

HEINZ GEORG DEPPNER  
STN Atlas Elektronik, Bremen

## 1 Geschichtlicher Rückblick

Der Einsatz von Kreiseln zur Erfassung von Drehbewegungen und/oder räumlichen Orientierungen beginnt um 1900. Die erste wichtige Anwendung ist der von Anschütz entwickelte Kurskreisel (Kreiselkompass), der zum unentbehrlichen Hilfsmittel für die Navigation von Seeschiffen wird. In den zwanziger Jahren werden Kreisel in der instrumentell gestützten Luftfahrt, zum Beispiel für Nachtflüge, als Lagesensor (künstlicher Horizont), Kreiselkompass und Wendekreisel (Gierraten-Anzeiger) eingesetzt.

Während bis dato die Systeme in erster Linie der Messung und Anzeige dienen – die Kreiselmechaniken sind in der Regel direkt mit einem optischen Anzeigeinstrument verbunden – werden Anfang/Mitte der vierziger Jahre erstmalig Wenderatengeber als Messorgane in geschlossenen Regelkreisen, zum Beispiel in den „Gierdämpfern“ der ersten turbinengetriebenen Flugzeuge eingebaut.

Der Einsatz von Drehratenmessgebern in der Inertialnavigation beginnt in den fünfziger Jahren mit den Plattformen für die Atom-Unterseeboote und für militärische Langstreckenflugzeuge.

In den sechziger und siebziger Jahren erfolgt eine Verfeinerung der Kreiselgeräte insbesondere in Hinblick auf erhöhte Genauigkeiten, wobei mit den optischen Kreiseln auch nichtmechanische Systeme zum Einsatz kommen. Zur Zeit letztes Glied in dieser Kette ist ein optischer Kreisel, der in Neuseeland installiert ist. Er misst Schwankungen der Erdrate mit einer Auflösung von 0,1 ppm.

Ab den achtziger Jahren gibt es, aufbauend auf neuen Messprinzipien, auch am anderen Ende der Genauigkeitsskala – bei in Massen hergestellten Billigkreiseln – Neuentwicklungen, die in Geräten des täglichen Bedarfs, z.B. bei Antiblockiersystemen in der Kfz-Technik oder bei Videorecordern als „Verwackelschutz“ eingesetzt werden.

Die folgende Beschreibung kann sowohl chronologisch als auch funktional geordnet gesehen werden, da die Entwicklung neuer Kreiseltechnologien sequentiell und ohne nennenswerte Überschneidungen erfolgte. Sie soll ei-

nen Überblick über Funktionsprinzip und Genauigkeit der heute gebräuchlichen Techniken geben.

## 2 Einachsige gefesselte Kreisel

Bild 1 zeigt das Prinzip eines einachsigen gefesselten Kreisels. Im Englischen wird dieser Kreisel als „Single degree of freedom gyro“ bezeichnet, die gebräuchliche Abkürzung ist SDG.

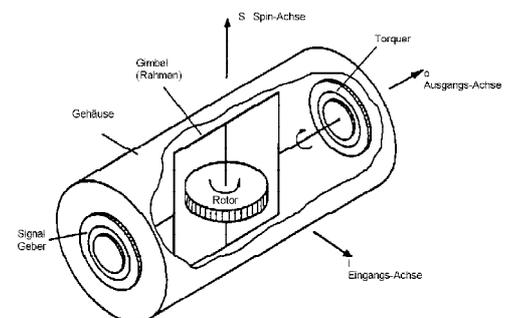


Bild 1:  
Prinzipdarstellung eines einachsigen Wenderatengebers

Seine Funktion ist gleichzeitig das Grundprinzip aller mechanischen Kreisel. Sie lässt sich mit der „U-V-W-Regel“ in einem Rechts-Koordinatensystem beschreiben:

Wird ein Drehmoment auf die Eingangsachse  $i$  ausgeübt (Ursache), versucht der um die Drehachse  $S$  (Vermittler) rotierende Kreisel diesem Moment auszuweichen. Das kann er aufgrund seiner Fesselung nur durch eine Präzession um die Ausgangsachse  $o$  (Wirkung). Das Moment in der Ausgangsachse ist, konstante Rotordrehzahl vorausgesetzt, bei kleinen Auslenkungen von der Ruhelage direkt proportional zur Eingangs-drehgeschwindigkeit.

