



FORSCHUNGSBEITRAG ZUR PHYSIK

Nach dem Abitur 1990 studierte Gesine Grosche Naturwissenschaften und Physik am Trinity College, Universität Cambridge (UK), wo sie eine Bachelorarbeit zu Ladungstransport und Exzitonbildung in LED-Polymeren erstellte. Von 1993-1997 promovierte sie am Imperial College, Universität London, im Gebiet Halbleiterphysik, über „Infrared absorption due to gap and local vibrational modes in gallium phosphide“. Seit 1997 in Braunschweig, zunächst als Post-Doc an der TU Braunschweig mit Arbeiten zur Laser-Doppler-Anemometrie vom Flugzeug aus, gehört sie seit 2000 der Abteilung Optik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt an. Sie leitete dort zunächst ein EU-Projekt zur Entwicklung präziser Wellenlängenreferenzen für die optische Nachrichtentechnik, und erforschte und entwickelte dann u. a. die metrologische Verwendung glasfaserbasierter Femtosekundenlaser als Frequenzkämme für hochpräzise Frequenzvergleiche. Seit 2002 verfolgt sie die Vision einer glasfasergestützten Weitergabe höchstpräziser Frequenzen und leitet seit 2013 die neu eingerichtete PTB-Arbeitsgruppe „Frequenzübertragung mit Glasfasern“. Sie erhielt 2012 den „Young Scientist Award“ des European Frequency and Time Forum.

DR. GESINE GROSCHE

AUF 19 STELLEN GENAU MESSEN – PRÄZISIONSEXPERIMENTE MIT GLASFASERN

Wieso Glasfasern für Präzisions- experimente?

Glasfasernetze benutzen wir fast alle täglich für die Telekommunikation und das Internet. Aber auch in der Forschung finden sie breite Verwendung, z.B. in großen Forschungsverbänden (Datenströme der Radioastronomie) oder in Experimenten zur Quantenkommunikation. Eine relativ junge Anwendung ist die „Zweckentfremdung“ der i. A. unterirdisch verlegten Glasfaserverbindungen für Präzisionsmessungen mit Laserlicht. Die Grundidee ist einfach: Telekommunikations-Glasfasern sind ein hervorragendes Übertragungsmedium für extrem rauscharme Signale, wie sie für sehr präzise Messungen erforderlich sind. Das hat vor allem drei Gründe:

- a. Glasfasern wurden über Jahrzehnte auf möglichst geringe Verluste hin optimiert: bei einer Wellenlänge von 1550nm erreicht man inzwischen eine Dämpfung von weniger als 0.2dB pro km, d. h. nach einer Distanz von 100km kommt noch 1% der injizierten optischen Leistung an. So ist es möglich, ein Signal über sehr weite Strecken zu übertragen;
- b. aufgrund des kommerziell riesigen Marktes „Telekommunikation“ sind ausgereifte optische Komponenten für fast jede erdenkliche Aufgabenstellung kostengünstig verfügbar;

- c. Glasfaser hat einen zeitlich sehr konstanten Brechungsindex. Dadurch wird die Phase von Licht, was eine Glasfaser durchläuft, viel weniger gestört, als z. B. in Luft, also bei der Freistrah-Übertragung in (erdnaher) Atmosphäre. Grund hierfür ist, dass unterirdisch verlegte Glasfasern gut vor Störungen geschützt sind, also nur kleinste Druck- oder Temperaturänderungen erfahren.

Optische Uhren – transportieren wir die Uhr oder nur ihr Signal?

