

# Großringlaser zur kontinuierlichen Beobachtung der Erdrotation

Thomas Klügel, Wolfgang Schlüter, Ulrich Schreiber und Manfred Schneider

## Zusammenfassung

Erdrotationsparameter werden heute routinemäßig mit den geodätischen Raumverfahren VLBI, SLR, GPS und DORIS bestimmt. Von externen Referenzsystemen unabhängige Gyroskope zur absoluten Bestimmung des Rotationsvektors sind seit vielen Jahren in der Diskussion. Die Realisierung solcher lokaler Rotationssensoren, die in der Lage sind, Variationen der Erddrehung zu erfassen, ist extrem schwierig und erforderte die Entwicklung sehr großer Ringlaser. Im Rahmen der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FGS) entwickelten das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München in enger Zusammenarbeit mit der University of Canterbury, Christchurch (Neuseeland) einen solchen Großringlaser (G) als weltweit ersten Rotationssensor für die Beobachtung der Erdrotation, insbesondere der Variationen im subtäglichen Zeitbereich. G hat eine Größe von  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  und wird in einem unterirdischen Labor auf der Fundamentalstation Wettzell unter stabilen Umweltbedingungen betrieben. In diesem Aufsatz werden die technische Realisierung des G und seines unterirdischen Labors beschrieben und Messdaten vorgestellt.

## Summary

*Today Earth Rotation Parameters are derived from space techniques such as VLBI, SLR, GPS and DORIS. The potential of gyroscopes for the absolute determination of the rotation vector independent of a reference system has been proposed for many years. The realisation of such a local rotation sensor, which is sensitive enough and capable to even measure variations of Earth rotation is extremely difficult and required the development of very large ring lasers. On behalf of the Research Group Satellite Geodesy (FGS) the Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) and the Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) of the Technical University Munich in close cooperation with the University of Canterbury, Christchurch (New Zealand), developed such a ring laser dubbed G, which is the first rotation sensor for monitoring Earth rotation, in particular the variations on a subdaily time scale. G has a size of  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  and operates in an underground installation at the Fundamentalstation Wettzell under controlled environmental conditions in order to minimize local disturbances. This paper describes the technical layout of G and its underground laboratory and presents data from the ring laser operation.*

## 1 Einleitung

Die Drehbewegung der Erde spielt eine zentrale Rolle bei der Realisierung und Laufendhaltung globaler Referenz-

systeme. Geodätische Raumverfahren wie VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), GPS (Global Positioning System) und DORIS (Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite) liefern diese Informationen heutzutage mit einer Genauigkeit, die noch vor wenigen Jahrzehnten undenkbar waren: 0,01 Millisekunden in der Tageslänge und 0,1 Millibogensekunden in den Polkoordinaten, was etwa 3 mm an der Erdoberfläche entspricht. Die Raumverfahren setzen globale Beobachtungsnetze und Organisationsstrukturen für den Datenfluss, die Datenanalyse und die Ergebnisbereitstellung voraus, wie sie durch die internationalen Dienste der IAG (International Association of Geodesy) realisiert werden.

Obgleich die Beobachtungsobjekte der »Very Long Baseline Interferometry«, Radiosterne oder Quasare, die für den irdischen Beobachter die unbeweglichsten Objekte darstellen und daher für die Realisierung eines himmelfesten Referenzsystems gut geeignet sind, handelt es sich doch bei der Herleitung der Erdrotation um eine relative Beobachtung, die durch den »Blick nach draußen« realisiert wird. Demgegenüber erfassen inertiale Rotationssensoren die absolute Rotation eines Körpers, ohne auf als fix angenommene Referenzpunkte angewiesen zu sein. Im Bereich der klassischen Mechanik kann die Dynamik der Rotation z. B. durch Beobachtung der Corioliskraft erfolgen. Jedoch sind die zur Verfügung stehenden Instrumente wie das Foucault-Pendel oder mechanische Kreisel bei weitem nicht in der Lage, Erdrotationsschwankungen, die sich in der Größenordnung  $10^{-7}\text{ °/h}$  abspielen, zu erfassen (z. B. Schmidt 2004). Die Detektion von Änderungen der Zentrifugalkraft ist mit modernen supraleitenden Gravimetern zwar möglich, der Störsignalpegel z. B. durch atmosphärische oder hydrologische Massenumlagerungen ist jedoch hoch im Vergleich zum Messsignal, und z. B. die täglichen Polbewegungen werden durch die frequenzgleichen und wesentlich stärkeren Erdgezeiten überdeckt. Bei den optischen Verfahren wird der Sagnac-Effekt zur absoluten Rotationsmessung ausgenutzt, d. h. dem der Rotation proportionalen Frequenzunterschied zweier in einer aktiven ringförmigen Anordnung gegenläufiger Laserstrahlen. Durch die kleine Wellenlänge des Laserlichts wird hierbei eine sehr hohe Messauflösung erreicht. Die hierzu zählenden Ringlaser-Kreisel und Faserkreisel sind von ihrer Konstruktion her relativ einfach und werden seit vielen Jahren für Navigationszwecke erfolgreich eingesetzt. Eine theoretisch noch höhere Auflösung lässt sich mit Instrumenten aus dem Bereich der Quantenphysik wie dem Heliumkreisel oder dem Atominterferometer erzielen, da die

de-Broglie-Wellenlänge von Materiewellen wie z. B. dem Helium weitaus kleiner ist als die Wellenlänge der Photonen bei den optischen Verfahren. Damit sind im Labor hochauflösende Rotationsmessungen gelungen (Gustavsson et al. 1997, Lenef et al. 1997), jedoch sind die technischen Probleme dieser Verfahren für eine Nutzung als Erdrotationssensor bislang ungelöst.

Unter den inertialen Rotationssensoren haben derzeit nur Laserkreisel das Potenzial, eine den geodätischen Raumverfahren vergleichbare Auflösung und Stabilität tatsächlich zu erreichen. Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie, namentlich das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und die Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG), entwickelte deshalb in Zusammenarbeit mit der University of Canterbury (Neuseeland) den Großringlaser G als weltweit ersten inertialen Rotationssensor für die Beobachtung der Erdrotation.

Ziele, die mit dem Großringlaser primär verfolgt werden, sind

- die Erfassung von Änderungen in der Drehgeschwindigkeit der Erde mit einer Genauigkeit von  $10^{-9}$  bezüglich der Tageslänge,
- die Erfassung der Polbewegung der momentanen Rotationsachse mit einer Genauigkeit von wenigen cm,
- Echtzeitfassung vor Ort mit einer zeitlichen Auflösung von unter 1 Stunde.

Bedingt durch die hohe Sensitivität auf lokale Einflüsse wie Temperaturschwankungen und Orientierungsänderungen wird der Ringlaser bis auf weiteres eine den geodätischen Raumverfahren vergleichbare Langzeitstabilität nicht erreichen und daher die Ergebnisse der Raumverfahren als Stützwerte benötigen. Der zunehmend interessante Kurzzeitbereich von wenigen Stunden bis Tagen wird durch die Raumverfahren allerdings nur unzureichend abgedeckt. Die Lücken in diesem Zeitbereich können durch den Großringlaser in idealer Weise ergänzt werden. Insgesamt ergeben sich folgende Vorteile:

- Sensor repräsentiert inertiales Bezugssystem (lokales Fermi-System),
- kein globales Netz erforderlich,
- direkter Zugriff auf Daten in Echtzeit,
- hohe Zeitauflösung (Erfassung subtäglicher Variationen),
- offen für weiterführende Anwendungen (Rotationsseismogramme, Eigenschwingungen der Erde, Relativistik).

Dem stehen als Nachteile gegenüber:

- hohe Empfindlichkeit auf lokale Einflüsse (Temperatur, Orientierung),
- Beobachtung zahlreicher Zusatzparameter erforderlich,
- absolute Orientierung nicht genau bekannt,
- systematische Effekte noch nicht genau bekannt.

## 2 Entwicklungsgeschichte

Nachdem Mitte der 80er-Jahre der Einsatz großer Ringlaser für die Messung von Erdrotationsschwankungen für möglich gehalten wurde (z. B. Rotgé et al. 1986) und eine Pilotstudie am Max-Planck-Institut für Quantenoptik einem solchen Projekt durchaus gute Realisierungschancen einräumte (Höling 1990), wurde die Entwicklung eines Großringlasers als Erdrotationssensor in das Forschungsprogramm 1990–1995 der Forschungsgruppe Satellitengeodäsie mit aufgenommen. Zu dieser Zeit wurde an der University of Canterbury in Christchurch (Neuseeland) mit dem dort entwickelten Ringlaser C-I nachgewiesen, dass es technologisch möglich ist, die Erdrehung zu erfassen (Stedman et al. 1993).

