* 95, 1931 (2007).
- [44] Siehe „Wozu brauchen wir genauere Uhren?“ in dieser Ausgabe, S. 112.

Superstabile Laser

Christian Lisdat¹ und Christian Tamm²

1 Das Ziel: Perfekte Kohärenz

In den meisten gebräuchlichen Lichtquellen werden Photonen spontan entweder von einer heißen Oberfläche, einem Plasma oder durch die Rekombination von Ladungsträgern in einem Halbleiter ausgesandt. Dieses so entstandene Licht wird in der klassischen Physik als eine elektromagnetische Welle beschrieben, die sich aus statistisch verteilten Wellenzügen zusammensetzt: Das Licht ist inkohärent. Bei inkohärentem Licht weisen die Amplitude und die Phase des elektromagnetischen Feldes starke unkorrelierte zeitliche Fluktuationen auf. Die charakteristische Zeitskala dieser Schwankungen wird Kohärenzzeit τ_c genannt. Sie ist gegeben durch $\tau_c \approx 1/\pi\Delta\nu$, wobei $\Delta\nu$ die spektrale Bandbreite des untersuchten Lichts ist. Mit konventionellen Lichtquellen lassen sich bestenfalls Kohärenzzeiten im Nanosekundenbereich erreichen.

Das von Lasern emittierte Licht hat sowohl auf der quantenmechanischen Ebene wie auch im klassischen Grenzfall ganz andere Eigenschaften. Ein kontinuierlich betriebener Einmodenlaser emittiert eine elektromagnetische Welle, die nur kleine Amplituden- und Phasenfluktuationen aufweist. Eine fundamentale Störung sind die diffusionsartigen Änderungen der optischen Phase, die durch spontane Emission im Verstärkungsmedium des Lasers ausgelöst werden [1]. Bei Halbleiterlasern begrenzt dieser Effekt häufig die erreichbare Kohärenzzeit. Schwankungen der Laserfrequenz ergeben sich außerdem durch Änderungen der optischen Weglänge im Laserresonator aufgrund von akustischen Störungen oder Brechungsindexänderungen im Lasermedium. Bei vielen Lasertypen genügen passive Stabilisierungsmaßnahmen, um Kohärenzzeiten im Bereich von $\tau_c \geq 1 \mu\text{s}$ zu erreichen, also Linienbreiten $\Delta\nu = 1/\pi\tau_c \leq 300 \text{ kHz}$. Die verbleibenden Frequenzfluktuationen sind dann langsam genug, um sie durch aktive Stabilisierung auf ein noch erheblich kleineres Niveau zu reduzieren.

1.1 Aktive Frequenzstabilisierung

Aktive Laser-Frequenzstabilisierungen beruhen auf der Detektion der Frequenz- oder Phasenschwankungen des Laserlichts mittels eines optischen Frequenzdiskriminators oder durch Vergleich mit einem stabilen Referenzlaser. In einem Regelkreis wird das elektronisch verstärkte Fehlersignal dem Laser zur Frequenzkorrektur zugeführt. Eine signifikante Verringerung der Laserlinienbreite ergibt sich allerdings nur, wenn die Reaktionszeit des Regelkreises kürzer ist als die Kohärenzzeit des unstabilierten Laserlichts.

Es mag nicht überraschen, dass die technisch einfachste Referenz für eine aktive Frequenzstabilisierung ein stabiler Referenzlaser ist, dessen Frequenz nahe an der zu stabilisierenden liegt. Durch Interferenz beider Laserfelder auf einem Fotodetektor erhält man ein Schwebungssignal bei der Differenz der optischen Frequenzen. Wenn die Frequenz des Schwebungssignals mit einem HF-Referenzoszillator synchronisiert wird, ist die Laserfrequenz bei der Summen- oder Differenzfrequenz des Referenzlasers und des HF-Oszillators stabilisiert. Optische Frequenzkammgeneratoren erlauben es inzwischen, diese Technik auch auf Laser anzuwenden, deren Frequenzen im optischen Spektrum beliebig weit voneinander entfernt liegen [2, 3].

Wir werden uns in diesem Artikel auf Laserfrequenzstabilisierungen mit optischen Resonatoren konzentrieren. Hier wird das Fehlersignal durch einen optischen Frequenzdiskriminator erzeugt, dessen zentrales Element ein Fabry-Pérot-Resonator mit hoher intrinsischer Stabilität ist. Im Gegensatz zu Verfahren, die atomare oder molekulare Absorptionslinien zur Verbesserung der Langzeitstabilität benutzen, zielt die Verwendung von optischen Resonatoren vor allem auf die Erhöhung der Kohärenzzeit und Verringerung der Kurzzeit-Frequenzschwankungen ab.

Der als Frequenzdiskriminator genutzte Resonator hat eine Resonanzfrequenz nahe bei der Frequenz des zu stabilisierenden Lasers. Das Fehlersignal wird aus der Veränderung der Lei-

¹ PD Dr. Christian Lisdat, Arbeitsgruppe „Quantenoptik mit kalten Atomen“, PTB Braunschweig, E-Mail: christian.lisdat@ptb.de

² Dr. Christian Tamm, Senior Scientist, Arbeitsgruppe „Optische Uhren mit gespeicherten Ionen“, PTB Braunschweig, E-Mail: christian.tamm@ptb.de

stung des Lichts abgeleitet, das vom Resonator transmittiert oder reflektiert wird. Zusätzliche Rauschsignale, die bei der Fotodetektion auftreten, lassen sich nicht von Laserfrequenzschwankungen unterscheiden und beschränken daher die erreichbare Frequenzstabilität. Eine grundsätzliche Grenze stellt hier das Photonen-Schrotrauschen des Detektors dar. Die Größe des elektrischen Fotodetektorsignals δU aufgrund einer Frequenzexkursion $\delta\nu$ wird durch den Referenzresonator, die zugeführte optische Leistung und die Empfindlichkeit des Fotodetektors bestimmt. Eine kleine Resonanzbreite Δ des Referenzresonators führt naturgemäß zu einer großen Diskriminatorsteilheit $\delta U/\delta\nu$. Dies ist vorteilhaft, weil so die relativen Beiträge von Schrotrauschen und Störsignalen reduziert werden.

Bei den meisten frühen Experimenten zur Laserfrequenzstabilisierung mit Referenzresonatoren wurde das vom Resonator transmittierte Licht zur Erzeugung des Fehlersignals genutzt. Dies führte zu einem Dilemma: Da die Reaktionszeit des Regelkreises der Frequenzstabilisierung nicht kleiner sein kann als die Zeitkonstante $1/\pi\Delta$ des Referenzresonators, kann die Stabilisierung nicht gleichzeitig hinsichtlich kurzer Reaktionszeit und Störempfindlichkeit optimiert werden [4]. Dieses Problem wurde durch das so genannte Pound-

Einsatz von Referenzresonatoren mit beliebig hoher Resonanzgüte ohne Einschränkung der Regelbandbreite.

1.2 Maße für Frequenzstabilität

Die Frequenzstabilität eines Lasers kann mit verschiedenen Maßen charakterisiert werden. Welches Maß am besten geeignet ist, hängt gewöhnlich vom Spektrum der Frequenzfluktuationen ab, das der Laser aufweist.

- Bei weißem Laser-Frequenzrauschen hat das optische Leistungsspektrum die Form einer Lorentzkurve. Die zugehörige *Linienbreite* $\Delta\nu$ ist mit der *Kohärenzzeit* τ_c und der *Kohärenzlänge* l_c durch $\Delta\nu = 1/\pi\tau_c = c/\pi l_c$ verknüpft (c : Lichtgeschwindigkeit).
- Spektral strukturiertes Frequenzrauschen wird durch die *spektrale Rauschleistungsdichte* $S_\nu(f)$ beschrieben (Dimension: Hz^2 pro Hz Analysebandbreite). Für weißes Frequenzrauschen ist $S_\nu(f)$ unabhängig von der Fourierfrequenz f , und die Linienbreite ergibt sich aus $S_\nu(f)$ durch $\Delta\nu = \pi S_\nu(f)$.
- Die *Allan-Abweichung* $\sigma_y(\tau)$ ist ein Maß für die relative Frequenzabweichung als Funktion der Mittelungszeit τ . Für weißes Frequenzrauschen gilt: $\sigma_y(\tau) = (\Delta\nu/2\pi\nu_0^2\tau)^{1/2}$. Im Fall von $1/f$ -Rauschen ($S_\nu(f) \sim 1/f$) ist σ_y unabhängig von τ .

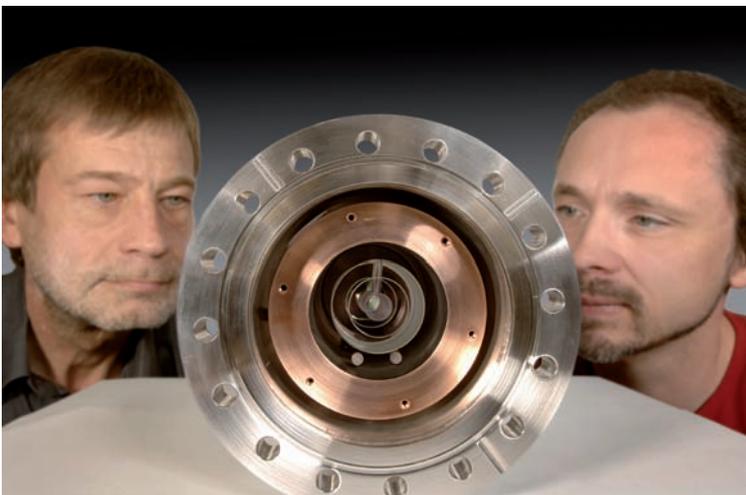


Bild 1:
Konventionelle Halterung eines Referenzresonators. Der Referenzresonator (Mitte) wird durch Elastomerstücke in einem temperaturstabilisierten polierten Kupferzylinder gehalten. Der Kupferzylinder wird mit minimalem thermischen Kontakt in einem Ultrahochvakuumgefäß fixiert, das im Betrieb auf 10^{-5} Pa evakuiert wird. Eine innovative Resonatorhalterung wird in Kap. 3.1 beschrieben.

Drever-Hall Verfahren gelöst, das auf der Detektion des reflektierten Lichts beruht [5]. Hier wird durch HF-Phasenmodulation des auf den Resonator fallenden Lichts die Phasenverschiebung des resonatorinternen Feldes relativ zum einfallendem Licht nachgewiesen. Für Frequenzen $f < \Delta$ des Fehlersignals ist das Signal wie bei Transmissionverfahren proportional zu $\delta\nu$. Für $f > \Delta$ dagegen ist das Signal proportional zur augenblicklichen Phasendifferenz von einfallendem und im Resonator gespeicherten Lichtfeld. Dies erlaubt den

1.3 Der Stand der Technik

Die Stabilität eines mittels Referenzresonator stabilisierten Lasers wird generell durch drei Faktoren bestimmt: die Stabilität der Anbindung an die Eigenfrequenz des Referenzresonators, die Stabilität der optischen Weglänge vom Laser zum Referenzresonator und die Stabilität des Referenzresonators selbst.

Die Stabilität der Anbindung an den Referenzresonator wird durch eine niedrige Resonatorlinienbreite Δ maximiert. Die Linienbreite wird häufig durch die Finesse $F = c/2L\Delta$

(L : Resonatorlänge) ausgedrückt. Gegenwärtig können dielektrische Spiegelschichten hergestellt werden, die im nahen Infrarotbereich eine Finesse bis zu $F = 10^6$ liefern. Verwendet man einen Resonator mit $F \approx 10^5$ und $L \approx 100$ mm, läßt sich die Instabilität der Anbindung an den Resonator auf $\sigma_y(\tau) < 10^{-15}$ für $0,1 \text{ s} \leq \tau \leq 100 \text{ s}$ reduzieren, wenn Störungen des Fehlersignals sorgfältig minimiert werden [6,7,8].

Bild 2: In einer magnetooptischen Falle gespeicherte Kalzium-Atome. Die Laserkühlung erzeugt ein Ensemble von sich langsam bewegenden Atomen. Durch anschließende Anregung mit Laserpulsen hoher Frequenzstabilität wird ein Materiewelleninterferometer realisiert, das als optischer Frequenzstandard dienen kann (siehe auch [17]).



Größere Beiträge zur Laserinstabilität ergeben sich gewöhnlich durch Fluktuationen der Eigenfrequenz des Resonators. Problematische Effekte sind insbesondere die thermische Ausdehnung des Resonators, seine Verformung durch Trägheitskräfte sowie Längenfluktuationen, die durch thermisches $1/f$ -Rauschen (Brownsche Bewegung) des Resonatormaterials verursacht werden [9]. Zur Verringerung der Tempera-

turabhängigkeit werden der Abstandshalter des Resonators und die Spiegelsubstrate aus einem Spezialglas gefertigt, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient einen Nulldurchgang im Bereich der Raumtemperatur hat (ULE-Glas [10]). Der im Hochvakuum betriebene Resonator ist von einem temperaturstabilisierten Wärmeschild umgeben (siehe Bild 1). In konventionellen Aufbauten werden mechanische Störungen der Umgebung durch die Lagerung des Resonators auf einem Vibrationsisolationstisch unterdrückt, dessen Eigenfrequenz unter 1 Hz liegt.

Diese Maßnahmen sind in vielen Fällen ausreichend, um die Linienbreite eines im sichtbaren oder nahinfraroten Wellenlängenbereich arbeitenden Lasers ($\nu_0 \approx 3 \cdot 10^{14}$ Hz) auf wenige Hertz zu reduzieren. Die Drift der stabilisierten Laserfrequenz wird von langfristigen Temperaturschwankungen und der Alterung des Resonatormaterials bestimmt und liegt typischerweise im Bereich von $|d\nu_0/dt| \leq 0,5 \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$. Für Zeitintervalle von 1 s bis 100 s wird die Frequenzstabilität gewöhnlich durch nicht unterdrückte mechanische Störungen oder thermisches $1/f$ -Rauschen begrenzt. Die bisher beste Stabilität eines Referenzresonator-stabilisierten Lasers wurde am National Institute of Standards and Technology (NIST, USA) demonstriert: Ein Farbstofflaser, der bei 533 THz emittiert (Wellenlänge $\lambda = 563 \text{ nm}$), wird mit zwei kaskadierten Regelsystemen auf einen aufwendig von Umgebungseinflüssen abgeschirmten Resonator stabilisiert. Der Vergleich mit einem zweiten baugleichen System ergab eine obere Grenze der Linienbreite von $\Delta\nu = 0,6 \text{ Hz}$ und eine durch thermisches Rauschen begrenzte Allan-Abweichung von $\sigma_y(\tau) \approx 4 \cdot 10^{-16}$ für $1 \text{ s} \leq \tau \leq 300 \text{ s}$ [11].

1.4 Wo superstabile Laser benötigt werden

Laserlicht mit einer Bandbreite im Hertz-Bereich erlaubt einmalig präzise Messungen. Wenn es in einem Interferometer eingesetzt wird, können Längenänderungen auf der Skala des Protonenradius (1,6 fm) zwischen Referenzpunkten verfolgt werden, die einen Meter voneinander entfernt sind. Wird die hohe Kurzzeitstabilität der Frequenz ausgenutzt, um Zeitintervalle zu messen, können Intervalle von 1 s mit einer Auflösung von weniger als einem optischen Zyklus (3,3 fs bei $\nu_0 = 300 \text{ THz}$) vermessen werden.

Interferometrische Gravitationswellendetektoren wie VIRGO, GEO600 oder der zukünftige weltraumgestützte Detektor LISA verwenden einen umfangreichen optischen Aufbau und hochentwickelte Systeme zur Kontrolle der Laserfrequenz, um von Gravitationswellen erzeugte Abstandsänderungen zwischen weit voneinander entfernten Testmassen nachzuweisen [12]. Optische Tests der Lorentz-Invarianz stellen ein

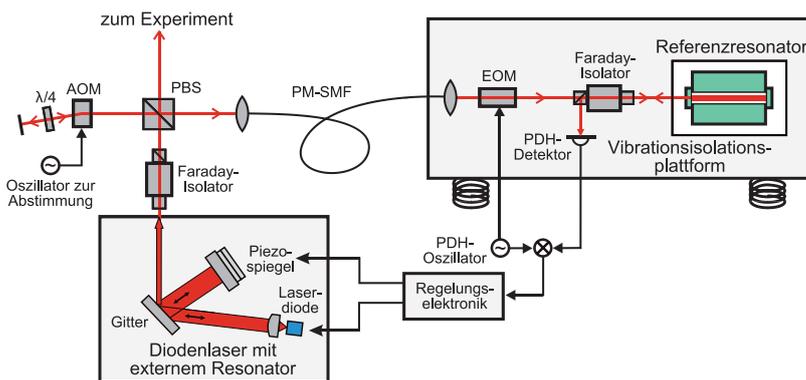


Bild 3: Schema der aktiven Laser-Frequenzstabilisierung, die in der PTB zur Verringerung der Linienbreite von Diodenlasern auf wenige Hertz benutzt wird. Das Licht des Lasers wird mit einem akusto-optischen Modulator (AOM) frequenzverschoben und über einen polarisationserhaltenden Lichtwellenleiter (PM-SMF) zum Referenzresonator geführt, der auf einer Vibrationsisolationsplattform aufgebaut ist. PDH: Komponenten des Pound-Drever-Hall-Frequenzdiskriminators; EOM: elektro-optischer Phasenmodulator; PBS: Polarisationsstrahlteiler; $\lambda/4$: Verzögerungsplatte (weitere Erläuterungen im Text)



anderes aktives Feld der Grundlagenforschung dar, das auf Laser hoher Stabilität angewiesen ist [13,14].

