

GEODÄSIE

Ein Ring, die Erde zu finden

Hochauflösende Ringlaser ermöglichen die Inertialnavigation für den Erdkörper.

Ulrich Schreiber

Unser Alltag hängt, oft ohne dass wir es merken, immer mehr von satellitengestützten Navigationssystemen ab. Damit diese funktionieren, müssen die Orientierung der Erde im Raum und ihre Rotationsgeschwindigkeit, die beide variieren, so genau wie möglich bekannt sein. Traditionell liefert ein globales Netz von Radioteleskopen diese Information. Doch höchst präzise Ringlaser, deren Prinzip auf ein Experiment von Georges Sagnac aus dem Jahr 1913 zurückgeht, können diese Größen auch in einem Laborexperiment bestimmen und haben das Potenzial, die Messungen von Radioteleskopen bedeutend zu verbessern.

Auch wenn unsere Alltagserfahrung dagegen spricht, ist die Erde kein starrer Körper. Über große Zeiträume hinweg betrachtet hat sie sich ganz erstaunlich verändert. Kontinente haben sich über große Distanzen verschoben. Die Ausrichtung und Feldstärke des Erdmagnetfelds wandert, wobei mehrfach Polaritätswechsel stattgefunden haben. Daher verwundert es auch nicht, dass beispielsweise auf Spitzbergen fossile Pflanzenreste einer subtropischen Vegetation gefunden wurden. Doch auch jenseits dieser Vorgänge gibt es Hinweise auf einen dynamischen, deformierbaren Erdkörper. Dass der Mond für die Gezeiten der Meere verantwortlich ist, überrascht niemanden mehr, dass er aber auch in gleichem Maße Gezeiten der festen Erde mit einer Amplitude von rund zwanzig Zentimetern bei uns in Mitteleuropa verursacht, ist weniger allgemein bekannt und entspricht obendrein auch nicht unserer Alltagserfahrung. Die durch die gravitative Deformation verursachte Hebung bzw. Senkung der Erdkruste findet periodisch über einen Zeitraum von etwas mehr als zwölf Stunden statt, und das wellenförmige Signal mit einer Amplitude von 20 cm, einer Frequenz von 22,4 mHz und einer Wellenlänge von ca. 20 000 km entzieht sich unserer direkten Wahrnehmung. Mit Gravimetern und hochgenauen Neigungsmessern lässt sich aber nicht nur die Höhenänderung, sondern auch der Neigungswinkel der lokalen Erdkruste infolge der Deformation der Erde bestimmen.

Um herauszufinden, ob so kleine Effekte für unsere typischen Alltagssituationen vielleicht doch konkrete Auswirkungen haben können, müssen wir genauer hinschauen. Die Erde besteht in einer einfachen Einteilung aus einem festen inneren Kern, einem flüssigen



In einem Untergrundlabor des Geodätischen Observatoriums Wettzell steht

der Ringlaser „G“, der in dieser stabilen Bauform und Größe einzigartig ist.

äußeren Kern, einem Mantel, einer dünnen Kruste, den Ozeanen und nicht zuletzt der Atmosphäre. In dieser Aufzählung dürfen auch die großen kontinentalen Eisschilde aufgrund ihrer Variabilität nicht fehlen. Jede dieser Komponenten trägt einen Teil der Gesamtmasse der Erde und nimmt an einem fortwährenden Massenverteilungsprozess bzw. einem Impulsaustausch teil. Die Folge dieser gegenseitigen Wechselwirkungen im Gravitationsfeld von Sonne, Mond und anderen prominenten Massen des Sonnensystems sind geringfügige Änderungen des effektiven Trägheitsmoments der Erde. Damit gehen leichte Schwankungen in der täglichen Rotationsgeschwindigkeit sowie der Lage des Erdkörpers im Raum einher. Als ein Effekt von mehreren führt allein die Verlangsamung der Rotationsge-

KOMPAKT

- Im Jahr 1913 zeigte Georges Sagnac, dass sich die Rotation eines Experiments mithilfe von interferierenden Lichtstrahlen nachweisen lässt.
- Von dem reinen Nachweis der Erdrotation bis hin zur Messung ihrer Variation mit der erforderlichen Genauigkeit gilt es allerdings neun Größenordnungen zu überbrücken.
- Mit dem Ringlaser „G“ des geodätischen Observatoriums Wettzell ist es bereits gelungen, sowohl die periodischen Signaturen der täglichen Polbewegung als auch die auf längerer Zeitskala stattfindenden Polwanderungen zu messen.

