

Qualifizierung von Drehratensensoren für Fahrzeugnavigationssysteme

Harald Sternberg und Christian Schwalm

Zusammenfassung

Navigationssysteme werden verstärkt in komplexe Fahrerassistenzsysteme eingebunden, die ihre Informationen an aktive und passive Systeme weitergeben. In der Folge steigen die Anforderungen an die Navigationssysteme hinsichtlich der Genauigkeit und Zuverlässigkeit, so dass zusätzliche, qualifizierte Sensoren für eine zuverlässige Bestimmung der gefahrenen Trajektorie benötigt werden. Dieser Artikel beschäftigt sich ausschließlich mit dem Qualifizierungsprozess für mikromechanische Kreisel, da die auf dem Markt erhältlichen Systeme sich signifikant im Hinblick auf Preis und Qualität unterscheiden und nur schwer zu vergleichen sind, da die relevanten Parameter von den Herstellern unterschiedlich definiert werden. Um die Sensoren gegenüberstellen zu können, müssen sie in einheitlichen Testverfahren unter realistischen kinematischen Umweltbedingungen qualifiziert werden. Sensorfehler und -verhalten, mögliche Störquellen und Kalibrierungsprozeduren werden diskutiert und angemessene Testreihen und Verarbeitungsmethoden werden aufgezeigt.

Summary

Navigation systems of the future will be integrated in a complex network of driver assistance systems, providing navigation data to several active and passive systems. With respect to this development, requirements concerning navigation accuracy and reliability grow rapidly. Hence, systems utilize additional qualified sensors for a reliable determination of the travelled trajectory. This paper focuses on the qualification process for micromechanical gyroscopes. The market provides various rate sensors with big differences in costs and quality. It is difficult to compare the sensors only with respect to the information in the manufacturers' data sheet because the relevant sensor parameters are differently defined. In order to make different sensors comparable, they have to be qualified using unified test series, exposing the sensors to realistic kinematic and environmental working conditions. Sensor errors and behaviour, potential disturbance sources and calibration procedures are discussed, and suitable test series and processing methods are presented.

1 Einleitung

Die Entwicklung von Fahrzeugnavigationssystemen geht bis in die 70er-Jahre zurück. Im August 1981 brachte Honda mit dem *Electro Gyrocompator* das weltweit erste Fahrzeugnavigationssystem auf den Markt, ein reines *Dead Reckoning*-System, das die Fahrzeugposition auf eine halbtransparente Karte projizierte (Honda 2006). Wenig

später wurden die ersten Navigationssysteme mit digitaler Karte entwickelt. So stellte Blaupunkt im Jahre 1983 den Prototyp eines digitalen Navigationssystems vor, den *Elektronischen Verkehrsleitsen für Autofahrer*, kurz EVA. Es folgte der 1989 serienreife *Blaupunkt TravelPilot IDS*, das erste Navigationssystem in Europa (Bosch 2005). Das Fehlen hinreichend flächendeckender Kartendaten und eines geeigneten Massenspeichers führte dazu, dass sich diese frühen Systeme bis Mitte der 90er-Jahre nicht durchsetzen konnten.

Auch nach der Einbindung des Global Positioning Systems (GPS) in die Sensorik ist heutzutage weiterhin der Einsatz der klassischen Navigationssensoren Gyroskop und Odometer in der Fahrzeugnavigation begründet. Diese ermöglichen eine genauere Bestimmung der Fahrzeugposition und ein zuverlässigeres *Map Matching*, insbesondere dann, wenn Empfangsprobleme im städtischen Bereich (Abschattungen, Multipath) die GPS-Navigation stören. Erst durch eine gegenseitige Stützung der verschiedenen Sensoren können optimierte Navigationsergebnisse erzielt werden.

Fahrzeugnavigationssysteme der Zukunft werden immer mehr zur Schnittstelle zwischen Mensch und Fahrzeug, die durch die Berücksichtigung jeweiliger Verkehrs-, Wetter- und Straßensituationen dem Fahrer bei der Entscheidungsfindung helfen bzw. diesem die Entscheidungsfindung weitgehend abnehmen. Diese Entwicklung macht deutlich, dass Fahrzeugnavigationssysteme nicht mehr nur den Fahrer entlasten, sondern darüber hinaus aktiv sicherheitsrelevante Informationen bzw. Warnungen kommunizieren und zur Unfallvermeidung beitragen können. Sie erhalten stetig mehr den Charakter von informativen Fahrerassistenzsystemen.

Zukünftig ist eine zunehmende Vernetzung der einzelnen Assistenzsysteme zu erwarten. Eine gemeinsame Auswertung sämtlicher relevanter Sensordaten sowie ein sinnvolles Zusammenwirken mehrerer Systeme ohne gegenseitige Beeinträchtigung können die Leistung eines Systems und somit die Fahrsicherheit deutlicher steigern, als wenn jedes System eigenständig arbeitete (Bachmann und Bujnoch 2001). So ist es in Zukunft denkbar, dass anhand der Navigations-, Wetter- und Fahrdynamikdaten bei zu schneller Näherung an eine enge Kurve eine Warnung ausgegeben und gegebenenfalls über einen Bremsassistenten automatisch in die Situation eingegriffen wird. In Anbetracht dessen steigt der Anspruch an die Produktqualität. Obwohl sich einzelne Sensoren im Zuge der Vernetzung gegenseitig stützen, können sich qualitative Mängel auch direkt auf die Verkehrssicherheit auswirken. Daneben liegt eine gründliche Qualitätssicherung

alleine schon aus rein wirtschaftlichen Gründen und zur Pflege eines Renommées nahe, bevor ein Produkt an den Kunden ausgeliefert wird.