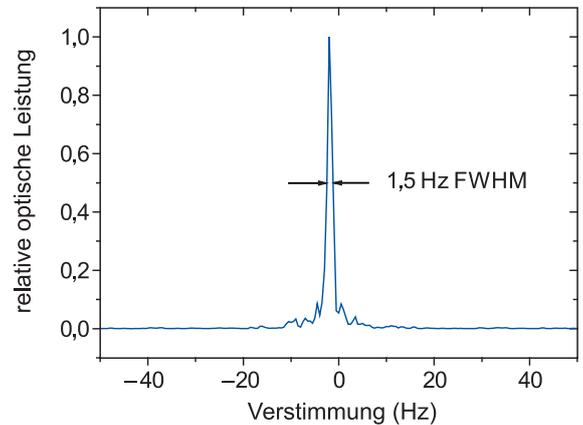
Viele der derzeitigen Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der superstabilen Laser stehen im Zusammenhang mit dem Bedarf an hochstabilen Abfrageoszillatoren für optische Uhren und frequenzempfindliche Atominterferometer (siehe Bild 2). Die mit optischen Uhren erreichbare Stabilität hängt vor allem von der Kohärenzzeit des Lichtes ab, das den atomaren Referenzübergang anregt und dadurch die Uhrenfrequenz ausliest [15]. Mit dem gegenwärtig bei der Laserfrequenzstabilisierung erreichten Stand der Technik ist es möglich, die Stabilität der besten Cäsium-Mikrowellenuhren um mehr als eine Größenordnung zu übertreffen.

2 Superstabile Laser in der PTB

In der PTB werden eine Reihe von höchst frequenzstabilen Lasersystemen als Abfrageoszillatoren in optischen Frequenznormalen und als Referenzoszillatoren für optische Frequenzvergleiche über große Entfernungen eingesetzt [3]. Wir wollen im folgenden das Design und die Leistungsmerkmale dreier technisch ähnlicher Systeme beschreiben. Das frequenzverdoppelte Licht eines dieser Laser (Grundwellenlänge $\lambda = 871$ nm) regt den atomaren Referenzübergang in einer optischen Einzelionen-Uhr an [15]. Die beiden anderen Laser [8,16] wurden als Abfragelaser für ein Atominterferometer mit lasergekühlten Ca-Atomen ($\lambda = 658$ nm) entwickelt [17].

Bild 4:

Vibrationsisolation (digital bearbeitetes Photo). Der Referenzresonator ist auf einem passiven Vibrationsisolationstisch montiert (unten rechts). Das Vakuumgefäß mit dem Resonator ist in einem massiven temperaturstabilisierten Aluminiumgehäuse gehalten. Die äußere thermische Isolation (hellblau) wurde teilweise entfernt. Der optische Aufbau auf dem Tisch enthält den Pound-Drever-Hall-Frequenzdiskriminator und Komponenten zur Einkopplung des Lichts in den Referenzresonator.



Alle drei Lasersysteme nutzen Halbleiterlaserdioden in einem abstimmbaren externen Resonatoraufbau, der ohne weitere Stabilisierung Linienbreiten im Bereich $\Delta\nu \approx 100$ kHz liefert. Ein Schema der aktiven Frequenzstabilisierung ist in Bild 3 zu sehen. Ein Teil (ungefähr $100 \mu\text{W}$) des Laserlichts wird durch einen akustooptischen Modulator geleitet, der einen variablen Frequenzabstand zwischen der gewünschten Laserfrequenz und der Frequenz einer TEM_{00} -Resonanz des Referenzresonators herstellt. Das frequenzverschobene Licht wird über einen polarisationserhaltenden Einmoden-Lichtwellenleiter auf einen passiven Vibrationsisolationstisch geführt, der den Referenzresonator trägt (siehe Bild 4). Zur Trennung von einfallendem und reflektiertem Strahl wird das Licht durch einen Faraday-Isolator in den Resonator eingekoppelt. Dem Schema des Pound-Drever-Hall-Frequenzdiskriminators entsprechend wird das einfallende Licht bei ca. 15 MHz phasenmoduliert und die synchrone Intensitätsmodulation des reflektierten Lichts nachgewiesen. Zur Korrektur der Laserfrequenz wird der Injektionsstrom der Laserdiode und die optische Weglänge ihres

Bild 5:

Spektrum des Schwingungssignals zwischen zwei unabhängigen Lasersystemen bei $\lambda = 657$ nm [16]. Aufzeichnungszeit: 4 s; Auflösungsbandbreite: 1 Hz.

Bild 6:

Allan-Abweichung $\sigma_y(\tau)$ des Frequenzverhältnisses zweier Laser, die bei $\lambda = 658$ nm und $\lambda = 871$ nm emittieren. Die Meßwerte zeigen die kombinierte Instabilität beider Laser als Funktion der Mittelungszeit τ . Zum Vergleich ist das berechnete Niveau des thermischen $1/f$ -Rauschens der Referenzresonatoren und die Stabilitätscharakteristik eines 658 nm-Lasers mit einer Linienbreite von 1 Hz dargestellt.

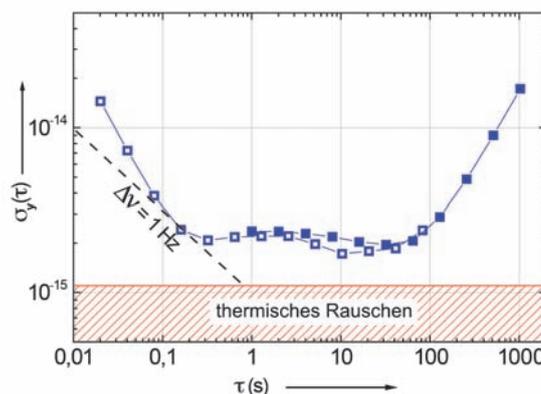
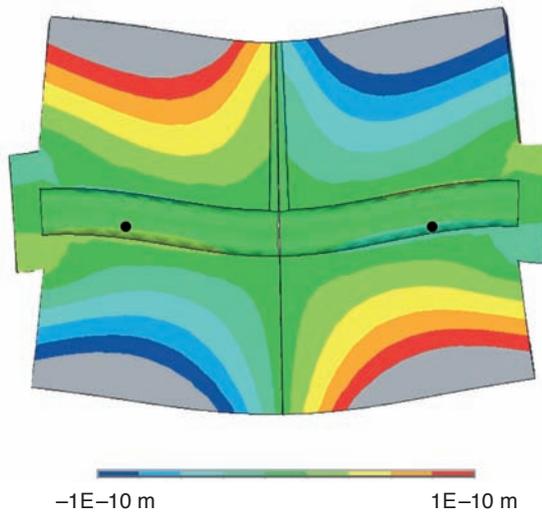


Bild 7:
Finite-Elemente-Simulation der Verformung eines Resonators aus ULE-Glas bei einer vertikalen Beschleunigung von 10 m/s^2 . Die Auflagepunkte (schwarze Punkte) minimieren die Abstandsänderung der Spiegel bei Beschleunigungen [20]. Die Durchbiegung des Resonators ist um einen Faktor 10^7 vergrößert dargestellt.



externen Resonators variiert. Die Bandbreite des Regelkreises für die Laserfrequenz liegt im Bereich von 3 MHz; für $f \leq 100 \text{ Hz}$ wird die Schleifenverstärkung größer als 160 dB. Die verwendeten Referenzresonatoren haben eine Länge von $L \approx 100 \text{ mm}$ und eine Finesse im Bereich von $F = 5 \cdot 10^4$ bis $2 \cdot 10^5$. Die Temperatur der Resonatorabschirmung wird auf 1 mK stabil gehalten. Die Zeitkonstante der thermischen Isolation liegt im Bereich von 30 h. Für Frequenzen im Bereich

von $0,3 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$ reduziert die Vibrationsisolierung horizontale und vertikale Beschleunigungen auf ungefähr $0,3 \mu\text{g}$ [18].

Zur Bestimmung der Linienbreite der beiden 658 nm-Laser wurden ihre abgeschwächten Ausgangsstrahlen auf einem Photodetektor überlagert und das Spektrum des Schwebungssignals analysiert. Das Spektrum in Bild 5 wurde mit einer Auflösungsbandbreite von 1 Hz aufgezeichnet. Die beobachtete Linienbreite von 1,5 Hz (volle Halbwertsbreite) lässt auf einen Beitrag des Schwebungssignals von 1,2 Hz schließen. Vernachlässigt man die nicht korrigierte lineare Drift des Schwebungssignals ($0,5 \text{ Hz} \cdot \text{s}^{-1}$) und nimmt an, dass die Frequenzfluktuationen beider Laser unkorreliert sind und gleichermaßen zur Breite des Schwebungssignals beitragen, ergibt sich aus dem Spektrum in Bild 5 eine Laserlinienbreite von $\Delta\nu \approx 0,9 \text{ Hz}$.

Die kombinierte Instabilität eines 658 nm-Lasers und des 871 nm-Lasers wurde mit Hilfe eines optischen Frequenzkammgenerators als Transferoszillator bestimmt [3]. Das Verhältnis der optischen Frequenzen $\nu_0(658 \text{ nm}) / \nu_0(871 \text{ nm})$ wurde in einer Sequenz von 20 ms langen Mittelungsintervallen aufgezeichnet. Vor der Berechnung der Allan-Abweichung (siehe Bild 6) wurde von den registrierten Daten eine durch ungleiche Driften der Laserfrequenzen verursachte lineare Drift von ungefähr $5 \cdot 10^{-15} \text{ s}^{-1}$ abgezogen. Bild 6 zeigt außerdem das Niveau des thermischen $1/f$ -Rauschens, das nach dem Modell von Numata et al. [9] für die verwendeten Referenzresonatoren zu erwarten ist. Für Mittelungszeiten von $0,1 \text{ s} \leq \tau \leq 100 \text{ s}$ liegt die beobachtete Instabilität nicht wesentlich über dem thermischen Rauschniveau. Die bei $\tau \approx 0,1 \text{ s}$ beobachtete Instabilität ist vergleichbar mit der eines einzelnen 658 nm-Lasers mit $\Delta\nu = 1 \text{ Hz}$. Für $\tau < 0,1 \text{ s}$ steigt $\sigma_y(\tau)$ ungefähr proportional zu τ^{-1} , da die Verstärkung der Frequenzregelkreise wegen der begrenzten Bandbreite zu hohen Frequenzen hin abnimmt. Für $\tau > 100 \text{ s}$ führen Nichtlinearitäten der Frequenzdrift zu einem Anstieg der Allan-Abweichung mit $\sigma_y(\tau) \sim \tau$.

3 Weiterentwicklung und neue Konzepte

Die superstabilen Laser sind einzigartige Instrumente für Grundlagenforschung und Präzisionsmessungen – dennoch lassen sie sich noch weiter verbessern, um für spezielle Anwendungen die Stabilität weiter zu steigern oder um ihren Aufbau zuverlässiger zu gestalten. Ein Durchbruch zu noch höherer Frequenzstabilität kann allerdings nur gelingen, wenn mehrere Probleme gleichzeitig gelöst werden. Hier ist die Reduktion des thermischen Rauschens des Referenzresonators besonders wichtig, da diese Rauschquelle derzeit die Stabilität der meisten hochstabilen Laser begrenzt. Wenn die Stabilität

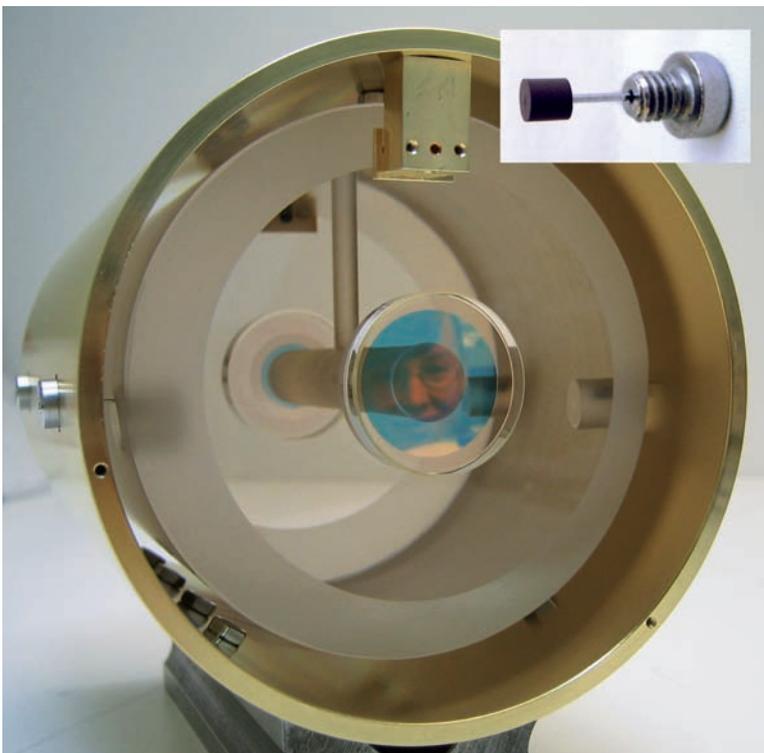


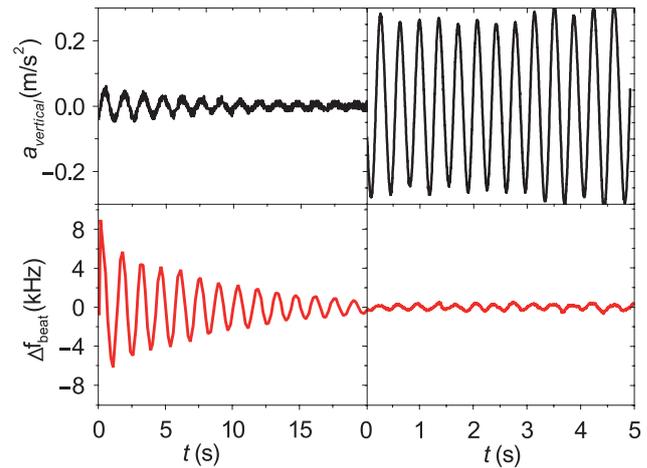
Bild 8:
Experimentelle Realisierung der in Bild 7 gezeigten FEM-Simulation einer vibrationsisolierten Resonatoraufhängung. Im kleinen Bild sieht man einen der Haltearme, die in die Sackbohrungen im ULE-Abstandhalter ragen.

deutlich gesteigert werden soll, müssen Verbesserungen auf diesem Gebiet allerdings von einer Erhöhung der Kurzzeitstabilität und effizienteren Methoden zur Vibrationsisolation des Referenzresonators begleitet werden.

3.1 Vibrationsunempfindliche Resonatoren

Konventionell wird der Referenzresonator auf Elastomer-Elemente gelegt, so dass sich die Auflagepunkte im unteren Teil der Zylinderfläche des Abstandshalters befinden (Bild 1). Diese Lagerung führt unausweichlich zu Änderungen im Abstand der Spiegel, wenn der Abstandshalter durch vertikale Beschleunigung elastisch verformt wird. Es gibt jedoch alternative Methoden der Halterung, bei denen der Spiegelabstand und damit die Resonanzfrequenz des Resonators unverändert bleibt, wenn der Resonator durch Trägheitskräfte verformt wird [19].

Eine neuartige vibrationsunempfindliche Resonatorlagerung wurde in der PTB entwickelt und untersucht [18, 20]. Unsere Realisierung beruht auf einer Unterstützung des Abstandshalters nahe seiner horizontalen Symmetrieebene. Vertikale Beschleunigungen dehnen bzw. stauchen den Resonator dann vorwiegend oberhalb und unterhalb der Symmetrieebene, wobei der Spiegelabstand unverändert bleibt. In Finite-Elemente-Simulationen wurde die Position der Auflagepunkte identifiziert, bei der die optische Resonanzfrequenz von der vertikalen Beschleunigung unabhängig wird (siehe Bild 7). Diese Aufhängung erhält die horizontale Symmetrie, so dass im Idealfall auch die Empfindlichkeit für horizontale Beschleunigung verschwindet.



Bei der ersten Realisierung wurde der Resonator mit Federstahldrähten gehalten, die am Auflagepunkt mit Vitonzyklindern ummantelt waren (siehe Bild 8). In neueren Aufbauten wurde eine robustere Konstruktion gewählt, um Beschädigungen während eines Transports zu verhindern. Bild 9 zeigt die erreichte Vibrationsisolation: Relativ zu einem stabilen Vergleichslaser wurde hier die Frequenz eines Lasers gemessen, dessen Referenzresonator periodisch beschleunigt wurde. Die experimentellen Ergebnisse zeigen die erheblich verbesserte Stabilität der Resonatoraufhängung.

Bild 9: Durch eine periodische vertikale Beschleunigung a_{vertical} induzierte Laserfrequenzvariationen Δf_{beat} bei einer konventionellen Aufhängung des Referenzresonators (links) und bei der realisierten vibrationsunempfindlichen Aufhängung (rechts) [20].