Prof. Dr. Ulrich Schreiber, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, Technische Universität München, und Geodätisches Observatorium Wettzell, Sackenrieder Str. 25, 93444 Bad Kötzing



Abb. 1 Das Radioteleskop des Geodätischen Observatoriums Wettzell wird für die Very Long Baseline Interferometry (VLBI) genutzt.

schwindigkeit der Erde aufgrund der Gezeitenreibung dazu, dass ein Tag innerhalb von hundert Jahren um rund 2 ms länger wird. Auf den ersten Blick erscheint es vernachlässigbar wenig, wenn ein Tag mit 86 400 Sekunden nach hundert Jahren um 2/1000 Sekunden länger ist. Man muss sich jedoch vor Augen halten, dass sich diese kleine Abweichung mit jedem weiteren Tag erneut aufsummiert. Bei 36 525 Tagen in einem Jahrhundert kommt da schon einiges an Abweichungen zusammen. Die gelegentliche Einführung von Schaltsekunden in unserer bürgerlichen Zeit erinnert uns immer wieder daran. Zu diesem gut überschaubaren Effekt der Gezeitenreibung kommen die nicht vorher-sagbaren Effekte aus den angesprochenen Massenumlagerungen sowie dem Impulsaustausch zwischen den einzelnen Subsystemen der Erde. Damit ändert sich die Tageslänge noch erheblich mehr. Doch warum ist dies für jeden von uns so wichtig?

Viele Abläufe unseres täglichen Lebens hängen von satellitengestützten Navigationssystemen ab, angefangen bei der Routenführung von Fahrzeugen über die Choreografie von Transporterflotten bis hin zur Georeferenzierung von Objekten, d. h. der Zuordnung von geografischen Koordinaten zu einem Messpunkt bzw. Gegenstand. Für alle diese Anwendungen wird der geografische Standort eines Autos, Lastwagens oder sonstigen Gegenstands bestimmt, indem man die Laufzeit elektromagnetischer Signale zwischen den beteiligten Satelliten und dem mit dem Objekt verbundenen Empfänger misst. Während also die Koordinaten für ein mit der Erde fest verbundenes mitrotierendes Bezugssystem notwendig sind, bewegen sich die Satelliten in einem raumfesten, nicht rotierenden Bezugssystem. Die Satellitenbahnen beziehen sich zwar auf das Massenzentrum der Erde, welches in einem Brennpunkt ihres elliptischen Orbits liegt, aber die aktuelle Lage der Erde im Raum, also welche Region sich gerade unter ihnen befindet, „kennen“ die Satelliten nicht. Die notwendige Information über die Orientierung der Erde im Raum und ihre momentane Drehgeschwindigkeit muss die Navigationsanwendung also von außen erhalten. Hier ist die größtmögliche Genauig-

1) Dies ist die Zeit, welche die Erde für eine exakte Umdrehung benötigt. Im Gegensatz hierzu ist der Sonnentag, also unsere bürgerliche Zeiteinteilung, um knapp vier Minuten länger, weil zu der Eigendrehung noch 1/365 der Erdbahn um die Sonne anfällt.

keit gefragt, denn davon hängt es ab, wie genau sich eine Position auf der Erdoberfläche bestimmen lässt. Die Anforderungen steigen, wenn man bedenkt, wie schnell die Erde sich dreht. Am Äquator legt ein Punkt im Verlauf eines Sternentages¹⁾ 40 000 km zurück. Das entspricht in unseren Breiten immer noch einer Geschwindigkeit von 200 m/s nach Osten. Die Positionsbestimmung selbst eines festen Ortes auf der Erde ist also eine hochdynamische Aufgabe, bei welcher der kumulative Effekt von „Gleichlaufschwankungen“ der Erde sehr stört.

Wie lang ist ein Tag?

So wie Schiffe oder Raumsonden durch Richtungspeilungen ihre Orientierung erhalten, lässt sich auch die Lage der Erde im Raum bestimmen. Anstelle von Leuchttürmen oder Leitsternen verwendet man ein interferometrisches radioastronomisches Verfahren (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) [1], das eine höhere Genauigkeit ermöglicht. Dazu zeichnen mindestens zwei Radioteleskope mit einem Abstand von mehreren tausend Kilometern zueinander das Mikrowellenrauschen von Quasaren gleichzeitig auf (Abb. 1). Durch Korrelation dieser Messungen ergibt sich die Laufzeitverzögerung $\Delta\tau$ zwischen den Beobachtungsstationen. Da die Wellenfront der Mikrowellenstrahlung aufgrund des großen Abstands zwischen Quelle und Empfänger als eben angesehen werden darf, kann man aus dieser Messung auf die Richtung zwischen der Verbindungslinie der beiden Radioteleskope und dem Quasar schließen (Abb. 2). Werden jetzt viele solche Messungen von einem ganzen globalen Netz von Beobachtungsstationen in alle Raumrichtungen ausgeführt, ergibt sich die Orientierung der Erde im Raum und deren momentane Drehgeschwindigkeit mit einer fantastischen Genauigkeit. Eingebbracht in die Navigationsmessung ergibt sich so ein Auflösungsvermögen in der globalen geodätischen Punktbestimmung von etwa einem Zentimeter. Allerdings sind Radioteleskope teuer, und der dauerhafte Betrieb eines solchen

