

Faserkreisel : eine neue Messmethode für Drehbewegungen

Autor(en): **Petermann, K.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **73 (1982)**

Heft 3

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904929>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Faserkreisel – eine neue Messmethode für Drehbewegungen

K. Petermann

1. Einleitung

Das Messen absoluter Bewegungen ist nur bei beschleunigten Bewegungen möglich. So ist es beispielsweise aufgrund der speziellen Relativitätstheorie nicht möglich, messtechnisch festzustellen, ob man sich in einem gleichförmig bewegten System befindet oder nicht. Im Gegensatz dazu ist das Messen absoluter Drehungen möglich, so dass sich mit einem solchen Gerät beispielsweise die Erddrehung absolut messen lässt. Von grosser Bedeutung sind derartige Drehgeschwindigkeitssensoren für Navigationssysteme, denn aus der Messung der Drehgeschwindigkeit lässt sich der Drehwinkel und damit die Winkellage eines Fahrzeuges bestimmen. Messgeräte für Drehbewegungen werden auch als Kreisel bezeichnet. «Kreisel» deswegen, weil zum Bestimmen der Winkellage derzeit nahezu ausschliesslich mechanische Kreisel verwendet werden, bei denen eine Masse auf hohe Drehzahlen gebracht wird. Ein solcher Kreisel hat das Bestreben, seine Achsrichtung im Raum beizubehalten. Wird diese einer Drehbewegung ausgesetzt, so müssen Kräfte auf sie ausgeübt werden. Aus den gemessenen Kräften lässt sich dann die Drehgeschwindigkeit ableiten.

Aufgrund des grossen Fortschritts der optischen Nachrichtentechnik und insbesondere der Lichtleitfasertechnik in den vergangenen Jahren ist es möglich geworden, mit einem gänzlich anderen Prinzip Drehbewegungen zu messen. Man gelangt so zum sog. *Faserkreisel*, der gegenüber einem mechanischen Kreisel bedeutende Vorteile hat:

- keine mechanisch bewegten Teile,
- hohe Lebensdauer, da kein Verschleiss,
- unempfindlich gegenüber Erschütterungen,
- kurze Einschaltzeit,
- Herstellung möglich mit Komponenten der optischen Nachrichtentechnik,
- kompakter Aufbau mit integrierter Optik möglich.

2. Funktionsweise

Die Funktionsweise des Faserkreisels beruht auf dem *Sagnac-Effekt*, der mit Hilfe von Figur 1 näher erläutert werden soll.

Das Licht einer Lichtquelle S wird über einen optischen Strahlteiler T in beide Enden eines geschlossenen Lichtweges eingekoppelt, der eine Fläche A umschliesst. Nach Durchlaufen des Lichtweges interferieren die beiden Lichtstrahlen wieder an T, und dieses Interferenzsignal wird vom Detektor D erfasst. Für die Messung der Drehrate wird ausgenutzt, dass der sich in Drehrichtung ausbreitende Lichtstrahl eine geringfügig längere Zeit braucht, um wieder zum Strahlteiler T zu gelangen, als der sich entgegengesetzt zur Drehrichtung ausbreitende Lichtstrahl.

Dieser Laufzeitunterschied Δt ist selbst bei grossen umschlossenen Flächen A des Lichtweges ausserordentlich klein. Soll beispielsweise die Erddrehrate ($\Omega = 15^\circ/\text{h}$) gemessen werden, so ergibt sich selbst bei einer relativ grossen umschlossenen Fläche von $A = 1000 \text{ m}^2$ ein Laufzeitunterschied von nur

$3 \cdot 10^{-18} \text{ s}$. Es scheint auf den ersten Blick nahezu unmöglich, derart kleine Zeitunterschiede zur zuverlässigen Messung von Drehraten heranzuziehen.