In Experimenten mit hochstabilen Lasern werden zunehmend vibrationsunempfindliche Referenzresonatoren eingesetzt. Dies ist insbesondere für Anwendungen wichtig, bei denen Vibrationen der Umgebung nicht gut unterdrückt werden können. Der in Bild 9 demonstrierte Grad von Vibrationsisolation ist außer-

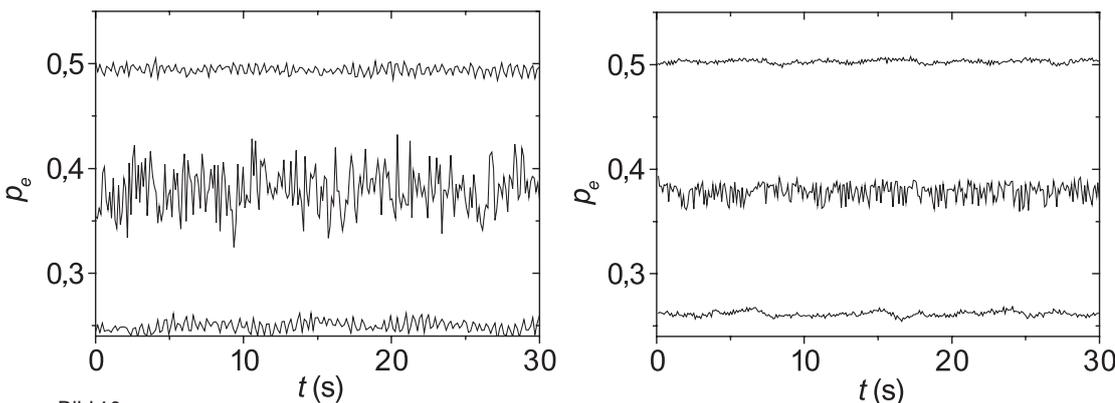


Bild 10: Zeitliche Veränderung der Anregungswahrscheinlichkeit ρ_e im Ca-Atominterferometer der PTB, gemessen am Maximum, Minimum und am Punkt größter Steigung des Interferenzsignals [23]. Links: Ohne Resonatorfilterung des Anregungslasers, rechts: mit Resonatorfilterung. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis am Punkt größter Steigung zeigt die erhöhte Kurzzeit-Frequenzstabilität bei Resonatorfilterung (siehe Text). Die Eliminierung anderer Rauschbeiträge im Interferometeraufbau führt zu dem verbesserten Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Maximum- und Minimum-Signale in der rechts gezeigten Messung.

dem eine notwendige Voraussetzung, um Resonatoren mit niedrigerem thermischen Rauschen gewinnbringend einzusetzen (siehe Kap. 3.3).

3.2 Der Referenzresonator als Filter

Lichtpulse von frequenzstabilisierten Lasern werden in Atominterferometern vom Ramsey-Bordé-Typ [21] benutzt, um atomare Materiewellen aufzuspalten und umzulenken. Die laserfrequenzempfindliche Variante eines

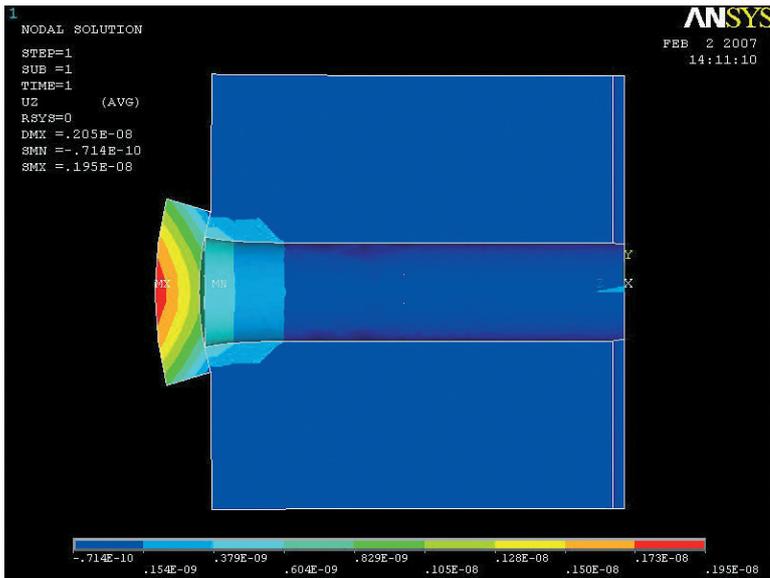
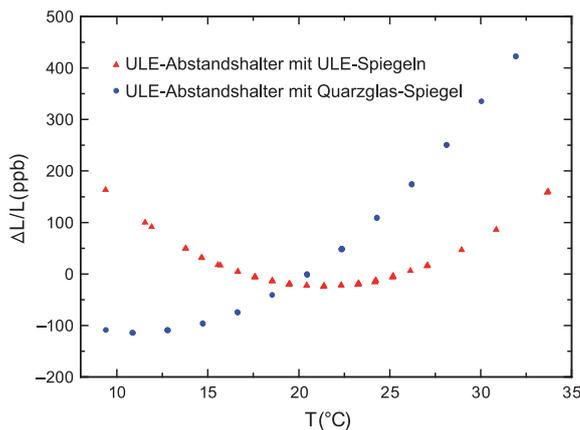


Bild 11: Finite-Elemente-Simulation der temperaturinduzierten Verformung eines Quarzglasspiegels, der fest mit einem ULE-Abstandshalter verbunden ist. Angenommen wurde eine Temperaturänderung von 0,25°C nach dem Zusammenbau. Die Farben zeigen eine axiale Verschiebung zwischen $-0,07$ nm (blau) und $1,7$ nm (rot).

Bild 12: Messung der temperaturinduzierten Längenänderungen eines ganz aus ULE-Glas aufgebauten Resonators und eines Resonators, bei dem ein ULE-Spiegelsubstrat durch ein Quarzglassubstrat ausgetauscht wurde. Der Nulldurchgang des thermischen Ausdehnungskoeffizienten verschiebt sich von 21°C auf 11°C.

derartigen Interferometers ist als optischer Frequenzstandard geeignet und wurde zu diesem Zweck an der PTB und am NIST mit Ca-Atomen verwirklicht [17]. Die Wechselwirkungszeit zwischen Licht und Atomen ist bei diesen Systemen üblicherweise kurz im Vergleich zur Länge des Messzyklus, der auch die Präparation und Detektion der Atome einschließt. Als Folge des niedrigen Tastverhältnisses verschlechtert Laserfrequenzrauschen mit hohen Fourierfrequenzen das Signal-zu-Rausch-Verhältnis bei niedrigeren Frequenzen (Dick-Effekt [22]). Leider sinkt die Frequenzstabilität bei hohen Fourierfrequenzen, weil die Schleifenverstärkung der Laserfrequenzregelung frequenzabhängig ist (vgl. Bild 6). In Verbindung mit dem Dick-Effekt kann die Kurzzeit-Instabilität der Laserfrequenz die Kurzzeitstabilität des Atominterferometer-Signals vermindern.

An der PTB wurde eine neue Idee demonstriert, wie die Kurzzeitstabilität eines Referenzresonator-stabilisierten Lasers erhöht werden kann: Um die hochfrequenten Anteile im Seitenbandspektrum des Laserlichts zu entfernen, verwenden wir das vom Referenzresonator transmittierte Licht. Der Resonator wirkt hier als bestmöglich abgestimmtes Bandpassfilter



mit sehr kleiner Bandbreite [18, 23]. Um die im Experiment erforderliche optische Leistung zu erhalten, steuert das transmittierte Licht durch Injektionskopplung eine zusätzliche Laserdiode.

Die Signale des Ca-Atominterferometers wurden im Betrieb mit und ohne Filterung verglichen. Um zwischen laserfrequenzabhängigem Rauschen und anderen Rauschquellen wie Atomzahlschwankungen zu unterscheiden, wurden die Signale auf dem Maximum, dem Minimum und bei der größten Steigung des Interferenzsignals aufgezeichnet. In erster Näherung ist nur die letzte Messung frequenzempfindlich. Bild 10 zeigt die erhebliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses durch die Filterung mit dem Resonator. Eine quantitative Untersuchung der Daten in Bild 10 zeigt, dass mit Resonatorfilterung die Signalqualität des Atominterferometers unter normalen Betriebsbedingungen nicht von der Kurzzeitstabilität des Lasers bestimmt wird, sondern vielmehr durch die kleineren Frequenzschwankungen auf der Skala der Zykluszeit.

3.3 Verringerung des thermischen Rauschens

Die Brownsche Bewegung des Resonatormaterials führt zu Schwankungen der Resonatorlänge. Dieser Effekt begrenzt gegenwärtig die Stabilität der besten Referenzresonator-stabilisierten Laser (siehe 1.3). Gemäß dem Fluktuations-Dissipations-Theorem werden die vom thermischen Rauschen hervorgerufenen Längenänderungen durch die Verwendung von Materialien mit hoher mechanischer Güte Q verringert. Bei einem ULE-Resonator mit einer Länge von $L = 100$ mm und der üblichen dielektrischen Spiegelbeschichtung tragen zum thermischen Rauschen der Resonatorfrequenz hauptsächlich Oberflächenanregungen der Spiegelsubstrate bei ($Q = 6 \cdot 10^4$, relative Größe des Beitrags: 84%) und in zweiter Linie die Spiegelbeschichtung ($Q = 2,5 \cdot 10^3$, relative Größe des Beitrags: 13%) [9].

Man kann verschiedene Ansätze verfolgen, um das thermische Rauschen zu reduzieren. Der hohe Beitrag der ULE-Spiegelsubstrate legt es nahe, diese durch ein anderes Material zu ersetzen oder die Länge des Resonators zu vergrößern. Bei einer erheblichen Vergrößerung des Resonators wäre es allerdings schwierig, ihn hinreichend stabil zu halten.

Ersetzt man die ULE-Spiegel durch Substrate mit höherer mechanischer Güte wie Quarzglas ($Q > 10^6$), werden die thermischen Frequenzfluktuationen eines 100 mm langen Resonators auf ein Fünftel reduziert. Allerdings führen die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von ULE und Quarzglas bei Temperaturänderungen zu mechanischen Spannungen, so dass sich die Temperatur des Nulldurchgangs des effektiven

Ausdehnungskoeffizienten stark verschiebt. Wir haben die temperaturinduzierte Verformung mit einer Finite-Elemente-Simulation berechnet (Bild 11) und den Ausdehnungskoeffizienten eines modifizierten Resonators gemessen, bei dem ein ULE-Spiegel durch einen Quarzglasspiegel ersetzt wurde. In guter Übereinstimmung mit den Rechnungen beobachtet man, dass sich die Nulldurchgangstemperatur des thermischen Ausdehnungskoeffizienten um ca. 10 °C verringert (Bild 12). Um starke temperaturinduzierte Schwankungen der Resonatorfrequenz zu vermeiden, müsste ein derartiger Resonator entweder sehr aufwendig thermisch isoliert oder in einem gekühlten Gehäuse betrieben werden.

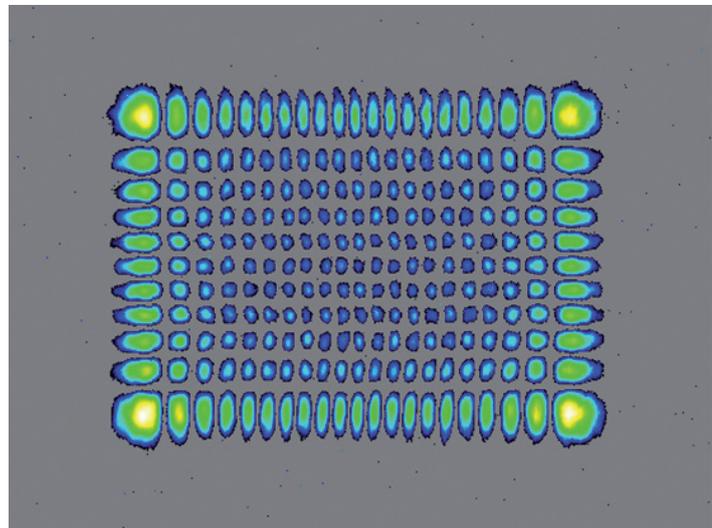
Ein anderer an der PTB verfolgter Weg ist, im Referenzresonator die effektive Spiegelfläche zu vergrößern, die vom zu stabilisierenden Laser beleuchtet wird. Dieser Ansatz verringert die zwei dominanten Rauschbeiträge des Spiegelsubstrates und der dielektrischen Beschichtung, da die thermischen Fluktuationen über eine größere Fläche gemittelt werden. Eine deutliche Vergrößerung des Durchmessers der TEM_{00} -Resonatorgrundmode würde bei allen realisierbaren Resonatorlängen zu extremen Anforderungen an die Fertigungstoleranzen für Abstand und Krümmung der Spiegel führen. Eine alternativer Ansatz, der auch mit herkömmlichen Resonatoren verfolgt werden kann, ist die Anregung von Gauß-Hermite-Moden hoher Ordnung ($TEM_{m,n}$ mit $m,n \gg 1$). Wir untersuchen die Möglichkeit, mit einem zweidimensionalen Flüssigkristall-Phasenmodulator Lichtstrahlen in einer Gauß-Hermite-Mode hoher Ordnung zu erzeugen (siehe Bild 13) und solche Moden selektiv in einem Resonator hoher Güte anzuregen.

Der nächstliegende Ansatz zur Verringerung des thermischen Rauschens ist es, die Temperatur des Referenzresonators zu senken. Bei 4 K betriebene optische Resonatoren zeigen sehr hohe Langzeitstabilität [13]. Aufgrund des Einbaus in einen Kryostaten erscheint es aber schwierig, eine mit herkömmlichen Aufbauten vergleichbare Kurzzeitstabilität zu erreichen. In Verbindung mit einer vibrationsunempfindlichen Resonatoraufhängung (Kap. 3.1) könnten kryogene Resonatoren aber zu einem Durchbruch bei der Entwicklung ultrastabiler Laser führen. Dabei ist die Wahl des Resonatormaterials von hoher Bedeutung, da der Gewinn durch Verringerung der Temperatur leicht durch eine Verschlechterung der mechanischen Güte Q aufgewogen werden kann. Außerdem ist ein niedriger Ausdehnungskoeffizient wünschenswert, um die Empfindlichkeit für Temperaturschwankungen zu reduzieren. In der PTB wird derzeit die Möglichkeit untersucht, einen gekühlten aus Silizium (Si) aufgebauten Referenzresonator zu realisie-

ren. Aufgrund der spektralen Transmission von Si liegt es nahe, einen Si-Resonator-stabilisierten Laser im Telekommunikations-Wellenlängenbereich ($\lambda \approx 1,5 \mu\text{m}$) zu betreiben. Hier sind Laser mit hoher Stabilität und Zuverlässigkeit verfügbar. Die Frequenzstabilität des Lasers kann dann mit Femtosekunden-Frequenzkammgeneratoren in andere Wellenlängenbereiche transferiert werden [3].

4 Ausblick

Superstabile Laser sind unverzichtbare Werkzeuge für experimentelle Tests von fundamentalen physikalischen Gesetzen und für Messungen mit beispielloser Genauigkeit. Die an der PTB entwickelten Systeme spielen eine zentrale Rolle insbesondere bei der Ausnutzung des enormen Genauigkeits- und Stabilitätspotentials



von optischen Uhren. Tatsächlich wird die Stabilität einiger der besten optischen Uhren durch die Instabilität der Abfragelaser begrenzt, auch wenn diese dem derzeit höchsten Entwicklungsstand entsprechen. Die größte Notwendigkeit für einen Durchbruch zu höherer Stabilität ergibt sich für den Zeitbereich von 0,1 s bis 100 s, in dem die erreichbare Stabilität gegenwärtig durch das thermische Rauschen der Referenzresonatoren begrenzt wird. Vermutlich muß die nächste Generation von superstabilen Lasern nicht allein in diesem Punkt optimiert werden, da für eine signifikante Verbesserung eine Reihe von Instabilitätsquellen ausgeschaltet werden müssen.

Wir beobachten, dass das Interesse an Lasern mit Linienbreiten im Hertz-Bereich nicht mehr allein auf die Grundlagenforschung unter Laborbedingungen beschränkt ist, sondern auch mögliche Anwendungen außerhalb des Labors in das Blickfeld rücken. Solche Anwendungen benötigen weiterentwickelte Referenzresonatoren, die unempfindlich für Umwelteinflüsse wie Vibrationen und Temperaturänderungen sind.

Bild 13: Bild eines $TEM_{20,10}$ -Laserstrahls, der mit einem zweidimensionalen Flüssigkristall-Phasenmodulator erzeugt wurde. Die Anregung von transversalen Moden höherer Ordnung in einem Referenzresonator verringert den Effekt des thermischen Rauschens im Vergleich zu der üblichen TEM_{00} -Anregung, da die thermischen Fluktuationen über eine größere Fläche gemittelt werden.

Wir erwarten, dass die gegenwärtig in der PTB durchgeführten Arbeiten die Entwicklung von robusten und transportablen hochstabilen Lasern und optischen Uhren vorantreiben werden.

Danksagung

Die Autoren möchten den derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitern der PTB danken, die zu den in diesem Bericht vorgestellten Ergebnissen beigetragen haben: D. Griebisch, J. Helmcke, A. Hoppmann, Th. Leder, T. Legero, B. Lipphardt, F. Mensing, M. Misera, T. Nazarova, F. Riehle, T. Schneider, I. Sherstov, B. Stein, U. Sterr und H. Stoehr. Die Arbeiten wurden durch die DFG über den SFB 407 und durch QUEST unterstützt.

