

Charakterisierung des C-II Ringlasers

Ulrich Schreiber, Manfred Schneider, Geoffrey E. Stedman, Clive H. Rowe, Wolfgang Schlüter

Abstract:

Intertialsensoren spielen für die hochgenaue Vermessung der Erdrotation in der Geodäsie noch keine Rolle, da ihre technische Realisierung noch nicht weit genug vorangetrieben worden ist. Mechanische Kreisel, Faserkreisel und Laserkreisel finden zwar eine breite Anwendung für Aufgaben in der Navigation und Orientierung von beweglichen mechanischen Strukturen. Allerdings sind die Genauigkeitsanforderungen an Auflösungsvermögen und Stabilität für diese Anwendungen sehr viel geringer als für geowissenschaftliche Fragestellungen. Mit dem Canterbury Ringlaser C-I konnte gezeigt werden, daß durchaus die Möglichkeit besteht einen großen Ringlaser zu bauen. Von einem Gerät (G) mit einer umspannten quadratischen Fläche von 16 m^2 kann man erwarten in den geowissenschaftlich interessanten Genauigkeitsbereich von 10^{-9} oder besser der Erdrotation vorzudringen [3, 4]. Ausgehend von den Erfahrungen mit dem C-I wurde der Prototyp C-II entworfen und gebaut, der alle notwendigen Eigenschaften des Großringes G erproben soll. Sein Konzept und die erzielten Ergebnisse werden hier vorgestellt.

1 Das Ringlaser Prinzip

Umläuft Licht einer gegebenen Wellenlänge eine beliebig geformte Fläche gegensinnig, so ergibt sich eine Phasenverschiebung, wenn diese Fläche gegen das lokale Fermisystem [6] rotiert. Diese Phasenverschiebung zwischen den beiden Umlaufsinnen ist proportional zur Rotationsgeschwindigkeit des Flächenstückes und verschwindet, wenn die Drehrate zu Null wird. Diese Eigenschaft wurde von G. Sagnac 1913 experimentell beobachtet und heißt Sagnac-Effekt. Führt man diese Fläche beispielsweise als Quadrat (A) aus und fügt ein Verstärkungsmedium (z.B. ein Gasgemisch aus Helium und Neon) hinzu, so ergibt sich ein Laseroszillator mit ringförmigem Resonator und die meßtechnisch schlecht bestimmbare Phasendifferenz des passiven Sagnacinterferometers wird zu einer Frequenzdifferenz [1]. Somit ergibt sich die Ringlasergleichung zu

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

wobei L der Umfang des Ringes ist und $\lambda = 633\text{ nm}$ die Wellenlänge des HeNe Lasers, während $\mathbf{\Omega}_e$ die Rotationsgeschwindigkeit der Erde beschreibt.

Für den Betrieb eines Gyroskopes ist dies jedoch nicht die einzige Bedingung. Man muß ferner sicherstellen, daß nur eine einzige longitudinale Lasermode, bevorzugt TEM(0,0), pro Umlaufsinn anschwingt. Für Navigationskreisel mit deutlich geringerer Winkelauflösung ist dies kein Problem, da deren Resonatorlängen mit $L < 60\text{ cm}$ nur eine Longitudinalmode verstärken kann, bei einem großen Ring wie dem C-II mit einem freien Spektralbereich ($\text{FSR} = c/L = 74.948\text{ MHz}$; für $L = 4\text{ m}$) sind jedoch mehrere longitudinale Moden anregbar. Durch gezieltes Herabsetzen der Verstärkung des Lasermediums bleibt letzten Endes nur noch eine Lasermode übrig, die sich aufgrund eines differentiell geringfügig höheren Verstärkungsfaktors auf Kosten der benachbarten Moden behauptet.