In enger Zusammenarbeit mit den oben genannten Institutionen und auf den Erfahrungen des C-I aufbauend wurde ein weiterer Ringlaser für den Einsatz als Erdrotationssensor entwickelt und bei der Fa. Zeiss in Oberkochen gebaut. Dieser ebenfalls quadratische Ringlaser hat eine Kantenlänge von 1 m und ist mit C-II bezeichnet. Er dient dabei als ein Prototyp, an dem die notwendige Technologie entwickelt und erprobt werden sollte, um die Spezifikationen für einen Großring abzuleiten. Der C-II wurde in der unterirdischen Höhle, in der der C-I bereits installiert war, eingebracht und ist seit Januar 1997 in Betrieb. Durch seine monolithische Bauweise, die Verwendung des äußerst formstabilen Materials Zerodur und die optische Ansprengtechnik ist eine bis dahin unerreichte Stabilität erlangt worden. Es war klar, dass der C-II aufgrund seiner Größe keine Variationen der Erdrotation erfassen kann. Die Konstruktion und die Eigenschaften des Ringlasers C-II sind in Schreiber (2000) ausführlich beschrieben.

Da sich mit zunehmender Größe der Frequenzabstand zweier benachbarter Longitudinalmoden verringert, war zur damaligen Zeit nicht klar, ob ein Ringlaser der Größe  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  sich überhaupt auf einer Mode betreiben lässt, was für ein Sagnac-Interferometer unbedingt erforderlich ist. Deshalb wurde im Jahr 1997 mit relativ einfachen Mitteln ein weiterer Prototyp G-0 gebaut, der im Wesentlichen die technische Funktionsfähigkeit eines Ringlasers dieser Größe zeigen sollte (Rowe et al. 1999, Schreiber 2000). Dieses Experiment brachte den Nachweis, dass ein Ringlaser von der Größe des G-0 noch auf einer Lasermode pro Umlaufsinn zu betreiben und ein Sagnac-Signal zu erhalten ist. Damit war die Sicherheit gewonnen worden, dass einer Vergrößerung auf  $16 \text{ m}^2$  keine technischen und physikalischen Hindernisse entgegenstehen.

Am 25. September 1998 wurde schließlich der Auftrag zum Bau des Großrings an die Fa. Carl Zeiss erteilt. Die erste Inbetriebnahme (»first light«) erfolgte im Juni 2001, am 5. Oktober 2001 wurde der Großringlaser offiziell eingeweiht.

### 3 Funktionsprinzip

Ein Ringlaser ist ein Drehgeschwindigkeitssensor, der unter Ausnutzung des Sagnac-Effektes Rotationen absolut erfassen kann. Er besteht aus mindestens drei Spiegeln in einer Ebene, zwischen denen ein Lichtstrahl auf einem geschlossenen Pfad eine Fläche umschreibt (Abb. 1). Im Gegensatz zu einem passiven Sagnac-Interferometer wie z. B. dem Faserkreisel wird das Laserlicht nicht von einer externen Quelle eingekoppelt, sondern es handelt sich um einen geschlossenen Resonatorring mit Helium und Neon als Verstärkungsmedium (aktives Sagnac-Interferometer). Aufgrund der Ringgeometrie ergeben sich zwei gegenläufige Ausbreitungsrichtungen für die entstehende Laserstrahlung. In einem sich drehenden Sensor lässt sich ein in Rotationsrichtung und ein gegen die Rotationsrichtung umlaufender Strahl unterscheiden. Ein mit dem Instrument rotierender Beobachter sieht einen Frequenzunterschied zwischen beiden Strahlen, vergleichbar der Doppler-Frequenzverschiebung bewegter Objekte. Beide Strahlen werden an einem Strahlteiler-Prisma zur Interferenz gebracht und die resultierende Schwebungsfrequenz, die dem Frequenzunterschied beider Strahlen entspricht, an einem Detektor in ein elektrisches Signal umgewandelt. Diese Schwebungsfrequenz, nach George Sagnac Sagnac-Frequenz genannt (Sagnac 1913), beträgt:

$$\Delta f = \frac{4A}{\lambda P} \vec{n} \cdot \vec{\Omega} \quad (1)$$

- $\vec{\Omega}$  Winkelgeschwindigkeit,
- $\vec{n}$  Normalenvektor zu  $A$ ,
- $A$  vom Laserstrahl umlaufene Fläche,
- $P$  Umfang (Weglänge des Laserstrahls),
- $\lambda$  Wellenlänge des Laserlichts.

Erfährt ein auf der Erde aufgestellter und fest angekoppelter Ringlaser keine weiteren Rotationsanregungen, so zeigt er über die Sagnac-Frequenz  $\Delta f$  die Rotation der Erde an bzw. den Anteil, der sich aus der Projektion des Rotationsvektors auf die Ringlasernormale ergibt. Liegt die Ringlasernormale parallel zur Rotationsachse, wird die volle Drehgeschwindigkeit gemessen, liegt sie senkrecht dazu, wird Null gemessen.

### 4 Einflüsse auf das Ringlasersignal

#### 4.1 Rotationen

Als inertialer Rotationssensor ist ein Ringlaser empfindlich auf jede Art von Rotation mit einer Komponente normal zur Ringlaserebene, unabhängig von deren Ur-

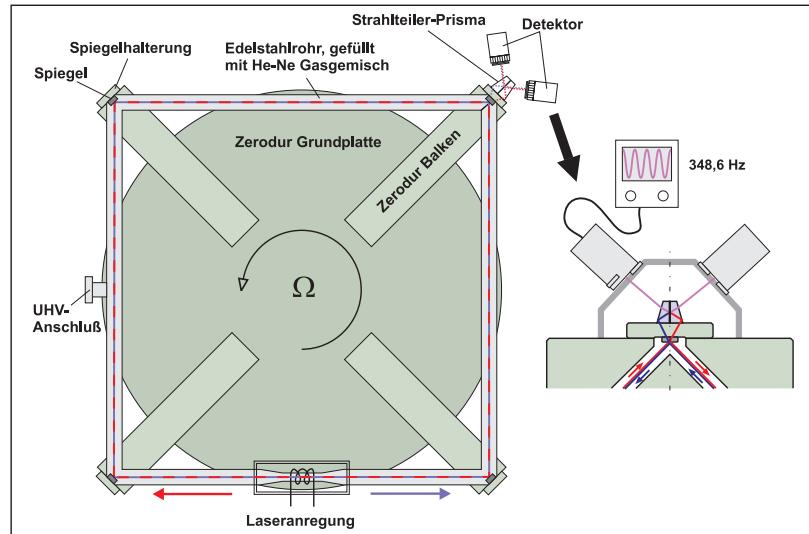


Abb. 1: Grundsätzlicher Aufbau eines Ringlasers am Beispiel des G. Rechts das Strahlteiler-Prisma im Detail

sache und Dimension. Die Erddrehung  $\Omega_E$  wird bei horizontaler Aufstellung mit einem Anteil von  $\sin\phi$  erfasst, mit  $\phi$  als geographischer Breite. Am Aufstellungsort Wettzell entspricht das etwa 75 % der Drehrate. Beim G resultiert daraus eine Sagnac-Frequenz von ca. 348,6 Hz. Um beispielsweise halbtägliche bis tägliche Variationen der Drehrate, die im Bereich unter 0,1 ms/Tag liegen, erfassen zu können, muss das Auflösungsvermögen und die Stabilität über mehrere Tage weniger als  $10^{-9} \Omega_E$  bzw.  $0,35 \mu\text{Hz}$  in der Sagnac-Frequenz betragen. Die Bewegung der momentanen Rotationsachse relativ zum Erdkörper macht sich als Orientierungseffekt bemerkbar (s. 4.2) und beträgt in unseren Breiten für den Chandler-Wobble bis zu  $2 \cdot 10^{-6} \Omega_E$  bzw.  $700 \mu\text{Hz}$  in der Sagnac-Frequenz und für die tägliche Polbewegung bis zu  $1,5 \cdot 10^{-7} \Omega_E$  bzw.  $50 \mu\text{Hz}$ .