Literatur

- [1] A. L. Schawlow, C. H. Townes: Infrared and optical masers. *Phys. Rev.* 112, 1940 (1958).
- [2] T. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, T. W. Hänsch: Accurate measurement of large optical frequency differences with a mode-locked laser. *Opt. Lett.* 24, 881 (1999).
- [3] Siehe „Hochgenaue Zeit- und Frequenzvergleiche über weite Strecken“ in dieser Ausgabe, S. 131.
- [4] J. Helmcke, S. A. Lee, J. L. Hall: Dye laser spectrometer for ultrahigh spectral resolution: design and performance. *Appl. Opt.* 21, 1686 (1982).
- [5] 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, 93 (1983).
- [6] Ch. Salomon, D. Hils, J. L. Hall: Laser stabilization at the millihertz level. *J. Opt. Soc. Am. B* 5, 1576 (1988).
- [7] M. Eichenseer: Aufbau und Charakterisierung eines hochstabilen Nd:YAG-Lasers für ein Indium-Frequenznormal. Doktorarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München (2003).
- [8] H. Stoehr: Diodenlaser mit Hertz-Linienbreite für ein optisches Calcium-Frequenznormal. Doktorarbeit, Univ. Hannover (2004).
- [9] K. Numata, A. Kemery, J. Camp: Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities. *Phys. Rev. Lett.* 93, 250602 (2004).
- [10] Für technische Informationen siehe: http://www.corning.com/specialtymaterials/products_capabilities/ULE.aspx
- [11] B. C. Young, F. C. Cruz, W. M. Itano, J. C. Bergquist: Visible lasers with subhertz linewidths. *Phys. Rev. Lett.* 82, 3799 (1999).
- [12] H. Grote et al.: The status of GEO 600. *Class. Quantum Grav.* 22, S193 (2005) und dort angegebene Quellen.
J. Hough, D. Robertson, H. Ward, P. McNamara and LISA science team: LISA – the interferometer. *Adv. Space Res.* 32, 1247 (2003).
- [13] P. Antonini, M. Okhapkin, E. Göklü, S. Schiller: Test of constancy of speed of light with rotating cryogenic optical resonators. *Phys. Rev. A* 71, 050101(R) (2005).
- [14] H. Müller: Testing Lorentz invariance by the use of vacuum and matter filled cavity resonators. *Phys. Rev. D* 71, 045004 (2005).
S. Herrmann, S. Senger, E. Kovalchuk, H. Müller, A. Peters: Test of the isotropy of the speed of light using a continuously rotating optical resonator. *Phys. Rev. Lett.* 95, 150401 (2005).
- [15] Siehe „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123.
- [16] H. Stoehr, F. Mensing, J. Helmcke, U. Sterr: Diode Laser with 1 Hz linewidth. *Opt. Lett.* 31, 736 (2006).
- [17] U. Sterr, C. Degenhardt, H. Stoehr, Ch. Lisdat, H. Schnatz, J. Helmcke, F. Riehle, G. Wilpers, Ch. Oates, L. Hollberg: The Optical Calcium Frequency Standards of PTB and NIST. *C. R. Physique* 5, 845 (2004).
- [18] T. Nazarova: Towards the quantum noise limit in Ramsey-Bordé atom interferometry. Doktorarbeit, Leibniz Universität Hannover (2007).
- [19] 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).
S. A. Webster, M. Oxborrow, P. Gill: Vibration insensitive optical cavity. *Phys. Rev. A* 75, 011801(R) (2007).
- [20] T. Nazarova, F. Riehle, U. Sterr: Vibration-insensitive reference cavity for an ultranarrow-linewidth laser. *Appl. Phys. B* 83, 531 (2006).
- [21] C. J. Bordé: Atomic interferometry with internal state labelling. *Phys. Lett. A* 140, 10 (1989).
- [22] G. Dick: Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards. In: *Proceedings of 19th Annual Precise Time and Time Interval Application and Planning Meeting*, p. 133 (1987).
- [23] T. Nazarova, Ch. Lisdat, F. Riehle, U. Sterr: Low-frequency noise diode laser for atom interferometry. *J. Opt. Soc. Am. B* 25, 1632 (2008).

Quantenlogik für die Präzisionspektroskopie

Piet O. Schmidt¹, Borge Hemmerling², Birgit Brandstätter³,
Daniel Nigg⁴

1 Einführung

Unser aktuelles Verständnis der Physik basiert auf dem Standardmodell der Teilchenphysik. Obwohl sich das Modell in vielerlei Hinsicht bewährt hat, wird gemeinhin angenommen, dass es durch eine vollständigere Theorie ersetzt werden wird. Eine derartige Theorie müsste eine Quantentheorie sein, die alle vier fundamentalen Kräfte vereinigt. Einige Kandidaten für solch eine „Theorie für Alles“ erlauben eine Variation von fundamentalen Konstanten. Die Idee von sich ändernden physikalischen Konstanten wurde zum ersten Mal von Dirac in seiner „Hypothese großer Zahlen“ geäußert. Hierbei stellte Dirac eine Relation zwischen der Stärke der elektromagnetischen und der gravitativen Wechselwirkung zum Alter des Universums auf. Da das Universum weiter altert, muss sich nach der Hypothese auch eine der fundamentalen Konstanten ändern, die Elektromagnetismus bzw. Gravitation beschreiben.

In der Zwischenzeit wurden viele Erweiterungen und Variationen der Hypothese postuliert. Die Beobachtung einer derartigen Änderung von Fundamentalkonstanten würde unser derzeitiges Verständnis der Physik revolutionieren. Selbst eine Einschränkung der Änderungsrate zu immer kleineren Werten würde helfen, Vorhersagen von Theorien jenseits des Standardmodells zu testen. Dabei ist es sinnvoll, nur dimensionslose Konstanten zu betrachten, da man ansonsten nicht zwischen einer Änderung des Werts und der Maßeinheit einer Konstanten unterscheiden könnte. Mögliche experimentell zugängliche Kandidaten für eine zeitliche Änderung sind (neben anderen) die Feinstrukturkonstante α , die die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung beschreibt, sowie das Massenverhältnis zwischen Elektron und Proton m_e/m_p [1].

Im Jahr 2001 wurde die Diskussion um eine Änderung der Feinstrukturkonstanten durch eine Publikation von Webb und Mitarbeitern [2] angeregt, die behaupteten, eine Änderung von α auf kosmologischen Zeitskalen beobachtet zu haben. Für ihre Analyse haben sie Spektren von

Licht aufgenommen, das von Quasaren emittiert wurde. Diese Spektren zeigen Absorptionslinien von Atomen und Molekülen, die dem Licht aufgeprägt wurden, als dieses auf seinem Weg zur Erde interstellare Wolken durchlief. Bei dem Vergleich mit Spektren, die im Labor aufgenommen wurden zeigt sich, dass α vor 10^{10} Jahren einen um $(5,4 \pm 1,2) \cdot 10^{-6}$ kleineren Wert gehabt haben könnte. Ähnliche Untersuchungen wurden von anderen Kollaborationen durchgeführt, die dieses Ergebnis nicht bestätigen konnten [3, 4] und damit den Ausgang der Kontroverse offen lassen. Die Zuverlässigkeit dieser Analysen ist derzeit auch durch die Präzision der Laborspektren begrenzt [5].

Eine Änderung von fundamentalen Konstanten auf der Laborzeitskala dagegen kann durch einen hochpräzisen Langzeitvergleich zweier atomarer oder molekularer Übergänge ermittelt werden, deren Frequenzen in unterschiedlicher Weise von der betrachteten Konstante abhängen. Ein Beispiel ist der kürzlich durchgeführte Vergleich zwischen den optischen Einzelionenuhren mit Quecksilber und Aluminium [6]. Über einen Zeitraum von fast einem Jahr wurden Frequenzmessungen zwischen den Uhrenübergängen dieser Ionen durchgeführt, die eine Obergrenze für eine relative Änderung von α von $(-1,6 \pm 2,3) \cdot 10^{-17}/\text{Jahr}$ ergaben.

Im Folgenden werden wir zwei Projekte beschreiben, die derzeit am QUEST-Institut für Experimentelle Quantenmetrologie aufgebaut werden mit dem Ziel, die Frage einer möglichen zeitlichen Änderung von Fundamentalkonstanten lösen zu helfen.

2 Quantenlogik und Präzisionspektroskopie

Beiden Projekten gemeinsam ist der Verwendung von Quantenlogik-Techniken, die ursprünglich für Quanteninformationsverarbeitung mit gefangenen Ionen entwickelt wurden. Die Idee basiert auf Ketten von in einer linearen Paulifalle gefangenen Ionen, die über ihre gegenseitige Coulombabstoßung stark gekoppelt

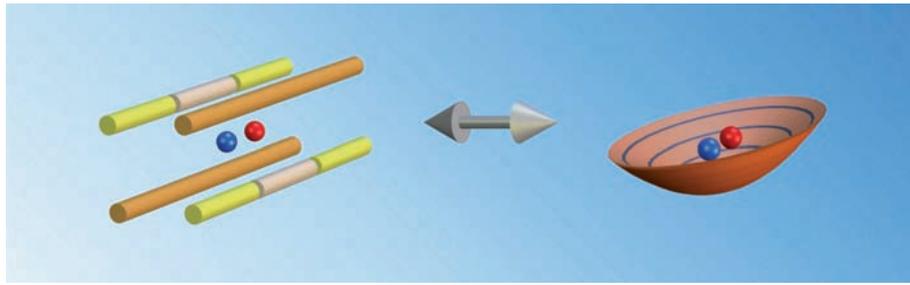
¹ Prof. Dr. Piet O. Schmidt, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig und Leibniz Universität Hannover E-Mail: piet.schmidt@ptb.de

² Dipl.-Phys. Borge Hemmerling, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig und Leibniz Universität Hannover

³ Dipl.-Ing. Birgit Brandstätter, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck

⁴ Daniel Nigg, QUEST Institut für experimentelle Quantenmetrologie, PTB Braunschweig, Leibniz Universität Hannover und Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck

Bild 1:
Speicherung von zwei Ionen in einer linearen Paulfalle. Links: Speicherung der Ionen in elektrischen Feldern, die durch Hochfrequenz- (orange) und Gleichspannungs-Elektroden (gelb und grau) erzeugt werden. Rechts: Das resultierende Potential ist in allen drei Richtungen harmonisch. Die Bewegung der Ionen ist über ihre Coulombabstoßung stark gekoppelt.



sind. Die Bewegung der Ionen wird in diesem Fall über kollektive Bewegungen aller Ionen beschrieben. Mit Laserlichtpulsen geeigneter Frequenz und Dauer ist es nicht nur möglich, den internen elektronischen Zustand der Ionen zu ändern, sondern auch ihren Bewegungszustand in der Falle. Cirac und Zoller schlugen vor, solche Laserpulse dazu zu benutzen, Ionen über die gemeinsame Bewegung in der Falle als „Quantenbus“ zu verschränken und so Quantenlogikgatter zu implementieren [7].

Kurz nach diesem wegweisenden Vorschlag wurde in einem Pionierexperiment ein *controlled NOT*-Gatter zwischen einem gefangenen atomaren Ion und seinem Bewegungszustand realisiert [8]. Nach dieser Demonstration einer praktisch perfekten kohärenten Kontrolle der internen und externen Freiheitsgrade in einem atomaren System blühte die Quanteninformatonsverarbeitung mit gefangenen Ionen auf und beeindruckende Resultate wie Teleportation, Fehlerkorrektur und die Implementierung der Deutsch-Jozsa- und semiklassischen Fouriertransformationalgorithmen wurden erreicht.

Quantenlogik-Techniken zur Verbesserung von Präzisionsspektroskopie vorgeschlagen [12, 13] und demonstriert [14, 15].

Präzisionsspektroskopie wird typischerweise an einer lasergekühlten atomaren Probe durchgeführt, um Dopplerverschiebungen zu reduzieren und Abfragezeiten zu erhöhen. Danach wird der zu untersuchende Übergang mit einem frequenzstabilisierten Laser angeregt. Die Anregungswahrscheinlichkeit wird entweder direkt über Fluoreszenz oder über die *electron shelving*-Technik durchgeführt, die ein drittes atomares Niveau voraussetzt. In beiden Fällen wird ein schneller zyklischer Übergang benötigt, um eine für die Zustandsunterscheidung ausreichende Anzahl von Photonen zu detektieren. Dies stellt eine signifikante Einschränkung der atomaren und molekularen Spezies dar, die für die Hochpräzisionsspektroskopie geeignet sind. Wineland schlug im Jahr 2001 vor, Quantenlogik-Techniken zu verwenden, um diese Einschränkung zu überwinden [12]. In seinem Schema wird ein Spektroskopie-Ion zusammen mit einem Logik-Ion im selben Potentialtopf einer

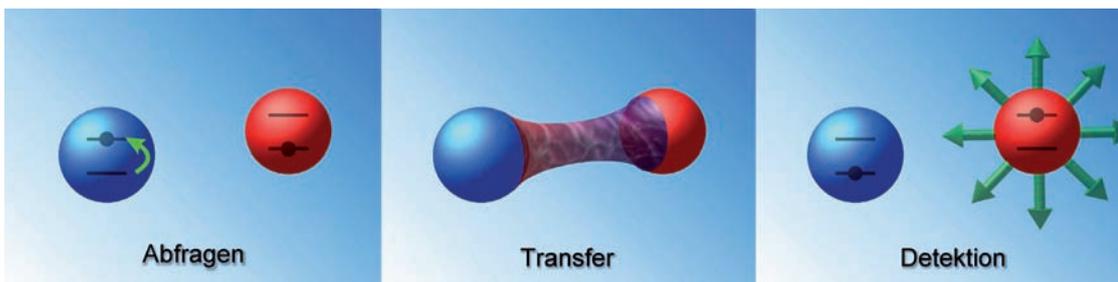


Bild 2:
Schematische Beschreibung der Quantenlogikspektroskopie. Links: Der Übergang im Spektroskopie-Ion (blau) wird mit einem Laser angeregt. Mitte: Die Zustandsinformation wird auf das Logik-Ion (rot) übertragen. Rechts: Effiziente Zustandsdiskriminierung am Logik-Ion durch „electron shelving“.

Derzeitiger Stand der Technik ist die Manipulation von bis zu acht Ionen [9, 10] und Güten von Ionengattern mit zwei Ionen von über 99,3% [11]. Diese Errungenschaften waren nur durch die effiziente Entkopplung der internen und externen Freiheitsgrade von Dekohärenz erzeugenden Umwelteinflüssen und durch Manipulation von internen Zuständen mit Hilfe von hochkohärentem Laserlicht möglich. Dieselben Anforderungen gelten für die Präzisionsspektroskopie, bei der Frequenzmessungen von ungestörten atomaren oder molekularen Resonanzen durchgeführt werden. Tatsächlich haben die beiden Fachgebiete viele Gemeinsamkeiten und inzwischen wurden eine Reihe von

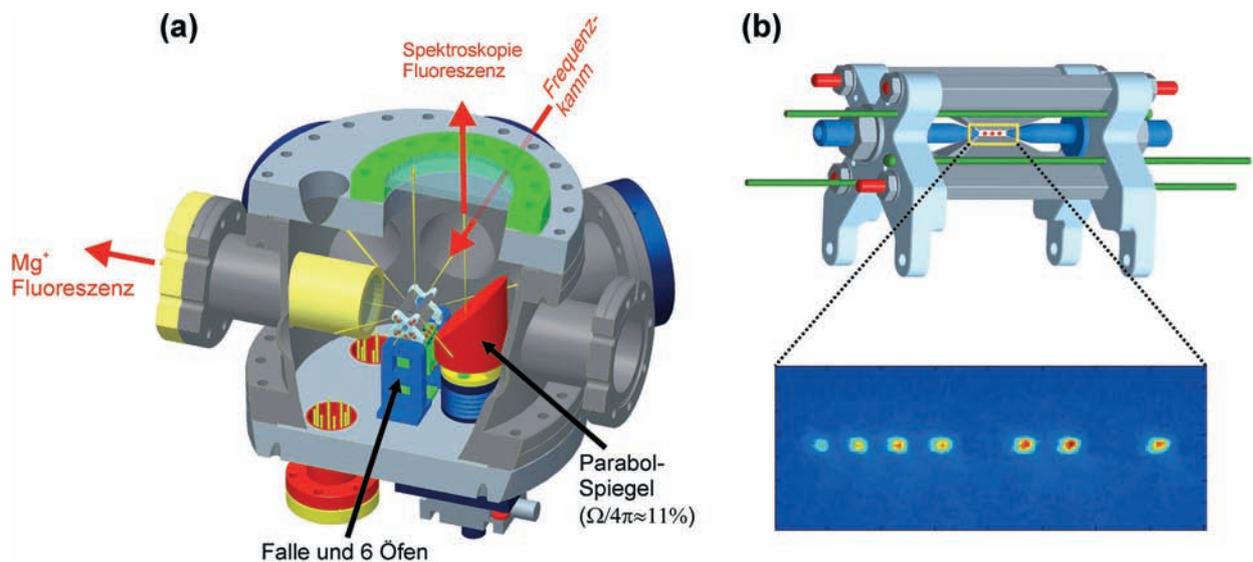
linearen Paulfalle gefangen (siehe Bild 1). Über die starke Kopplung der Bewegung zwischen den Ionen wird das Spektroskopie-Ion durch Laserkühlung des Logik-Ions mitgekühlt. Mit Hilfe von Quantenlogikprotokollen kann die interne Zustandsinformation des Spektroskopie-Ions nach der Abfrage des Übergangs getreu auf das Logik-Ion übertragen werden, wo sie mit praktisch 100% Effizienz nachgewiesen wird (Bild 2).

