

Ultragenau Taktgeber

OPTISCHE UHREN IN DER ANWENDUNG

Im HITec arbeiten Geodäten und Physiker der Leibniz Universität Hannover (LUH) zusammen mit Wissenschaftlern der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter anderem daran, optische Uhren und deren Vergleiche für Anwendungen in der sogenannten relativistischen Geodäsie zu erschließen. Anhand dieser neuen Technologien können unter anderem postglaziale Anhebung von Landmassen oder der Anstieg des Meeresspiegels vermessen werden.

Einführung

Optische Atomuhren sind die genauesten Messinstrumente, die uns aktuell zur Verfügung stehen. Die besten heutigen Uhren haben eine relative Gangungenauigkeit von wenigen 10^{-18} ; damit würde die Zeitdifferenz zwischen diesen Uhren nach 14 Milliarden Jahren – der Zeit vom Urknall bis heute – weniger als eine Sekunde betragen. Eine berechtigte Frage drängt sich geradezu auf: Wer braucht überhaupt so genaue Uhren? Diese ultragenauen Taktgeber finden unter anderem Anwendungen in der Grundlagenforschung wie zum Beispiel bei der Beantwortung der Frage nach dunkler Materie, deren Existenz eine mögliche Erklärung für erstaunliche astrophysikalische Phänomene ist. Eine Wechselwirkung mit »normaler« Materie würde zu einer Verschiebung von Energieniveaus in Atomen führen. Bestimmte Modelle dunkler Materie sagen Oszillationen oder Dichteunterschiede voraus, die wir beim Durchflug der Erde durch dunkle Materie über einen sich ändernden Gangunterschied zwischen unterschiedlichen optischen Uhren messen könnten.

Aber es gibt auch praktische Anwendungen optischer Uhren, die von der hohen Genauigkeit profitieren wie zum Beispiel in der Geodäsie. Eine der zentralen Aufgaben der Geodäsie ist die Etablierung



von Höhenreferenzsystemen und die Bestimmung von Höhenunterschieden, um beispielsweise den Anstieg des Meeresspiegels oder langsame Landanhebungen oder -absenkungen zu bestimmen. Daher arbeiten im HITec Geodäten und Physiker der Leibniz Universität Hannover (LUH) zusammen mit Wissenschaftlern der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) unter anderem daran, optische Uhren und deren Vergleiche für Anwendungen in der sogenannten relativistischen Geodäsie zu erschließen. Nach Albert Einsteins Relativitätstheorie gehen Uhren in einem Gravitationspotenzial (wie dem der Erde) langsamer, als Uhren außerhalb eines solchen Potenzials. Mit einer relativen Gangänderung von 10^{-16} pro Meter Höhenunterschied ist der Effekt auf der Erde win-

zig, aber mit heutigen Uhren sind Höhenunterschiede von wenigen cm bereits messbar. Dabei ist die erreichbare Höhenauflösung unabhängig vom Abstand zwischen den Uhren und nur limitiert durch die Genauigkeit, mit der die Uhren verglichen werden können.

Für den Einsatz in der Geodäsie müssen optische Uhren noch »feldtauglich« werden: Das heißt, die fragilen Laboraufbauten müssen transportabel und unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen gemacht werden, sodass Uhren nach dem Transport an geodätisch relevante Orte auch wieder funktionieren. Dafür sollen zusammen mit anderen HITec Wissenschaftlern beispielsweise spezielle miniaturisierte Komponenten für optische Uhren entwickelt und getestet werden.

Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung in der relativistischen Geodäsie ist die hochpräzise Übertragung von Frequenzen über große Distanzen, um die Uhren miteinander vergleichen zu können. Daher wird im HITec am Uhrenvergleich über Freistrahlstrecken geforscht, die eines Tages Uhrenvergleiche über Satellit und damit sogar über Kontinente hinweg ermöglichen könnten.

Darüber hinaus sollen im HITec auch anderen Forschern hochgenaue Zeit- und Frequenzreferenzen zur Verfügung gestellt werden. Dazu wird ein entsprechendes Signal, das über eine optische Faser von der PTB in Braunschweig ans HITec geliefert wird, dort mit höchster Qualität und Ausfallsicherheit in die Labors verteilt.