Es sind jedoch aufgrund der Interferenz zwischen den beiden umlaufenden Lichtstrahlen am Strahlteiler T auch sehr kleine Laufzeitunterschiede messbar. Die unterschiedlichen Laufzeiten bewirken nämlich, dass die optischen Phasen der beiden am Strahlteiler T interferierenden Wellen nicht exakt übereinstimmen, sondern einen Phasenunterschied $\Delta\varphi$, den sog. *Sagnac-Phasenunterschied*, zueinander aufweisen. Durch dessen Messung lassen sich sehr kleine Laufzeitunterschiede bestimmen, wobei man für den als Beispiel angegebenen Wert für Δt bei einer Lichtquelle im nahen Infrarot ($\lambda \approx 800 \text{ nm}$) einen Phasenunterschied von ca. $\Delta\varphi = 0,4^\circ$ erhält. Dieser kleine Phasenunterschied ist mit modernen Methoden messbar, so dass damit auch eine so kleine Drehgeschwindigkeit bestimmbar wird.

Bereits vor mehr als 50 Jahren war es *Michelson* und *Gale* [1] gelungen, mit einem Aufbau entsprechend Figur 1 die Erddrehrate nachzuweisen. Es wurde ein rechteckiger Aufbau mit Kantenlängen von ca. 600 m und ca. 300 m verwendet, so dass sich eine sehr grosse umschlossene Fläche A von ca. 200000 m² ergab. Aufgrund der für eine hohe Empfindlichkeit notwendigen grossen Abmessungen des Aufbaus war aber an ein technisches Messinstrument für Drehbewegungen nicht zu denken. Dies änderte sich mit dem Erfolg der optischen Nachrichtentechnik und insbesondere der Lichtleitfaser-Technologie.

Heutige Lichtleitfasern weisen im nahen Infrarot ($\lambda = 0,8 \mu\text{m} \dots 0,9 \mu\text{m}$) Dämpfungswerte von nur 2...3 dB/km auf, d.h., nach 1 km Faserlänge sind noch etwa 50 % bis 60 % des eingekoppelten Lichtes vorhanden. Bei längeren Wellen beträgt die Dämpfung nur noch Bruchteile von einem dB/km. Lichtleitfasern lassen sich infolge ihres geringen Durchmessers und ihrer Flexibilität in grossen Längen auf Spulen kleiner Abmessungen wickeln, so dass sich bei kompakter Anordnung lange Lichtwege realisieren lassen. In dieser Form ist der sog. *Faserkreisel* (Fig. 2) aufgebaut. Entscheidend ist dabei die Faserspule mit der Windungsfläche A_F und n Windungen, wobei n sehr gross sein kann. Die Anordnung entspricht damit

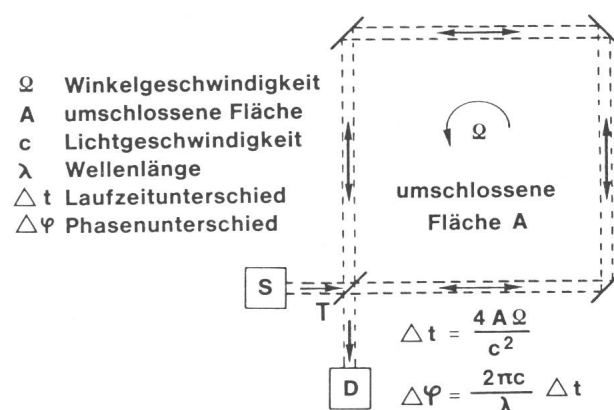


Fig. 1 Funktionsweise des Faserkreisels nach dem Sagnac-Effekt

Dieser Aufsatz entspricht dem Fachreferat am Technischen Presse-Colloquium von AEG-Telefunken am 8./9. Oktober 1981.

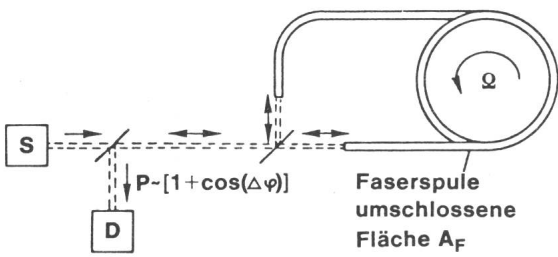


Fig. 2 Prinzip eines Faserkreisels

im wesentlichen der Figur 1, nur wird jetzt die Fläche nicht nur einmal, sondern n -mal umschlossen. Die für den Sagnac-Effekt wirksame Fläche A ist deshalb beim Faserkreisel durch das Produkt der Spulenfläche A_F und der Windungszahl n gegeben, so dass sich bei genügend grosser Windungszahl n auch bei kompakten Aufbauten eine grosse Empfindlichkeit ergibt. Mit der Verfügbarkeit von dämpfungsarmen Lichtleitfasern eröffnet sich damit die Möglichkeit, kompakte störunanfällige Sensoren zum Messen von Drehungen bereitzustellen.

