

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 dauerbetriebfähige 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 Mitte-

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-

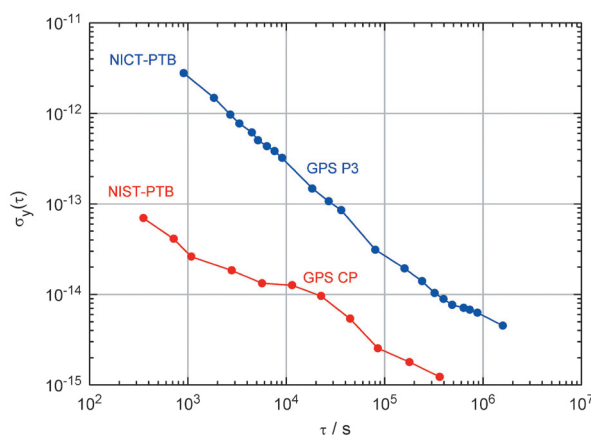
dium-Atomuhr ausgerüstet, die als Referenz für die zwei ausgesendeten Trägerfrequenzen dient (ca. 1600 MHz und ca. 1200 MHz). Diese sind mit Pseudozufallskodes phasenmoduliert, die für den jeweiligen Satelliten charakteristisch sind. Der so genannte *coarse acquisition code* moduliert den 1600 MHz-Träger 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 werten 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

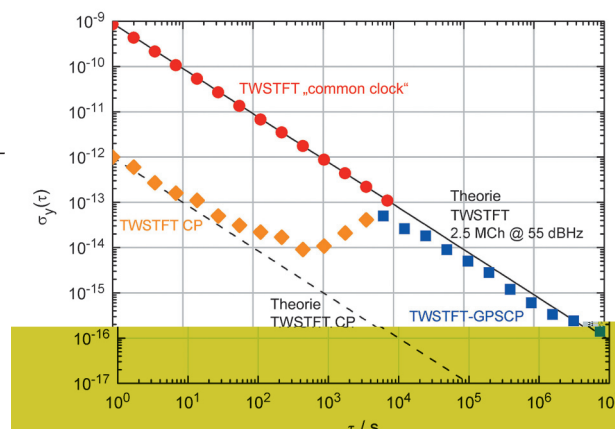
Zwei-Weg-Zeit- und Frequenzübertragung mit geostationären Satelliten (*Two-way satellite time and frequency transfer*, TWSTFT) ist die zweite Methode, mit der weit voneinander entfernte Atomuhren verglichen werden [13]. Der Hauptvorteil von Zwei-Weg-Methoden liegt darin, dass wegen der Reziprozität der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