Miniaturisierte Komponenten für optische Uhren

Uhren basieren im Allgemeinen auf der Zählung von periodischen Vorgängen wie zum Beispiel der Rotation der Erde oder der Schwingung eines Quarzes. Optische Uhren nutzen als Referenz schmalbandige Übergänge zwischen zwei elektronischen Zuständen in gefangenen und mit Laserlicht gekühlten Atomen. Durch Abfragen des Übergangs mit einem Uhrenlaser kann die Frequenz des Lasers auf den Übergang stabilisiert werden. Die Schwingungen des Lasers bei optischen Frequenzen im Bereich von 500 Billionen Schwingungen pro Sekunde (500 THz) stellt den Ausgang der Uhr dar, der entweder gezählt oder mit anderen Uhren verglichen werden kann. Je frequenzstabiler und schmalbandiger der Uhrenlaser ist, desto kürzer ist die erforderliche Mittelungszeit, um eine bestimmte Frequenzauflösung zu erreichen. Um die sehr schmalen optischen Übergänge abfragen zu kön-

nen, werden Uhrenlaser meist auf optische Resonanzen von Spiegelresonatoren vorstabilisiert. Dazu muss der Abstand der Spiegel auf ein Zehntel des Durchmessers eines Protons stabil gehalten werden! Im HITec sollen daher ausgehend von an der PTB entwickelten Resonator-Designs (siehe Abbildung 1) transportable Systeme entwickelt werden, die unempfindlich gegenüber störenden Vibrationen und Temperatureinflüssen sind und deren intrinsische thermische Restbewegung möglichst klein ist. Dazu wurden in einem der HITec Labore vom Rest des Gebäudes getrennte Sockel gegossen, die eine besonders schwingungsarme Umgebung für den Aufbau und die Charakterisierung der optischen Resonatoren zur Verfügung stellen.

Für das Kühlen und Einfangen der Atome sind komplexe optische Aufbauten mit vielen schaltbaren und fein in ihrer Frequenz abstimmbaren Laserstrahlen notwendig. Diese Aufbauten müssen typischerweise auf wenige Mikrometer genau über mehrere Meter Strahlweg stabil bleiben. Das sind große Herausforderungen an die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Aufbaus. Im HITec sollen in Zusammenarbeit mit Experten für derartige Aufbauten am Institut für Quantenoptik und dem Albert-Einstein-Institut sowie den Glasfaser-Spezialisten vom Laser Zentrum Hannover kompakte sowie thermisch- und vibrationsunempfindliche optische Aufbauten für Uhren realisiert werden, die sogar Raketenstarts überstehen. Dazu sollen neben der Miniaturisierung konventioneller Aufbauten auch Ansätze basierend auf Hydroxid-katalytischem Verbinden sowie Aufbauten ganz in Glasfasern realisiert und getestet werden. Weiterhin sollen hier bis-

lang kommerziell nicht verfügbare gehärtete Glasfasern für ultra-violettes Licht für diesen Einsatz entwickelt werden. Eine enge Abstimmung zwischen HITec Wissenschaftlern und den Uhren-Experten der PTB stellt sicher, dass die entsprechenden Komponenten direkt in existierenden beziehungsweise im Aufbau befindlichen transportablen optischen Uhren zum Einsatz kommen. Durch den im HITec erzielten Technologieschub in der Entwicklung optischer Uhren werden neue Anwendungen in der Geodäsie, wie die Vermessung der postglazialen Anhebung von Landmassen oder der Anstieg des Meeresspiegels, erst möglich.

Frequenz-Freistrahübertragung

Faser-gestützte Methoden zur Frequenzübertragung ermöglichen höchstpräzise Messungen und Vergleichsexperimente über weite Strecken quer durch Deutschland und Europa. Aktuell werden dazu meist konventionelle Glasfasern eingesetzt, die mit speziellen Verstärkern ausgestattet einen störungsfreien Vergleich der Uhren auf einem Niveau von 10^{-18} und besser ermöglichen. Dieser Ansatz ist jedoch auf Uhrenvergleiche zwischen Standorten limitiert, welche mit einer entsprechenden hochwertigen bidirektionalen Faserverbindung verbunden sind. Insbesondere Frequenzvergleiche über Kontinente hinweg gestalten sich schwierig, da die in Unterseekabeln verbauten Verstärker für den Uhrenvergleich nicht geeignet sind. Eine Vielzahl an zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten optischer Uhren, wie zum Beispiel die relativistische Geodäsie, erfordern hingegen Frequenzvergleiche zwischen weit entfernten, teilweise mobilen Stationen. Um diese Anwendungen erschließen zu können, wären Satellitenge-

Abbildung 1
An der PTB entwickelter transportabler optischer Resonator.
Bild: PTB