Die Gezeiten der festen Erde weisen an der Oberfläche einer kugelförmigen Erde ein wirbelfreies Verschiebungsfeld auf (Rautenberg et al. 1997), sodass ein horizontal aufgestellter Ringlaser dadurch keine Rotationsanteile erfährt. Durch die Abplattung der Erde ergeben sich jedoch kleine gezeitenbedingte Rotationsanteile in der Größenordnung um  $10^{-9} \Omega_E$  (Riepl 1998). Der weitaus größere Einfluss der Erdgezeiten erfolgt durch die Neigung der Erdoberfläche (s. 4.2).

Zusätzlich wird die Erdrotation durch lokale und regionale Rotationsanteile überlagert. Lokale Rotationsanteile entstehen beispielsweise durch seismische Scherwellen, Meeresmikroseismik, oder seismisches Hintergrundrauschen, das z. B. durch Wind verursacht wird. Diese relativ hochfrequenten Rotationsanteile lassen sich durch Filterung entfernen bzw. werden durch die langen Integrationszeiten nicht erfasst. Regionale Deformationen, beispielsweise durch atmosphärische oder ozeanische Auflast, können nicht-wirbelfreie Verschiebungsfelder an der Erdoberfläche erzeugen und zu Rotationen um die vertikale Achse führen. Allerdings ist dieser Effekt erheblich kleiner als der durch Orientierungsänderungen

zu erwartende Beitrag, er kann durch Inhomogenitäten in der Erdkruste lokal aber deutlich größer werden. Für eine homogene Kruste gibt Riepl (1998) den Rotationsanteil der ozeanischen Gezeitenauflast am Standort Wettzell mit  $0,6 \cdot 10^{-9} \Omega_E$  an.

## 4.2 Orientierung

Gemäß der Sagnac-Gleichung verändert eine Winkeländerung zwischen dem Normalenvektor der Ringlaser-ebene  $\mathbf{n}$  und der Erdrotationsachse  $\Omega$  das Skalarprodukt  $\mathbf{n} \cdot \Omega$  und somit die gemessene Sagnac-Frequenz  $\Delta f$ . Neigungen in Nord-Süd-Richtung verändern unmittelbar den Winkel  $\varphi$  zur Erdrotationsachse, während Neigungen in Ost-West-Richtung nur über den Cosinus des Winkels  $\delta_E$  den effektiv wirksamen Rotationsvektor verändern (Abb. 2). Beispielsweise verursacht eine Neigung von  $1 \mu\text{rad}$  ( $0,2$  Bogensekunden) in Ost-West-Richtung in mittleren Breiten und bei horizontaler Aufstellung des Ringlaser eine relative Änderung der Sagnac-Frequenz von nur etwa  $5 \cdot 10^{-13}$  und ist daher vernachlässigbar. Eine Neigungsänderung von  $1 \mu\text{rad}$  in Nord-Süd-Richtung erzeugt dagegen eine relative Änderung der Sagnac-Frequenz von etwa  $1 \cdot 10^{-6}$ . Neigungen dieser Größenordnung können z. B. lokal durch thermoelastische oder hydrologisch induzierte Verformungen des Untergrundes verursacht werden. In der Bodenzone muss z. B. in einer Tiefe von  $6 \text{ m}$  mit Neigungssignalen von mehreren  $\mu\text{rad}$  innerhalb weniger Tage und Jahresamplituden von mehreren Zehner  $\mu\text{rad}$  gerechnet werden (Klügel 2001). Selbst das in  $30 \text{ m}$  Tiefe installierte Askania-Pendel zeigt noch Neigungssignale von mehreren hundert Nanoradian, die mit hydrologischen Effekten zusammenhängen.

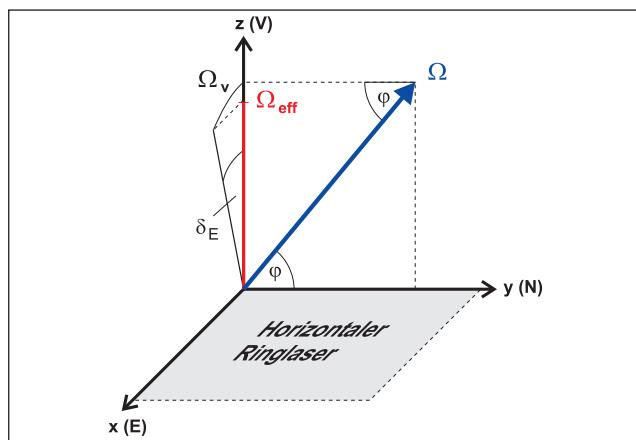


Abb. 2: Einfluss von Orientierungsänderungen auf einen horizontal aufgestellten Ringlaser. Neigungen in Nord-Süd-Richtung  $\delta_N$  verändern unmittelbar den Winkel  $\varphi$  zur Erdrotationsachse, während Neigungen in Ost-West-Richtung nur über den Cosinus des Winkels  $\delta_E$  den effektiv wirksamen Rotationsvektor  $\Omega_{\text{eff}}$  verändern. Das Skalarprodukt zwischen der Ringlaserfläche  $A$  und dem Rotationsvektor  $\Omega$  ergibt sich somit zu:  $A \cdot \Omega = |A| \cdot |\Omega| \cdot \sin(\varphi + \delta_N) \cdot \cos(\delta_E)$

In der gleichen Weise wirken die Gezeiten der festen Erde auf das Ringlasersignal. Dabei ist zu beachten, dass der Ringlaser nur auf den geometrischen Anteil der Gezeitenneigung sensiv ist, während Neigungsmesser zusätzlich den Attraktionsanteil registrieren. Die halbtägigen Doppelamplituden des geometrischen Anteils der Gezeitenneigung betragen in Wettzell etwa  $20\text{--}60 \text{ nrad}$  (Nord-Süd-Richtung) und sollten sich mit bis zu  $6 \cdot 10^{-8} \Omega_E$  bzw.  $20 \mu\text{Hz}$  bemerkbar machen. Der Auflasteffekt der ozeanischen Gezeiten beträgt in Wettzell etwa  $5\%$  der Erdgezeiten und sollte daher im Ringlasersignal max.  $3 \cdot 10^{-9} \Omega_E$  bzw.  $1 \mu\text{Hz}$  ausmachen. Am Standort des C-II in Christchurch verursacht die Auflast des nur  $5 \text{ km}$  entfernten Ozeans Gezeitenneigungen bis zu  $400 \text{ nrad}$ . Im Spektrum des C-II findet sich tatsächlich die halbtägige Haupttide des Mondes mit ihrer typischen Periode von  $12,43 \text{ h}$  (Schreiber et al. 2003).

Die variierende Auflast der Atmosphäre durch den Wechsel von Hoch- und Tiefdruck verursacht ebenfalls Neigungen an der Erdoberfläche in für den Ringlaser relevanter Größenordnung. Mit einem analytischen Auflastmodell berechnen Rabbel & Zschau (1985) Neigungsvariationen von  $\pm 15 \text{ nrad}$  für mittlere und bis zu  $\pm 50 \text{ nrad}$  für extreme atmosphärische Druckschwankungen. In der gleichen Größenordnung liegen auch die mit hochauflösenden Neigungsmessern beobachteten, maximalen Luftdruckeffekte, und zwar zwischen  $50$  und  $100 \text{ nrad}$  (z. B. Herbst 1976, Weise 1992, Klügel 2001). Dagegen sind die zusätzlich auf die Neigungsmesser wirkenden Attraktionseffekte der Luftmassen, die mit einem auf dem Lokalmodell des Deutschen Wetterdienstes aufbauenden, numerischen Attraktionsmodell berechnet wurden, mit unter  $10 \text{ nrad}$  etwa eine Größenordnung kleiner (Klügel 2003).

Letztlich ist die Ursache der Orientierungsänderungen von untergeordneter Bedeutung, da die Orientierung des G relativ zum Lot mit einem Array von sechs hochauflösenden Neigungsmessern aufgezeichnet wird. Dabei ist es erforderlich, die Gezeitenattraktion, die die Lotrichtung verändert, aus den Zeitreihen der Neigungsmesser zu entfernen. Jedoch muss hierbei nicht nur das Attraktionspotenzial der gezeiterzeugenden Körper  $V_t$ , sondern auch die Potenzialänderung durch die verschobenen Massen der gezeitedeformierten Erde berücksichtigt werden. Dies geschieht durch die Love-Zahl  $k$ , die das Verhältnis des zusätzlichen Deformationspotenzials  $V_d$  zum gezeiterzeugenden Potenzial  $V_t$  wiedergibt:

$$V_d = k V_t. \quad (2)$$

Das gesamte Attraktionspotenzial  $V_{at}$  ergibt sich somit zu:

$$V_{at} = V_t + V_d = V_t + k V_t = (1 + k) V_t. \quad (3)$$

Dieser Ausdruck wird für die Attraktionskorrektur der Tiltmeter-Zeitreihen verwendet mit  $k = k_2 = 0,3$ . Demgegenüber wird der rein geometrische Anteil der Gezeitenneigungen  $V_g$  durch die Love-Zahl  $h$  beschrieben:

$$V_g = -h V_t. \quad (4)$$

Das negative Vorzeichen zeigt, dass der geometrische Anteil und der Attraktionsanteil der Gezeitenneigungen entgegenwirken.