Bisher ist die SI-Sekunde über die Cäsium-Atomuhr definiert, welche mit einer Mikro-

Kurzzusammenfassung:

Das weltweite, für die Telekommunikation verlegte Glasfasernetz eröffnet neue Möglichkeiten für höchstpräzise Messungen und Vergleichsexperimente über weite Distanzen: quer durch Deutschland, in den nächsten Jahren vielleicht sogar quer durch Europa. Dabei vergleichen wir mittels optischer Interferometrie die Phase von Laserlicht an den beiden Enden einer bis zu 2.000 km langen Telekommunikations-Glasfaser. So holen wir das entfernte Ende der Glasfaser z. B. in ein Präzisionslabor der PTB, wo spezielle Messinstrumente stehen. Dies erlaubt Spektroskopie-Experimente mit zuvor unerreichbarer Genauigkeit: die Frequenzauflösung liegt bei etwa einem Teil in 10^{18} . Als Vergleich: wenn wir ähnlich genau den Abstand zwischen Erde und Mond messen könnten (~380.000 km), würde das einer Auflösung von einem 100000stel der Dicke eines Haares (40 μm) entsprechen.

”Optische Interferometrie über Glasfaser erlaubt uns, ein weit entferntes Messobjekt am einen Ende (der Glasfaser) mit Präzisionsinstrumenten am anderen Ende zu betrachten.“

Dr. Gesine Grosche

wellenfrequenz von etwa 9.2 GHz „tickt“, und dabei einen Hyperfein-Übergang des Cs-Atoms als Referenz nutzt. In den letzten 15 Jahren sind sogenannte „optische Atomuhren“, die mit sichtbarem Licht arbeiten, rasant entwickelt worden. Diese Uhren nutzen als Referenz atomare Übergänge, die mit Laserlicht bei einer Frequenz von etwa 500 THz ausgelesen werden: die Uhren „ticken“ also fast fünf Größenordnungen schneller, als eine herkömmliche Cs-Atomuhr. Die höhere Frequenz erlaubt eine viel schnellere Charakterisierung und feinere, also präzisere Unterteilung der Zeit. Die „optischen Uhren“ gehen genauer, und inzwischen kann ihr Gang (also ihre Frequenz) mit einer relativen Unsicherheit von etwa 10^{-17} vorhergesagt und reproduziert werden [1].

Schon früh wurde überlegt, wie die Frequenz der neuen optischen Uhren (od. Frequenzstandards) ohne Genauigkeitsverlust transportiert werden kann – zum einen, um die Uhren miteinander vergleichen zu können, zum anderen, um die noch genaueren Referenzfrequenzen auch zu nutzen. Optische Längenmessung und Spektroskopie bedient sich als Referenz i. A. stabilisierter Laser, wie z. B. Helium-Neon-Laser, die auf molekulare Übergänge des Iod-Moleküls stabilisiert

werden. Diese Frequenzstandards müssen zwischen den beteiligten Laboratorien hin und her transportiert werden. Analog hierzu wurden und werden „transportable“ optische Atomuhren entwickelt, die so gebaut sind, dass sie einen Transport unbeschadet überstehen und danach mit der gleichen Frequenz laufen [2].

Ein eleganter, alternativer Ansatz ist, nur die Information, die eine Uhr oder ein Frequenzstandard liefert, zu transportieren: also Frequenzsignale (und ggf. Zeitsignale) möglichst präzise über weite Distanzen zu übertragen. Dies ist mit Radiofrequenzen z. B. über Satellitenverbindungen möglich; eine weitaus höhere Genauigkeit kann nun über Glasfaserverbindungen erreicht werden. Die Vorteile liegen auf der Hand: das Signal kann ständig zur Verfügung gestellt werden, es entstehen geringere Kosten, und pro Empfänger wird nur eine zusätzliche Übertragung benötigt, kein zusätzlicher transportabler Frequenzstandard.

Entsprechend wurden die ersten Entwicklungsarbeiten für kohärente Radio-Astronomie-Experimente, also mit vielen Empfängern, durchgeführt. In Europa waren die ersten Experimente motiviert durch Spektroskopie am Wasserstoff-Atom – über eine 3 km lange Glasfaser wurde sichtbares Licht eines Frequenzstandards übertragen und ermöglichte die genaue Bestimmung der Rydberg-Konstanten. [3, 4].