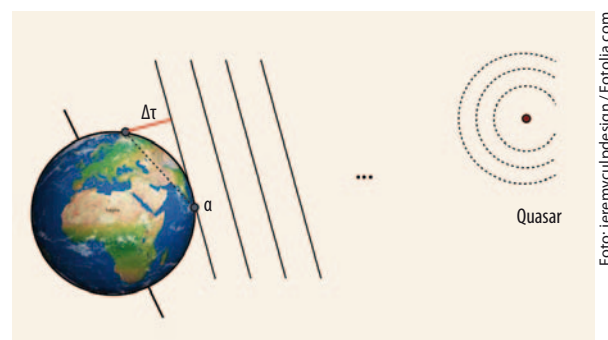


Abb. 2 Bei der VLBI-Technik erhält man aus dem gemessenen Laufzeitunterschied $\Delta\tau$ bei bekannter Länge der Basislinie die Richtung zu einem Quasar. Ein Quasar ist eine extrem weit entfernte aktive Galaxie, die eine sehr starke Strahlungsquelle in ihrem Kern hat, angetrieben von einem supermassereichen Schwarzen Loch. Die parallelen Striche deuten die ebenen Wellenfronten der Strahlung an.

Foto: jeremyculpdesign/Fotolia.com

Netzes ist sehr aufwändig. Daher werden pro Woche normalerweise nur zwei 24-Stunden-Messungen durchgeführt. Wie müsste ein alternatives Messverfahren aussehen, welches den erforderlichen Aufwand reduzieren kann?

Eine Antwort liefert die Ringlasertechnologie, die es durch die genaue inertielle Messung von Drehgeschwindigkeiten auf autonome Weise, also ohne Bezug auf ein externes Bezugssystem, ermöglicht, eine Winkeländerung zu bestimmen. Dieses Verfahren wurde in den 1970er-Jahren insbesondere für die Navigation von Flugzeugen entwickelt. Für die Anwendung in der Geodäsie war es jedoch notwendig, die Sensorempfindlichkeit und die Langzeitstabilität ganz erheblich zu steigern.

Licht in Rotation

Im Jahre 1913, also genau vor einem Jahrhundert, gelang es dem französischen Physiker Georges Sagnac (1869 – 1926), die Rotation eines Laborexperiments mithilfe der Interferenz von Lichtstrahlen nachzuweisen [2]. Er kollimierte dazu den Strahl einer Lichtquelle und richtete ihn auf einen Strahlteiler (Abb. 3). Einen Teilstrahl führte er im Uhrzeigersinn um eine aus vier Spiegeln aufgespannte Fläche, den anderen Teilstrahl in entgegengesetzter Richtung. Wieder am Strahlteiler angelangt, überlagerten sich die Strahlen und bildeten ein Interferenzmuster auf einem Schirm. Wenn diese Apparatur rotiert, verlängert sich der Weg des in Richtung der Rotation verlaufenden Strahls geringfügig, während der entgegengesetzte Strahl einen um den gleichen Betrag kürzeren Weg hat. Dadurch verschiebt sich das Interferenzmuster auf dem Schirm. Mehr noch, dieser Versatz stellte sich als direkt proportional zu der Rotationsgeschwindigkeit und der Größe des verwendeten Flächenstücks heraus. Sagnac musste seine Apparatur mit zwei Umdrehungen pro Sekunde rotieren lassen, um eine kleine Verschiebung zu beobachten. Dies war eine große technische Leistung, musste das optische Interferometer doch so stabil sein, dass es sich durch die Fliehkräfte bei der Rotation nicht verformt.

Albert A. Michelson und Henry G. Gale vergrößerten die Fläche eines solchen Sagnac-Interferometers um einen Faktor von mehr als 2,3 Millionen und erzielten damit ein messbares Interferenzsignal, allein durch die Drehung der Erde hervorgerufen [3]. Diese Apparatur bestand aus evakuierten Wasserleitungen, die ein Rechteck von 603 m × 334 m aufspannten. Die Tatsache, dass sich die Rotationsgeschwindigkeit der Erde nicht verändern lässt, stürzte die beiden Experimentatoren in ein unerwartetes Dilemma. Wie konnten sie sicher sein, dass der gemessene Wert nicht auf einem systematischen Fehler beruht? Michelson und Gale lösten dieses Problem, indem sie in ihrer Apparatur zwei optische Wege anlegten: einen um die gesamte Sensorfläche und einen etwas kürzeren Weg, der nur eine vernachlässigbar kleine Fläche umschrieb. Durch Umschalten vom langen auf den kurzen Weg konnten

sie so den Messeffekt verschwinden lassen, obwohl die Lichtquelle und der Detektionsbereich mit Strahlteiler nicht verändert wurden.

Von dem reinen Nachweis der Erdrotation bis zur Messung ihrer Variationen mit der notwendigen Genauigkeit gilt es, neun Größenordnungen zu überbrücken. Außerdem ist es sehr unpraktisch, mit einer Apparatur von den Abmessungen des Michelson-Gale-Experiments zu arbeiten. Daher sind andere Technologien notwendig. Aktive Ringlaser von moderater Größe haben das Potenzial, diese Lücke zwischen unseren Anforderungen und der Michelsonschen Apparatur von immerhin 10^{12} zu überbrücken, denn unser Ringlaser ist über 12 500-mal kleiner [4, 5].