In Zukunft kann es erforderlich werden, auch den Attraktionseffekt der Luftmassen auf die Neigungsmesser zu berücksichtigen, der beim derzeitigen Auflösungsvermögen des G noch unerheblich ist.

### 4.3 Geometrie

Gemäß der Sagnac-Gleichung (1) hängt der Skalenfaktor neben dem Betrag und der Orientierung des Rotationsvektors auch von der umlaufenden Fläche  $A$ , dem Umfang  $P$  und der Wellenlänge  $\lambda$  des Laserstrahls ab. In einem geschlossenen Ringresonator ist die Wellenlänge eine Funktion des Umfanges:

$$\lambda = \frac{P}{I} \quad (5)$$

mit  $I$  als dem Index der Longitudinalmode, sodass die Sagnac-Gleichung (1) wie folgt geschrieben werden kann:

$$\Delta f = \frac{4IA}{P^2} \vec{n} \cdot \vec{\Omega}. \quad (6)$$

Für einen quadratischen Ring und unter der Annahme, dass die Änderungen der Fläche und des Umfanges einander entsprechen (d. h. keine geometrische Verzerrung des Ringes auftreten), ergibt sich keine Veränderung des Skalenfaktors, wenn die Größe des Ringes sich geringfügig ändert (Schreiber et al. 2004a). Die Flächenänderung wird durch die gleichzeitige Änderung des Umfanges und der Wellenlänge kompensiert. Erreicht die Umfangänderung die Größenordnung einer Wellenlänge, kommt es jedoch zu einem Modensprung (Änderung des Longitudinalmoden-Index), der mit einer vorübergehenden Instabilität des Lasersignals verbunden ist. Da sich durch einen Modensprung die relative Lage der Laserfrequenz bezüglich des Zentrums der Verstärkungskurve ändert, wirken auf die beiden gegenläufigen Umlaufsinne des Ringlasers systematische Einflüsse auf die Laserfrequenz aufgrund von Dispersion unterschiedlich stark (Stedman 1997), was sich unmittelbar in der Sagnac-Frequenz niederschlägt.

### 4.4 Einrasteffekt

Unter dem Einrasteffekt versteht man das Verschwinden der Sagnac-Frequenz durch Synchronisation, wenn die Rotationsgeschwindigkeit und damit der Frequenzunterschied der beiden gegenläufigen Strahlen unter eine Schwelle absinkt. Diese

Einrastschwelle ist durch den Grad der Kopplung der beiden gegenläufigen Laserstrahlen gegeben, der sich durch die Rückstreuung von Licht aus einem Umlaufsinn des Ringlasers in den jeweils anderen ergibt und ist durch die Konstruktion des Ringlasers sowie dessen Spiegelqualität abhängig (Aronowitz 1971). Im Falle des G-Ringlasers ist diese Einrastschwelle weit unterhalb des durch die Erdrotation auf dem Observatorium Wettzell erzeugten Sagnac-Signals.

## 5 Technische Realisierung

### 5.1 Großring G

Der Großring G besteht wie auch der Prototyp C-II aus der Glaskeramik Zerodur und hat einen Umfang von 16 m und eine effektive Umlauffläche von 16 m<sup>2</sup>. Bei der in Abb. 3 dargestellten Konstruktion sind vier Zerodurbalken in kreuzförmiger Anordnung auf eine Grundplatte aus Zerodur montiert. Der thermische Ausdehnungskoeffizient beträgt  $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  für die Grundplatte und  $-1,7 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  für die Balken, sodass sich in der Summe ein extrem kleiner Wert von unter  $1 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  ergibt. An den äußeren Stirnseiten der Balken sind die Spiegelträger mit den Umlenkspiegeln optisch angesprengt. Durch die Technik der optischen Ansprengung wird ein Vakuum siegel durch molekulare Adhäsion geschaffen, das ohne ausgasende Stoffe wie Klebstoffe oder Dichtungsringe auskommt und dauerhaft stabil ist. Alle Verbindungen müssen ultrahochvakuumtauglich, d. h. auch bei  $10^{-5} \text{ Pa}$  gegenüber der Außenluft noch dicht sein. Die Spiegel sind von höchster Güte und dürfen nur minimale Totalverluste (Streuung, Absorption und Transmission) von wenigen ppm (parts per million) aufweisen, um die gegenseitige Beeinflussung der beiden Umlaufsinne durch Rückstreuung so weit wie möglich zu vermeiden. Um einen stabilen Laseroszillator zu erhalten, werden vier Hohlspiegel mit einem Krümmungsradius von 4 m verwendet. Der G verfügt über keine Justiermöglichkeit für