Abbildung 1: Der C-II Ringlaser an seinem Aufstellungsort in Christchurch

Die Rotationsbewegung eines Ringlasers kann man erfassen, indem die trotz der geringen Transmission von weniger als 1 ppm durch die Spiegel durchtretende Laserstrahlung in einem Köstersprisma überlagert und die Schwebungsfrequenz mit einem Photodetektor (Photomultiplier, PIN-Diode) registriert wird. Die am Ausgang des Detektors als Wechselspannung erscheinende Sagnacfrequenz des Ringlasers wird anschließend spannungsverstärkt, digitalisiert mit Zusatzinformationen der meteorologischen Station ergänzt und gespeichert. Da der meßbare Anteil der Sagnacfrequenz von der Orientierung des Ringlasers relativ zur Rotationsachse der Erde abhängt, läßt sich Gleichung (1) auch schreiben als

$$\delta f = \frac{4\mathbf{A} \cdot \mathbf{\Omega}_e}{\lambda L} = \frac{f_0 \Omega \cos \Lambda}{4F}. \quad (2)$$

Hierbei ist die Erdrotationsrate $\Omega = 2\pi/86164.1 = 7.2921 \times 10^{-5}$ rad/s, wobei die Zahl im Nenner der siderischen Tageslänge in Sekunden entspricht, $f_0 = 4.73612215 \times 10^{14}$ Hz der optischen Frequenz des Lasers (genauer die Komponente i des I_2), $F = 74.948$ MHz dem freien Spektralbereich und $\Lambda = 43.5679^\circ = 43^\circ 34' 37''$ S dem Breitengrad des Aufstellungsortes bei Christchurch. Wenn eine Zeitreihe der Sagnacfrequenz erfaßt ist, kann sie mit den Methoden der digitalen Spektralanalyse weiter untersucht werden. Durch Fouriertransformation erhält man das dazugehörige Frequenzspektrum. Abbildung 2 zeigt hierzu ein Beispiel. Für den Betrieb des Ringlasers als Erdrotationssensor ist es wichtig, daß die zirkulierende Laserleistung möglichst hoch und damit die gemessene Linienbreite so klein wie möglich ist. Dies wird zum einen durch die Länge der aufgenommenen Zeitreihe und zum anderen durch die mögliche Verstärkung im Lasermedium bis zum Auftreten weiterer Longitudinalmoden begrenzt. Für den C-II erhält man die minimal erreichbare Linienbreite mit $200 \mu\text{Hz}$. Sie ergibt sich sowohl aus der Abschätzung der Leistungsbilanz, wie auch aus Messungen. Da auch bei einer gegebenen Halbwertsbreite die Linienmitte noch mit höherer Genauigkeit bestimmt werden kann, ist das eigentliche Kriterium für die Qualität der Apparatur die Stabilität der Linienmitte. Hier ist es erforderlich, daß apparativ verursachte Stabilitätsschwankungen geringer sind als die Variation in der Eingangsdrehrate.

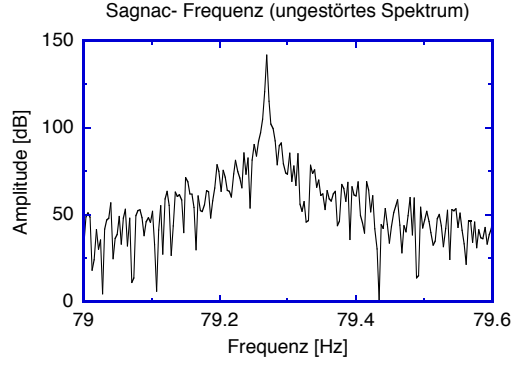


Abbildung 2: Beispiel für ein Sagnacspektrum des C-II Ringlasers. Die Linienbreite beträgt weniger als $200 \mu\text{Hz}$ FWHM und der Signal-/Rauschabstand ist größer als 90 dB.