Ein optisches Getriebe – der Frequenzkamm-Generator

Wesentlicher Baustein für die weitere Entwicklung war und ist eine Erfindung, die Radiofrequenzen (MHz-Bereich) mit den Frequenzen sichtbaren Lichtes (500 THz-Bereich) verbindet, und zwar ohne Schlupf, wie ein Getriebe. Dieses Instrument, zu dessen Entwicklung Forscher in Europa und USA (u.a. Harald Telle an der PTB in Braunschweig und federführend der spätere Nobelpreisträger Theodor Hänsch am MPQ Garching) beigetragen haben, heißt „Femtosekundenlaser-Frequenzkamm-Generator“. Er erlaubt es, beliebig zwischen verschiedenen optischen Frequenzen oder auch zwischen optischen und Radiofrequenzen zu konvertieren. So können wir – prinzipiell fast ohne Verlust an Genauigkeit – aus dem Signal einer „optischen Uhr“, also hochstabilem Laserlicht, auch einen Sekundentakt generieren. Außerdem ist es mittels Frequenzkamm möglich, die Signale der optischen Uhr in Signale bei einer Wellenlänge von 1550 nm umzuwandeln [5], wo sie per Glasfaser verlustarm übertragen werden können.

Wie gut der Frequenzkamm als optisches Getriebe ohne Schlupf funktioniert, kann man z. B. testen, indem zwei Frequenzkämme die gleiche Frequenzumsetzung ausführen, und wir die Ergebnisse vergleichen: Unterschiede und relative Fluktuationen sind dann auf den Frequenzkamm zurückzuführen.

Derartige Experimente haben mit einer relativen Unsicherheit von zunächst $< 6 \cdot 10^{-16}$ [6] und wenig später $< 5 \cdot 10^{-18}$ [5] frühzeitig die Frequenzkammtechnik für faserbasierte Systeme bestätigt, sodass inzwischen portable, zuverlässige Systeme serienmäßig industriell verfügbar sind.

Riesige Interferometer mit Glasfaser

Die einfachste Möglichkeit, Frequenzen per Glasfaser zu verteilen, ist „passiv“, d. h. das Signal wird einfach in die Glasfaser eingespeist. Erste Experimente [3, 4] zeigten, dass das Signal z. B. nach 6 km Glasfaserstrecke um einige kHz verbreitert ist, seine Mittenfrequenz sich jedoch kaum verändert: für eine optische Frequenz (385 THz) lag die Änderung bei wenigen Hz, also relativ etwa bei 10^{-14} .

Die Verbreiterung wird vor allem durch mechanische Störungen verursacht, die über Druckeinwirkung den Brechungsindex n in der Glasfaser verändern, sodass die optische Weglänge schnellen Fluktuationen unterliegt. Entsprechend verändert sich die Phase des Lichts am Ausgang, und deren zeitliche Ableitung, also die optische Frequenz. Das gleiche passiert für Temperaturänderungen, die ebenfalls primär über den Brechungsindex die optische Weglänge verändern. In Glasfaser gilt, dass eine Temperaturdrift (mit der Rate dT/dt) eine relative Frequenz-

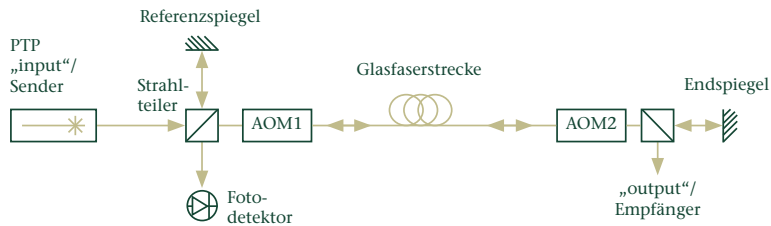


Abbildung 1:

Prinzipskizze des Aufbaus für die Frequenzübertragung per Glasfaser, schematisch als Michelson-Interferometer. AOM1 und AOM2 sind akusto-optische Modulatoren, die eine kontrollierbare Frequenzverschiebung bewirken. Zusammen mit der Glasfaserstrecke bilden sie den langen Interferometer-Arm, dessen Phasenexkursionen relativ zum Referenzarm (Strahlteiler/Referenzspiegel) aus dem Schwebungssignal am Fotodetektor bestimmt werden. Eine spezielle Regelektronik (nicht gezeigt) kann den AOM1 so steuern, dass die Lichtphase im langen Interferometerarm nicht fluktuiert. So liegt am Endspiegel und damit auch am Empfängerausgang eine konstante und bekannte Frequenz vor: die Glasfaserstrecke ist „stabilisiert“.

verschiebung $\Delta\omega/\omega \sim \tau \cdot 1/n \cdot dn/dT \cdot dT/dt$ ergibt, wobei τ die Signallaufzeit durch die Glasfaser ist, also etwa 1 ms pro 200 km (mit $n \sim 1.5$). Diese Effekte sind analog zum Doppellereffekt, wie er auch im Alltag zu beobachten ist (Tonhöhenänderung vorbeifahrender Ambulanzwagen), und wo sich die Weglänge durch Bewegung des Senders bzw. Empfängers ändert.

Unterirdisch verlegte Glasfaser bewirkt i. A. relative Frequenzverschiebungen kleiner 10^{-13} für Distanzen von etwa 100 km; d. h.

eine optische Frequenz von 200 THz wird maximal um etwa 20 Hz verändert. Das ist für eine Fernkalibrierung optischer Geräte (Wellenlängenmessgeräte, Laser) mehr als ausreichend, und eine attraktive Möglichkeit, das Meter (SI-Einheit) als Einheit kostengünstig zu verteilen. Für den Vergleich optischer Uhren wird jedoch eine Unsicherheit kleiner 10^{-17} benötigt.

Das geht, indem die Störungen auf der Glasfaserstrecke interferometrisch detektiert und kompensiert werden, siehe Abbildung 1: Grundidee ist, dass etwas Licht nahe dem Empfänger gespiegelt und zum Sender zurück geschickt wird. Die Störungen werden dann am Sendereingang durch Vergleich mit Senderlicht ermittelt, und durch frequenzverschiebende optische Geräte kompensiert. Annahme dabei ist, dass Störungen auf die Lichtphase in beiden Ausbreitungsrichtungen gleich wirken, also Reziprozität. Mit einem hochempfindlichen Interferometer wurde ein hohes Maß an Reziprozität für verlegte Glasfaser bestätigt, sodass Störungen um mehr als 50 dB unterdrückt werden können; im Experiment über 150 km Faser wurde so eine Frequenzinstabilität von 10^{-19} demonstriert [7].

Messungen mit dieser Genauigkeit sind bisher nur möglich, wenn die übertragene Frequenz wieder am Senderort ankommt, d. h. der Empfänger im gleichen Labor steht wie der Sender. Daher ist es üblich, zwei zu-

sammen verlegte Glasfasern als stabilisierte Strecke zu betreiben.

Rauscharme Verstärkung

Für Distanzen bis etwa 100 km kann das transmittierte Signal noch unverstärkt empfangen werden – für längere Faserstrecken muss es unterwegs verstärkt werden. Dies trifft auch für die Nachrichtentechnik zu, sodass etwa alle 100 km Fasercontainer oder Knotenpunkte an den Faserstrecken stehen, in denen Geräte installiert werden können. Die folgenden vier Verstärkertechniken sind für die Frequenzübertragung untersucht worden, wobei die erste auf den Standardverstärkern der Nachrichtentechnik aufbaut:

d. Erbium-dotierte Faserverstärker (englisch: erbium doped fibre amplifier, kurz EDFA): eine wenige Meter lange, dotierte Glasfaser wirkt als Verstärkermedium und wird durch Pumplicht (z. B. bei 980 nm) mit Energie versorgt. Signale zwischen 1530 nm und 1560 nm, also in einer Verstärkungsbandbreite von etwa 30 nm, werden verstärkt. Die dotierte Faser verstärkt Licht in beiden Ausbreitungsrichtungen, sodass vor- und rückwärtslaufende Signale in Wechselwirkung treten, und das System bei hohen Pumpleistungen sogar ohne Eingangssignal spontan zu schwingen beginnt. Deswegen werden EDFAs in der Nachrichtentechnik mit

einem Einwegfilter ausgestattet, der nur Vorwärtslicht durchlässt und verstärkt. Für den interferometrischen Aufbau, wie in Abbildung 1, muss das Licht aber in beide Richtungen identische Wege durchlaufen, das Gerät also bi-direktional durchlässig sein. Um Schwingungen zu vermeiden, sind bi-direktional nur niedrige Pumpleistungen, und damit geringe Verstärkung möglich – typisch sind etwa 16 dB.

- e.** Raman-Verstärker: hohe Pumplichtleistungen von etwa 1 Watt können Lichtsignale durch Wechselwirkung mit Molekülschwingungen des Glases selbst, also durch Ramanstreuung, verstärken. Dies erfordert keine Dotierung des Materials und es wird eine große Verstärkungsbandbreite (typisch 10 THz, entsprechend 80 nm) erreicht; die Verstärkung ist meist geringer als 20 dB.
- f.** Signalregeneration („Auffrischung“): eine Laserquelle mit hoher Leistung wird an das ankommende Signallicht mit geringer Leistung in seiner Frequenz angekoppelt; hierfür gibt es verschiedene Verfahren. Die effektive Verstärkung kann 50 dB und mehr betragen, der apparative Aufwand ist relativ hoch.
- g.** Faser-Brillouin-Verstärkung (fibre Brillouin amplification, oder kurz „FBA“): ähnlich wie bei der Raman-Verstärkung

sind Phononen für den Austausch der Energie zwischen Pumplicht und Signallicht verantwortlich, der Brillouin-Verstärker benutzt dabei akustische Phononen. Diese haben eine lange Lebensdauer, sodass sich eine extrem schmale Verstärkungsbandbreite von nur etwa 15 MHz (etwa 0.0001 nm) ergibt. Gleichzeitig bewirkt die Impulserhaltung (Auswahlregel), dass Pump- und Signallicht gegenläufig sein müssen. So können wir über die Pumpkonfiguration und Pumplichtfrequenz wählen, in welcher Ausbreitungsrichtung Signallicht verstärkt wird. Die Verstärkung beträgt bis zu 50 dB auch in bi-direktionalen Fasersystemen [8].

Für eine Glasfaserstrecke von 1000 km ist eine Dämpfung (relativer Signalleistungsverlust) von etwa 250 dB zu erwarten. Um dies auszugleichen, müsste man etwa 15 EDFAs mit jeweils 17 dB Verstärkung in regelmäßigen Abständen von etwa 70 km in der Strecke einbauen.

Die Alternative, nur fünf bis sechs FBA-Geräte je mit einer Verstärkung von 40–50 dB, ist attraktiv, zumal nicht-lineare Effekte und Rauschen mit der Anzahl kaskadierter Verstärker stark ansteigen. Tatsächlich wurden in der bisher längsten realisierten Glasfaserstrecke zur Frequenzübertragung, einer 920 km langen Verbindung zwischen der PTB in Braunschweig und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, nahe

München, beide Techniken kombiniert, siehe Abbildung 2. Die verfügbaren Container etwa im Abstand von 100 km und die Labore an den Endpunkten, wurden mit EDFAs bestückt und der verbleibende Nettoverlust von etwa 50 dB durch zusätzliche FBA an den Endpunkten ausgeglichen. Für Frequenzen, die über die stabilisierte Strecke übertragen wurden, wurde eine relative Instabilität und Unsicherheit kleiner 10^{-18} gemessen [9].