Ein Gegenmoment wird durch eine Hebel-Feder-Anordnung oder, wie in Bild 1, durch einen Torque-Motor mit Regelschleife aufgebracht. Dieses System hat konstruktionsbedingt eine entscheidende Schwäche:

Die Lagerung der Ausgangsachse  $o$  muss einerseits alle auftretenden Momente und Gewichtskräfte auffangen, also entsprechend stabil sein, andererseits ist  $o$  die sensitive Achse, und die Lager müssen möglichst reibungsfrei

### INERTIALNAVIGATION

Bei der Inertialnavigation werden die translatorischen und die rotatorischen Bewegungen des Fahrzeugs (Schiff, Flugzeug, Auto ...) relativ zu einem inertialen Fixpunkt gemessen. In der Theorie muß dieser Fixpunkt der „Mittelpunkt des Universums“ sein, in erdgebundenen Anwendungen genügt häufig der Mittelpunkt der Erde, wobei allenfalls noch die Rotation der Erde um sich selbst ( $15,041^\circ/h$ ) berücksichtigt werden muß. Die Inertialnavigation erfährt alle Bewegungskomponenten des Fahrzeugs. Sie ermöglicht also eine vollständige Bestimmung von Translation und Rotation. Im Gegensatz dazu liefern die meisten anderen Navigationsformen keinen vollständigen Datensatz, beispielsweise ermöglicht die Koppelnavigation nur eine Bestimmung der Translation in zwei und der Rotation in einer Achse, die Satellitennavigation nur eine Bestimmung der Translation in 3 Achsen.

sein, um Messfehler zu minimieren.

Diese widersprüchlichen Forderungen führen dazu, dass ohne immensen Aufwand bei der Ausführung der Mechnik nur eingeschränkte Mess- und Genauigkeitsanforderungen erreicht werden können. Heute erhältliche SDG haben die folgenden charakteristischen Größen:

- Messbereich bis 3 Dekaden
- Signalbandbreite bis 20 Hz
- Genauigkeit bis 100 °/h

Das Haupteinsatzfeld für diese Systeme sind unterlagerte Drehratenregelungen in Flugzeugen, Schiffen oder auf stabilisierten Plattformen.

Der Parameter „Genauigkeit“, soll hier kurz erläutert werden:

Neben dem aufgelisteten Typ „Bias“ gibt es natürlich noch andere charakteristische Daten wie Messrauschen, Auflösung usw. In den meisten Datenblättern wird der Bias als bestimmende Kenngröße verwendet, da zum einen eine technisch und/oder kommerziell sinnvolle qualitative Kopplung zwischen Bias und den anderen Kenngrößen besteht (je größer der Bias, desto größer auch die anderen Fehler; je ungenauer der Kreisel, desto größer kann die Auflösung sein ...) und zum anderen durch den Bias ein direkter Bezug zum Restfehler einer Drehratenmessung oder zum Genauigkeitspotential einer Inertial-Navigationsanlage mit eben diesen Kreiseln gegeben ist. Die mittlere Positionsdrift einer Inertialplattform ist nämlich annähernd proportional zum Kreiselbias, ein Bias von 1 °/h entspricht einer Drift von etwa 110 km/h.

### 3 Dynamisch abgestimmte Kreisel

Der dynamisch abgestimmte Kreisel, im Englischen als „Dry tuned gyro“, abgekürzt DTG, bezeichnet, umgeht auf elegante Art die o.a. Schwäche des einachsigen Kreisels und

ermöglicht zudem eine Messung in zwei Achsen mit nur einem System. Der Kreisel wird als „trocken“ bezeichnet, weil er prinzipiell ohne Lagerflüssigkeit auskommt. Er wird in den sechziger Jahren entwickelt, und bis etwa Mitte der siebziger Jahre auch in hochgenauen Navigationsanlagen eingesetzt. Sein Haupteinsatzgebiet heute sind die Drehratenmessung mit Genauigkeiten, die auch für eine Kurzzeit-Lagestabilisierung ausreichen.