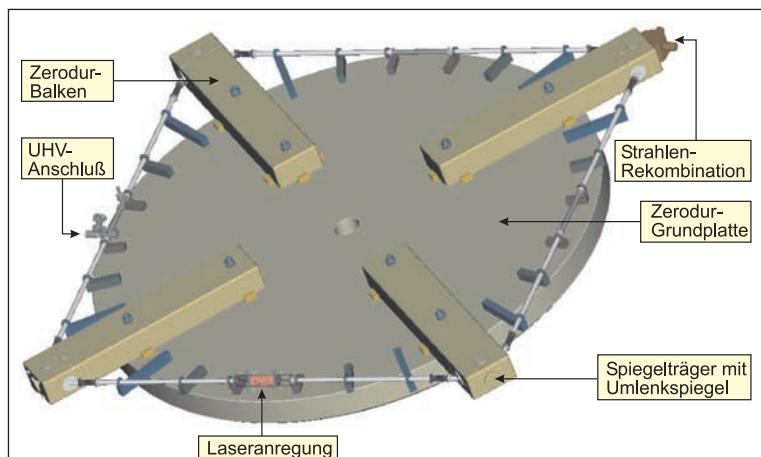


Abb. 3: Konstruktionsskizze des G

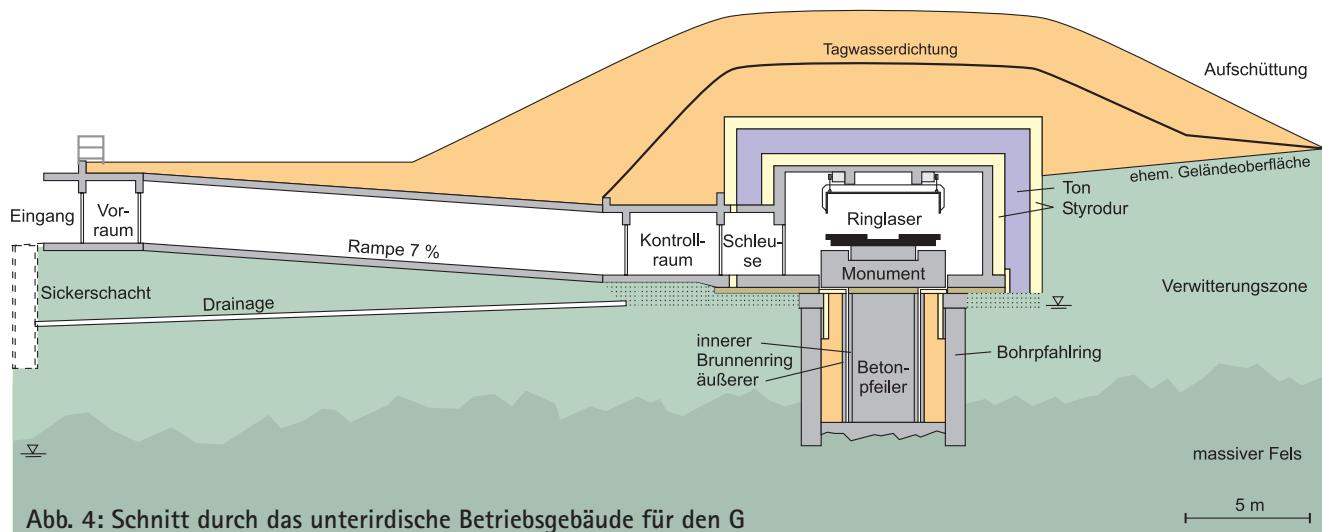


Abb. 4: Schnitt durch das unterirdische Betriebsgebäude für den G

den Strahlengang. Nach einer präzisen Vermessung des Systems werden die Spiegelträger in solcher Weise angeschliffen, dass nach An sprengung von Spiegeln und Spiegelträgern das System justiert ist. Eine Zentrierung der Anregungskapillare um den Laserstrahl herum kann extern vorgenommen werden. Das Lasermedium, ein He/Ne-Gasgemisch mit einem Druck von wenigen hPa, wird in einer Kapillare aus Pyrexglas durch ein elektromagnetisches Wechselfeld angeregt. Der Arbeitspunkt knapp oberhalb der Laserschwelle wird durch eine rückgekoppelte Regelschaltung konstant gehalten. Mit Mikrometerschrauben kann die Anregungskapillare justiert werden. Zur Detektion werden die beiden Laserstrahlen an einem der Spiegel ausgekoppelt, in einem Kösters-Prisma umgelenkt und an einer Strahlteilerschicht zur Interferenz gebracht. Die beiden entstehenden Mischsignale werden nach einer Spektralfilterung einem Photomultiplier bzw. einer Photodiode zugeführt und dort als Sagnac-Signal registriert. Die durch die Erdrotation bedingte Frequenz von ca. 348,6 Hz muss mit einer Auflösung von wenigen  $\mu$ Hz gemessen werden. Hierfür werden zwei Verfahren eingesetzt. Zum einen wird das Signal durch einen Analog/Digital-Wandler mit 1000 Hz abgetastet und mithilfe eines Autoregressionsverfahrens einer Sinusschwingung angepasst. Das zweite Verfahren wird durch einen für diesen Zweck gebauten, über 30 Minuten integrierenden Periodenzähler realisiert. Für eine höherfrequente, aber ungenauere Frequenzmessung stehen noch ein schnell integrierender Frequenzzähler sowie ein Demodulator, der Frequenzänderungen in Spannungen umwandelt, zur Verfügung.

## 5.2 Monumentierung

Der G ist auf einem massiven, glatt polierten und exakt horizontierten Granitisch abgelegt, der seinerseits in ein Betonmonument eingelassen ist. Das Monument befindet sich auf einem Betonpfeiler, der ca. 10 m unterhalb der

ehemaligen Geländeoberfläche auf massivem Fels ge gründet und durch ein System von Betonringen vor oberflächennahen Bodenbewegungen entkoppelt ist. Durch diese Ankopplung in größerer Tiefe wird die höhere thermische und mechanische Stabilität in diesem Bereich genutzt. In einem unterirdischen Betriebsraum wird der G vor äußeren Einflüssen geschützt. Die erforderliche thermische Stabilität wird durch eine 2 m dicke Isolations schicht aus Styrodur und Ton und einer 4 m hohen Auf schüttung erreicht. Eine Tagwasserdichtung in der Auf schüttung verhindert, dass durch Sickerwasser größere Wärmemengen nach unten transferiert werden. Durch einen langen Zugangstunnel mit insgesamt fünf Kühl raumtüren und einer Schleuse sowie einem vom eigentlichen Labor getrennten Datenerfassungsraum werden Störungen des thermischen Gleichgewichtes minimiert.

## 6 Auflösungsvermögen und Stabilität

Der Skalenfaktor eines Ringlasers und somit seine Empfindlichkeit nimmt gemäß der Sagnac-Gleichung (1) mit wachsender Größe zu. Auf der anderen Seite ist das Auflösungsvermögen durch das Schrotrauschen physikalisch begrenzt. Die Höhe des Schrotrauschen lässt sich mit der Kenntnis der Resonatorgüte und der zirkulierenden Licht leistung theoretisch herleiten (Schreiber 2000) und beträgt für den G etwa  $9 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1} \text{ Hz}^{-0.5}$  (vgl. Tab. 1). Da es sich um weißes Frequenzrauschen handelt, nimmt die

Tab. 1: Auflösungsvermögen und Stabilität des G in Gegenüberstellung mit den Großringlasern in Christchurch. Damit sind Großringlaser mehrere Größenordnungen empfindlicher und stabiler als andere Präzisionsrotationssensoren (elektrostatische Kreisel, Heliumgyroskope, Atominterferometer).

Ring	Standort	Fläche [m <sup>2</sup> ]	$f_{\text{Sagnac}}$ [Hz]	Auflösung [rad s <sup>-1</sup> Hz <sup>-1/2</sup> ]	Stabilität [ $\Delta f/f$ ]
C-II	Christchurch	1	79,4	$4,8 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
G	Wettzell	16	348,6	$9,1 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$
UG1	Christchurch	366	1512,8	$7,3 \cdot 10^{-12}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

daraus resultierende Unsicherheit der Signaldetektion mit zunehmender Messdauer  $\tau$  gemäß  $\tau^{-0.5}$  ab. Das bedeutet, dass für die Detektion eines Signals von  $10^{-9}$  der Erddrehrate theoretisch eine Messzeit von etwa 20 Minuten erforderlich ist. Dieses Auflösungsvermögen wird gegenwärtig aufgrund apparativer Driften noch nicht erreicht.

Die Stabilität eines Ringlasers lässt sich mithilfe der Allan-Varianz ( $\sigma^2$ ) bzw. Allan-Standardabweichung ( $\sigma$ ) gut beurteilen (Schreiber 2000). Sie gibt die Streuung der Messwerte eines Zeitreihenabschnitts in Abhängigkeit von der Länge des betrachteten Abschnitts wieder:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{k=1}^{n-1} (f_{k+1} - f_k)^2, \quad (7)$$

wobei  $f_k$  und  $f_{k+1}$  zwei aufeinanderfolgende Messwerte und  $n$  die Zahl der Datenpunkte im betrachteten Abschnitt darstellen. Daneben dient die Allan-Varianz auch der Identifikation von Rauschprozessen (weißes Rauschen,  $1/f$ -Rauschen, stochastisches Rauschen), die in doppelt logarithmischer Darstellung Geraden mit unterschiedlicher negativer Steigung aufweisen. Die typischen Allan-Standardabweichungen der Großringlaser C-II, UG1 und G sind in Abb. 5 dargestellt. Die Streuung nimmt mit zunehmender Datensatzlänge gemäß  $\tau^{-0.5}$  ab bis zu einem Minimum, ab dem Instabilitäten wieder zu einer Zunahme der Streuung führen. Dieses Minimum wird beim C-II bereits nach weniger als 10 min erreicht, was auf Rückstreueffekte an den Umlenkspiegeln zurückzuführen ist. Rückstreuung führt zu einer Kopplung der beiden in entgegengesetzter Richtung laufenden Strahlen und so zu einer nichtlinearen Variation des Skalenfaktors, woraus eine hohe Sensitivität auf Längenänderungen z. B. durch Luftdruck- oder Temperaturschwankungen resultiert. Der G ist aufgrund seiner Größe von keinen Rückstreueffekten mehr betroffen und weist wegen seiner hohen mechanischen und thermischen Stabilität die geringsten Driften auf. Er erreicht bei einer Datensatzlänge von 2-3 Stunden eine relative Auflösung von  $2 \cdot 10^{-8}$  der Erddrehrate. Danach begrenzen die eigentlichen Messsignale wie die tägliche Polbewegung und der

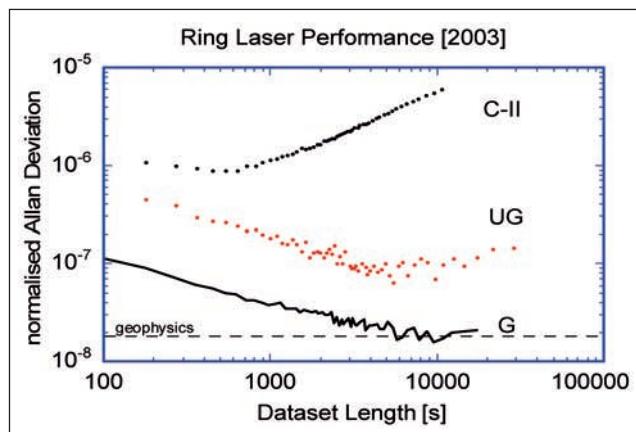


Abb. 5: Normierte Allan-Standardabweichungen der drei Großringlaser C-II, UG1 und G

Orientierungseffekt der Erdgezeiten die Stabilität. Werden diese Signale durch die Subtraktion von Modellzeitreihen entfernt, erreicht G eine Auflösung von  $1 \cdot 10^{-8}$ . Damit ist G der weltweit genaueste Rotationssensor.