Zusätzlich kann der interne Zustand innerhalb der möglichen Spektroskopiezustände deterministisch mit dieser Technik präpariert werden [14]. Folglich erlaubt es die Quantenlogik, alle Anforderungen zu erfüllen, die für die Präzisionsspektroskopie an Ionen mit feh-

lendem zyklischem Übergang notwendig sind. Diese Methode ist daher besonders vielversprechend für Ionen mit zyklischen Übergängen im Vakuum-UV-Spektralbereich, in dem keine Laserquellen verfügbar sind sowie für molekulare Ionen mit einer komplexen internen Niveaustuktur mit vielen möglichen Zerfallskanälen vom angeregten Zustand. Das beschriebene Protokoll funktioniert am Besten für langlebige (im Vergleich zur Dauer des Transferprozesses) angeregte Zustände. In einer Variation des Schemas kann Quantenlogikspektroskopie aber auch an Übergängen mit einer kurzen Lebensdauer durchgeführt werden. Durch diese Technik eröffnen sich eine ganze Reihe von neuen Anwendungsmöglichkeiten. Sie ermöglicht bislang un-

werden. Eine alternative Lösung besteht darin, das Atom durch optisches Pumpen der metastabilen Zustände zurück in die Spektroskopie-niveaus zu transferieren. Dazu wird Licht bei vielen unterschiedlichen Wellenlängen benötigt, um alle Übergänge adressieren zu können. Eine derartige Quelle mit einem sehr breiten Spektrum ist der optische Frequenzkammgenerator [18]. Seine Entdeckung durch Hänsch und Hall ist 2005 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet worden. In der Zwischenzeit haben sich zwei Frequenzkammtechnologien etabliert: Ti:Saphir-basierte Systeme mit Puls-wiederholraten zwischen 80 MHz bis zu 10 GHz und spektraler Emission zwischen 600 nm und 1200 nm sowie Faserlaser-basierte Systeme mit

Bild 3:
Aufbau des Spektroskopie-experiments. (a) Konstruktionszeichnung der Vakuumapparatur. (b) Detail der Ionenfalle und eine Kette von Magnesiumionen, wie sie in der Falle beobachtet wurden (Falschfarbenbild).



erreichte Präzision in der Spektroskopie bei einer breiten Auswahl von atomaren und molekularen Spezies mit interessanten spektroskopischen Eigenschaften und Anwendungen, wie z.B. eine erhöhte Empfindlichkeit auf die Änderung von fundamentalen physikalischen Konstanten [16, 17] oder atomare Uhren [6, 14].

3 Direkte Frequenzkammspektroskopie mit Quantenlogik

Viele atomare und molekulare Spezies mit interessanten spektroskopischen Eigenschaften besitzen eine sehr komplexe Niveaustuktur. Wie oben beschrieben, können Quantenlogik-Techniken eingesetzt werden, um das Ion in den Spektroskopieniveaus zu präparieren und abzufragen. Trotzdem kann die Zustandspräparation aufwändig sein, falls zu viele Niveaus involviert sind. In der konventionellen Spektroskopie wird dieses Problem umgangen, indem sehr viele Atome in einem Strahl oder in einer Gaszelle untersucht werden, wobei jedoch Abstriche in der Meßgenauigkeit durch Niveaushiftungs- und Verbreiterungseffekte in Kauf genommen

Puls-wiederholraten zwischen 100 MHz und 200 MHz und einer spektralen Emission zwischen 900 nm und 2 µm. Externe Frequenzverdopplung und -verdreifachung in nichtlinearen Kristallen und die Erzeugung hoher Harmonischer in Gasjets erlauben es, das emittierte Licht in andere Spektralbereiche zu verschieben. Die von diesen System abgestrahlte regelmäßige spektrale Kammstruktur ist phasen- und frequenzstabilisiert und stellt damit ein fixiertes „Lineal im Frequenzraum“ dar, das als eine Ansammlung von phasenstabilisierten kontinuierlichen Einfrequenz-Lasern angesehen werden kann. Dies macht Frequenzkämme nicht nur zu idealen Instrumenten für die Frequenzmessung [18], sondern auch für Spektroskopie direkt mit dem breiten Ausgangsspektrum des Kamms. Direkte Frequenzkammspektroskopie wurde in einer Reihe von Varianten durchgeführt: (i) Eine einzelne Kammkomponente wechselwirkt mit einem Übergang [19]; (ii) der Kamm als ganzes wird für Zweiphotonenanregungen eingesetzt, bei der Resonanzüberhöhung durch ein zwischenliegendes Niveau ausgenutzt werden kann [20, 21]; (iii) der Kammgenerator fungiert als

breitbandige Quelle und wechselwirkt simultan mit vielen Übergängen im untersuchten Atom oder Molekül [22].

Wir bauen derzeit ein Experiment auf, in dem wir direkte Frequenzkammspektroskopie von Metallionen wie z.B. Ca^+ , Ti^+ und Fe^+ durchführen wollen, wobei Quantenlogik für die Zustandspräparation und Detektion eingesetzt werden soll. Abhängig von der Ionenspezies werden entweder Zweiphotonenübergänge (Ca^+) angeregt oder der Frequenzkamm als breitbandige Anregungsquelle für viele Übergänge gleichzeitig eingesetzt (Ti^+ , Fe^+). Optische Übergänge in diesen Ionen werden bei der Analyse

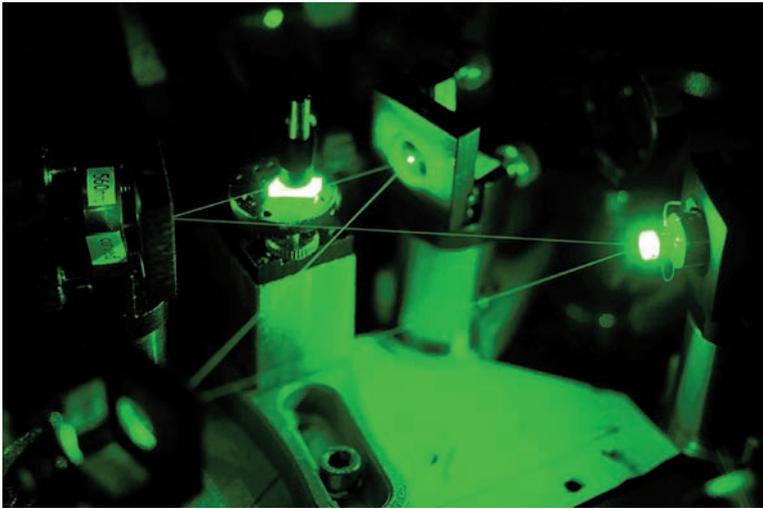


Bild 4: Detail des experimentellen Aufbaus: Die letzte Frequenzverdopplungsstufe zur Erzeugung des ultravioletten Lichts zur Kühlung und Detektion von Magnesiumionen. Vier Spiegel bilden einen gefalteten Resonator, der resonant mit dem Pumplicht bei 560 nm ist. In einem nichtlinearen Kristall wird das Licht zur Wellenlänge 280 nm konvertiert. (Bild: Universität Innsbruck)

von Quasar-Absorptionsspektren verwendet und sind derzeit nur mit einer Genauigkeit zwischen einigen 10 MHz bis zu einigen Gigahertz bekannt [23]. Jedoch werden Genauigkeiten von besser als 1 MHz benötigt, um die Analyse bezüglich der zeitlichen Änderung von Fundamentalkonstanten aus astronomischen Beobachtungen zu verbessern [5].

In unserem Experiment planen wir, ein einzelnes Spektroskopie-Ion zusammen mit dem Logik-Ion Mg^+ in einer linearen Paulfalle zu speichern. Licht aus einem Frequenzkammgenerator wird entlang der Symmetrieachse der Falle eingestrahlt (siehe Bild 3). Unser erster Kandidat ist Ca^+ , für das genaue Messungen zum $^2\text{S}_{1/2} - ^2\text{P}_{3/2}$ -Übergang fehlen [24]. Die Spektroskopie wird in mehreren Schritten durchgeführt (Bild 5): (i) Der Ionenkristall wird über Raman-Seitenbandkühlen von Mg^+ in den Bewegungsgrundzustand gebracht; (ii) der optische Frequenzkamm wird in seiner Frequenz verändert und für einige hundert Millisekunden auf das Spektroskopie-Ion eingestrahlt; (iii) Photonenstreuung heizt den Ionenkristall zu höheren Vibrationsquantenzahlen, was mit nahezu 100% Effizienz am Mg^+ -Ion nachgewiesen werden kann. Diese Schritte werden wiederholt durchgeführt, wobei in jedem Zyklus die Wiederholrate

bzw. die Versatzfrequenz des Frequenzkamms geändert wird. Auf diese Weise kann über einen Vergleich mit einem theoretischen Modell die globale elektronische Niveaustuktur des atomaren Systems bestimmt werden [21] [siehe Bild 5(c)].

Eine ähnliche Methode wird für die Spektroskopie von Ti^+ und Fe^+ verwendet. Im Prinzip sollte es möglich sein, denselben Aufbau für die Untersuchung einer ganzen Reihe von Spektroskopie-Ionen einzusetzen, vorausgesetzt, dass die spektrale Bandbreite des Frequenzkamms alle Übergänge abdeckt. Wir werden mit anderen QUEST-Partnern (U. Morgner und LZH) zusammenarbeiten, um optische Frequenzkämme in den für viele atomare Ionen relevanten nahen ultravioletten Spektralbereich zu transferieren.

Die oben beschriebenen Quantenlogik-Techniken können nicht nur für die Präzisionspektroskopie eingesetzt werden, sondern auch für die Kühlung von Rotationsfreiheitsgraden von Molekülen [25]. Mit Molekülen im absoluten Grundzustand können eine große Vielfalt an faszinierenden Experimenten durchgeführt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, Präzisionsmessungen von verschiedenen elektronischen und Rotations-Vibrationsübergängen mit Hilfe der oben beschriebenen direkten Frequenzkammspektroskopie durchzuführen. Das wäre besonders interessant für das astrophysikalisch relevante CaH^+ -Molekül, für das keine experimentellen Daten bekannt sind. Wir werden auch die Möglichkeit untersuchen, dieses Schema auf andere kleine Moleküle wie z.B. H_2^+ und HD^+ zu übertragen, die für m_e/m_p -Messungen relevant sind.

4 Eine Einzelionen-Uhr mit Quantenlogik

Eine weitere Anwendung der Quantenlogik-Spektroskopie ist die Entwicklung von optischen Uhren der nächsten Generation [26]. Bis jetzt mussten Atome, die für optische Uhren in Betracht gezogen wurden, mehrere Kriterien erfüllen: Sie mussten einen geeigneten Übergang zur Laserkühlung und Detektion aufweisen, sowie einen schmalbandigen Uhrenübergang mit geringer Empfindlichkeit für Störungen durch externe Felder. Mit Quantenlogikspektroskopie reduzieren sich diese Anforderungen auf eine einzige relevante, nämlich einen geeigneten Uhrenübergang, da alle anderen Anforderungen über die Quantenlogik erfüllt werden können. Dies wurde bereits erfolgreich mit Aluminium als Uhren- und Beryllium als Logik-Ion demonstriert [14]. In der Zwischenzeit hat sich die Aluminiumionen-Uhr zu einer der genauesten Uhren der Welt entwickelt [6]. Die Limitierungen dieses Experiments bestehen in Frequenzverschiebungen aufgrund von Mikro- und

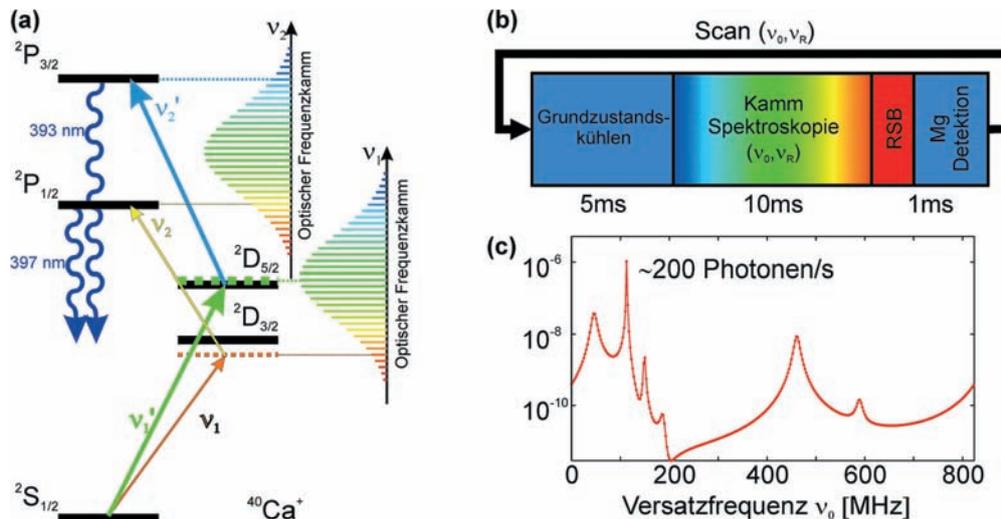


Bild 5: Direkte Frequenzkamm-spektroskopie von Ca^+ . (a) Partielle Niveaustruktur von Ca^+ und Anregung über einen optischen Frequenzkamm. (b) Zyklus der Quantenlogikspektroskopie. (c) Simulation (Dichtematrixrechnung) der Zahl der auf dem $\text{P}_{1/2} - \text{S}_{1/2}$ -Übergang gestreuten Photonen als Funktion der über den Bereich der Wiederholrate (824 MHz) verstimmen Versatzfrequenz.

Makrobewegung des Ions in der Falle. Mikrobewegung wird dabei vermutlich aufgrund der Aufladung der Elektroden durch ultraviolettes Laserlicht erzeugt. Heizung des Ionenkristalls während der Abfrage des Uhrenübergangs führt zu einer Unsicherheit in der Amplitude der Makrobewegung und damit zu einer Dopplerverschiebung zweiter Ordnung. Beide Effekte können in einem neuen Aufbau, der sich durch eine Falle mit niedriger Heizrate und einem für den Photoeffekt weniger anfälligen Elektrodenmaterial auszeichnet, signifikant reduziert werden. Wir planen ein solches Experiment mit Aluminium als Uhren-Ion und einem neuen Fallendesign aufzubauen, das die oben beschriebenen Probleme überwindet. Der Aufbau einer derartigen hochgenauen Uhr an der PTB wird den Weg für Aluminium als sekundäres Frequenznormal ebnen, aber auch Frequenzmessungen mit beispielloser Auflösung ermöglichen. Hier wäre es von besonderem Interesse, das Aluminiumfrequenznormal mit anderen Frequenznormalen der PTB über den Zeitraum von vielen Jahren zu vergleichen, um eine obere Grenze für die zeitliche Änderung der Feinstrukturkonstanten auf der Laborzeitskala abzuleiten.

Danksagung

Wir bedanken uns für die Unterstützung von Manuel Kluibenschädl, Arthur Wander, Gerhard Händl (Elektronikwerkstatt), Helmut Jordan, Anton Schönherr, Andreas Strasser und Stefan Haslwanter (Mechanikwerkstatt) und Lukas an der Lan beim Aufbau der Apparatur. Dieses Projekt wurde von der Universität Innsbruck, dem START-Preis des österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung (BMWF) und vom Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST) finanziell unterstützt. Weiterhin danken wir Rainer Blatt für großzügige Geräteleihen und Unterstützung.

Literatur

- [1] Siehe „Wozu brauchen wir genauere Uhren?“ in dieser Ausgabe, S. 112.
- [2] *J. Webb et al.*: Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant. *Phys. Rev. Lett.* 87, 091301 (2001).
- [3] *R. Srikanand, H. Chand, P. Petitjean, B. Aracil*: Limits on the time variation of the electromagnetic fine-structure constant in the low energy limit from absorption lines in the spectra of distant Quasars. *Phys. Rev. Lett.* 92, 121302 (2004).
- [4] *R. Quast, D. Reimers, S. A. Levshakov*: Probing the variability of the fine-structure constant with the VLT/UVES. *Astron. Astrophys.* 415, L7 (2004).
- [5] *J. C. Berengut et al.*: Laboratory spectroscopy and the search for space-time variation of the fine structure constant using QSO spectra. arXiv: physics/0408017 (2004).
- [6] *T. Rosenband et al.*: Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; metrology at the 17th decimal place. *Science* 319, 1808 (2008).
- [7] *J. I. Cirac and P. Zoller*: Quantum computations with cold trapped ions. *Phys. Rev. Lett.* 74, 4091 (1995).
- [8] *C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, D. J. Wineland*: Demonstration of a fundamental quantum logic gate. *Phys. Rev. Lett.* 75, 4714 (1995).
- [9] *H. Häffner et al.*: Scalable multiparticle entanglement of trapped ions. *Nature* 438, 643 (2005).
- [10] *D. Leibfried et al.*: Creation of a six-atom „Schrödinger cat“ state. *Nature* 438, 639 (2005).
- [11] *J. Benhelm, G. Kirchmair, C.F. Roos, R. Blatt*: Towards fault-tolerant quantum computing with trapped ions. *Nature Physics* 4, 463 (2008).