3. Besondere Probleme

Der Aufbau gemäss Figur 2 bringt aber noch einige Probleme:

- Die am Photodetektor D empfangene Lichtintensität ist proportional zu $\cos(\Delta\varphi)$. Zum hochempfindlichen Messen kleiner Drehraten müssen sehr kleine Phasenunterschiede $\Delta\varphi$ zuverlässig detektiert werden. Dabei ändert sich aber der $\cos(\Delta\varphi)$ und damit die optische Leistung nur proportional zu $(\Delta\varphi)^2$, so dass kleine $\Delta\varphi$ nur schlecht gemessen werden können.

- Zum zuverlässigen Ermitteln des Sagnac-Phasenunterschiedes darf eine Interferenz nur zwischen den beiden die Spule entgegengesetzt durchlaufenden Lichtwellen auftreten. Jede weitere Interferenz, wie sie beispielsweise aufgrund einer unerwünschten Reflexion innerhalb der Faserspule auftreten kann, führt zu einem Fehler des detektierten Sagnac-Phasenunterschiedes.

- Es ist wichtig, dass das Licht beim Durchgang durch die Faserspule in beiden Richtungen *exakt* den gleichen Weg durchläuft. Zwar werden für Faserkreisel einwellige Fasern verwendet, aber auch diese gestatten die Lichtausbreitung in beiden Polarisationszuständen. Sind die beiden die Faserspule entgegengesetzt durchlaufenden Wellen unterschiedlich polarisiert, sind die durchlaufenen Wege nicht mehr gleich, und der Sagnac-Phasenunterschied wird fehlerhaft ausgelesen.

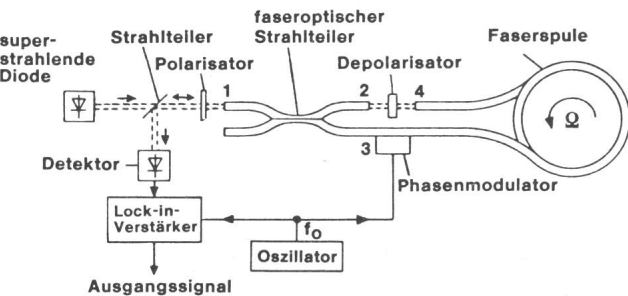


Fig. 3 Realisierter Aufbau des Faserkreisels

3.1 Empfindlichkeit

Die geschilderten Probleme wurden mit einem speziellen Aufbau gelöst (Figur 3). Um eine höhere Empfindlichkeit auch bei kleinen Drehraten zu erzielen, wird an der Faserspule ein Phasenmodulator angeordnet, der mit einem sinusförmigen Signal der Frequenz $f_0 \approx 120$ kHz angesteuert wird und die Phase der Lichtwelle in der optischen Faser moduliert. Durch die Phasenmodulation wird auch die optische Leistung am Photodetektor moduliert, und zur Signalgewinnung wird mit Hilfe eines Lock-in-Verstärkers die Signalkomponente bei f_0 detektiert. Das sich am Ausgang ergebende Signal ist proportional zu $\sin(\Delta\varphi)$ und damit auch für kleine Phasenunterschiede proportional zur Drehrate. Auf diese Weise ergibt sich auch für sehr kleine Drehraten eine hohe Empfindlichkeit.