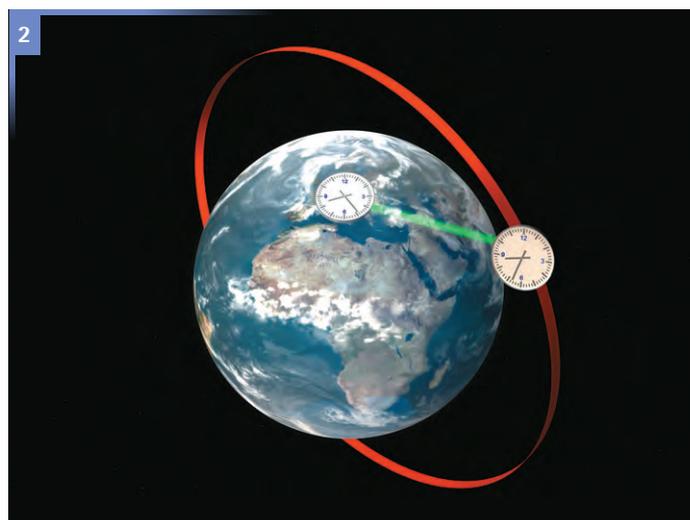
stützte Übertragungswege ideal. Schon jetzt werden internationale Zeitskalen über bidirektionale Hochfrequenz-Verbindungen über Satelliten etabliert. Aufgrund der im Vergleich zu Schwingungen bei optischen Frequenzen um bis zu eine hunderttausend Mal langsameren Schwingungsfrequenz dieser Verbindungen ist die erreichbare Auflösung entsprechend geringer und für den Vergleich

satz ist die Sichtbarkeit des Satelliten bei schlechtem Wetter und die durch Turbulenzen hervorgerufenen optische Weglängenänderungen. Da die meisten Turbulenzen in den ersten 5 bis 10 km in der Erdatmosphäre auftreten, genügt es, horizontale Freistrahlstrecken mit dieser Distanz zu untersuchen. In den speziell dafür ausgelegten Dachlabors im HITec sollen optische Transponder entwi-

sowie die Entwicklung von Strategien um Phasenfehler von mehr als einem Radian aufgrund der großen Störungen mit möglichst kurzer Latenz zu kompensieren. Als weiterer Schritt sollen optische Inter-Satelliten-Frequenzvergleiche für flexible Feldstudien und interkontinentale Vergleiche realisiert werden.

Mit der Möglichkeit optische Frequenz- und Zeitsignale mit Satelliten auszutauschen, eröffnen sich neue Möglichkeiten jenseits der kontinentübergreifenden relativistischen Geodäsie. So wären zum Beispiel optische Uhren in Navigationssatelliten der nächsten Generation mit höherer Positionsgenauigkeit denkbar. Synchronisierung der Uhren in den Navigationssatelliten durch direkte optische Links würde zu einer höheren Ausfallsicherheit führen, da nur noch sporadisch Kontakt mit Bodenstationen aufgenommen werden müsste.

Abbildung 2
Illustration des optischen Freistrahlfrequenzvergleichs zwischen einer Bodenstation und einem Satelliten.



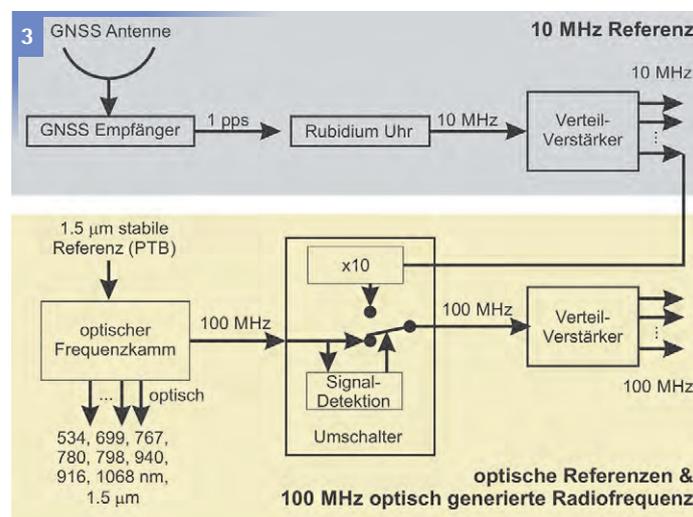
von optischen Uhren daher nicht adäquat. Einen Ausweg bieten zukünftige bidirektionale optische Freistrahverbindungen zwischen Bodenstationen und Satelliten (siehe Abbildung 2). Ein offensichtliches Problem bei diesem An-

kelt und für Freistrahübertragung eingesetzt werden. Wichtige Forschungsfragenstellungen, die beantwortet werden sollen, sind das Mitführen des Laserstrahls bei nicht-geostationären Satelliten entlang der Satellitenbahn