- [12] *D. Wineland, J. Bergquist, J. Bollinger, R. Drullinger, W. Itano*: Quantum computers and atomic clocks. In: Proc. 6th Symposium on Frequency Standards and Metrology, (St. Andrews, Scotland, 2001) ed. P. Gill (World Scientific, Singapore, 2001), p. 361.
- [13] *C. F. Roos*: Precision frequency measurements with entangled states. arXiv:quant-ph/0508148 (2005).
- [14] *P. O. Schmidt, T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, D. J. Wineland*: Spectroscopy using quantum logic. *Science* 309, 749 (2005).
- [15] *C. F. Roos, M. Chwalla, K. Kim, M. Riebe, R. Blatt*: ‚Designer atoms‘ for quantum metrology. *Nature* 443, 316 (2006).
- [16] *J.-P. Uzan*: The fundamental constants and their variation: observational and theoretical status. *Rev. Mod. Phys.* 75, 403 (2003).
- [17] *S. G. Karshenboim*: Fundamental physical constants: looking from different angles. arXiv: physics/ 0506173 (2005).
- [18] *T. Udem, R. Holzwarth, T. W. Hänsch*: Optical frequency metrology. *Nature* 416, 233 (2002).
- [19] *V. Gerginov, C. E. Tanner, S. A. Diddams, A. Bartels, L. Hollberg*: High-resolution spectroscopy with a femtosecond laser frequency comb. *Opt. Lett.* 30, 1734 (2005).
- [20] *A. Marian, M. C. Stowe, J. R. Lawall, D. Felinto, J. Ye*: United time-frequency spectroscopy for dynamics and global structure, *Science* 306, 2063 (2004).
- [21] *A. Marian, M. C. Stowe, D. Felinto, J. Ye*: Direct frequency comb measurements of absolute optical frequencies and population transfer dynamics. *Phys. Rev. Lett.* 95, 023001 (2005).
- [22] *M. Thorpe, J. Ye*: Cavity-enhanced direct frequency comb spectroscopy. *Appl. Phys. B* 91, 397 (2008).
- [23] *D. C. Morton*: Atomic data for resonance absorption lines. III. Wavelengths longward of the Lyman limit for the elements Hydrogen to Gallium. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 149, 205 (2003).
- [24] *A. L. Wolf, S. A. van den Berg, C. Gohle, E. J. Salumbides, W. Ubachs, K. S. E. Eikema*: Frequency metrology on the $4s\ ^2S_{1/2}-4p\ ^2P_{1/2}$ transition in $^{40}\text{Ca}^+$ for a comparison with Quasar data, *Phys. Rev. A* 78, 032511 (2008).
- [25] *P. O. Schmidt et al.*: Spectroscopy of atomic and molecular ions using quantum logic. In: *Non-Neutral Plasma Physics VI: Workshop on Non-Neutral Plasmas 2006*, eds. M. Drewsen, U. Uggerhoj, H. Knudsen, vol. 862 (AIP, 2006), p. 305.
- [26] Siehe „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123

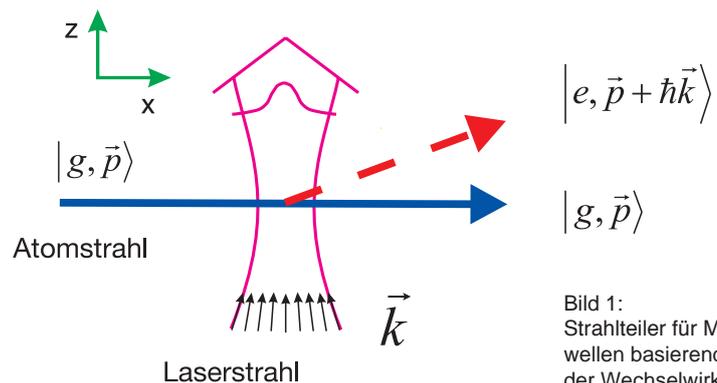
Atominterferometrie

Uwe Sterr¹ und Fritz Riehle²

1 Einleitung

Im 19. Jahrhundert waren die Interferenzexperimente von Fizeau und Young der entscheidende Beweis für die Wellennatur des Lichts. Interferometrie mit Licht wurde seit dem Ende des 19. Jahrhunderts in vielen Präzisionsexperimenten eingesetzt. Die Vorstellung, dass Materie ebenfalls durch Wellen beschrieben werden muss, wurde in den frühen Tagen der Quantenmechanik von E. Schrödinger und L. de Broglie eingeführt. Sie schrieben einem Teilchen mit Impuls p eine Wellenlänge $\lambda = h/p$ zu, wobei h die Plancksche Konstante bezeichnet. Bei lasergekühlten Teilchen mit einer Temperatur von $T = 20 \mu\text{K}$ liegt die entsprechende de-Broglie-Wellenlänge im Bereich von 100 Nanometern. Bei Raumtemperatur liegt die Wellenlänge bei wenigen Pikometern und damit fünf Größenordnungen unterhalb der Wellenlänge von sichtbarem Licht. Man erwartet deshalb, mit Atominterferometern eine weitaus höhere Empfindlichkeit als mit optischen Interferometern zu erreichen. Die Verwendung von Atominterferometern wurde jedoch für lange Zeit durch technische Schwierigkeiten erschwert, da kohärenzerhaltende Strahlteiler und Spiegel für Materiewellen nicht verfügbar waren. Nach den ersten Experimenten zur Beugung von Materiewellen in den 1930er Jahren dauerte es bis Ende der 1980er Jahre, bevor die ersten Atominterferometer aufgebaut wurden. Die dazu entwickelten Methoden legten die Grundlagen zur gezielten Manipulation von atomaren Wellenfunktionen, dem sogenannten „Quantum Engineering“.

Die heutigen Atominterferometer benutzen mikrostrukturierte mechanische Gitter, weitverteilte Lichtgitter oder die resonante Wechselwirkung mit Lichtfeldern als Strahlteiler (für eine aktuelle Übersicht siehe [1]). Hier wollen wir uns im Weiteren auf die letztgenannte Methode konzentrieren, insbesondere auf die sogenannten Ramsey-Bordé-Atominterferometer. Der Begriff „Ramsey-Bordé-Interferometer“ bezieht sich darauf, dass eine spezielle Anordnung mit räumlich getrennten Anregungsfeldern, die von N. Ramsey in den 1950er Jahren



für die höchstauflösende Spektroskopie und für Frequenznormale erfunden wurde [2], von Ch. Bordé 1989 als Atominterferometer identifiziert wurde [3]. In diesem Beitrag werden wir einen Überblick über die Arbeiten geben, die an der PTB an Ramsey-Bordé-Interferometern mit Calciumatomen durchgeführt wurden, entsprechende Arbeiten in QUEST ansprechen und zum Abschluss zukünftige Möglichkeiten vorstellen.

2 Prinzip des Ramsey-Bordé-Atominterferometers

Ramsey-Bordé-Atominterferometer verwenden als Strahlteiler und Spiegel für Materiewellen Laserstrahlen, die in Resonanz mit geeigneten atomaren Übergängen sind. Bei der Anregung eines Atoms werden Energie und Impuls auf das Atom übertragen. Die Stärke der Wechselwirkung kann so eingestellt werden, dass sich das Atom nach der Wechselwirkung in einer Überlagerung seines Grundzustands $|g\rangle$ und eines angeregten Zustands $|e\rangle$ befindet. Der angeregte Zustand hat dabei den Impuls $\hbar k$ des absorbierten Photons aufgenommen, wobei k der Wellenvektor $2\pi/\lambda_L$ des Lichtfeldes ist (Bild 1). Entsprechend wird bei einer stimulierten Emission der Impuls eines anfangs angeregten Atoms beeinflusst. Im einfachsten Fall ist die Wechselwirkung eine Ein-Photon-Anregung des Atoms in einen langlebigen angeregten Zustand; aber auch Raman-Übergänge zwischen Hyperfein-Niveaus des atomaren Grundzustands werden häufig verwendet.

Bild 1:
Strahlteiler für Materiewellen basierend auf der Wechselwirkung eines Atoms mit einem Laserstrahl. Durch die Wechselwirkung mit einem Photon des Laserstrahls wird ein Atom aus seinem Grundzustand $|g\rangle$ mit Impuls p in eine Überlagerung des Grundzustands mit dem angeregten Zustand $|e\rangle$ gebracht. Im angeregten Zustand ist der Impuls des Atoms um den Impuls $\hbar k$ des absorbierten Photons vergrößert. Eine entsprechende umgekehrte Impulsänderung erfährt auch ein Atom, das durch stimulierte Emission aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand gebracht wird.

¹ Dr. Uwe Sterr, Arbeitsgruppe „Quantenoptik mit kalten Atomen“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
E-Mail: uwe.sterr@ptb.de

² Dr. Fritz Riehle, Abteilung „Optik“, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig
E-Mail: fritz.riehle@ptb.de

Bild 2:
Symmetrisches Ramsey-Bordé-Atominterferometer. Nur die Teilwellen, die zur Interferenz führen, sind dargestellt. Die schwarzen (roten) Pfade bezeichnen atomare Teilwellen, in denen das Atom im Grundzustand (im angeregten Zustand) ist.

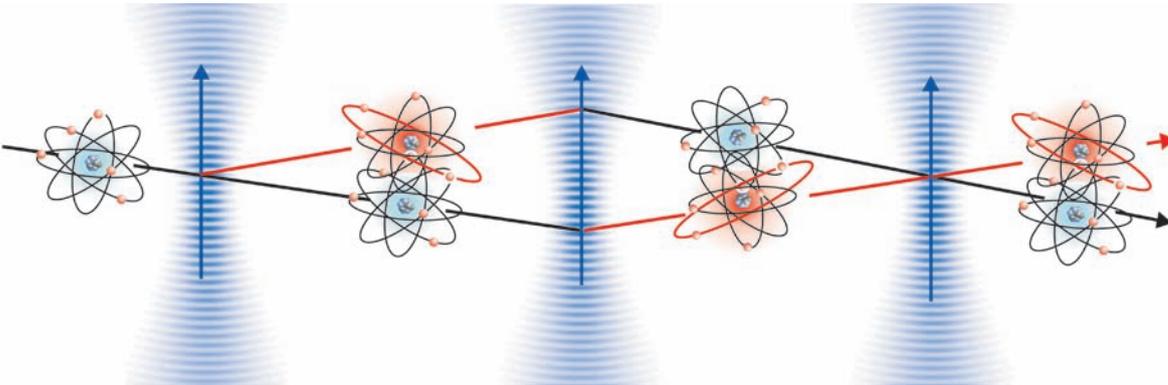
Die Wechselwirkung mit einem Photon, wie sie in Bild 1 dargestellt ist, kann als Baustein für verschiedene Typen von Interferometern verwendet werden. Zwei Möglichkeiten sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt. Im Interferometer von Bild 2 wird die Materiewelle bei der ersten Wechselwirkung in zwei kohärente Teilwellen aufgespalten. (Wir betrachten hier nur zwei Teilwellen, obwohl in manchen Interferometern auch mehr als zwei Teilwellen interferieren können). In der zweiten Wechselwirkungszone werden die Teilwellen – wiederum durch den Impulsaustausch zwischen den Materiewellen und dem Laserfeld – umgelenkt, um dann in der

tion in Bild 2 einer zeitlichen statt einer räumlichen Koordinate.

Wird der Weg der Atome im Zeitbereich beschrieben, so hängt die Entwicklung der Phase der atomaren Wellenfunktion von der Energie des Teilchens ab. Entsprechend der Schrödingergleichung ergibt sich

$$\Delta\Phi = \frac{1}{\hbar} \int \Delta U(t) dt . \quad (1)$$

Hier bezeichnet $\Delta\Phi$ die sich ergebende Phasenverschiebung. In einem Atominterferometer kann sich die Energie U in den beiden Teilwellen durch die Wechselwirkung mit exter-



ritten Zone wieder zusammengeführt zu werden. Die beiden Teilwellen interferieren daher am Ausgang des Interferometers. Abhängig von der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ der beiden Teilwellen verändert sich die Amplitude der überlagerten Wellen (und damit auch die Atomzahl) sinusförmig. Bei einer großen Geschwindigkeit der Atome ist der übertragene Impuls eines Photons klein gegenüber dem gesamten atomaren Impuls und daher kann die räumliche Aufspaltung zwischen den beiden Interferometerausgängen sehr klein werden. Trotzdem kann das Interferometersignal optisch zweifelsfrei detektiert werden, da sich die Atome in den beiden Ausgängen in unterschiedlichen internen Zuständen befinden.

Die ersten Atominterferometer verwendeten thermische Atomstrahlen und benutzten die Wechselwirkung mit räumlich getrennten Laserfeldern zur Strahlteilung. Ähnlich wie bei optischen Weißlichtinterferometern führte die breite Geschwindigkeitsverteilung der Atome im thermischen Atomstrahl zu einem breiten Spektrum von de-Broglie-Wellenlängen. In den folgenden Experimenten wurde die Geschwindigkeitsbreite der atomaren Ensembles mit Methoden der Laserkühlung eingeengt. Üblicherweise werden die Atome in einer magneto-optischen Falle gekühlt und gespeichert. Dann wird die Falle abgeschaltet, und die frei fallende Wolke der kalten Atome wechselwirkt mit gepulsten Lichtfeldern, die als Strahlteiler dienen. In diesem Fall entspricht die horizontale Rich-

nen Potentialen oder aufgrund unterschiedlicher interner Energie der Atome unterscheiden. In Interferometern, die Laserlicht als Strahlteiler verwenden, wird außerdem auch die optische Phase zum Zeitpunkt der Wechselwirkung auf die atomare Wellenfunktion abgebildet.

Im Interferometer des Bild 2 wirken der erste und der letzte Laserpuls als sogenannte $\pi/2$ -Pulse: Atome, die im Grundzustand in die Wechselwirkung eintreten, sind danach in einer Überlagerung aus Grundzustand und angeregtem Zustand und die beiden entsprechenden Teilwellen haben die gleiche Amplitude. Verlängert man die Wechselwirkungszeit oder erhöht man die Leistung des Pulses, erzeugt man einen π -Puls, der ein Atom aus dem Grundzustand in den angeregten Zustand befördert beziehungsweise umgekehrt aus dem angeregten in den Grundzustand. In diesem Fall wirkt der Puls als Spiegel und nicht als Strahlteiler. Der π -Puls wird in der zentralen Zone im Interferometer in Bild 2 verwendet. In beiden Armen dieses Interferometers verbringen die Atome die gleiche Zeit im Grund- und im angeregten Zustand. Die Phasenverschiebung nach Gleichung (1) ist daher für beide Teilwellen gleich und ihre Phasendifferenz ist ausschließlich durch die Differenz $\Delta\varphi$ auf Grund der räumlichen Phasen φ_i der Laser in den drei Wechselwirkungen $i = 1, 2, 3$ gegeben:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3 . \quad (2)$$

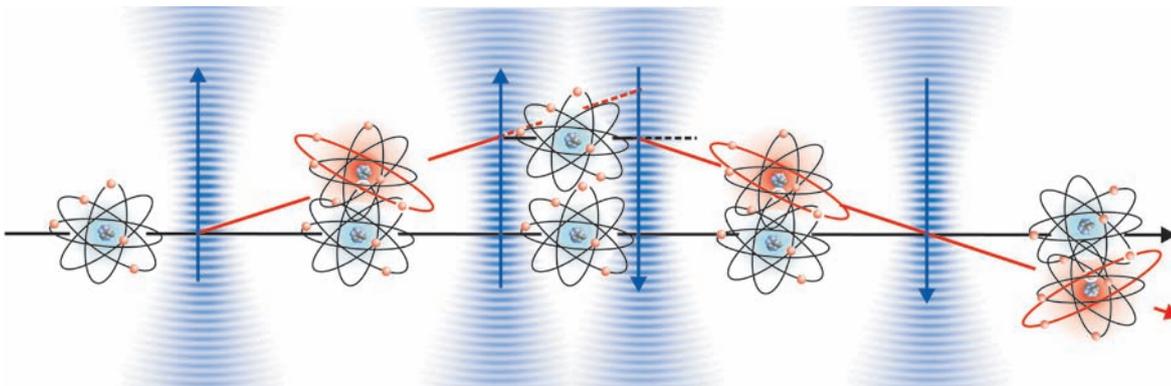
Abhängig von der Geometrie des Experiments kann die Phasendifferenz beispielsweise empfindlich von Beschleunigungen oder Rotationen abhängen.