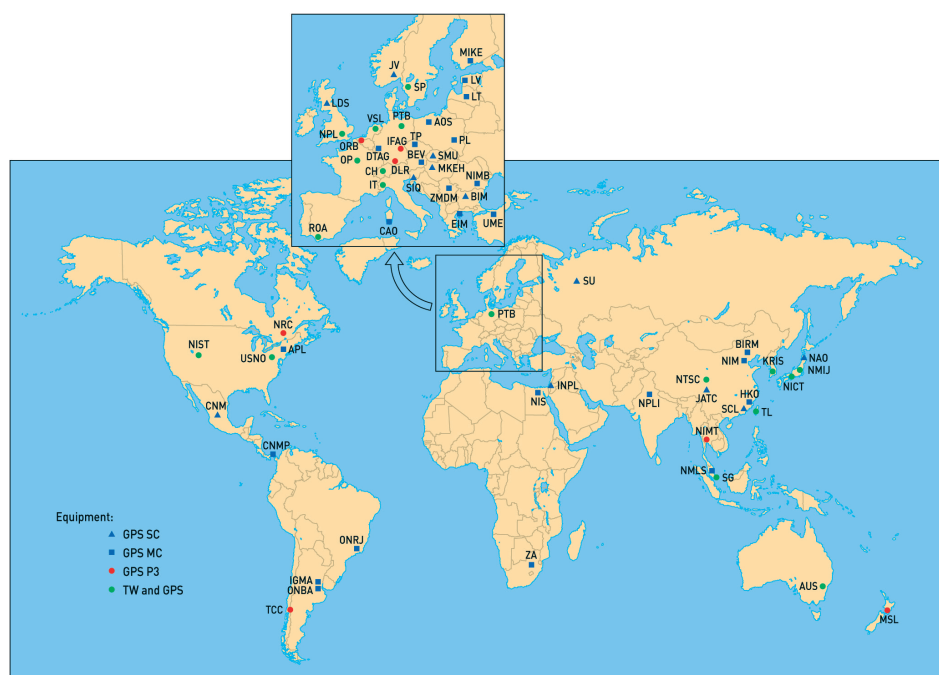


Bild 3:
Geographische Verteilung aller Institute, die mit ihren Atomuhren zur internationalen Atomzeitskala TAI beitragen. Das jeweilige Symbol zeigt das beim Uhrenvergleich vorwiegend verwendete Verfahren an [17]. (Bild: BIPM)

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.

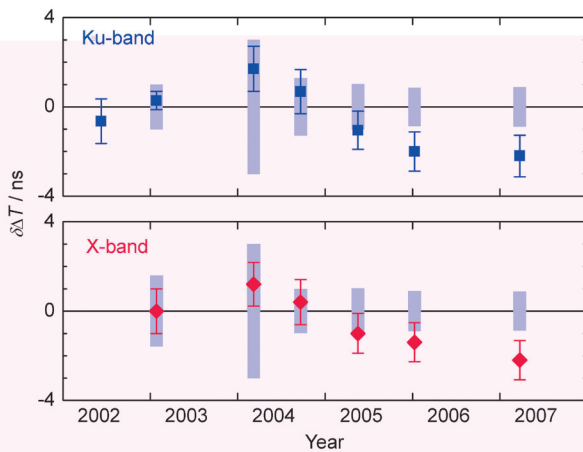


Bild 5:

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 differentiellen 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

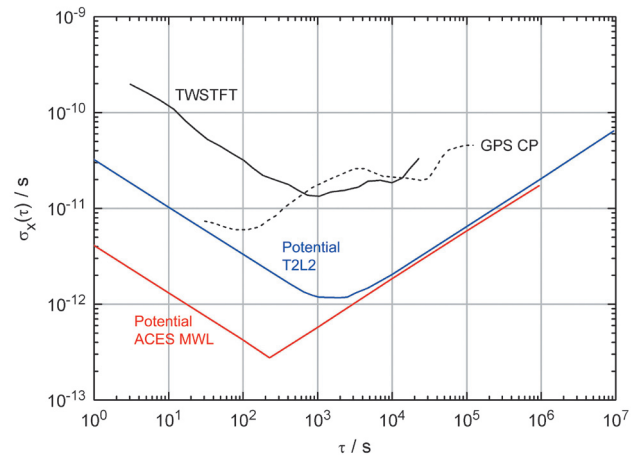


Bild 6:

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].

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.

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

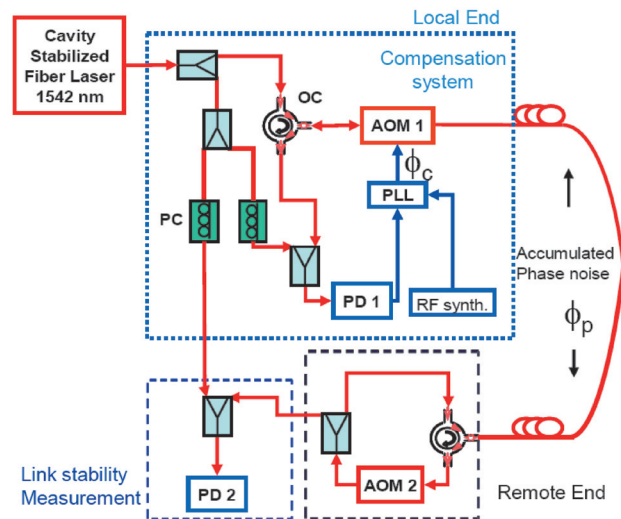


Bild 7:
Aufbau einer aktiven Weglängenstabilisierung für Glasfaser-Übertragungsstrecken.
AOM: Akusto-optischer Modulator; PD: Photodiode; PLL: Phasenregelkreis; PC: Polarisationssteller; OC: optischer Zirkulator; RF synth: HF-Synthesizer.
Für Details siehe Text.
(Bild: G. Santarelli, LNE-SYRTE)