3.2 Interferenzen

Als Lichtquelle wird eine superstrahlende Diode verwendet. Eine derartige Diode nimmt eine Mittelstellung zwischen einer gewöhnlichen lichtemittierenden Diode (LED) und einem Halbleiterlaser ein: In der Richtcharakteristik gleicht sie einem Halbleiterlaser, in der Kohärenzlänge einer gewöhnlichen LED. Die Spektralbreite der im Forschungsinstitut verwendeten superstrahlenden Diode beträgt etwa 8 bis 10 nm und ist damit erheblich grösser als die Spektralbreite eines Halbleiterlasers. Eine grosse Spektralbreite entspricht einer geringen Kohärenz und damit einer geringen Kohärenzzeit. Wird eine Lichtquelle geringer Kohärenz verwendet, lassen sich Interferenzen nur dann messen, wenn sich die Laufzeiten der interferierenden Strahlen um weniger als die Kohärenzzeit der Lichtquelle voneinander unterscheiden. Da der Laufzeitunterschied zwischen den beiden die Spule entgegengesetzt durchlaufenden Wellen ausserordentlich gering ist, ist die Ermittlung des Sagnac-Phasenunterschiedes auch bei Verwendung sehr inkohärenter Lichtquellen möglich. Auf diese Weise lässt sich das Interferenz-Problem weitgehend vermeiden. Die aufgrund beispielsweise von Reflexionen unerwünscht interferierenden Wellen haben im allgemeinen relativ grosse Laufzeitunterschiede. Wenn die Kohärenzzeit der Lichtquelle kurz ist gegenüber diesen Laufzeitunterschieden, treten die unerwünschten Interferenzen nicht mehr in Erscheinung, und es wird nur der Sagnac-Phasenunterschied gemessen.

3.3 Polarisation

Um das Problem unterschiedlicher Polarisation auszu-schalten, wird durch den Polarisator ein Polarisationszustand fest vorgegeben. Damit stellt sich auch an den Toren 2, 3 und schliesslich an 4 jeweils ein bestimmter Polarisationszustand ein. Die Lichtleistung am Photodetektor hängt vom Übereinstimmungsgrad der Polarisationszustände an 2, 4 ab, und jede Änderung des Übereinstimmungsgrades führt zu einer Änderung der Signalleistung. Um nun den Übereinstimmungsgrad konstant zu halten, wird zwischen 2, 4 ein Depolarisator angeordnet, der polarisiertes Licht gleichmässig auf alle Polarisationszustände verteilt. Durch diese gleichmässige Verteilung wird genau ein Übereinstimmungsgrad von $1/2$ erreicht. Damit wird die Signalleistung am Detektor unabhängig von Polarisationsdrehungen innerhalb der Faserspule.

4. Messungen an einem Laboraufbau

Nach diesem Prinzip wurde ein Faserkreisel gebaut mit einem Spulendurchmesser von 20 cm und einer Faserlänge von



Fig. 4 Laboraufbau des Faserkreisels

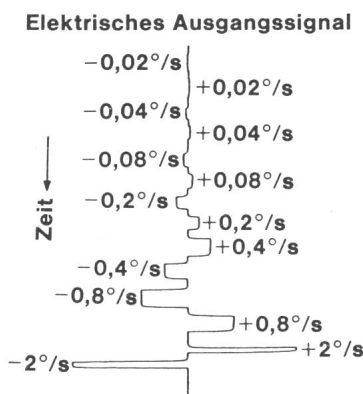


Fig. 5 Ausgangssignal des Faserkreisels für verschiedene Drehraten

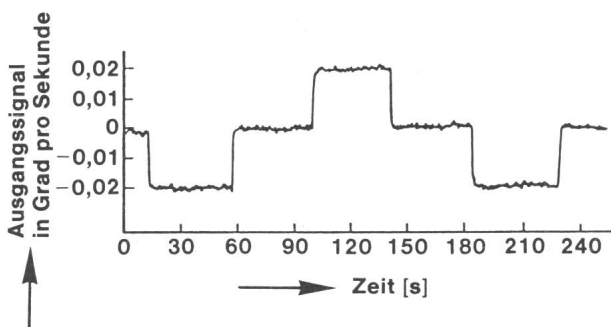


Fig. 6 Ausgangssignal des Faserkreisels für Drehraten von $0,02^\circ/\text{s}$

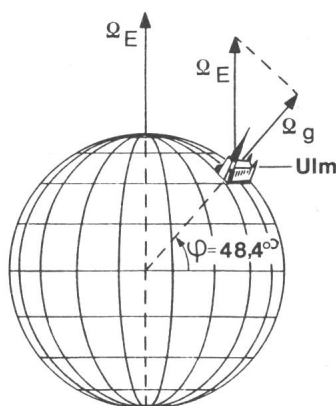


Fig. 7 Erddrehbewegung am Messort Ulm

800 m, so dass sich insgesamt eine umschlossene Fläche von $A = 40 \text{ m}^2$ ergibt. Einen Laboraufbau eines solchen Kreisels zeigt Fig. 4. Die Grösse ist dabei im wesentlichen durch den Durchmesser der Faserspule gegeben.