## 7 Messergebnisse

### 7.1 Lokale Orientierungsänderungen

In den Zeitreihen des Ringlasers treten lokale Orientierungsänderungen als Störsignale auf und müssen deshalb erkannt und entfernt werden. Diese Orientierungs- oder Neigungsänderungen haben überwiegend hydrologische Ursachen. Druckänderungen in Klüften führen zu Verformungen des Untergrundes, woraus allmähliche oder auch sprunghafte Neigungen des Beobachtungspfeilers bis zu einigen 10er µrad resultieren. Neigungsmesser auf dem G registrieren diese Ereignisse. Die Parallelregistrierung durch mehrere unabhängige Neigungsmesser erlaubt eine gegenseitige Kontrolle der gemessenen Neigungssignale. Diese Neigungsvariationen (betrachtet wird dabei nur die relevante Nordrichtung) können gemäß der in Abb. 2 dargestellten geometrischen Beziehung in Variationen der Sagnac-Frequenz umgerechnet werden. In Abb. 6 sind zwei Beispiele sprunghafter Neigungsänderungen dargestellt. Die Zeitreihen der Neigungsmesser wurden nach Korrektur der Gezeitenattraktion in Änderungen der Sagnac-Frequenz umgerechnet und der tatsächlich gemessenen Sagnac-Frequenz gegenübergestellt. Im ersten Beispiel zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, während sich im zweiten Beispiel die Sagnac-Frequenz wesentlich stärker ändert als erwartet. Die Korrekturfaktoren, mit denen die berechnete Zeitreihe multipliziert werden muss, um etwa den Betrag der Sagnacfrequenzänderung zu erhalten, variieren zwischen 0,8 und 6. Die Ursache für diese Abweichung ist bislang nicht geklärt. Möglicherweise treten bei einigen Pfeilern auch Rotationsanteile in der sensiven Ebene des Ringlasers, d. h. um die vertikale Achse, auf, die von den Neigungsmessern natürlich nicht erfasst werden und sich mit dem Orientierungseffekt überlagern.

### 7.2 Erdgezeiten

Die Gezeiten der festen Erde beeinflussen den Ringlaser in erster Linie durch die Neigung der Erdoberfläche. Dieser Anteil muss aus den Ringlaser-Zeitreihen sorgfältig entfernt werden, da die zu messenden Signale, z. B. die tägliche Polbewegung, die gleichen Frequenzen aufweisen wie die täglichen Komponenten der Erdgezeiten. Die Gezeitenneigungen werden durch die auf dem Ringlaser platzierten Neigungsmesser erfasst. Die Zeitreihen der Neigungsmesser werden gemäß (3) um den Anteil der Gezeitenattraktion korrigiert, bevor sie als Orientierungs-

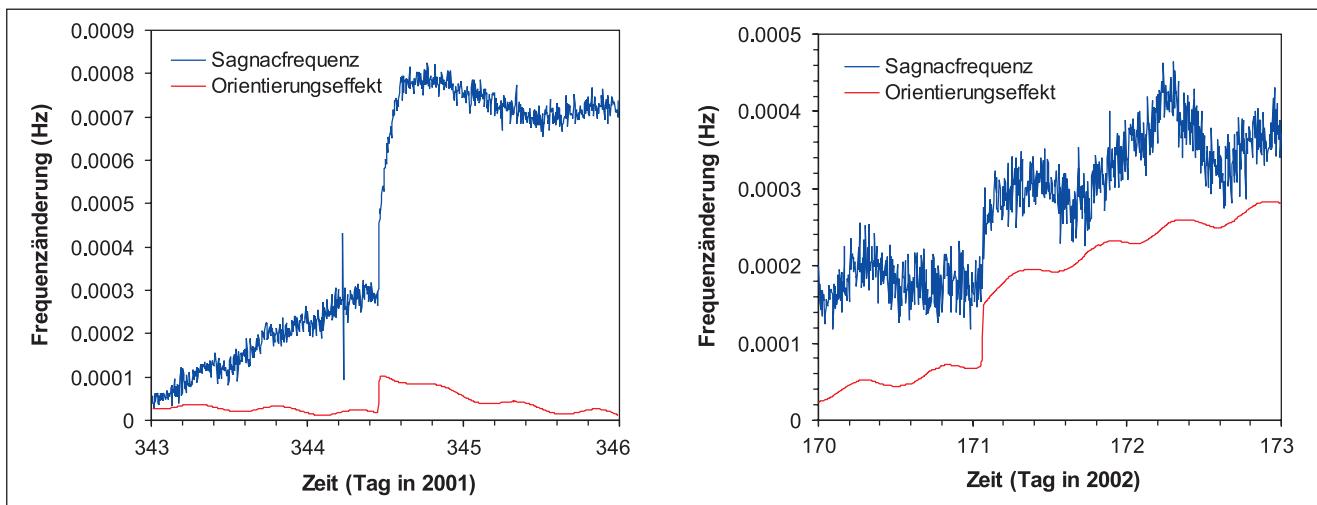


Abb. 6: Zwei Beispiele von sprunghaften Pfeilerneigungen, die in Änderungen der Sagnac-Frequenz umgerechnet wurden (Orientierungseffekt), in Gegenüberstellung mit der gemessenen Sagnac-Frequenz

korrektur an die Ringlaser-Zeitreihen angebracht werden (vgl. 4.2). Gezeitenneigungen durch Ozeanauflast werden auf diese Art ebenfalls aus den Ringlaser-Zeitreihen entfernt. Vor der Gezeitenkorrektur sind im Spektrum der Sagnac-Frequenz die halbtägigen Gezeitenwellen  $M_2$  und  $K_2/S_2$  deutlich zu erkennen (Abb. 7b). Die ganztägigen Komponenten ( $O_1, K_1$ ) sind in den Spikes der täglichen Polbewegung enthalten. Nach der Gezeitenkorrektur (Abb. 7a) sind die halbtägigen Komponenten verschwun-

den bis auf einen Rest bei exakt zwei Zyklen pro Tag, was möglicherweise auf einen Einfluss der halbtägigen atmosphärischen Luftdruckwelle  $S_2$  hinweist. Das vollständige Fehlen der stärksten Gezeitenkomponente  $M_2$  mit der Frequenz von 1,932 pro Tag zeigt, dass die Gezeitenkorrektur funktioniert, was auch für die ganztägigen Komponenten anzunehmen ist. Die Amplituden der ganztägigen Komponenten haben nur geringfügig abgenommen, da in mittleren Breiten die Nordkomponente