Weltweit einzigartig ist der „Ringlaser G“, der seit 2001 in einem speziell dafür angefertigten thermisch gut isolierten Untergrundlabor auf dem Geodätischen Observatorium Wettzell (Bayerischer Wald) untergebracht ist (Foto auf S. 25). Ringlaser heißt in diesem Zusammenhang, dass eine quadratische Anordnung von vier Spiegeln einen geschlossenen Strahlengang bildet, der hier eine Fläche von 16 m² einschließt. Da vier Spiegel allein noch keinen Laser machen, verläuft der Strahlengang in einem Rohr, welches zunächst evakuiert und dann mit einer 40:1-Mischung aus Helium und Neon bei einem Gesamtdruck von 5 mbar gefüllt wurde. Auf einer Seite verjüngt sich der Strahlengang und führt zentrisch durch eine ca. 10 cm lange Kapillare mit 5 mm Durchmesser (auf dem Foto im Vordergrund). Ein äußeres Hochfrequenzfeld regt hier ein Plasma an und ermöglicht damit die Lichtverstärkung bei einer Wellenlänge von 632,8 nm, der üblichen roten Linie eines Helium-Neon-Lasers. Was ist das Besondere an diesem Aufbau?

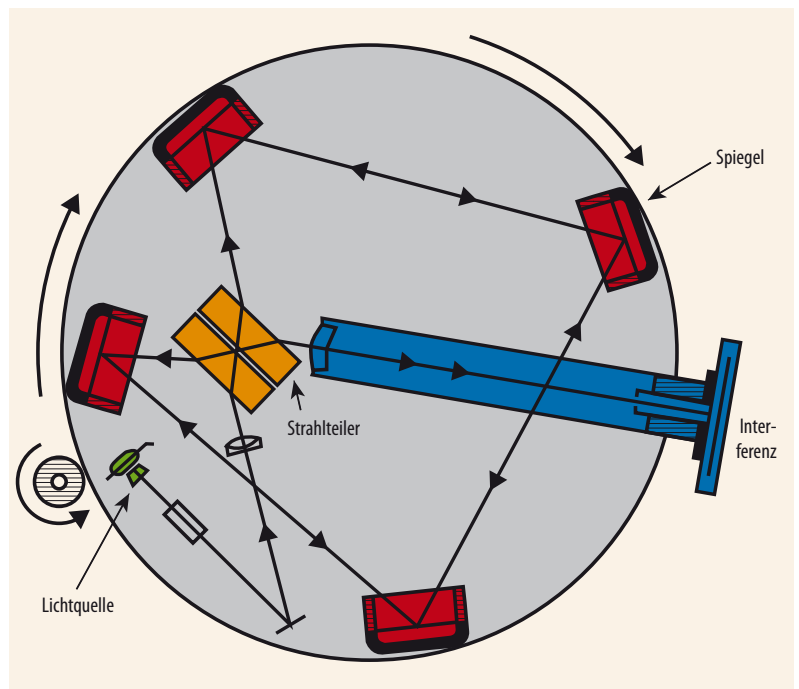


Abb. 3 Das Interferometer von George Sagnac bestand im Wesentlichen aus einer Lichtquelle (grün), einem Strahlteiler (orange), vier Spiegeln (rot), die den optischen Weg definieren, sowie einer Optik zur Beobachtung des Interferenzmusters (blau). Die gesamte Apparatur ließ sich in Rotation versetzen.

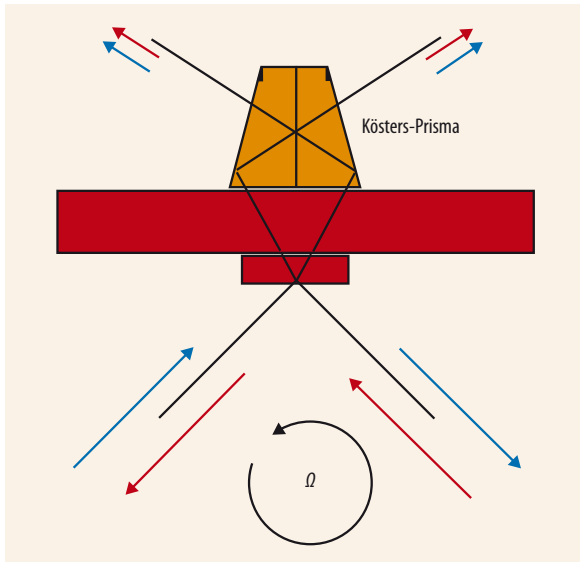


Abb. 4 An den vier Ecken des Ringlasers treffen die beiden Strahlen von rechts bzw. links auf einen Spiegel, der sie reflektiert. An einer Ecke wird der geringe transmittierte Anteil (0,2 ppm) im dahinter liegenden Kösters-Prisma umgelenkt. Eine Strahlteilerschicht in der Mitte des Prismas mischt die Strahlen im Verhältnis 1:1. Dabei entsteht eine Schwebung mit 348,5 Hz zwischen beiden Strahlen, die ein Photodetektor sichtbar macht.