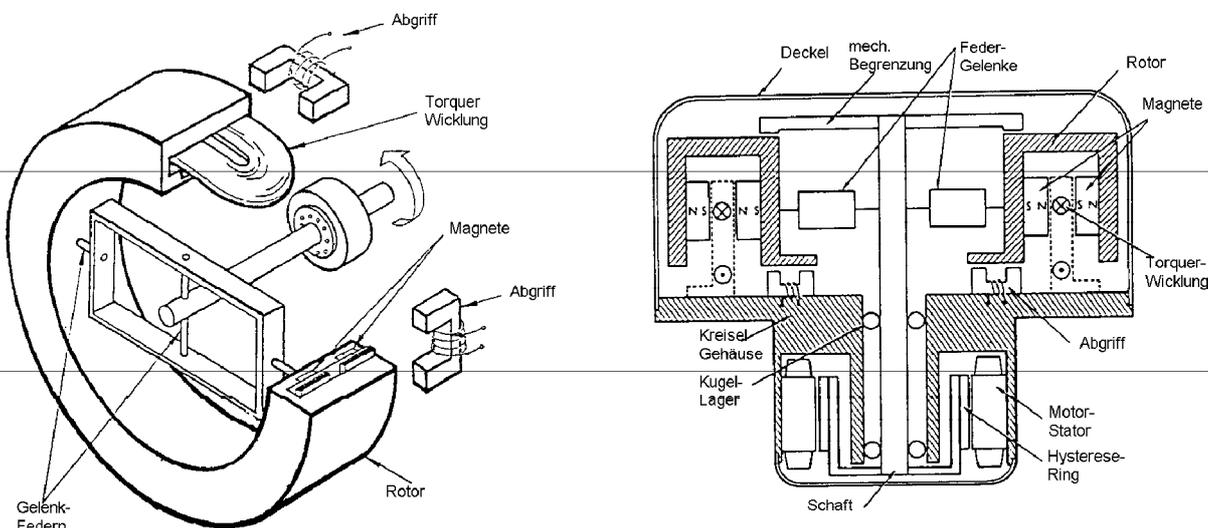
Besonders dann, wenn in genau zwei Achsen gemessen werden muss, wie zum Beispiel bei der Plattform-Stabilisierung, und wenn Gewichts- oder Volumenbeschränkungen eingehalten werden müssen, kann der DTG durchaus noch mit den neueren Entwicklungen konkurrieren. Das Funktionsprinzip des DTG wird in Bild 2 verdeutlicht:

Ein ringförmiger Rotor ist zweiachsig kardanisch aufgehängt, wobei die Kardan-„gelenke“ durch Blattfedern gebildet werden. Der Ring ist damit frei beweglich und vom Antrieb entkoppelt, solange die Auslenkungen um die zentrale Antriebsachse klein bleiben. Im Betrieb wirken auf den Ring die Trägheitsmomente durch die Rotation und durch vorhandene Unwuchten. Dem entgegen stehen die Federmomente der „Gelenke“.

Da die Trägheitsmomente vom Quadrat der Drehzahl  $n$  abhängen, die Federmomente aber konstant sind, ergibt sich bei einer charakteristischen Resonanz-Drehzahl  $N$  ein Gleichgewichtszustand, in dem sich alle auf den Rotor wirkenden Momente aufheben. Der Rotor „schwimmt“ frei im Raum und widersetzt sich jeder aufgezwungen Drehbewegung senkrecht zur Rotorachse.

Durch Torquer wird die relative Lage des Rotors zum Kreiselgehäuse nachgeführt, das dazu notwendige Moment, messbar über den Torquer-Strom, ist ein direktes Maß für die Rate der Gehäusedrehung.

Da bei diesem Kreiselssystem zum einen der Antriebsmotor prinzipiell vom Messmittel



**Bild 2:** Dynamisch abgestimmter Kreisel, links Prinzip, rechts Querschnitt durch eine typische Bauform

(Rotor-Ring) entkoppelt ist und zum anderen der Rotor-Ring nicht durch Lager oder ähnliches in seiner Bewegung in den Messachsen gehindert wird, kann ein Genauigkeitspotential erreicht werden, das im notwendigen Bereich für Navigationsanlagen liegt. Die charakteristischen Größen sind:

- |   |                |
|---|----------------|
| <input type="checkbox"/> Messbereich      | bis 6 Dekaden  |
| <input type="checkbox"/> Signalbandbreite | bis 100 Hz     |
| <input type="checkbox"/> Genauigkeit      | bis unter 1°/h |

#### 4 Der Sagnac Effekt

Die nächste Entwicklungsstufe, der optische Kreislauf, verlässt die Disziplin der klassischen Mechanik mit Drall- und Impulssatz, Coriolisbeschleunigung und Pirouetteneffekt, auch wenn die theoretische Grundlage ursprünglich noch mit ihrer Hilfe gelegt wurde:

Sagnac, ein französischer Physiker, machte im Jahre 1913 mit dem in Bild 3 skizzierten Aufbau das folgende Experiment und zeigte damit den nach ihm benannten „Sagnac-Effekt“:

In einem optischen System wird Licht als Signalträger durch

einen halbdurchlässigen Spiegel getrennt, auf einen geschlossenen Weg einmal „rechts“ und einmal „links“ herum geschickt, wiedervereinigt und auf einer Mattscheibe sichtbar gemacht.