Ein zweiter Interferometertyp verwendet zwei gegenläufige Paare von Laserstrahlen oder Laserpulsen wie in Bild 3 dargestellt. Neben nicht interferierenden Wegen gibt in diesem Interferometer zwei geschlossene Kombinationen von Wegen, die zwei Interferometer bilden. In Bild 3 ist davon nur eine Kombination dargestellt. Im Interferometer verbringen die Atome in beiden Teilarmen unterschiedliche Zeiten im Grund- und im angeregten Zustand. Zusätzlich

3 Präzisionsmessungen mit Atominterferometern: Frühe Untersuchungen in der PTB

In diesem Abschnitt diskutieren wir Anwendungen von Ramsey-Bordé-Atominterferometern für Präzisionsmessungen, die in der PTB experimentell untersucht wurden. Die Interferometer verwendeten die $^1S_0-^3P_1$ Interkombinationslinie von Calcium bei $\lambda_L = 657 \text{ nm}$ um die Materiewellen aufzuspalten, zu modifizieren und wieder zusammenzuführen. In den ersten Experimenten wurden thermische Atomstrahlen mit kurzer Kohärenzlänge verwendet. Spätere

Bild 3: Asymmetrisches Ramsey-Bordé-Atominterferometer. Nur eine der beiden Kombinationen von Wegen, die ein Interferometer bilden, ist dargestellt.



zu den Phasen der Laserfelder hängt die Phasendifferenz daher auch von der Verstimmung Δv des Lasers von der atomaren Übergangsfrequenz ab:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left[\Delta v \pm \frac{h\nu^2}{2Mc^2} \right] 2T + \varphi_1 - \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4 \quad (3)$$

Hier ist M die Masse des Atoms und T die Zeit zwischen der ersten und der zweiten bzw. der dritten und vierten Wechselwirkung.

Bild 4: Signale von laserfrequenz-abhängigen Calcium-Atominterferometern. Dargestellt sind Messungen mit einem thermischen Atomstrahl und mit laser-gekühlten Atomen.

Experimente verwendeten mit Laserlicht abgebremste Atomstrahlen und Calciumatome, die in magneto-optischen Fallen bis auf Temperaturen von 3 mK und 20 μK abgekühlt wurden. Wie in Bild 4 zu erkennen ist, führte die Verringerung der Temperatur zu einer dramatischen Verbesserung des Signals.

3.1 Messung von Rotationen: Der Sagnac-Effekt

Kurz nach der Interpretation des Ramsey-Anregungsschemas als Atominterferometer durch Ch. Bordé wurde der Sagnac-Effekt mit einem Calcium-Atominterferometer beobachtet und gemessen [4]. Der Aufbau bestand aus einer thermischer Atomstrahlapparatur, die auf einem Drehtisch montiert war und mit einer Winkelgeschwindigkeit von bis zu $\Omega = 0,12 \text{ s}^{-1}$ rotiert werden konnte (Bild 5). Das Interferometer verwendete vier Wechselwirkungsphasen. Das

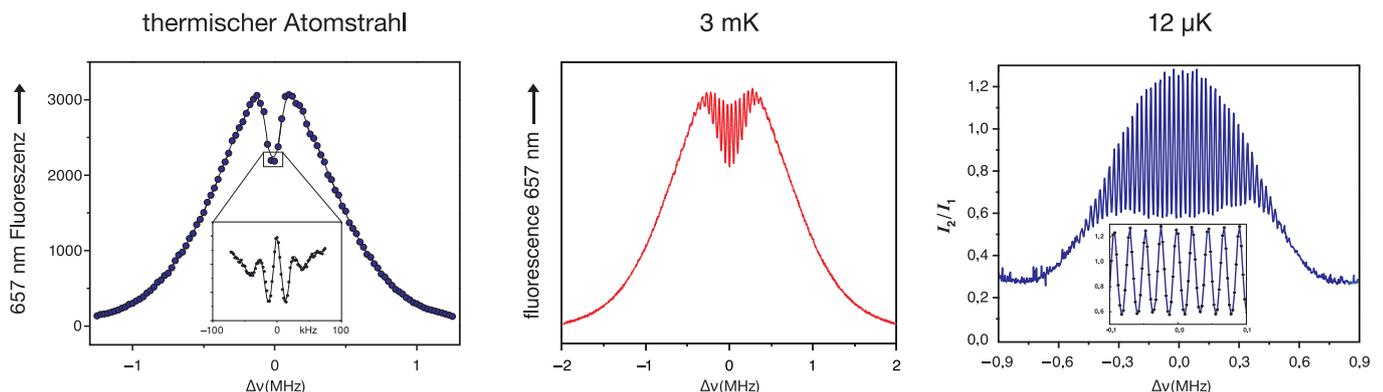
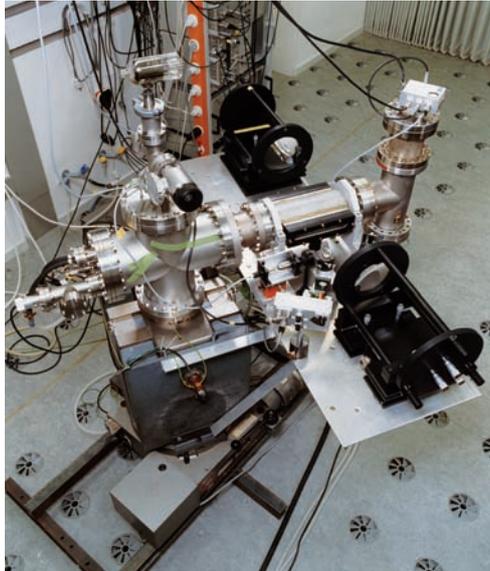


Bild 5:
Drehbares Atominterferometer. Für die erste atominterferometrische Messung des Sagnac-Effekts wurde ein Calcium-Atomstrahl verwendet.



Licht wurde mit einer Einmoden-Glasfaser zum Drehtisch geleitet. Mit zwei Katzenaugen-Retroreflektoren wurden aus dem kollimierten Laserstrahl die vier parallelen Strahlen der Wechselwirkungszone erzeugt (Bild 6).

In diesem Aufbau beträgt die Phasendifferenz zwischen den am Interferometerausgang interferierenden Teilwellen

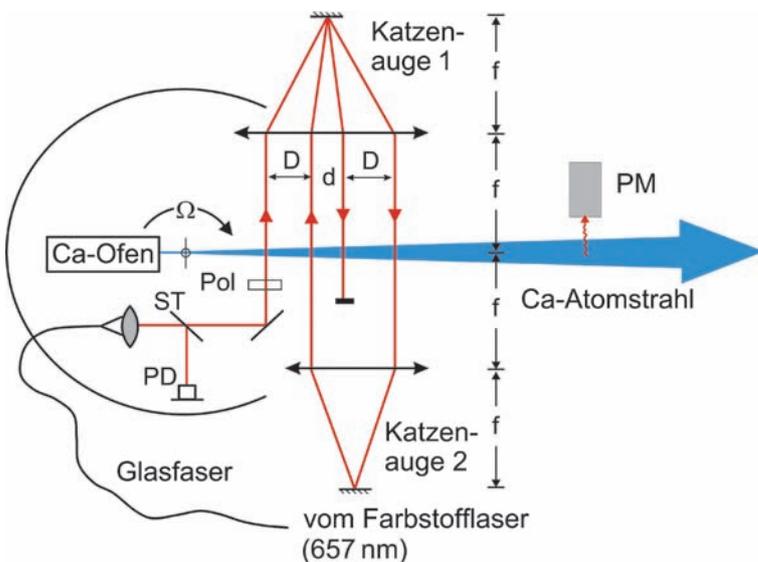
$$\Delta\varphi = 2\pi \left[\Delta v \pm \frac{hv^2}{2Mc^2} + \Omega \frac{D+d}{\lambda_L} \right] \left[\frac{2D}{v} \right], \quad (4)$$

wobei v die Geschwindigkeit der Atome bezeichnet; D und d sind die Abstände der Zonen aus Bild 6. Daher führt die Rotation mit der Kreisfrequenz Ω zu einer Frequenzverschiebung

$$\Delta v_{\text{Sagnac}} = \Omega(d+D) / \lambda_L. \quad (5)$$

Im Experiment konnte eine gute Übereinstimmung mit dieser Vorhersage nachgewiesen werden. Weniger als zwei Jahrzehnte nach

Bild 6:
Aufbau für die erste Messung des Sagnac-Effekts mit einem Atominterferometer. ST: Strahlteiler, PD: Photodiode; Pol: Polarisator; PM: Photomultiplier.



diesem wegweisenden Experiment wurde mit lasergekühlten Rubidiumatomen und der Anregung von Ramanübergängen zwischen den Hyperfein-Niveaus ihres Grundzustands die Genauigkeit um zwölf Größenordnungen gesteigert [5]. Diese Genauigkeit ist jetzt mit derjenigen der besten mechanischen und Laser-Gyroskope vergleichbar [6].

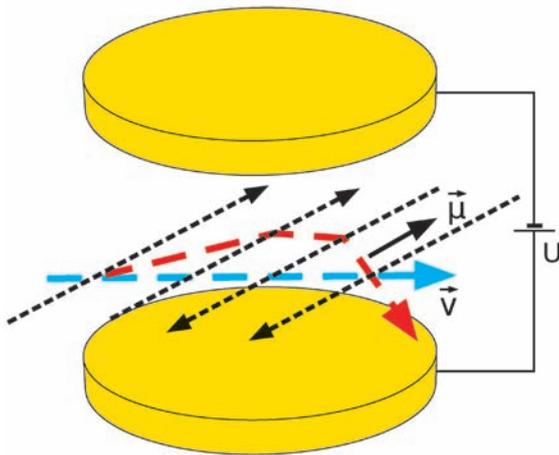
3.2 Messung atomarer Eigenschaften: Statische und dynamische Polarisierbarkeit

Betreibt man ein Ramsey-Bordé-Interferometer in einem elektrischen Feld, kann die Polarisierbarkeit der Atome aus der Abhängigkeit der Phasenverschiebung von der Feldstärke bestimmt werden. In dieser Art von Interferometer entsprechen die Teilwellen unterschiedlichen atomaren Zuständen. Wenn man an der Differenz der Polarisierbarkeit der beiden atomaren Zustände interessiert ist, ist es daher nicht erforderlich, das angelegte Feld auf einen Arm des Interferometers zu beschränken. In unseren Experimenten befand sich das ganze Interferometer [7] oder ein Teil davon [8] in einer Anordnung von ebenen Elektroden, ähnlich einem Kondensator (Bild 7).

Später wurde an der PTB die dynamische Polarisierbarkeit von Calcium mit einem Zeitbereich-Interferometer gemessen. Ein zusätzlicher Laser-Puls mit variabler Wellenlänge (zwischen 780 nm und 1064 nm) wurde zwischen dem ersten und dem zweiten Interferometer-Puls eingestrahlt [9]. Die Messungen mit diesem Aufbau verbesserten die Kenntnis der Größe der Übergangsmatrixelemente von Calcium und erlaubten damit, die sogenannte „magische Wellenlänge“ zu bestimmen. In einer Calcium-Gitterruhr, bei der das optische Gitter bei der magischen Wellenlänge betrieben wird, wird die Frequenz des Uhrenübergangs durch das Gitter nicht beeinflusst (Bild 8) [10].

3.3 Messung topologischer Phasenverschiebungen

Die von Karsten Zeiske entwickelte Interferometeranordnung [7] gestattete auch eine Messung der sogenannten Aharonov-Casher-Phase. Diese Phasendifferenz tritt zwischen zwei Teilwellen eines Atoms mit nichtverschwindendem magnetischen Dipolmoment auf, die eine homogene Linienladung umschließen. Diese topologische Phasenverschiebung ergibt sich, obwohl keine beschleunigende Kraft auf das Atom wirkt. Die Größe der Phasenverschiebung hängt weder vom genauen Weg des Atoms noch von seiner Geschwindigkeit ab. Das Experiment bestätigte die theoretisch vorhergesagte Größe der Aharonov-Casher-Phase mit einer Unsicherheit von 2,2 %.



3.4 Optische Frequenznormale

Die Empfindlichkeit der asymmetrischen 4-Puls- und 4-Strahl-Interferometer für die Differenz zwischen Laserfrequenz und der Frequenz des atomaren Übergangs kann benutzt werden, um diese atomare Frequenz genau zu bestimmen. Das Calcium-Atominterferometer – zuerst mit einem Atomstrahl und später mit lasergekühlten Atomen in einer magneto-optischen Falle – wurde zur Messung der Frequenz der $^1S_0-^3P_1$ -Interkombinationslinie von Calcium ($\lambda = 657 \text{ nm}$) benutzt. Dieses System war eines der derzeit besten Frequenznormale und damit wegweisend für die Entwicklung derjenigen optischen Uhren, die heute mit den besten Mikrowellenuhren konkurrieren [11].

4 Atominterferometrie für Präzisionsmessungen: Laufende Projekte in QUEST

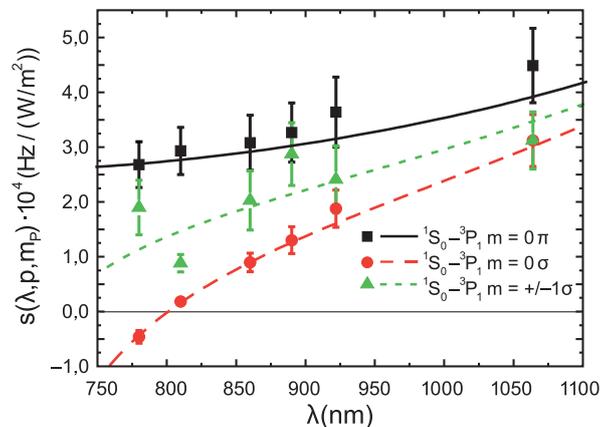
Im Bereich von QUEST werden vielfältige atominterferometrische Ansätze sowohl für die Grundlagenforschung als auch für die angewandte Forschung verfolgt, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

4.1 Sagnac-Interferometer mit kalten Atomen

Im Rahmen von QUEST wird gegenwärtig am Institut für Quantenoptik (IQO) der Leibniz Universität Hannover ein transportables Atominterferometer CASI (Cold Atom Sagnac Interferometer) entwickelt (Bild 9). Mit CASI wird es möglich sein, verschiedene Sagnac-Gyroskope zu testen und zu vergleichen, wie zum Beispiel die großen stationären optischen Sagnac-Interferometer, die in Christchurch (Neuseeland) und Wettzell (Deutschland) betrieben werden und die veränderliche Rotationsrate der Erde messen sollen. Zusätzlich soll CASI als terrestrische Testeinrichtung für zukünftige Satellitenmissionen genutzt werden.

CASI nutzt zwei Atomstrahlen mit lasergekühlten Rubidiumatomen. Die Atomstrahlquellen bestehen aus je einer dreidimensionalen magneto-optischen Falle (MOT), die von einer für hohen

atomaren Fluss optimierten zweidimensionalen magneto-optischen Falle beladen wird. Aus den beiden MOT-Systemen werden zwei Strahlen kalter Atome mit Laserstrahlen beschleunigt und auf gegenläufige ballistische Bahnen geschickt. Die Materiewellen werden in der Nähe des höchsten Punktes der Flugbahn durch senkrecht einfallende Laserstrahlen aufgespalten, umgelenkt und wiedervereinigt (blaue Pfeile in Bild 9). Die Phasenverschiebung zwischen den Teilwellen hängt von der Winkelgeschwindigkeit des Interferometers und der von den Teilstrahlen eingeschlossenen Fläche ab. Der Einsatz von gegenläufigen Strahlen erhöht die Genauigkeit der interferometrischen Rotationsmessung beträchtlich: Die meisten Störungen, die zu ungewollten Phasenverschiebungen führen, sind unabhängig von der Richtung der Strahlen, während das



Vorzeichen der Sagnac-Phasenverschiebung von der Strahlrichtung abhängt. Daher liefert die Differenz der mit den beiden gegenläufigen Atomstrahlen bestimmten Phasenverschiebungen nur den Effekt der Rotation, wohingegen störende Effekte z.B. durch nichtideale Strahlteiler in erster Näherung kompensiert werden.

4.2 Atominterferometrische Sensoren für Raum-Zeit-Messungen

Zusätzlich zum transportablen CASI-System werden im Institut für Quantenoptik auch andere Rubidium-Atominterferometer vom Ramsey-Bordé-Typ für ihre Nutzung in Rotations- und Beschleunigungssensoren untersucht [12]. Solche Interferometer werden möglicherweise als Sensoren in Raumfahrtmissionen wie HYPER (Bild 9) Anwendung finden, um bestimmte Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu überprüfen wie beispielsweise den bisher noch unmessbar kleinen Lense-Thirring-Effekt. Der Lense-Thirring-Effekt kann anschaulich so verstanden werden, dass die rotierende Erde das umgebende Raum-Zeit-System mit sich zieht. Dies kann im Prinzip durch einen Einfluss auf rotierende Testkörper nachgewiesen werden. Der Mitzieheffekt kann auch mit einem hinrei-

Bild 7:
Ein Atominterferometer in einem elektrischen Feld kann dazu benutzt werden, atomare Polarisierbarkeiten und die Aharonov-Casher-Phase zu messen [7].

Bild 8:
Normierte Frequenzverschiebung des Signals des Calcium-Atominterferometers für verschiedene Zeeman-Komponenten des $^1S_0-^3P_1$ -Übergangs als Funktion der Wellenlänge λ des zusätzlichen Laserfeldes [9].