Die Ringstruktur eines Laserresonators führt automatisch dazu, dass sich zwei Laserstrahlen ausbilden; einer davon im Uhrzeigersinn umlaufend, der andere entgegengesetzt. Das klassische Experiment von Sagnac hatte eindrucksvoll gezeigt, dass in einem rotierenden Ring der optische Weg für die gegenläufigen Strahlen verschieden lang ist. Übertragen auf den Ringlaser entspricht diese unterschiedliche effektive Resonatorlänge aber genau einer Frequenzverschiebung zwischen den beiden Strahlen, da beide Umlaufrichtungen die gleiche ganzzahlige Anzahl von Wellenlängen enthalten, in Rotationsrichtung etwas gedehnt und in Gegenrichtung etwas gestaucht. Gegenüber einer Apparatur in Ruhe ist also der mitrotierende Strahl ein wenig nach rot verschoben, der andere um den gleichen Betrag nach blau. Dieser kleine Frequenzunterschied δf wird messbar, wenn der verschwindend

geringe Anteil der beiden Strahlrichtungen, der durch einen der Spiegel leckt, auf einem Strahlteiler außerhalb des Ringresonators überlagert und auf einen Photodetektor geleitet wird (Abb. 4). Mithilfe der Ringlasergleichung

$$\delta f = \frac{4A}{\lambda L} n \cdot \Omega \quad (1)$$

lässt sich δf bestimmen. Dabei sind A die Fläche, L der Umfang und λ die Wellenlänge. Das Skalarprodukt gibt die Projektion des Rotationsvektors der Erde Ω auf den Normalenvektor n der vom Licht umschriebenen Fläche an. Für einen horizontal aufgestellten und fest mit dem Untergrund verbundenen Ringlaser ist daher die gemessene Frequenzverschiebung an den Polen maximal und null am Äquator. Je höher die Güte des Resonators ist, desto schärfer wird die Laserlinie und um so genauer lässt sich aus dem Interferogramm die Frequenzverschiebung ermitteln. Daher wurde der gesamte Aufbau des Ringlasers „G“ auf minimale Strahlungsverluste getrimmt. Schaltet man das Plasma schlagartig ab, leuchtet der Resonator noch gut eine Millisekunde nach. In anderen Worten: Die Laserstrahlen legen im Resonator noch einen Weg von etwa 400 km zurück, bevor das Laserlicht restlos aus dem Ring verschwunden ist. Aufgrund der hohen Resonatorgüte ist zur Anregung und Erhaltung der stationären Laserstrahlung auch nur eine sehr kurze Gasentladungsstrecke innerhalb der Kapillare erforderlich (Abb. 5).

Für die Funktion als hochgenauer Erdrotationsensor muss der Ringlaser noch zwei ganz wesentliche Bedingungen erfüllen: Zum einen dürfen sich die geometrischen Abmessungen des Gerätes während der Messung nicht ändern. Daher besteht die Apparatur aus der Glaskeramik Zerodur von Schott, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient α kleiner als $5 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$ ist, und der gesamte Ringlaser befindet sich in einem temperaturstabilisierten Untergrundlabor und einer druckstabilisierenden Kabine. Zum anderen muss der Sensor starr an die Erde angekoppelt werden, damit sich von einem lokalen Sensor eine globale Messgröße ableiten lässt.

Wogen, Wind und Wobble

Da laut Ringlasergleichung die gemessene Schwebungsfrequenz δf proportional zur Winkelgeschwindigkeit der Erde ist, lassen sich Änderungen der Winkelgeschwindigkeit detektieren, wenn ein Ringlaser über einen längeren Zeitraum betrieben wird. Wir würden natürlich auch Änderungen im Skalenfaktor $4A/\lambda L$ des Instruments feststellen können, wenn Fläche und Umfang nicht ausreichend genau stabilisiert wären. Daneben gibt es aber noch einen dritten Beitrag: Die Schwebungsfrequenz variiert auch, wenn sich die Projektion des Rotationssignals auf den Normalenvektor des Ringes ändert. Für einen solchen Signalbeitrag gibt es mehrere Kandidaten. Die eingangs angesprochenen