Setzt man diese Anordnung in Rotation, so entstehen auf der Mattscheibe Interferenzerscheinungen, die Sagnac durch Laufzeitunterschiede des mit und gegen die Rotationsbewegung umlaufenden Signals erklärte:

Das in Rotationsrichtung „laufende“ Signal muss einen längeren Weg zurücklegen, da sich während der Umlaufzeit des Signals auch die Mattscheibe als Ort der Signalauswertung weiterbewegt hat. Das entgegen der Rotationsrichtung umlaufende Signal hat einen entsprechend kürzeren Weg.

Es bleibt dem Leser selbst überlassen, mit Hilfe von Bild 4 durch Anwendung der klassischen Formeln für Geschwindigkeit und

Kreisgeometrie sowie der Beziehung zwischen Lichtgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz die Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Drehrate  $\Omega$  der Scheibe zu ermitteln.

Das Ergebnis entspricht (natürlich) dem, was in Physik-Lehrbüchern als Formel für den Sagnac-Effekt geschrieben ist, nur die Interpretation des Effekts als „Die beiden umlaufenden Wege sind unterschiedlich lang, und damit entstehen Laufzeitunterschiede“, die sich hier ergibt, steht im Widerspruch zur allgemeinen und speziellen Relativität von Zeit und Raum. Bei einem materiellen Signalträger, der mit deutlich weniger als Lichtgeschwindigkeit umläuft, ist diese Interpretation allerdings berechtigt.

Der Widerspruch zeigt sich anschaulich darin, dass sich beim klassischen Ansatz die Signalgeschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit der Scheibe grundsätzlich überlagern. Wenn Signal- und Relativgeschwindigkeit dieselbe Richtung haben, muss ein fester Beobachter eine Geschwindigkeit vom Betrage her größer als die Signalgeschwindigkeit sehen, was bei Licht als Trägermedium nach der Einstein'schen Relativitätstheorie nicht möglich ist. (Die Möglichkeit, dass Einsteins Theorien falsch sind und der o.a. klassische Ansatz eventuell doch stimmt, soll hier wegen der bekanntermaßen zur Zeit geringen Akzeptanz in der wissenschaftlichen Welt nicht weiter verfolgt werden.)

Eine richtige(re) Erklärung des Sagnac-Effekts ist mit Hilfe der speziellen Relativitätstheorie möglich und beruht auf der Hypothese, dass relativ zu einem ruhenden System (das absolut gesehen wieder ein bewegtes System sein kann – denn wo ist eigentlich der absolut ruhende Punkt?) in einem bewegten System die Zeit langsamer vergeht.

In der folgenden Ableitung wird eine Möglichkeit der Herleitung der Sagnac-Phase auf der Basis von Potentialen für die Lichtphotonen dargestellt.

Relativität der Zeit:

$$T_B = T_A \sqrt{1 - \frac{\Delta U}{c_0^2}}$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta U}{c_0^2}$$

$$U_{\text{ges}} = U_{\text{grav}} + U_{\text{zentr}}$$

$$U_{\text{zentr}} = \frac{1}{2} \int \omega r \, \rho \, r^2$$

Winkelgeschwindigkeit für ein rechts- bzw. linksläufiges Photon:

$$\omega_{r,l} = r \frac{c_0}{n} \pm \Omega$$

Potential für ein rechts- bzw. linksläufiges Photon:

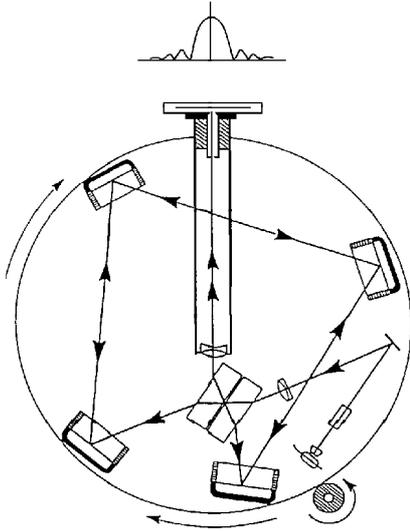


Bild 3: Prinzip des Sagnac'schen Versuchsaufbaus

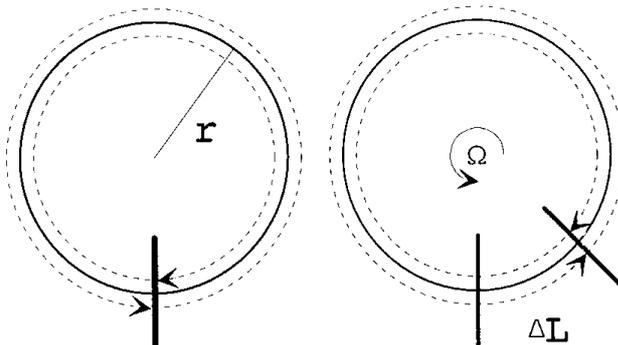
Bild 4: Die klassische Ableitung des Sagnac-Effekts

$$\Delta T = 2 \frac{\Delta L}{c} = \frac{2}{c} v T_0$$

$$= \frac{2v}{c} \int \frac{L}{c} = \frac{2Lr}{c^2} \Omega$$

$$\Omega = \frac{v}{r}$$

$$\Delta j = \omega \Delta T = \frac{4\pi r L}{1c} \Omega$$



$$U_{r,l} = U_{grav} + \frac{1}{2} \left( \frac{c_0}{n} \right)^2 \pm \Omega \left( \frac{c_0}{n} \right)^2 r^2 =$$

$$U_{grav} + \frac{1}{2} \left( \frac{c_0}{n} \right)^2 + \frac{1}{2} \Omega r \left( \frac{c_0}{n} \right)^2 \pm \frac{c_0}{n} \Omega r$$

Sagnacphase:

$$\Delta T = \frac{\Delta U}{c_0^2} T_A = \left( \frac{2}{nc_0} \right) \Omega r \left( \frac{c_0}{n} \right)^2 \frac{n}{c_0} =$$

$$\frac{4P^2}{c_0^2} \Omega = \frac{4A}{c_0^2} \Omega$$

$$\Delta j = 2P \frac{c_0}{I} \Delta T = 8P \frac{A}{I c_0} \Omega$$

Das Ergebnis entspricht exakt dem klassischen Ansatz, die Interpretation lautet jedoch: „Das entgegen dem Drehsinn der Scheibe umlaufende Licht bewegt sich in einem stärker bewegten System. Es ist nach einem Umlauf somit **jünger** als das mit dem Drehsinn umlaufende und hat damit eine andere Phasenlage.“

## 5 Optische Kreisel

Mit dem Sagnac-Effekt ist zwar die theoretische Basis gelegt, eine direkte Umsetzung des Prinzips in die Praxis stößt aber zunächst auf Schwierigkeiten:

Der Sagnac'sche Versuchsaufbau hat eine Masse von über 80 kg und kann eine Drehrate von 15.000 °/s (entspr. 2.500 U/min) erfassen, ein Versuch zur Messung der Erddrehrate (in unseren Breiten beträgt die parallel zum Erdlot messbare Komponente etwa 12 °/h) erfolgte 1923 in England mit einer Anordnung, die 400 m Kantenlänge hatte.

Das alles sind Dimensionen, die sich nicht unbedingt für einen Einsatz als miniaturisierter, hochauflösender Drehratensensor eignen.

Erst eine weitere Erfindung aus den späten fünfziger Jahren, der Laser (übrigens neben dem Rad und der Kernspaltung eine der wenigen menschlichen Erfin-

dungen, für die es kein Pendant in der Natur gibt), macht den Sagnac-Effekt praktisch nutzbar.

Es entstehen zwei unterschiedliche Bauformen für optische Kreisel, der Ringlaser-Kreisel, kurz RLG, und der faseroptische Kreisel, FOG. Der prinzipielle Aufbau beider Formen ist in Bild 5 dargestellt.