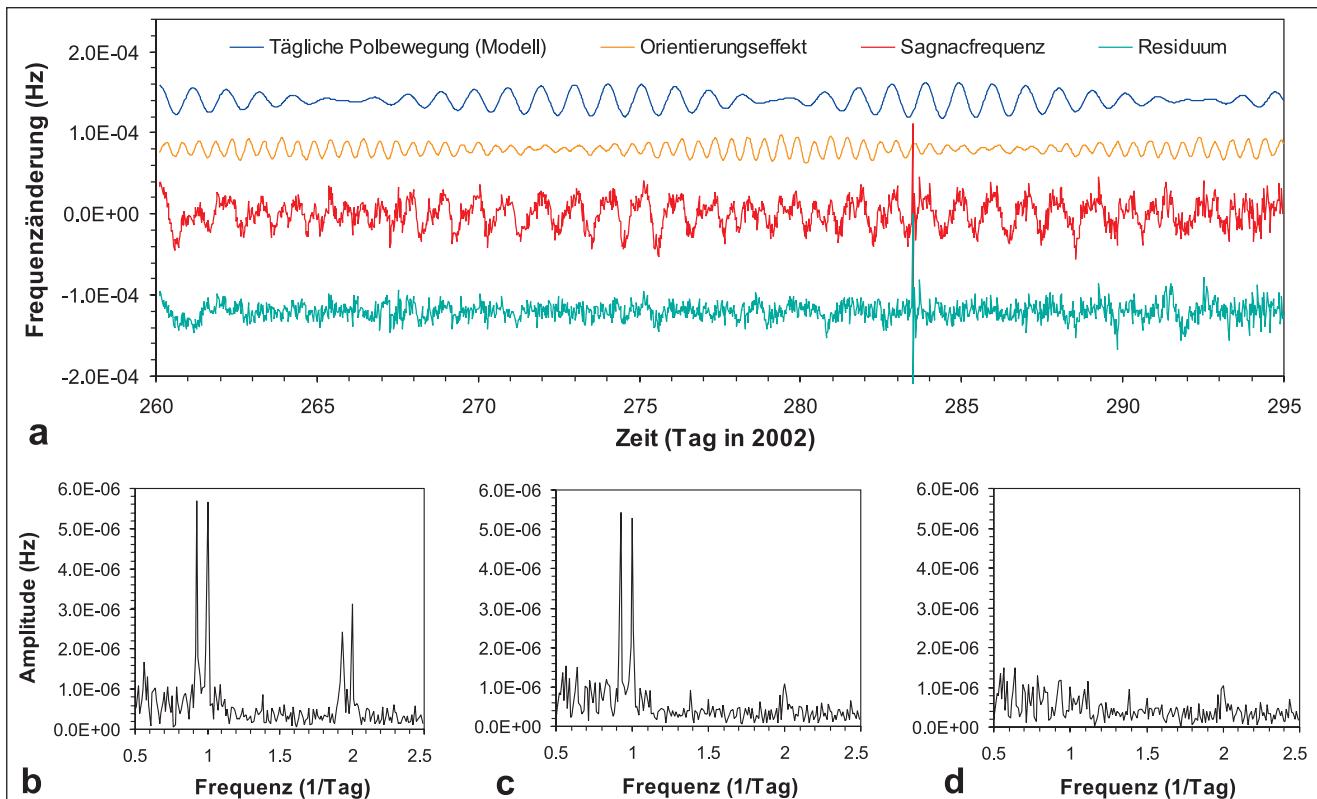


Abb. 7: (a) Ausschnitt einer 94-tägigen Zeitreihe der Sagnac-Frequenz in Gegenüberstellung mit einer Modellreihe der täglichen Polbewegung (nach Brzezinski 1986) und dem aus den Neigungszeitreihen berechneten Orientierungseffekt. Daten sind bandpassgefilterte 30-Minuten-Mittel (cut-off 0,03 und 2 Tage). Unten: Fast-Fourier-Transformation(FFT)-Amplitudenspektren der Zeitreihe, unkorrigiert (b), nach Abzug des Orientierungseffekts (c) und nach Abzug der Modellreihe der täglichen Polbewegung (d)

der täglichen Gezeitenneigungen fast Null ist, und enthalten nun den vollen Betrag der täglichen Polbewegung.

### 7.3 Tägliche Polbewegung

Die Anziehungs Kräfte von Sonne und Mond üben aufgrund der nicht-kugelförmigen Gestalt der Erde ein Drehmoment auf die Erde aus, woraus eine erzwungene periodische Bewegung der Rotationsachse sowohl im himmelfesten als auch im erdfesten Bezugssystem resultiert. Im himmelfesten System sind diese Bewegungen als Präzession und Nutation bekannt. Die Nutationen resultieren aus den zeitlich variierenden relativen Positionen von Sonne, Mond und Erde und zeigen Hauptperioden von 13,66 Tagen, 1/2 Jahr, 1 Jahr, 9,3 und 18,6 Jahren. Im erdfesten Bezugssystem kommt wegen der Erddrehung noch eine tägliche Variation der Anziehungs Kräfte hinzu, woraus eine annähernd kreisförmige Bewegung des Rotationspols gegen die Rotationsrichtung der Erde mit täglicher Periode resultiert. Die Amplitude dieser täglichen Periode wird mit den oben genannten Nutationsperioden moduliert. Die langperiodische Polbewegung (Chandler-Wobble und jährliche Polschwankung) wird von der täglichen Polbewegung überlagert, sodass sich das in Abb. 8 dargestellte Bewegungsmuster des Rotationspols im erdfesten System ergibt. Ein Ringlaser, dessen sensitive Achse nicht parallel zur Erdachse ausgerichtet ist, registriert genau diese Bewegungen, da sich der Winkel zwischen der Rotationsachse und der Ringlasernormalen und damit das Skalarprodukt  $\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}$  ändert (Schreiber et al. 2004b).

Im himmelfesten Bezugssystem weisen die Winkeländerungen zwischen der z-Achse des terrestrischen Koordinatensystems und der momentanen Rotationsachse lange (nicht-tägliche) Perioden auf und werden als zusätzlicher Term den Nutationen zugeordnet. Diese Korrekturterme werden auch als Oppolzer-Terme bezeichnet. Da durch die geodätischen Raumverfahren VLBI oder SLR nur die vollständige Rotationsmatrix zwischen erdfestem und himmelfestem System erhalten wird, kann mit diesen Verfahren nicht zwischen Nutationsoffsets ( $\delta\Delta\epsilon$  und  $\delta\Delta\psi$ ) und Oppolzer-Termen ( $\delta x$  und  $\delta y$ ) unterschieden werden. Hier besteht ein fundamentaler Unterschied zu einem an die Erde angekoppelten Ringlaser, der ausschließlich auf Bewegungen der Rotationsachse im erdfesten System sensitiv ist.

Neben der Rotationsachse sind auch die Drehimpulsachse und die Figurennachse von der Polbewegung betroffen, deren Amplitude teilweise stark vom Erdmodell abhängt. Für eine starre Erde bleibt die Figurennachse statio-när und die Bewegung der Drehimpulsachse ist mit max. 130 nrad etwa identisch mit der Bewegung der Rotationsachse (Woolard 1953). Bei einer elastischen Erde ist die Bewegung der Drehimpulsachse etwas kleiner (max. 90 nrad), während die Figurennachse bis zu 12 µrad auswandert (McClure 1973). Die Anpassung an verbesserte Erdmodelle, die den flüssigen äußeren Erdkern und die

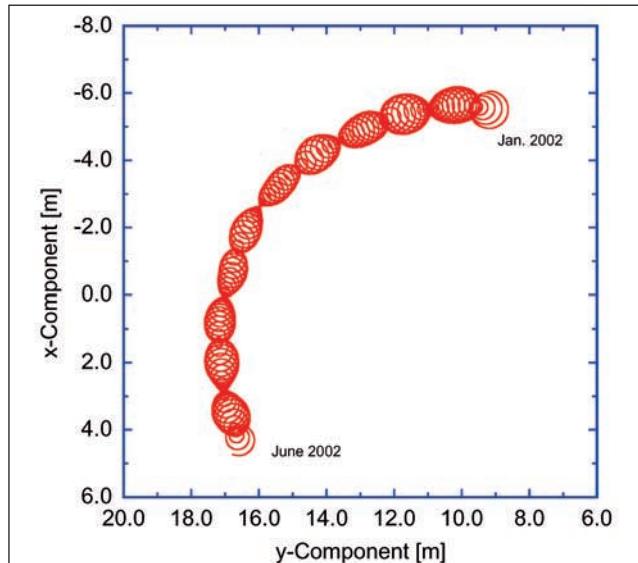


Abb. 8: Spur der momentanen Rotationsachse als Summe des langperiodischen Anteils (Chandler-Periode und jährliche Periode) und der täglichen Polbewegung

Resonanzfrequenz der »free core nutation« berücksichtigen, resultiert in einer starken Zunahme der Bewegung der Drehimpulsachse bis max. 1,4 µrad (Brzezinski 1986, Frede & Dehant 1999). Der Einfluss des Erdmodells auf die Bewegung der Rotationsachse ist mit max. 3 % klein.

In der Sagnac-Frequenz des G ist die tägliche Polbewegung bereits in der Zeitreihe deutlich zu erkennen, die in Abb. 7a einer Modellreihe gegenübergestellt ist. Zieht man die Modellreihe von der Messreihe ab, so sind im Residuum keine täglichen Variationen mehr erkennbar. In den FFT-Amplitudenspektren wird dieser Sachverhalt noch deutlicher (vgl. Abb. 7c, 7d). Die Frequenzauflösung lässt derzeit die Identifizierung der drei Frequenzgruppen  $K_1/P_1$ ,  $O_1$  und  $Q_1$  zu.