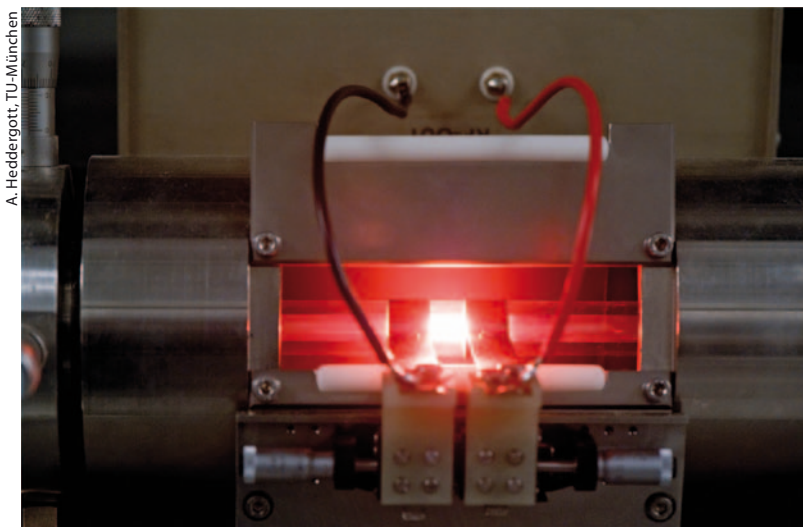


Abb. 5 Die Gasentladungsstrecke für die Erzeugung der Laserstrahlung ist nur drei Zentimeter lang. Dies weist auf eine sehr hohe Resonatorgüte hin.

A. Heddergott, TU-München

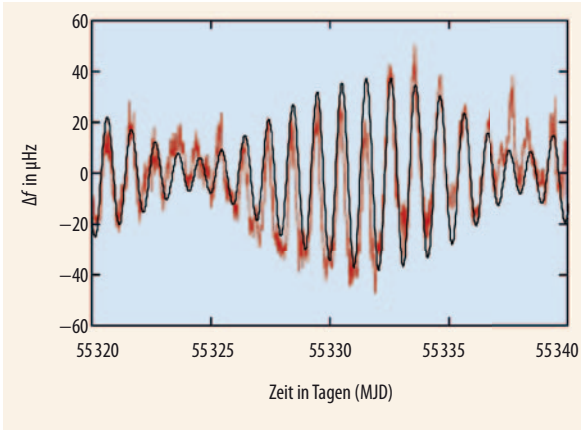


Abb. 6 Die mit dem Ringlaser gemessene Variation der Erdrotation (rot) stimmt gut mit der theoretischen Erwartung (schwarz) überein. Deutlich lassen sich die periodischen Signaturen der täglichen Polbewegung erkennen. Die 14-tägige Schwebung ist durch die Mondbahn verursacht.

Gezeiten der festen Erde gehen nicht nur mit einer Hebung oder Senkung einher, sie verursachen auch noch eine geringe Neigung mit einer Amplitude von maximal 40 Nanoradian (abhängig vom Stand des Mondes), lassen also den Normalenvektor etwas „wackeln“. Die momentane Rotationsachse der Erde schwankt auch, weil die Figurenachse (Geometrie) und die Trägheitsachse aufgrund der leicht unregelmäßigen Gestalt und inhomogenen Massenverteilung der Erde nicht genau aufeinander fallen. Dies führt zu einer Polbewegung, die ebenfalls nicht zu vernachlässigen ist. Vergleicht man die theoretisch zu erwartenden Frequenzvariationen aufgrund der Änderung des Skalarprodukts in der Ringlasergleichung mit den tatsächlichen Messungen, so stimmen beide Kurven generell sehr gut überein (Abb. 6). Im Detail erkennt man jedoch Abweichungen, die sich nicht mit einem begrenzten Auflösungsvermögen der Apparatur erklären lassen. Hier ist die Frage zu klären, ob diese subtilen Einflüsse einen apparativen Ursprung haben, oder ob die Erde (zumindest lokal) noch eine Überraschung bereit hält. Zur Zeit lässt sich diese Frage nicht eindeutig klären, es gibt jedoch einige Hinweise auf eine sehr subtile apparative Ursache.

Da die Umlaufbahn der Erde um die Sonne leicht elliptisch ist, variiert deren Gravitationswirkung im Verlauf eines Jahres. Auch dies führt zu einer Polbewegung, diesmal nicht mit einer täglichen, sondern mit einer jährlichen Periode. Hinzu kommt noch die 1891 von Seth Carlo Chandler entdeckte freie Oszillation des Erdkörpers („Chandler Wobble“) selbst mit einer Periode von etwa 435 Tagen, welche durch Wind und Wellenbewegung auf der Erde angeregt wird. Beide Signale zusammengenommen und um den Beitrag der täglichen Polbewegung reduziert, verursachen eine Wanderung der Pole (Abb. 7). In einem Feld von 12 m × 12 m verläuft die Polposition auf einer nahezu kreisförmigen Bahn, die der Schwebung zwischen Chandler- und jährlichem Signal entspricht. Für den Ringlaser „G“ ist diese Polwanderung an sich leicht aufzulösen [6]. Jedoch setzt dies eine enorme Stabilität der Apparatur voraus, denn die Lage des Pols ändert sich von Tag zu