Multi-Nutzer Frequenzverteilung zwischen PTB und HITec

Neben Anwendungen in der relativistischen Geodäsie und der Navigation stellen hochgenaue Zeit- und Frequenzsignale auch für andere Nutzer im HITec eine wertvolle Ressource dar. So können beispielsweise die Rauscheigenschaften von Lasern und optischen Resonatoren für Gravitationswellendetektoren (s. Beitrag »Vom All aus« in dieser Ausgabe) charakterisiert werden. Laser und Radiofrequenzen mit überragenden Kohärenzeigenschaften werden in der Atominterferometrie mit langer Basislinie (s. Beitrag »Der VLBAI-Teststand«) und der Quantenmetrologie mit kalten Atomen (s. Beitrag »Spukhafte Fernwirkung zwischen kalten Atomen«) benötigt. HITec

Abbildung 3
Schema der Frequenzverteilung im HITec. **Oben:** Verteilung einer auf GNSS basierten standard 10 MHz Referenz für alle Labors. **Unten:** Transfer einer hochstabilen optischen Referenz auf eine optisch generierte Radiofrequenz und optische Nutzerfrequenzen.



Forschung an globalen Satellitennavigationssystemen (Global Navigation Satellite System, GNSS) profitieren davon, dass über eine präzise Zeitreferenz der Uhrenfehler in den Satelliten-Signalen herausgerechnet werden kann. All diese Forschungsanwendungen werden von einer in Deutschland einzigartigen Infrastruktur bedient (siehe *Abbildung 3*): Die PTB in Braunschweig liefert ein hochgenaues optisches Frequenzsignal bei 1.5 µm Wellenlänge über stabilisierte Glasfasern ans HITec. Dort wird das Signal mit Hilfe ei-

nes sogenannten optischen Frequenzkamms, den man sich als Meterstab im Frequenzraum vorstellen kann, zu den benötigten Wellenlängen und Radiofrequenzen konvertiert. Eine wesentliche Forschungsaufgabe im HITec wird es sein, praktikable und im Hinblick auf zukünftige Anwendungen auch für die Industrie taugliche Multi-Nutzer-Verteilerkonzepte auf höchstem Qualitätsniveau und einer 24/7 Verfügbarkeit zu entwickeln. Daher sollen auch Rückfallkonzepte, wie zum Beispiel das automatische Umschalten von der op-

tischen Referenz auf eine qualitativ etwas schlechtere, aber lokal verfügbare, Mikrowellen-Referenz implementiert werden. Neben der Forschung an der Verteilung optischer Referenzen höchster Güte sollen auch die Erzeugung und Verteilung von besonders rauscharmen Radiofrequenzen im HITec untersucht und ausgewählten Labors zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht neue Anwendungen beispielsweise in der Messtechnik und könnte zusammen mit Industriepartnern kommerzialisiert werden.



Prof. Dr. Piet O. Schmidt

Jahrgang 1970, ist seit 2009 Professor für Experimentalphysik an der Leibniz Universität Hannover und Leiter des QUEST-Instituts für Experimentelle Quantenmetrologie an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Seit 2016 ist er Sprecher des SFB 1227 DQ-mat. Seit 2017 ist er Mitglied im HITec-Vorstand und Mitglied im Wissenschaftlichen Rat von QUANOMET. Kontakt: Piet.Schmidt@quantummetrology.de



Dr. Anna-Greta Paschke

Jahrgang 1985, studierte Physik an der Universität Hamburg und promovierte am Institut für Quantenoptik der Leibniz Universität Hannover, wo sie seit 2017 eine Arbeitsgruppe leitet. Kontakt: paschke@iqo.uni-hannover.de



Dr. Harald Schnatz

Jahrgang 1957, ist seit 2011 Leiter des Fachbereichs Quantenoptik und Längeneinheit an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Kontakt: Harald.Schnatz@ptb.de



HANNOVER

25 Jahre Partner-Hotel der Leibniz Universität Hannover

42 moderne Zimmer ■ Gute Anbindung zu den Fakultäten und zum Wissenschaftspark Marienwerder!

UNI-Sonderpreise: ■ Classic Einzelzimmer 72,00 Euro
 ■ Classic Einzelzimmer Garten 79,00 Euro
 ■ Doppel-/Zweibettzimmer 98,00 Euro
 ■ Inklusive Vital-Frühstücksbuffet und W-Lan

Erfragen Sie unsere Gruppenrabatte!

Hotel in Herrenhausen

Markgrafstraße 5
 30419 Hannover
 Tel.: 0511 - 7907 600
 Fax: 0511 - 7907 698
info@hotel-in-herrenhausen.de
www.hotel-in-herrenhausen.de
S-Bahn Linie 4+5 direkt am Hotel