## 8 Ergebnisse und Ausblick

Unter den inertialen Rotationssensoren sind große Ringlaser die mit Abstand empfindlichsten Instrumente. Mit dem Großringlaser G ist es gelungen, den weltweit einzigen Erdrotationssensor zu bauen, der bezüglich seines Auflösungsvermögens und seiner Stabilität imstande ist, Erdrotationsschwankungen zu erfassen. Die tatsächlich erreichte Auflösung beträgt derzeit  $1 \cdot 10^{-8}$  der Erdrotation oder  $7,3 \cdot 10^{-13}$  rad/s und wird nach einer Integrationszeit von 2–3 Stunden erreicht. Mit dieser Auflösung ist es erstmals möglich, die tägliche Bewegung des Rotationspols, der an der Erdoberfläche einen Kreis mit einem Radius von max. 80 cm beschreibt, direkt zu messen. Phase und Amplitude sind im Rahmen der Messgenauigkeit identisch mit den Modellreihen. Langperiodische Anteile wie der Chandler-Wobble und die jährliche Polschwankung können trotz ihrer größeren Amplitude aufgrund instrumenteller Driften bislang nicht nachgewiesen werden.

Als Inertialsensoren sind Ringlaser sehr empfindlich auf lokale Einflüsse. Durch die Verwendung des äußerst formstabilen Materials Zerodur und dem Betrieb in einem thermisch isolierten, unterirdischen Labor konnten Temperatureinflüsse auf ein unerhebliches Maß reduziert werden. Die trotz aufwändiger Gründung unvermeidlichen Neigungen des Aufstellungspfeilers werden durch ein Array von Neigungsmessern aufgezeichnet. Die orientierungsbedingten Änderungen des Ringlasersignals können im Falle der Gezeitenneigungen vollständig korrigiert werden, während lokale Neigungseignisse sich nicht immer in entsprechender Höhe im Ringlasersignal widerspiegeln. Dieser Effekt ist bislang unverstanden.

Die bisher erreichte Auflösung des G ist noch nicht ausreichend, um Änderungen der Drehgeschwindigkeit der Erde zu erfassen. Hierzu ist noch eine Steigerung der Genauigkeit von mindestens einer Größenordnung erforderlich. Da der G-Ringlaser in seiner gegenwärtigen Realisierung seine theoretische Schrottauschgrenze noch nicht erreicht hat, ist eine Steigerung der Empfindlichkeit durchaus möglich. Hierzu sind insbesondere instrumentelle Eigenschaften des Gyroskops in Bezug auf die lokale Ankoppelung an den Untergrund noch besser zu verstehen. Neben der Empfindlichkeit ist aber vor allem die Stabilität des Instrumentes zu erhöhen. Geringe zeitliche Variationen im Verstärkungsfaktor bzw. in den Verlusten des Laserresonators führen zu langsamem Drifterscheinungen im Bereich von einigen Teilen pro Milliarden der Sagnac-Frequenz. Leichte Unsymmetrien zwischen den beiden gegenläufigen Laserstrahlen z. B. durch Fresnelmitführung oder durch Dispersion sind hierfür verantwortlich. Diese Einflüsse sollen durch die Stabilisierung der optischen Frequenz im Resonator und durch ein verbessertes Lasermodell reduziert werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist keine unvermeidbare Begrenzung der Auflösung dieses Sensors absehbar.

## Literatur

- Aronowitz, F.: The Laser Gyro. In: M. Ross (ed.), *Laser Applications*, Vol. 1, S. 133–200, Academic Press, New York, 1971.
- Brzezinski, A.: Contribution to the theory of polar motion for an elastic earth with liquid core. *Manuscripta Geodaetica* 11: 226–241, 1986.
- Frede, V. & Dehant, V.: Analytical versus semi-analytical determinations of the Oppolzer terms for a non-rigid Earth. *J. Geodesy* 73: 94–104, 1999.
- Gustavson, T., Bouyer, P. & Kasevich, M.: Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope. *Phys. Rev. Lett.*, 78: 2046–2049, 1997.
- Herbst, K.: Interpretation von Neigungsmessungen im Periodenbereich oberhalb der Gezeiten. Dissertation, TU Clausthal, 1976.
- Höling, B.: Ein Lasergyroskop zur Messung der Erdrotation. Dissertation, MPI für Quantenphysik, München, 1990.
- Klügel, T.: Analyse der Zeitreihen lokaler Rotationssensoren – Entwicklung eines Orientierungsmodells. Schlussbericht, DFG-Forschungsprojekt ROT-SKOP (SCHN 240/6), Wettzell, 2001.
- Klügel, T.: Bestimmung lokaler Einflüsse in den Zeitreihen inertialer Rotationssensoren. Schlussbericht, DFG-Forschungsprojekt LOK-ROT (SCHR 645/1), Wettzell, 2003.

- Lenef, A., Hammond, T., Smith, E., Chapman, M., Rubenstein, R. & Pritchard, D.: Rotation sensing with an atom interferometer. *Phys. Rev. Lett.*, 78: 760–763, 1997.
- McClure, P.: Diurnal polar motion. GSFC Rep. X-529-73-259, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1973.
- Rabbel, W. & Zschau, J.: Static deformations and gravity changes at the earth's surface due to atmospheric loading. *J. Geophys.* 56: 81–99, 1985.
- Rautenberg, V., Plag, H., Burns, M., Stedman, G. & Jüttner, H.: Tidally induced Sagnac signal in a ring laser. *Geophys. Res. Lett.* 24: 893–896, 1997.
- Riepl, S.: Analyse der Zeitreihen lokaler Rotationssensoren – Entwicklung eines Rotationsmodells. Zwischenbericht, DFG-Forschungsprojekt ROT-SKOP, Wettzell, 1998.
- Rotgé, J.R., Shaw, G.L. & Emrick, H.W.: Measuring Earth rate perturbations with a large passive ring laser gyro. *Proc. IAU/IAG/IUGG Int. Conf. On Earth Rotation and Terr. Ref. Frame*, Columbus/Ohio, S. 719–729, 1986.
- Rowe, C.H., Schreiber, U., Cooper, S.J., King, B.T., Poulton, M.P. & Stedman, G.E.: Design and operation of a very large ring laser gyroscope. *Applied Optics* 38/12: 2516–2523, 1999.
- Sagnac, M.G.: La démonstration de l'existence de l'éther lumineux à travers les mesures d'un interféromètre en rotation. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* 157: 708–718, 1913.
- Schreiber, U.: Ringlasertechnologie für geowissenschaftliche Anwendungen. *Mitt. Bundesamt f. Kartographie u. Geodäsie*, Band 8, Frankfurt, 2000.
- Schreiber, U., Stedman, G.E. & Klügel, T.: Earth tide and tilt detection by a ring laser gyroscope. *J. Geophys. Res.* 108 (B) 2, 10.1029/2001JB000569, 2003.
- Schreiber, U., Velikoseltsev, A., Stedman, G.E., Hurst, R.B. & Klügel, T.: Large Ring Laser Gyros as High Resolution Sensors for Applications in Geoscience. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, S. 326–331, 2004.
- Schreiber, U., Velikoseltsev A., Rothacher M., Klügel, T., Stedman, G.E. & Wiltshire, D.L.: Direct measurement of diurnal polar motion by ring laser gyroscopes. *JGR* 109, 10.1029/2003JB002803, 2004.
- Schmidt, G.T.: INS/GPS technology trends. – In: *Advances in navigation sensors and integration technology*, NATO Research and Technology Organisation, RTO Lecture series 232 (2004): 1.1–1.16., 2004.
- Stedman, G.E., Bilger, H.R., Li, Z., Poulton, M.P. & Rowe, C.H.: Canterbury ring laser and tests for nonreciprocal phenomena. *Australian J. Phys.* 46: 87–101, 1993.
- Stedman, G.E.: Ring laser tests of fundamental physics and geophysics. *Reports Progr. Phys.* 60/6: 615–688, 1997.
- Weise, A.: Neigungsmessungen in der Geodynamik – Ergebnisse von der 3-Komponenten-Station Metsähovi. Dissertation, TU Clausthal, 1992.
- Woolard, E. W.: Theory of the rotation of the Earth around its center of mass. *Astr. J.* 58, 2, 1953.

## Anschrift der Autoren

Dr. rer. nat. Thomas Klügel / Dr.-Ing. Wolfgang Schlüter  
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie  
Fundamentalstation Wettzell  
Sackenrieder Straße 25, 93444 Kötzing  
thomas.kluigel@bkg.bund.de / wolfgang.schlüter@bkg.bund.de

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Dr. rer. nat. Ulrich Schreiber  
Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München  
Fundamentalstation Wettzell  
Sackenrieder Straße 25, 93444 Kötzing  
schreiber@wettzell.ifag.de

Prof. (em.) Dr. Manfred Schneider  
Hoppestraße 18, 93049 Regensburg  
mxss.tum@t-online.de