Tag nur sehr wenig. Die Polbewegung setzt sich aus einer Komponente in Nord-Süd-Richtung und einer in Ost-West-Richtung zusammen. Mit einem Ringlaser in der Nähe vom zehnten Längengrad Ost sehen wir über das Skalarprodukt in der Ringlasergleichung hauptsächlich die Nord-Süd-Komponente (Abb. 7). Damit bewegt sich die Erdrotationsachse über den Zeitraum unserer Messung sozusagen langsam mit einer Geschwindigkeit von etwa 6 cm/Tag auf uns zu, und die Drehrate steigt langsam durch die Vergrößerung der Projektion der Drehachse auf die Ringlasernormale an (Abb. 8). Der Ringlaser liefert alle dreißig Minuten einen Messwert, das Netz der Radioteleskope nur zwei Werte pro Woche. Die offensichtlich systematischen Signaturen und die größere Streuung der Ringlasermessungen zeigen, dass wir das Auflösungsvermögen des VLBI-Netzes noch nicht ganz erreicht haben. Um zu verdeutlichen, wie gering dieser Zahlenwert für einen lokal gemessenen globalen Effekt ist, wurde er in eine Winkeländerung pro Sekunde umgerechnet. Nehmen wir einen Wert von 40 Pikoradian pro Sekunde, also ungefähr den Wert am Anfang der Kurve in Abb. 8, so entspricht dies nach einem Tag Integration einem Winkel von 0,5 Winkelsekunden oder dem 7200sten Teil eines Grads. Dies zeigt, wie groß die Stabilität und das Auflösungsvermögen der Apparatur sein müssen, um diese Ergebnisse liefern zu können. Aufgrund eines Defekts in einem der Regelkreise des Gyroskops konnte die Messreihe nicht fortgeführt werden.

G wie genauer

In den vergangenen Jahren konnte die Ringlasertechnologie den Schritt von der Flugzeugnavigation in die Erdsystemforschung vollziehen. Als einzige Messtechnik der Geodätischen Raumverfahren stellt der große

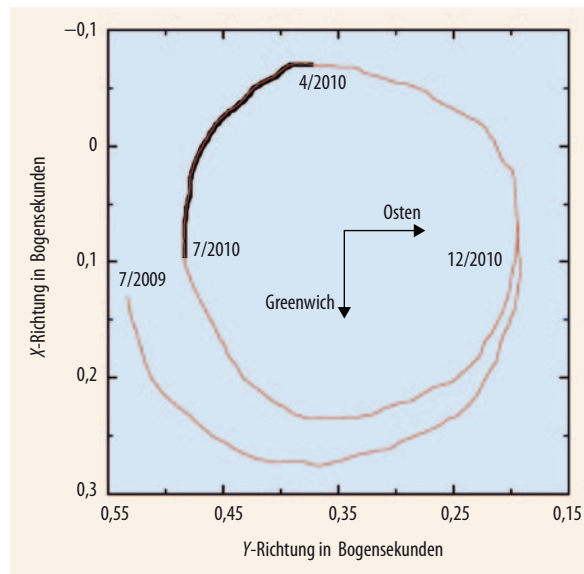


Abb. 7 Aus den Messungen der Radioteleskope lassen sich die Beiträge des Chandler-Wobble und der jährliche Polbewegung rekonstruieren (rot), hier für einen Zeitraum von 1,5 Jahren. Diese Größe lässt sich auch mit dem Ringlaser messen (schwarz). Man beachte die unterschiedlichen Skalen in X- bzw. Y-Richtung.

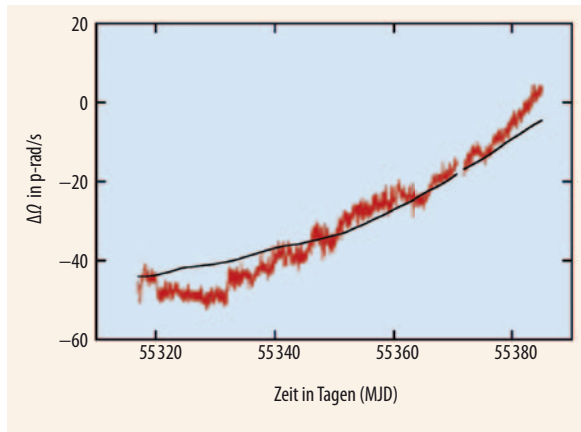


Abb. 8 Mit dem Ringlaser lässt sich lokal die Zunahme der Drehrate, genauer der Nord-Süd-Komponente der Signale von Chandler-Wobble und jährlicher Polbewegung, messen (rot). Zum Vergleich zeigt die schwarze Kurve die mithilfe der Ringlasergleichung aus den globalen VLBI-Messungen berechneten Werte.

Ringlaser „G“ den direkten Bezug zur Erdrotationsachse her. Gleichzeitig kann er die kampagnenorientierten Richtungsmessungen der Radioteleskope verbessern, indem er die Zeiten zwischen den Teleskopeinsätzen überbrückt [7]. Ringlaser sind im Gegensatz zu der VLBI-Technik autonome und kontinuierlich messende Apparaturen. Wie der Vergleich zwischen den Messungen mit VLBI und Ringlaser zeigt (Abb. 8), liegen das Auflösungsvermögen und die Sensorstabilität der Ringlaser noch etwa eine halbe Größenordnung hinter den Ergebnissen der Radioteleskope. Aber wir vergleichen hier einen einzelnen Sensor, der nur eine Komponente des Erdrotationsvektors bestimmt, gegen ein globales Netz von einem Dutzend gemeinsam messenden Radioteleskopen.