» Präzise Frequenzvergleiche zwischen den Staatsinstituten, wie sie zukünftig per Glasfaser möglich werden, sind ein Schlüsselement zur Neudefinition der SI-Sekunde. «

Dr. Gesine Grosche

Inzwischen wird die Verstärkertechnologie weiter getrieben, indem portable FBA-Module für den Einbau entlang einer Faserstrecke entwickelt werden. Dabei muss z. B. die Pumplichtfrequenz automatisch exakt an die Signalfrequenz und die lokale Brillouinverschiebung angepasst werden, wobei letztere von der Schallgeschwindigkeit in der verlegten Glasfaser abhängt.

Anwendungen

Bisher verwendet haben wir das neue Verfahren bereits, um z. B. einen speziellen, ultra-

stabilen Laser an der Universität Hannover gegen die besten Laser der PTB über die Glasfaser in Echtzeit zu charakterisieren und zu optimieren. Die erzielte Frequenzauflösung lag dabei nach einer Zehntelsekunde unter $3 \cdot 10^{-15}$ (oder < 1 Hz absolut bei 200 THz). Darauf folgend gelang auch eine Fern-Messung der Uhrenfrequenz des Magnesium-Frequenzstandards der Universität Hannover, gegen die Cäsium-Fontäne der PTB, mit der die SI-Sekunde in Deutschland definiert wird. Ähnliche spektroskopische Messungen sind auf kürzeren Distanzen u. a. in Boulder (Colorado, USA) mit optischen Uhren, sowie in Paris (Frankreich) und in Japan, zwischen Staatsinstituten und Universitäten erfolgt. Für die sehr lange Strecke MPQ Garching-PTB konnte der 1S-2S Übergang des Wasserstoffs im hochpräzisen Experiment des MPQ gegen die Cäsium-Fontäne der PTB vermessen werden. Neben dem nun genauesten Messwert erlaubte der Vergleich mit früheren Messungen auch, eine Jahreszeitabhängigkeit der Messung quantitativ einzugrenzen, was bedeutet, dass die sog. Lorentz-boost-invariance bestätigt wurde [10].

Sehr präzise Vergleiche zwischen den Staatsinstituten Europas sind ein Schlüsselement für eine Neudefinition der SI-Sekunde, wenn die SI-Sekunde künftig von optischen Uhren realisiert werden soll. Eventuell erlaubt der Vergleich mehrerer hochgenauer Uhren innerhalb von Europa erste Tests sog. relativistischer Geodäsie, also der Bestimmung

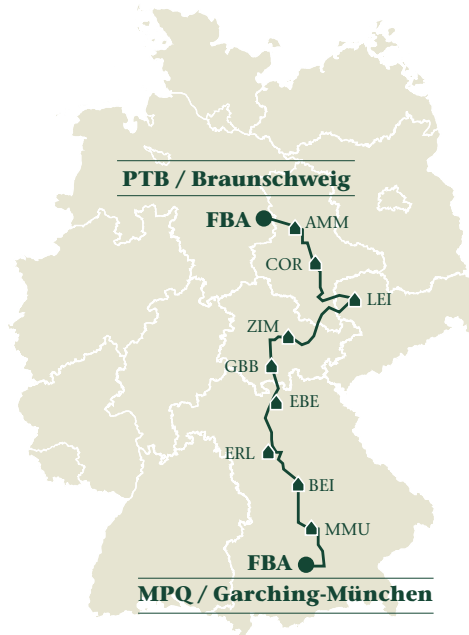
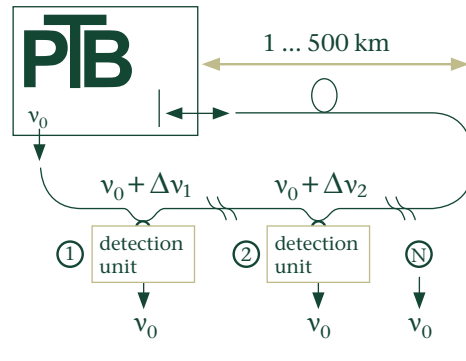