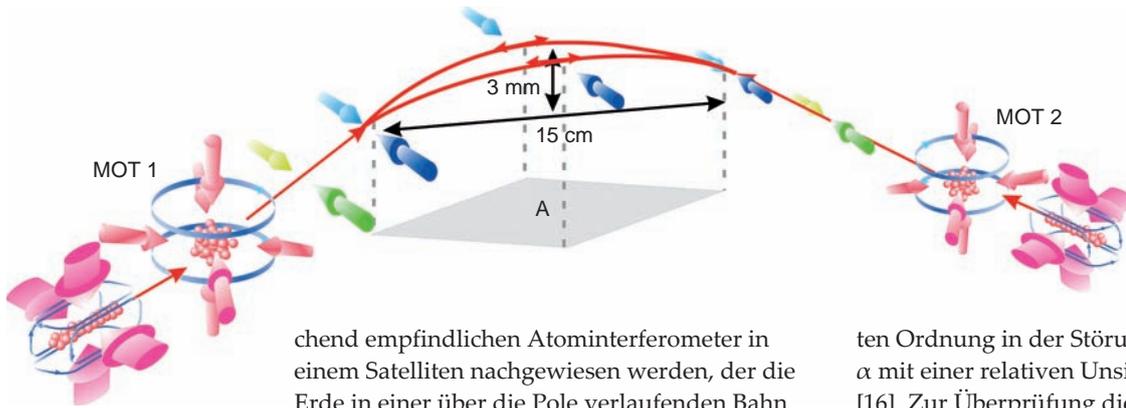


Bild 9: Schema des trans-portablen Materiewellen-sensors CASI (Cold Atom Sagnac Interferometer), der im Institut für Quantenoptik an der Leibniz Universität Hannover entwickelt wird.

chend empfindlichen Atominterferometer in einem Satelliten nachgewiesen werden, der die Erde in einer über die Pole verlaufenden Bahn umläuft [13].

In einer anderen Projektstudie namens SAGAS (Search for Anomalous Gravitation using Atomic Sensors) [14] wurde vorgeschlagen, in den äußeren Regionen des Sonnensystems nach Abweichungen vom Newtonschen Gravitationsgesetz zu suchen. Dabei würde eine Kombination aus einer Atomuhr und einem atominterferometrischen Beschleunigungssensor zum Einsatz kommen. Gegenwärtig wird in mehreren Projekten in QUEST daran gearbeitet, die technologische Reife dieser Sensoren für Raumfahrtmissionen zu verbessern.

5 Die Messung von Fundamentalkonstanten

Für die Grundlagen der Metrologie ist die hochgenaue Bestimmung von Fundamentalkonstanten von größter Bedeutung. Es gibt Bestrebungen, die meisten (und vielleicht sogar alle) Basiseinheiten des Internationalen Einheitensystems (SI) auf Fundamentalkonstanten zurückzuführen [15].

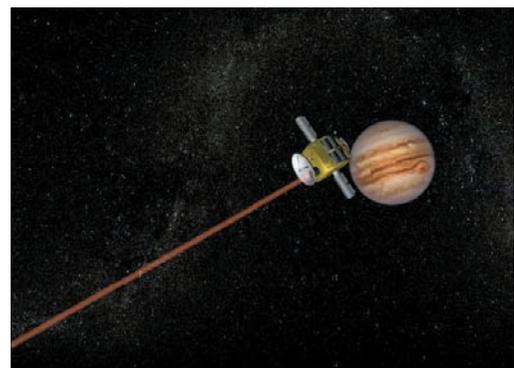
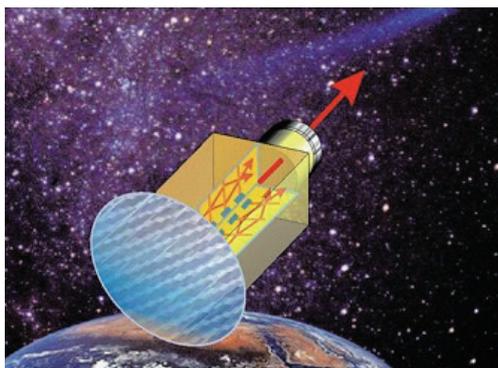
5.1 Feinstrukturkonstante

Die Feinstrukturkonstante α beschreibt die Kopplungsstärke der elektromagnetischen Wechselwirkung. Der gegenwärtig genaueste Wert basiert auf einer Messung des anomalen g -Faktors des Elektrons. Diese Größe hängt in einer verwickelten Art von der Feinstrukturkonstante ab, so dass zur Bestimmung von α komplizierte quantenelektrodynamische Berechnungen notwendig sind. Die bisher durchgeführten Rechnungen erstrecken sich bis zur ach-

ten Ordnung in der Störungstheorie und liefern α mit einer relativen Unsicherheit von $3,7 \cdot 10^{-10}$ [16]. Zur Überprüfung dieser Rechnungen ist eine unabhängige Messung unbedingt erforderlich. Der Wert der Feinstrukturkonstante kann alternativ auch aus der Rydbergkonstante oder aus dem Verhältnis h/M der Planckschen Konstante und der Masse M eines geeigneten Atoms (und dem Massenverhältnis von Elektron und Proton) abgeleitet werden. Die gegenwärtig genaueste Kenntnis von h/M basiert auf atominterferometrischen Messungen, bei denen die Rückstoßgeschwindigkeit $v = \hbar k/M$ oder die Rückstoßenergieverschiebung $\hbar^2 k^2/2M$ freier Atome bestimmt wird.

Solche Messungen nutzen asymmetrische Atominterferometer, wobei der im Interferometer angeregte atomare Übergang in zwei Rückstoßkomponenten mit einer Frequenzdifferenz $\Delta\nu = h/(\lambda_L^2 M)$ aufspaltet. Eine Schwierigkeit bei einer direkten Messung besteht allerdings darin, dass z.B. bei Calciumatomen diese Verschiebung nur 23 kHz beträgt. Um eine relative Unsicherheit von 10^{-10} zu erreichen, wäre damit eine Auflösung im Mikrohertzbereich erforderlich, also um viele Größenordnungen unterhalb der Linienbreite des verwendeten atomaren Übergangs. Daher erhöht man bei den meisten atominterferometrischen Messungen der Rückstoßaufspaltung die Empfindlichkeit dadurch, dass viele Rückstoßimpulse übertragen werden. Im Rubidium-Atominterferometer der Stanford-Universität wechselwirken die Atome zwischen dem ersten und zweiten Laserimpuls, die als atomare Strahlteiler wirken, zusätzlich mit einer Sequenz von π -Pulsen, so dass 24 Photonenimpulse übertragen werden [17].

Bild 10: Vorgeschlagene Satellitenmissionen wie HYPER (links) und SAGAS (rechts) basieren auf dem Einsatz von Atominterferometern. (Bild links: ESA; rechts: P. Wolf, LNE-SYRTE)



In einem anderen Ansatz werden sogenannte Blochoszillationen atomarer Materiewellen in einem optischen Gitter unter dem Einfluss der Gravitation oder in einem beschleunigten Gitter angeregt. In einem optischen Gitter sind die Atome in einem periodischen Potential gefangen. Wenn eine Kraft auf die Atome wirkt, werden sie beschleunigt und erfahren eine Bragg-Reflektion, die den atomaren Impuls um genau $\hbar k$ ändert. In einem Experiment, das an der École Normale Supérieure in Paris durchgeführt wurde, konnten bis zu 1600 Photonenrückstöße übertragen und die Feinstrukturkonstante mit einer relativen Unsicherheit von $4,5 \cdot 10^{-9}$ [18] bestimmt werden.

5.2 Erdbeschleunigung g und Gravitationskonstante G

Die Atominterferometrie ist besonders geeignet für die Messung sehr kleiner Kräfte, die auf die Atome einwirken. In einer Anordnung mit drei Wechselwirkungszonen (s. Bild 3) ist die Phasenverschiebung, die von einer Beschleunigung a parallel zu den Laserstrahlen herrührt, gegeben durch

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3 = -kaT^2. \quad (6)$$

Gegenwärtig kann die Erdbeschleunigung $a=g$ mit Atominterferometern mit einer Auflösung von $0,8 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}^2$ bei 1 s Mittelungszeit gemessen werden [18–20]. Der genaue Wert der Erdbeschleunigung g wird beispielsweise in einer sogenannten Wattwaage benötigt, die es ermöglicht, elektrische und mechanische Arbeit zu vergleichen. Dabei wird der Wert von g benötigt, um die Gewichtskraft einer vorgegebenen Masse zu bestimmen. Mit einem derartigen Vergleich und der Messung der elektrischen Arbeit mittels Josephson-Effekt und Quanten-Hall-Effekt wurde der Wert der Planckschen Konstante mit einer verbesserten relativen Unsicherheit von $6,6 \cdot 10^{-9}$ bestimmt [22].

Wenn zusätzliche Testmassen in der Nähe des Atominterferometers platziert werden, wird die Wirkung der Anziehungskraft der Erde mit der Gravitationswirkung der Testmassen überlagert. Aus der gemessenen Änderung der Beschleunigung für unterschiedliche Positionen der Testmassen konnte die Newtonsche Gravitationskonstante G mit einer relativen Unsicherheit von $2 \cdot 10^{-3}$ bestimmt werden [23]. Die Atominterferometrie erlaubt prinzipiell auch die Möglichkeit der Messung kleinster Kräfte bei kleinsten Abständen, wie z.B. der Casimir-Polder-Kraft, oder die Überprüfung des Gravitationsgesetzes bei sehr kleinen Abständen.

6 Ausblick

Nach den bisherigen erfolgreichen Anwendungen der Atominterferometrie bei Präzisionsexperimenten in den unterschiedlichsten Bereichen der Metrologie sind auch zukünftig wesentliche Fortschritte zu erwarten, wenn einer der größten Herausforderungen der Atominterferometrie erfolgreich begegnet werden kann. Sie rührt daher, dass Atome – im Gegensatz zu Photonen in optischen Interferometern – eine nichtverschwindende Ruhemasse besitzen und daher im Gravitationsfeld eine Anziehung erfahren. Dies begrenzt die nutzbare Wechselwirkungszeit in Atominterferometern und daher auch deren Größe und die erreichbare Genauigkeit. Eine Lösung für dieses Problem kann darin liegen, Atominterferometer in einer Mikrogravitationsumgebung zu betreiben. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Interferometer zu entwickeln, bei denen die Atome in statischen magnetischen oder elektrischen Feldern oder in Lichtfeldern geführt werden. Allerdings führen solche Führungsfelder leicht zu ungewollten und unkontrollierbaren Phasenverschiebungen. Dieses Problem kann möglicherweise vermieden werden, wenn die Atome in einer optischen Struktur geführt werden, die bei der so genannten magischen Wellenlänge (siehe Abschnitt 3.2) betrieben wird. Diesen neuartigen Ansatz wollen wir in der PTB verfolgen.

Eine weitere Option zur Unterdrückung des Einflusses der Gravitationsanziehung besteht darin, ein Atominterferometer zu benutzen, bei dem die Strahlteilerimpulse die Atome in geeigneter Weise über den Rückstoß der übertragenen Photonen in der Schwebe halten. Dieser Vorschlag von Impens und Bordé [24] könnte im Calcium-Atominterferometer der PTB realisiert werden.

Ein weiteres vielversprechendes Forschungsfeld, dessen volles Potential noch auszuloten ist, besteht in der Nutzung von Bose-Einstein-Kondensaten (BEC) für die Präzisions-Atominterferometrie. Obwohl bereits eine große Zahl von atominterferometrischen Experimenten mit BEC-Quellen durchgeführt wurde, wurden meistens nur qualitative oder halbquantitative Ergebnisse erzielt. Einerseits ist die hohe Atomdichte im Interferometer unbedingt notwendig für Experimente, die z.B. das Verhalten von Materiewellen in nichtlinearen Bereichen untersuchen wollen. Andererseits führt die Wechselwirkung zwischen den Atomen im BEC leicht zu räumlichen Phasenvariationen der Materiewelle, die genaue interferometrische Messungen ausschließen. In diesem Fall bietet ein BEC mit Erdalkaliatomen Vorteile, da deren Interkombinationslinien sehr schmale Linienbreiten haben. Diese Übergänge sind bereits für optische Frequenznormale eingesetzt worden und ihre Eigenschaften bezüglich

äußerer Störungen sind sehr gut bekannt. Mit dieser Kenntnis und den Frequenzmesstechniken, die für optische Uhren entwickelt wurden, können Phasenverschiebungen mit hoher Empfindlichkeit nachgewiesen und analysiert werden. An der PTB werden daher Experimente vorbereitet, die Bose-Einstein-Kondensate mit Calcium und Strontium herstellen und für die Atominterferometrie nutzen wollen.

Literatur

- [1] A. D. Cronin, J. Schmiedmayer, D. E. Pritchard: Optics and interferometry with cold atoms and molecules. Erscheint in: *Rev. Mod. Phys.* (2009).
- [2] N. F. Ramsey: Experiments with separated oscillatory fields and hydrogen masers. *Rev. Mod. Phys.* 62, 541 (1990).
- [3] Ch. J. Bordé: Atomic interferometry with internal state labelling. *Phys. Lett. A* 140, 10 (1989).
- [4] F. Riehle, Th. Kisters, A. Witte, J. Helmcke, Ch. J. Bordé: Optical Ramsey spectroscopy in a rotating frame: Sagnac effect in a matter-wave interferometer. *Phys. Rev. Lett.* 67, 177 (1991).
- [5] D. S. Durfee, Y. K. Shaham, M. A. Kasevich: Long-term stability of an area-reversible atom-interferometer Sagnac gyroscope. *Phys. Rev. Lett.* 97, 240801 (2006).
- [6] G. E. Stedman, R. B. Hurst, K. U. Schreiber: On the potential of large ring lasers. *Opt. Commun.* 279, 124 (2007).
- [7] K. Zeiske, G. Zinner, F. Riehle, J. Helmcke: Atom interferometry in a static electric field: Measurement of the Aharonov-Casher phase. *Appl. Phys. B* 60, 205 (1995).
- [8] V. Rieger, K. Sengstock, U. Sterr, J. H. Müller, W. Ertmer: Atom-interferometric determination of the dc-Stark shift of the Mg-intercombination line. *Opt. Commun.* 99, 172 (1993).
- [9] C. Degenhardt, H. Stoehr, U. Sterr, F. Riehle, Ch. Lisdat: Wavelength dependent ac-Stark shift of the $^1S_0 - ^3P_1$ transition at 657 nm in Ca. *Phys. Rev. A* 70, 023414 (2004).
- [10] Siehe „Optische Uhren“ in dieser Ausgabe, S. 123.
- [11] G. Wilpers, T. Binnewies, C. Degenhardt, U. Sterr, J. Helmcke, F. Riehle: Optical Clock with Ultracold Neutral Atoms. *Phys. Rev. Lett.* 89, 230801 (2002).
- [12] K. Eckert, P. Hyllus, D. Brufß, U. V. Poulsen, M. Lewenstein, C. Jentsch, T. Müller, E. M. Rasel, W. Ertmer: Differential atom interferometry beyond the standard quantum limit. *Phys. Rev. A* 73, 013814 (2006).
- [13] C. Jentsch, T. Müller, E. M. Rasel, W. Ertmer: HYPER: A satellite mission in fundamental physics based on high precision atom interferometry. *General Relativity and Gravitation* 36, 2197 (2004).
- [14] P. Wolf *et al.*: Quantum physics exploring gravity in the outer solar system: the SAGAS project. arXiv:0711.0304v5 und *Experimental astronomy* 23, 651 (2009).
- [15] On the possible redefinition of certain base units of the International System of Units (SI). Resolution 12 of the 23rd General Conference on Weights and Measures (2007): <http://www.bipm.org/utis/en/pdf/Resol23CGPM-EN.pdf>
- [16] D. Hanneke, S. Fogwell, G. Gabrielse: New measurement of the electron magnetic moment and the fine structure constant. *Phys. Rev. Lett.* 100, 120801 (2008).
- [17] H. Müller, S. Chiow, Q. Long, S. Herrmann, S. Chu: Atom interferometry with up to 24-photon-momentum-transfer beam splitters. *Phys. Rev. Lett.* 100, 180405 (2008).
- [18] M. Cadoret, E. de Mirandes, P. Cladé, S. Guellati-Khélifa, C. Schwob, F. Nez, L. Julien, F. Biraben: Combination of Bloch oscillations with a Ramsey-Bordé interferometer: New determination of the fine structure constant. *Phys. Rev. Lett.* 101, 230801 (2008).
- [19] J. Le Gouët, T. E. Mehlstäubler, J. Kim, S. Merlet, A. Clairon, A. Landragin, F. Pereira Dos Santos: Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter. *Appl. Phys. B* 92, 133 (2008).
- [20] A. Peters, K. Y. Chung and S. Chu: High-precision gravity measurements using atom interferometry. *Metrologia* 38, 25 (2001).
- [21] J. B. Fixler, G. T. Foster, J. M. McGuirk, M. Kasevich: Atom interferometer measurement of the Newtonian constant of gravity. *Science* 315, 74 (2007).
- [22] I. Robinson, B. P. Kibble: An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance. *Metrologia* 44, 427 (2007).
- [23] G. Lamporesi, A. Bertoldi, L. Cacciapuoti, M. Prevedelli, G. M. Tino: Determination of the Newtonian gravitational constant using atom interferometry. *Phys. Rev. Lett.* 100, 050801 (2008).
- [24] F. Impens, Ch. J. Bordé: Space-time sensors using multiple-wave atom interferometry. arXiv:physics/0808.3380v2 (2008).