Die ältere der beiden Bauformen ist der RLG. Seine Entwicklung beginnt Anfang der sechziger Jahre mit dem Ziel, ihn in hochgenauen Navigationsanlagen einzusetzen und damit die aufwendigen mechanischen Kreisel

**ZUM VERGLEICH:** Um Qualitäten wie ein optischer Kreisel zu erreichen, müsste eine Mikrometerschraube mit einer Auflösung von 10 mm eine Spannweite von 10 km und ein Voltmeter mit 10 V Meßbereich eine Auflösung von 3 nV haben.

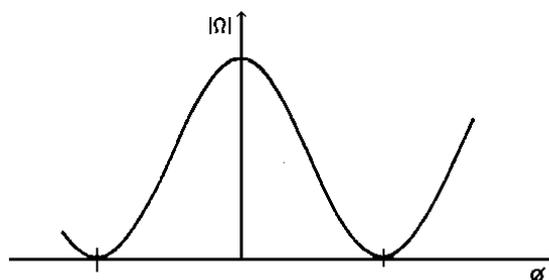
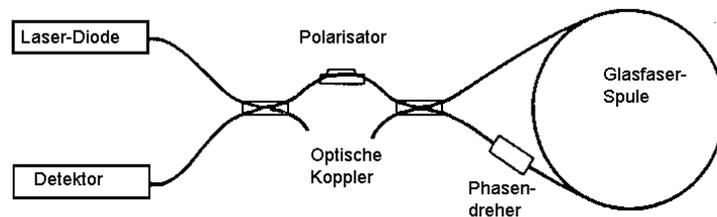
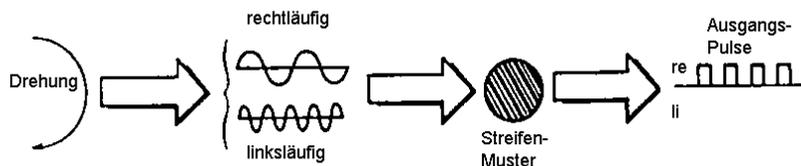
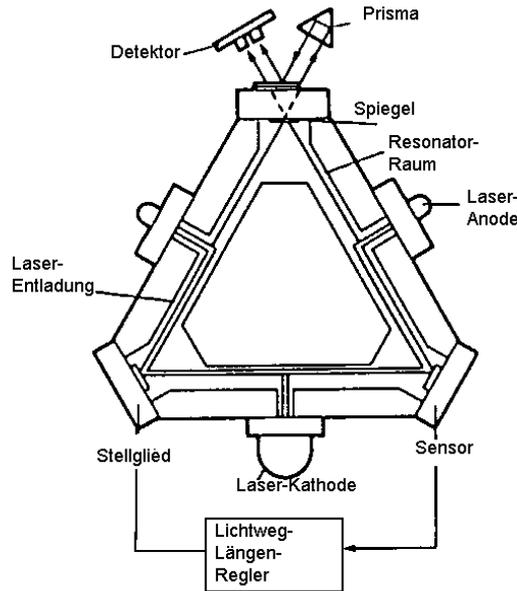


Bild 5: Prinzipdarstellung der optischen Kreisel, oben: Ringlaser, unten: faseroptischer Kreisel

in diesen Anwendungen zu ersetzen.

Im RLG dient ein Glasprisma als Ring-Resonator für den Laser. Die beiden im Resonator umlaufenden Laserwellen sind besonders empfindlich gegenüber einer Drehung des Prismas. Sie reagieren darauf mit signifikanten Frequenzänderungen, die Frequenz der im Drehsinn umlaufende Welle wird erniedrigt, die Frequenz der gegen den Drehsinn laufenden Welle wird erhöht. An der Auswerteeinheit erscheint dies als durchlaufendes Streifenmuster, wobei die pro Zeiteinheit gezählten Hell-Dunkel Phasen ein direktes Maß für die zu messende Drehrate sind.

Obwohl das Prinzip des faseroptischen Kreisels wesentlich näher am Sagnac'schen Experiment liegt, wird er erst etwa zehn Jahre nach dem RLG serienreif, da zu seiner Verwirklichung neben der Laser- (Halbleiterlaser) auch die Glasfasertechnik weit genug fortgeschritten sein musste.

Der Lichtweg im FOG wird durch eine Glasfaserspule von bis zu 1.000 m Länge verlängert, damit sich das gewünschte Verhältnis von Messgenauigkeit und Auflösung auf der einen und den Fertigungskosten und Volumen auf der anderen Seite einstellt. Aufgrund technischer Grenzen (u.a. optische Dämpfung) sind 1.000 m Faserlänge zur Zeit das Maximum.