Abbildung 2:
Eingebaute Verstärker in der Glasfaserverbindung zur Frequenzübertragung zwischen der PTB, Braunschweig und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching nahe München: EDFAs (Häusersymbol) in Containerstandorten entlang der Strecke und FBA an den Endpunkten. Die gesamte Faserstrecke von 920 km Länge bildet den langen Arm eines Interferometers wie er in Abb. 1 gezeigt ist.
Quelle: adaptiert aus: Katharina Predehl, "A 920 km Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place, Doktorarbeit an der LMU München", 2012.

von relativen Höhenunterschieden (unterschiedliches Gravitationspotenzial) durch Messen der unterschiedlichen Gravitationsrotverschiebung zwischen den Uhren an zwei Standorten. Das Gravitationspotenzial selbst ist wiederum zeitlich veränderlich, was je nach Standort relative Fluktuationen der lokalen Uhrenfrequenz von $> 10^{-17}$ bewirken kann – dann sind genauere Untersuchungen notwendig, um optische Uhren überhaupt sinnvoll einzusetzen.

Abbildung 3:
Fasergeführte Verteilung ultrapräziser Frequenzsignale an viele Empfänger, indem viele Empfänger auf die gleiche Glasfaserstrecke zugreifen. Jeder Empfänger kann durch eine spezielle Empfangsvorrichtung (detection unit) trotz Übertragungsstörungen das ursprüngliche hochpräzise Frequenzsignal regenerieren [11].



Quelle: adaptiert aus: Smandek/Grosche, www.ptb.de/s/c/tVmXF_Cx/patentDB_Dokumente/A276.pdf

Ausblick in die Zukunft

Im Weltraum sind einige Störeinflüsse, die die Genauigkeit von Uhren begrenzen, verringert. Deshalb gibt es Ideen, die genauesten Uhren in Satelliten im Weltraum zu platzieren. Bisher reicht allerdings die Genauigkeit der Frequenz-Übertragungsmethoden von den Satelliten zur Erde nicht aus. Erste Experimente werden unternommen, auch hier optische Signale zu nutzen. Ein Ansatz ist die Adaption der Techniken der glasfasergestützten Frequenzübertragung für die optische Freistrahlin-Übertragung.

Eine weitere Vision besteht darin, eines Tages viele Anwender kostengünstig mit einer hochgenauen Referenzfrequenz zu versorgen, d. h. analog zum bisherigen Funkuhrensystem, Lichtsignale mit höchstpräziser Frequenz (und ggf. Zeitstempel) per Glasfaser zu

verteilen. Im Vergleich zu existierenden Verfahren basierend auf NTP (network time protocol) im μsek -Bereich sind hier Verbesserungen von mehr als fünf Größenordnungen in der Genauigkeit physikalisch möglich.

Die hochgenaue Verteilung von Frequenzen an viele Nutzer ist wegen der erforderlichen Punkt-zu-Punkt-Stabilisierung eine große logistische Herausforderung. Eine elegante Vereinfachung basiert nun darauf, eine existierende stabilisierte Leitung lediglich anzuzapfen, und lokal aus vor- und zurücklaufendem Signal das hochstabile Signal zu erzeugen, wie in Abbildung 3 gezeigt [11].

Die Idee ist sowohl für Frequenzen, als auch für Zeitsignale umsetzbar [12] und erlaubt eine vergleichbare Präzision am Auskoppelort, wie sie am Ende der stabilisierten Leitung vorliegt. Dies wurde in Deutschland [12] und Frankreich [13] experimentell verifiziert, und ähnliche Systeme sind auch in China, und in abgewandelter Form in Polen, realisiert worden. Im Rahmen eines groß angelegten Projektes über acht Jahre werden so in Frankreich voraussichtlich etwa 20 Laboratorien im Großraum Paris und Umgebung in den Genuss einer höchstpräzisen optischen Referenzfrequenz, direkt aus dem französischen Staatsinstitut im Zentrum von Paris, kommen.