3 Fehlerquellen im Aufbau von Ringlasern

Obwohl es immer wieder möglich ist, die Drift der Apparatur über einige Stunden hinweg so gering zu halten, daß sie deutlich unterhalb der schrotrauschbegrenzten Linienbreite der Sagnaclinie liegt, ist dies über größere Zeiträume hinweg bislang noch nicht gelungen. Ursache hierfür ist eine Schwankung im Betrag des Skalenfaktors in der Ringlasergleichung. Schreibt man Gleichung (1) in der Form

$$\delta f = \frac{4A}{\lambda L} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Omega}_e \quad (3)$$

mit $\mathbf{n}$ dem normierten Flächennormalenvektor, so ist der Skalenfaktor definiert als

$$Sk = \frac{4A}{\lambda L} \quad (4)$$

und abhängig von der Größe des Instrumentes. Auch wenn durch die Verwendung des selbst unter dem Einfluß moderater Temperaturschwankungen formstabilen Werkstoffes Zerodur geometrische Einflüsse auf die Größe der Fläche (A) und Länge des Umfanges (L) ausgeschlossen sind, so ergibt sich durch die Rückstreuung von Licht aus einem Umlaufsinn in den jeweils gegenläufigen Sinn ein Mechanismus für die Störung der Sagnacfrequenz [5]. Die Größe der Rückstreuung an einem Spiegel gibt eine sogenannte Einrastfrequenz ω_L vor, bei der kein Sagnacsignal mehr beobachtet werden kann, wenn die Eingangsrotationsrate für den Kreisel so gering wird, daß die daraus resultierende Sagnacfrequenz die Einrastfrequenz unterschreitet. Im einfachsten Fall [2] gilt:

$$\delta f = SK \sqrt{\omega^2 - \omega_L^2} \quad (5)$$

Da ω_L nicht mit der Zeit konstant ist, sondern sich mit der Phasenlage des effektiv rückreflektierten Signales ändert, ist es wichtig, daß die geometrische Beziehung aller Rückstreuquellen im Strahlengang konstant bleibt. Experimentell wurde beobachtet, wie bereits Schwankungen in den Spiegelabständen von unter 5 nm bedeutende Auswirkungen zeigen. Das entspricht einer Resonatorlängenänderung von weniger als $\lambda/100$. Solche Änderungen ergeben sich im gegenwärtigen Aufbau aus dem Einfluß von Druck- und Temperaturschwankungen auf den Zerodurblock, wie auch durch eine Membranwirkung der Spiegelträger.

4 Der Betrieb des C-II

Für den Betrieb des Ringlasers hat sich die Amplitudenstabilisation als wichtig erwiesen. Sie erfüllt im wesentlichen zwei Aufgaben. Zum Einen verhindert sie, daß sich der Arbeitspunkt des

Ringlasers so weit verlagert, daß mehr als eine longitudinale Mode pro Umlaufsinn verstärkt wird. Zum Anderen unterdrückt sie Schwankungen in dem Verstärkungsfaktor des Laserprozesses, welche sich auf den Betrag der gemessenen Sagnacfrequenz auswirken. Realisiert wird dieser Regelkreis dadurch, daß ein Photomultiplier die durch den am weitesten vom Plasma entfernten Umlenkspiegel des im Uhrzeigersinn umlaufenden Laserstrahles durchtretende Lichtintensität aufnimmt, über eine invertierende Operationsverstärkerschaltung verstärkt und damit die Verstärkung des Hochfrequenzsenders regelt, der für die Plasmaanregung sorgt. Da die Kennlinie für die erzeugte Intensität des Laserlichtes in Abhängigkeit von der eingekoppelten Hochfrequenzleistung in der Nähe der Laserschwelle sehr steil ist, erhält man hiermit eine recht konstante Intensität des Ringlasers für beide Umlaufsinn.

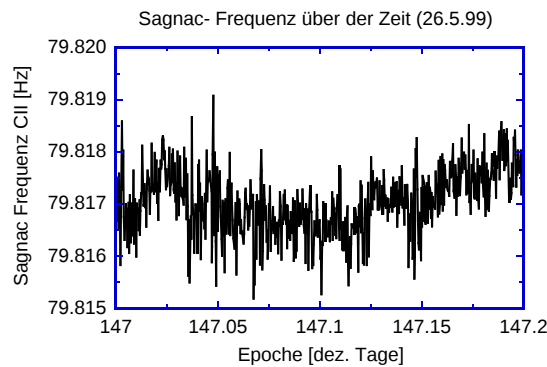


Abbildung 3: Darstellung der Sagnacfrequenz über der Zeit.