Das Genauigkeitspotential des FOG ist deutlich kleiner als das des RLG. Die technisch machbare obere Genauigkeits-Schranke des FOG liegt zur Zeit im Bereich der kommerziell

noch sinnvollen unteren Genauigkeitsschranke des RLG. Die charakteristischen Größen der optischen Kreisel sind:

□ Messbereich	bis 9 Dekaden
□ Signalbandbreite	über 500 Hz
□ Genauigkeit	FOG: 1 °/h RLG: < 0,001 °/h

Damit sind die optischen Kreisel mit Abstand diejenigen Messsysteme mit den umfassendsten Messqualitäten.

Optische Kreisel werden in hochgenauen Lagereferenz-Systemen, in der Navigation und in der Astrophysik eingesetzt. Aufgrund der zulässigen hohen Signaldynamik eignen sie sich besonders für „Strap-Down“-Navigationsanlagen.

Bei der Strap-Down Technologie werden die Beschleunigungsmesser zur Erfassung der translatorischen Bewegung nicht mehr durch eine mechanische Plattform vom Fahrzeug entkoppelt, sondern fest damit verbunden. Die Transformation der Messgebersignale aus dem fahrzeugfesten- in das Navigationskoordinaten-System erfolgt durch Rechnung. Voraussetzung hierfür ist die genaue, verzögerungsfreie Erfassung aller Drehbewegungen des Fahrzeugs in einem weiten Frequenzbereich.

## 6 Vibrations-Kreisel

Die Vibrationskreisel bilden die zur Zeit neueste Entwicklung auf dem Sektor der Drehratensensoren.

Auch wenn es auf den ersten Blick nicht so scheint, so nutzen sie, im Gegensatz zu den optischen Kreiseln, wieder die Effekte, die bereits bei den klassischen Kreiseln Anwendung finden. Das Prinzip der Vibrationskreisel (engl. Vibrating structure gyro, VSG) zeigt Bild 6.

Ein stabförmiger Quader wird in einer Ebene zur Schwingung angeregt. Sobald der Stab um seine z-Achse dreht, wird durch den Coriolis-Effekt ein Moment senkrecht zur anregenden Schwingung induziert. Bei entsprechender

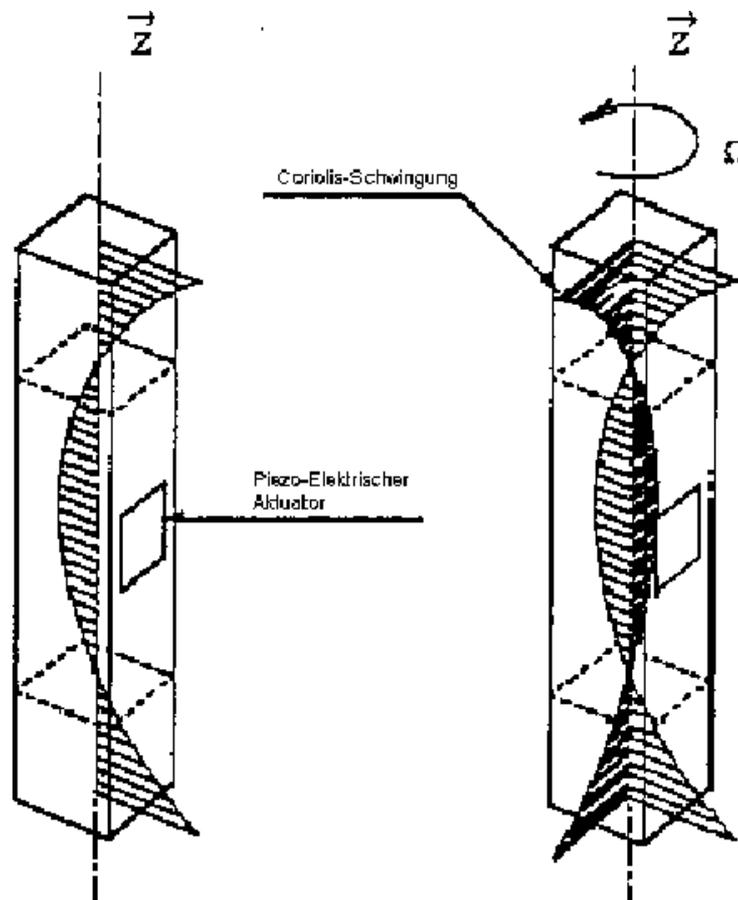


Bild 6:  
Funktionsprinzip eines  
Vibrationskreisels

Stab-Geometrie führt dies zu einer messbaren Schwingung in dieser Ebene, deren Amplitude ein Maß für die Drehrate  $\Omega$  ist.