Literaturverzeichnis

- [1] B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley, and J. Ye, “An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level”, *Nature* **506**, S. 71–75 (2014).
- [2] P. Kersten, F. Mensing, U. Sterr, and F. Riehle, “A transportable optical calcium frequency standard”, *Applied Physics B* **68**, S. 27–38 (1999).
- [3] B. de Beauvoir, F. Nez, L. Julien, B. Cagnac, F. Biraben, D. Touahri, L. Hilico, O. Acef, A. Clairon, and J. J. Zondy, “Absolute Frequency Measurement of the 2S-8S/D Transitions in Hydrogen and Deuterium: New Determination of the Rydberg Constant”, *Physical Review Letters* **78**, S. 440–443 (1997).
- [4] B. de Beauvoir, F. Nez, L. Hilico, L. Julien, F. Biraben, B. Cagnac, J. J. Zondy, D. Touahri, O. Acef, and A. Clairon, “Transmission of an optical frequency through a 3 km long optical fiber”, *European Physical Journal D* **1**, S. 227–229 (1998).
- [5] G. Grosche, B. Lipphardt, H. Schnatz, “Optical frequency synthesis and measurement using fibre-based femtosecond lasers”, *Eur. Phys. J. D* **48**, S. 27–33 (2008).
- [6] P. Kubina, P. Adel, F. Adler, G. Grosche, T. Hänsch, R. Holzwarth, A. Leitenstorfer, B. Lipphardt, and H. Schnatz, “Long term comparison of two fiber based frequency comb systems,” *Opt. Express* **13**, S. 904–909 (2005).
- [7] G. Grosche, O. Terra, K. Predehl, R. Holzwarth, B. Lipphardt, F. Vogt, U. Sterr, and H. Schnatz, “Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy”, *Optics Letters* **34**, S. 2270–2272 (2009).
- [8] O. Terra, G. Grosche, H. Schnatz, “Brillouin amplification in phase coherent transfer of optical frequencies over 480 km fiber”, *Optics Express* **18**, S. 16102–16111 (2010).
- [9] K. Predehl, G. Grosche, S. M. F. Raupach, S. Droste, O. Terra, J. Alnis, Th. Legero, T. W. Hänsch, Th. Udem, R. Holzwarth, and H. Schnatz, “A 920-Kilometer Optical Fiber Link for Frequency Metrology at the 19th Decimal Place”, *Science* **336**, S. 441–444 (2012).

[10] A. Matveev, Ch. G. Parthey, K. Predehl, J. Alnis, A. Beyer, R. Holzwarth, Th. Udem, T. Wilken, N. Kolachevsky, M. Abgrall, D. Rovera, Ch. Salomon, P. Laurent, G. Grosche, O. Terra, T. Legero, H. Schnatz, S. Weyers, B. Altschul, and T. W. Hänsch, „Precision Measurement of the Hydrogen 1S-2S Frequency via a 920-km Fiber Link“, *Physical Review Letters* **110**, 230801 (2013).

[11] G. Grosche, Patent DE 200810062139, „Verfahren zum Bereitstellen einer Referenzfrequenz“, publiziert 24.06.2010 .

[12] G. Grosche, „Eavesdropping time and frequency: phase noise cancellation along a time-varying path, such as an optical fiber“, *Optics Letters* **39**, S. 2545–2548 (2014).

[13] A. Bercy, S. Guellati-Khelifa, F. Stefani, G. Santarelli, Ch. Chardonnet, P. E. Pottie, O. Lopez, and A. Amy-Klein, „In-line extraction of an ultrastable frequency signal over an optical fiber link“, *J. Opt. Soc. Am. B* **31**, S. 678–685 (2014).