Ein besseres Auflösungsvermögen von Ringlasern lässt sich mit Spiegeln erzielen, deren Streuverluste noch geringer sind. Ob da noch eine Verbesserung zu erzielen ist, wird die Zukunft zeigen. Auch eine weitere Vergrößerung der Apparatur kann das Auflösungsvermögen verbessern. Da dies nicht mehr mit einem mechanisch so stabilen monolithischen Aufbau wie beim „G“ möglich ist (es gibt keine Zerodurscheiben ausreichender Größe), ist dafür eine grundsätzliche neue Technologie erforderlich. Dieser Wechsel entspricht dabei in seinem Aufwand dem Übergang von passiv stabilen optischen Teleskopen in der Astronomie zu den aktiv geregelten modernen Großteleskopen. Erste Konzepte hierfür existieren bereits, aber es gibt noch viele Schwierigkeiten auf diesem Wege zu bewältigen. Auch wenn dies in diesem Artikel nicht im Detail diskutiert wurde, gibt es eine Reihe von systematischen Fehlerquellen, welche, da zeitlich variabel, sich vornehmlich auf die Sensorstabilität auswirken. Obwohl die beiden gegenläufigen Laserstrahlen auf exakt dem gleichen Weg verlaufen, gibt es dennoch eine Asymmetrie und auch eine gegenseitige Beeinflussung, obgleich diese Effekte extrem klein sind. Auch hier sind noch Verbesserungen notwendig und möglich. Unsere internationale Arbeitsgruppe arbeitet mit weiteren sehr viel

weniger stabilen Instrumenten an möglichen Verbesserungen, zurzeit ist „G“ mit den hier vorgestellten Leistungsmerkmalen noch einmalig. Andere hochstabile Ringlaser wären aber allein schon deswegen notwendig, damit sich durch einen Vergleich etwaige lokale Rotationseffekte von regionalen bzw. globalen Effekten unterscheiden lassen.

Obwohl für die breite Öffentlichkeit nahezu unsichtbar, liefert die hochpräzise Vermessung der Erdrotation das entscheidende Bindeglied zwischen dem mitrotierenden terrestrischen und dem himmelfesten Bezugssystem der Satelliten. Ohne eine genaue Kenntnis von Lage und Winkelgeschwindigkeit der Erde wären viele Möglichkeiten, welche die satellitengestützte Navigation heute bietet, nicht vorstellbar. Der Gedanke, auf der Erde einen fest angeordneten Sensor zu installieren, welcher, genau wie die entsprechende inertielle Messeinheit in den Flugzeugen, die „Kursänderungen“ der Erde mit ausreichender Genauigkeit mitbekommt, ist bestechend. Bislang erreichen die Ringlaser noch nicht das erforderliche Auflösungsvermögen. Sie haben sich aber bereits bis auf eine halbe Größenordnung an die hohen Anforderungen herangetastet, und im Moment ist nichts in Sicht, was weitere Verbesserungen verhindern würde.

Literatur

- [1] International Earth Rotation and Reference System Service: www.iers.org/MainDisp.csl?pid=163-253
- [2] G. Sagnac, Comptes Rendus, Acad. Sci. (Paris) **157**, 708 (1913)
- [3] A. A. Michelson, und H. G. Gale, Astrophys. J. **61**, 2 (1925)
- [4] K. U. Schreiber, T. Klügel, A. Velikoseltsev, W. Schlüter, G. Stedman und J. Wells, Pure and Applied Geophysics **166**, 1485, (2009)
- [5] U. Schreiber, Physik in unserer Zeit **37**, 134 (2006)
- [6] K. U. Schreiber, T. Klügel, J.-P. R. Wells, R. B. Hurst und A. Gebauer, Phys. Rev. Lett. **107**, 173904 (2011)
- [7] T. Nilsson, J. Böhm, H. Schuh, U. Schreiber, A. Gebauer und T. Klügel, J. Geodyn. **62**, 69 (2012)

DER AUTOR

Ulrich Schreiber hat 1988 in Göttingen auf dem Gebiet der Ultraschallabsorptionsspektroskopie promoviert. Danach wechselte er an die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München, wo er 1999 über die Anwendung der Sagnac-Interferometrie auf dem Gebiet der Geodätischen Raumverfahren habilitierte. Sein Aufgabengebiet umfasst die Erschließung neuer Messmethoden und Verfahren in den Geodätischen Raumverfahren. Neben der lasergestützten Entfernungsmessung zu Satelliten und zum Mond stehen auch moderne optische Verfahren der Zeitsynchronisation und Zeitübertragung im Mittelpunkt seines Interesses. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Entwicklung und Nutzung großer Ringlaser für die Geophysik. Neben der Erdrotationsforschung ist hier auch die Anwendung dieser Interferometer in der Rotationsseismologie von großer Bedeutung.