Dennoch muß an dieser Stelle ein großer Aufwand getrieben werden, da selbst minimale Änderungen in der Lichtintensität von weniger 0,1% sich bereits auf die Sagnacfrequenz auswirken. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einer Zeitreihe gemessener Sagnacfrequenzen des C-II. Dabei zeigt die Streuung der Messwerte die durch das Schrotrauschen gegebene Unsicherheit in der Bestimmung der Sagnacfrequenz an, während die systematischen Variationen in der Zeitreihe dem gegenwärtigen Verständnis nach auf eine unzureichende Stabilisierung der eingekoppelten Hochfrequenzleistung zurückzuführen ist. Nach den Umgebungseinflüssen wie Luftdruck und Temperatur ist dies wohl die nächstgrößte Instabilitätsquelle in dem Ringlasersystem. Mit dem Regelkreis zur Stabilisierung der Hochfrequenzanregung des Laservorganges und der Digitalisierung des Sagnacsignals ist die Ringlasersteuerung noch nicht komplett. Zusätzlich werden auch noch die Umgebungsparameter Luftdruck, Luftfeuchte und Temperatur des Ringes mitbestimmt. Der Luftfeuchte kommt hierbei eine untergeordnete Bedeutung als Überwachungsgröße für die Benutzbarkeit des Labores zu, während Luftdruck und Ringtemperatur Einfluß auf die Sagnacfrequenz nehmen.

5 Meßergebnisse

Das Datenerfassungsprogramm des C-II ist so aufgebaut worden, daß es jeweils nach 30 Minuten eine Messung aufzeichnet und die momentane Sagnacfrequenz über diese Zeitspanne bestimmt. Damit erhält man über längere Zeiträume hinweg Darstellungen über die Stabilität der Apparatur. Abbildung 4 zeigt ein solches Beispiel. Deutlich sieht man die durch die Skalenfaktorschwankungen verursachten Systematiken auf der Zeitreihe des Sagnacsignals. Diese korrelieren mit den Schwankungen im Luftdruck, wie man der Abbildung 5 entnehmen kann. Auch Schwankungen in der Temperatur nehmen einen großen Einfluß, so daß sie für eine Korrektur berücksichtigt werden müssen. Den Temperaturverlauf zeigt die Abbildung 6.

Es wurde nun versucht durch Berücksichtigung des Luftdruck- und Temperaturverlaufes die Skalenfaktorvariationen zu modellieren. Auf diese Weise ist der korrigierte Verlauf der Sagnacfre-

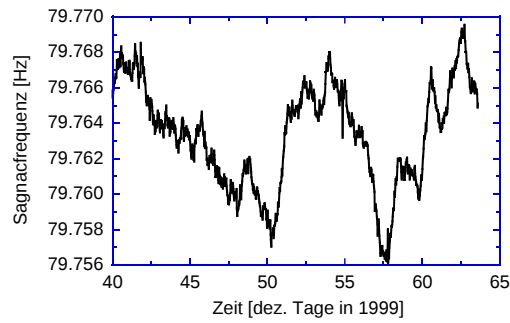


Abbildung 4: Darstellung einer Zeitreihe der Sagnacfrequenz wie sie vom C-II gemessen wurde..