Mit diesem Faserkreisel sind Drehraten über einen grossen Drehratenbereich bestimmbar. Das Ausgangssignal des Faserkreisels für Drehraten von bis zu $\pm 2^\circ/\text{s}$ zeigt Fig. 5. Das Ausgangssignal ist sehr stabil, so dass eine zuverlässige Messung von Drehungen möglich wird. Selbst die kleinste in Fig. 5 gezeigte Drehrate von $\pm 0,02^\circ/\text{s}$, was $\pm 72^\circ/\text{h}$ entspricht, ist noch mit grosser Zuverlässigkeit bestimmbar. Diese Drehrate entspricht ungefähr der $2\frac{1}{2}$ -fachen Drehgeschwindigkeit des kleinen Zeigers einer Uhr.

Zur Demonstration der Messempfindlichkeit ist der Aufbau auf einen Drehtisch montiert worden, der nach rechts (–) oder links (+) gedreht werden kann. In grösserer Auflösung zeigt Fig. 6 das Ausgangssignal, wobei der Drehtisch zunächst auf $-0,02^\circ/\text{s}$ und dann nach einer Pause auf $+0,02^\circ/\text{s}$ und zurückgeschaltet wird. Der genauen Ermittlung dieser Drehrate werden Grenzen durch Rauschen gesetzt, das dem Nutzsignal überlagert ist. In Fig. 6 beträgt die mittlere Rauschamplitude $0,00035^\circ/\text{s}$ bzw. $1,25^\circ/\text{h}$. Dieser Wert ist bereits um mehr als eine Grössenordnung geringer als die Erddrehrate, so dass diese sicher bestimmbar wird.

Die Empfindlichkeit eines Faserkreisels anschaulich zu demonstrieren, ist schwierig, da derart kleine Drehraten vom Auge nicht mehr wahrgenommen werden können.

In einem weiteren Versuch wurde der Faserkreisel mit Hilfe eines Drehtisches zunächst einer Drehrate von $1440^\circ/\text{h}$ ($= 0,4^\circ/\text{s}$) unterworfen, was der vierfachen Drehgeschwindigkeit des grossen Uhrzeigers entspricht. Diese Drehgeschwindigkeit ist vom Auge noch deutlich wahrnehmbar, und selbstverständlich wird sie auch vom Faserkreisel deutlich erfasst. Wird die Drehrate um den Faktor 10 auf $144^\circ/\text{h}$ reduziert, ist sie mit dem Auge kaum noch zu erkennen. Der Faserkreisel liefert aber weiterhin ein deutliches Signal. Bei einer weiteren Verringerung der Drehrate auf $14,4^\circ/\text{h}$ wird immer noch ein deutliches Signal detektiert. Allerdings ist dann auch bei stillstehendem Faserkreisel noch ein Signal vorhanden. Dieses Signal ist auf die Erddrehung zurückzuführen. Bei der Messung wird jedoch nicht die gesamte Erddrehrate Ω_E wirksam, sondern nur deren Komponente Ω_g (Fig. 7). Diese Komponente der Erddrehrate ergibt sich in Ulm, dem Versuchsort mit einer geographischen Breite von $48,4^\circ$, zu $11,2^\circ/\text{h}$. Auf der Nordhalbkugel ist dies eine Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn, so dass sie durch Drehen des Drehtisches von $14,4^\circ/\text{h}$ im Uhrzeigersinn weitestgehend kompensiert wird. Es verbleibt nur eine Restdrehung von ca. $3^\circ/\text{h}$.

Die Erddrehung ist also mit Hilfe eines Faserkreisels sicher nachzuweisen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass der Faserkreisel zukünftig eine ernsthafte Konkurrenz für konventionelle Kreisels darstellen kann.

Literatur

- [1] A. A. Michelson, H. G. Gale and F. Pearson: Effect of earth's rotation on velocity of light. *Astrophysical Journal* 61(1925)4, p. 140...145.

Adresse des Autors

Dr.-Ing. Klaus Petermann, AEG-Telefunken, Forschungsinstitut Ulm, Sedanstrasse 10, D-7900 Ulm.