Kennzeichnend für den VSG mit Stabstruktur und die davon abgeleiteten Bauformen ist, dass Antriebs- und Messebene entkoppelt sind und körperfest fixiert bleiben. Das ermöglicht prinzipiell eine saubere Trennung von „Antriebs“- und Messsignalen.

Das Messelement wird in den zur Zeit erhältlichen Systemen durch ein Piezo-Kristall gebildet. In der Entwicklung befinden sich mikromechanische Systeme auf Siliziumbasis. Da das Messverfahren auf einer absoluten Amplitudenmessung beruht, sind der Genauigkeit dieser Bauformen prinzipiell Grenzen gesetzt.

Anders ist dies bei Bauformen mit kreis-symmetrischem Vibrationskörper. Diese Bauart wird in Anlehnung an die Form des Vibrationskörpers als „Weinglaskreisel“ bezeichnet, international gebräuchlich ist die Kurzform HRG. Beim HRG wird keine Amplitude, sondern die Lage von Schwingungs-Knoten (Null-durchgänge) relativ zum Vibrationskörper bestimmt. Bei einer äußeren Drehung bleiben diese nämlich nicht ortsfest auf dem Körper sondern „wandern“ proportional zum Drehwinkel.

Die räumliche Ermittlung von Schwingungsknoten ist prinzipiell mit hoher Genauigkeit möglich, und so hat der HRG ein Genauigkeitspotential, das bis in den Bereich der RLG reicht. Der „Antrieb“ dieser Systeme ist allerdings problematisch, da eine vollständige Entkopplung von Antriebs- und Messschwingung nur dann möglich ist, wenn der Schwingungskörper während des Messvorgangs frei, ohne Beeinflussung durch eine äußere Anregung, schwingt.

Die charakteristischen Größen der Vibrationskreisel (ohne HRG) sind:

- Messbereich            über 3 Dekaden
- Signalbandbreite    bis zu 500 Hz
- Genauigkeit            10 °/h

Damit decken diese Systeme zumindest den Genauigkeitsbereich der einachsigen mechanischen Kreisel mehr als ab und sind dabei wesentlich billiger in der Herstellung. Es ist daher abzusehen, dass der klassische SDG und vermutlich auch der DTG in naher Zukunft durch Vibrationskreisel vom Markt verdrängt werden.

## 7 Zusammenfassung

In der ersten Hälfte in der Geschichte des Kreisel-Messgebers beherrschen mechanische Systeme das Feld. Erst vor knapp 40 Jahren, als die Genauigkeit der Mechanik an ihre Grenzen stieß, wurden mit den optischen Kreiseln

andere Messverfahren eingeführt.

Interessanterweise findet die Entdeckung des dabei zugrundeliegenden Sagnac-Effekts etwa zur selben Zeit statt wie der erste kommerzielle Einsatz von Kreiseln als Messgeber.

Eine Erweiterung der Produktpalette hin zu einfachen, billigen Systemen erfolgte in den letzten 20 Jahren durch die Einführung neuer Technologien und Fertigungsmethoden. Dadurch erweiterte sich auch das Anwendungsspektrum – Kreisel finden Eingang in Geräten des täglichen Gebrauchs.

Heute reicht das Spektrum von hochpräzisen Systemen für Navigationseinheiten mit Stückpreisen von mehreren hundert TDM bis hin zu Massenprodukten, die weniger als zehn DM pro Einheit kosten.

Diese Entwicklung ist noch längst nicht abgeschlossen. Sie dürfte mit der kommerziellen Nutzbarmachung von mikromechanischen VSG in naher Zukunft fortschreiten. Damit ist es möglich, ein komplettes System – Sensor, Leistungs- und Auswerteelektronik – in einem Siliziumchip zu integrieren.

In einigen Jahren liegt dann vielleicht die Hauptaufgabe der Sensorentwicklung darin, möglichst viele Messprinzipien in die Erfassung von Drehraten zu überführen, da der mikromechanische VSG das optimale Messmittel schlechthin – klein, robust, billig, genau, in Massen verfügbar, ... – geworden ist.