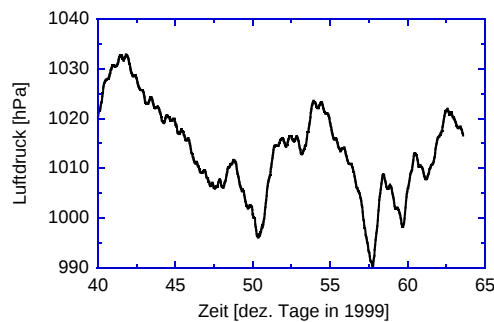


Abbildung 5: Der Verlauf des Luftdruckes während der Messungen.

quenz über der Zeit in Abbildung 7 entstanden. Man sieht eine deutliche Verbesserung durch ein Korrekturmodell [7] mit linearem Ansatz für die Drift durch Luftdruck und Temperatur. Nach den ausgeführten Korrekturen ergibt sich eine Stabilität des C-II Ringlasers für die Messung der Erdrotationsrate von bis auf 0,05 - 0,3 Winkelsekunden pro Stunde über einen Messzeitraum von 24 Tagen hinweg. Die verbliebene periodische Systematik auf der Zeitreihe der Sagnacfrequenz kann gegenwärtig noch nicht erklärt werden, wird aber auf Veränderungen in der Plasmaanregung zurückführbar sein. Das Hauptaugenmerk richtet sich zur Zeit darauf, wie die Skalenfaktorschwankungen für die Rohmessungen durch apparative Maßnahmen reduziert werden können.

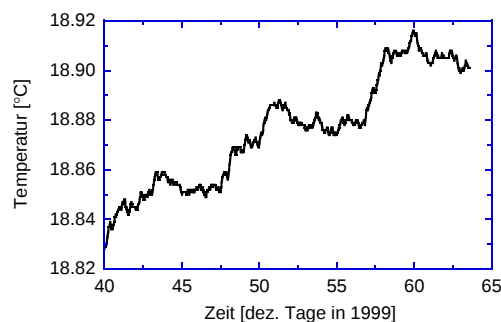


Abbildung 6: Der Verlauf der Temperatur während der Messungen.

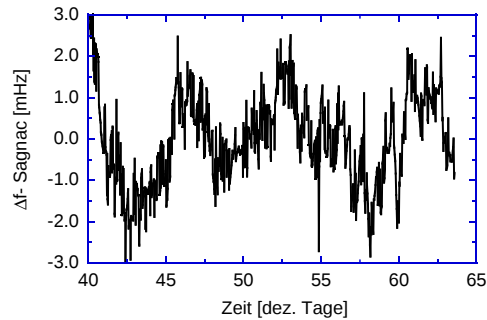


Abbildung 7: Der nach dem Einfluß von Luftdruck und Temperatur korrigierte Verlauf der Sagnacfrequenz über der Zeit.

6 Danksagung

G E Stedman und C H Rowe danken für die Unterstützung durch den Marsden Fund UOC 513 und den Projektmitteln der University of Canterbury 2096611, 2098611 welche für die Installation und Inbetriebnahme des C-II gewährt wurden. Die übrigen Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Vorhabens (Kennzeichen: SCHN240/6-3).

Literatur

- [1] G E Stedman, *Ring laser tests of fundamental physics and geophysics* , Rep. Progr. Phys. **60** 615-688 (1997).
- [2] F. Aronowitz; *The Laser Gyro*, Laser Applications, M. Ross (ed), Academic Press, New York (1971), **1**, 133-200
- [3] H.R. Bilger, G.E. Stedman, Z. Li, U. Schreiber, M. Schneider; *Ring Lasers for Geodesy*; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, 468-470 (April 1995).
- [4] H.R Bilger, U. Schreiber, G.E. Stedman; *Design and Application of Large Perimeter Ring Lasers* ; Proceedings of the Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Sept. 1996 8.0 - 8.24 (1996).
- [5] R. Rodloff; *A Laser Gyro with Optimized Resonator Geometry*, IEEE Journal of Quantum Electronics, **QE-23**, 438-445 (April 1987)
- [6] M. Schneider; *Himmelsmechanik, Band III Gravitationstheorie*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996
- [7] U. Schreiber; *Ringlaser Technologie für geowissenschaftliche Anwendungen*, Habilitationsschrift, Techn. Universität München, 1998 (im Druck)