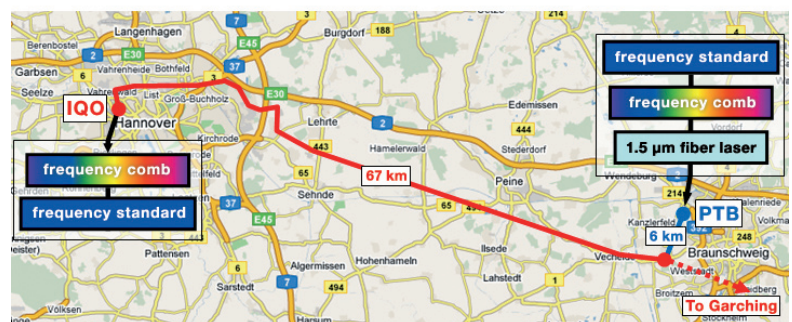


Bild 8:
Vergleich optischer Frequenznormale zwischen dem Institut für Quantenoptik (IQO) der Leibniz Universität Hannover und der PTB über eine kommerzielle Glasfaserverbindung (rote Linie). Die gestrichelte Linie zeigt die im Aufbau befindliche Erweiterung nach Garching. In der PTB wird ein Faserlaser 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-Glasfaserverbindung 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 Faserverbindung 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 Sende- und Empfangsseite betrug 3 mHz bei einer Meßunsicherheit von 4 mHz [23].

Im Folgenden wird eine Faserverbindung 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 Netzwerks, 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 Glasfaserverbindungen. 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 Sende- 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.

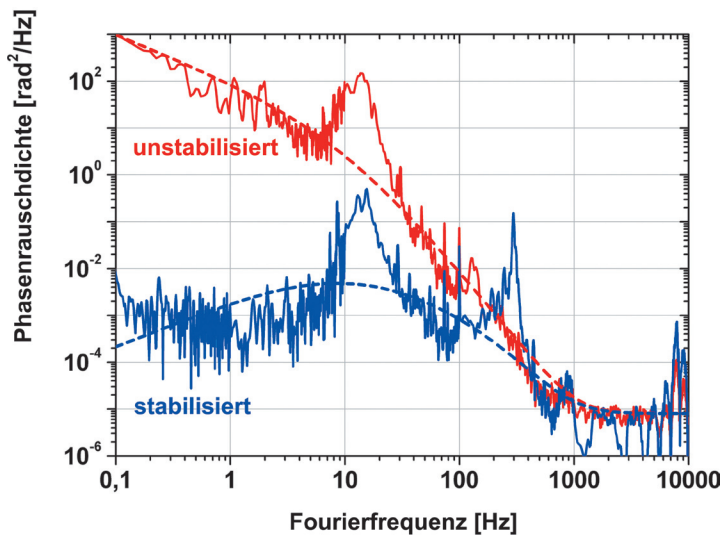


Bild 9:

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 $\sigma_y(\tau) \approx 3 \cdot 10^{-15} (\tau/\text{s})^{-1}$ abschätzen. Mit dem oben erwähnten Yb⁺-Uhrenlaser als Referenz konnten wir die Instabilität der übertragenen Frequenz relativ zur Sendeseite bestimmen: Die gemessene Instabilität ist $\sigma_y(\tau) = 2,5 \cdot 10^{-15} (\tau/\text{s})^{-1}$ (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

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 Verstärkerstu-

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. Narbonne 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. Narbonne, 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.