Qualitätssicherung bezieht sich auf sämtliche Bestandteile eines Systems: die Navigationssensorik, die Datenbanken, die Software und die verwendeten elektronischen Komponenten. Um darzulegen, ob eine Komponente die für die Fahrzeugnavigation festgelegten Qualitätsanforderungen erfüllt, wird sie einem umfangreichen Qualifizierungsprozess unterzogen, wie dieser in der Norm ISO 9000:2005 oder anderweitigen speziellen Normen beschrieben wird (vgl. z.B. International Organization for Standardization). Dieser Beitrag beschäftigt sich intensiv mit dem Qualifizierungsprozess im Bereich der Drehratensensoren. Eingeschlossen sind neben wirtschaftlichen Aspekten die Erfassung und die Analyse der Kenngrößen, Leistungsparameter und Fehlereinflüsse, die auf einen Sensor im Fahrbetrieb wirken.

2 Theoretische Grundlagen zu Drehratensensoren/Gyroskopen

Schwingende oder rotierende Massen sind bestrebt, ihre Schwingungsebene bzw. Rotationsachse im Inertialraum beizubehalten. Befinden sich diese selbst in einem rotierenden System, erfahren sie in diesem eine Veränderung der Schwingungsebene/Rotationsachse, die analog zur Drehrate des rotierenden Systems bzw. zu deren wirkenden Komponente ist. Ursache ist die Corioliskraft, eine Scheinkraft, die nur in rotierenden Systemen auftritt, und auf der die mechanische Drehratensensoren basiert. Somit war bereits das Foucault'sche Pendel (Foucault 1851 und 1852) ein Drehratensensor, der die wirkende Komponente der Erddrehrate erfasste.

Heute sind neben rotierenden Massen verschiedene Ansätze zur Messung von Drehraten gebräuchlich. Optische Gyroskope wie Faseroptische Kreisel (FOG) oder Ringlaserkreisel (RLG) basieren auf dem *Sagnac-Effekt* (Sagnac 1913a und 1913b), der auf die Ausbreitung von gegenläufigen elektromagnetischen Wellen bei einer Rotation wirkt. Vibrationskreisel nutzen schwingende Strukturen, deren Schwingungsverhalten sich aufgrund der Corioliskraft bei einer Drehung verändert. Optische Gyroskope, wie sie in der modernen *Strap-Down-Inertialnavigation* verwendet werden, zeichnen sich durch große Stabilität und geringes Driftverhalten aus. Diese werden z.B. von Garus (1995) und Lefèvre (1993) ausführlich beschrieben. Eine Langzeit-Stabilität ist in der Fahrzeugnavigation durch die ständige Sensorkalibrierung während des *Map-Matching*-Prozesses nicht nötig. Zudem sind teure optische Gyroskope für einen Massenmarkt wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen, so dass dort *Low-Cost*-Sensorik eingesetzt wird.

Standard sind heute wegen ihrer geringen Größe, des niedrigen Preises und der dennoch ausreichenden Perfor-

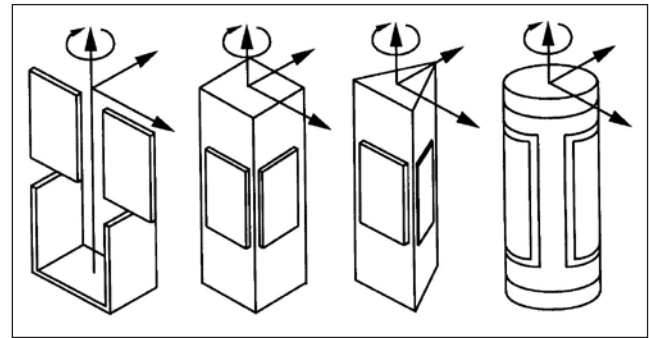


Abb. 1: Kreisel mit Biegeschwingung, unterschiedliche Probemassen (Zhao 1997)

mance Vibrationskreisel (*Coriolis Vibratory Gyro* (CVG)). Da sie auf den Wirkungen der Corioliskraft basieren, zählen sie zu den mechanischen Gyroskopen. Sie bestehen aus einer Struktur (Probemasse), die zur Schwingung angeregt wird. Wird diese entlang ihrer sensitiven Achse gedreht, verändert sich deren Schwingungsverhalten durch die auftretende Coriolisbeschleunigung proportional zur angewandten Drehrate. Die Anregung von Vibrationskreisel erfolgt meist piezoelektrisch, elektromagnetisch oder elektrostatistisch, die Messung piezoelektrisch, piezoresistiv oder kapazitiv (Paoletti et al. 1996). Wesentliche Kreiseltypen basieren im Allgemeinen auf dem Modell

- der Biegeschwingung oder
- der Formschwingung.

Neben diesen im Folgenden vorgestellten Prinzipien existieren weitere Sensoren, die sich Linear- oder Drehschwingungen zu Nutze machen. Generell treten auch bei ihnen messbare Schwingungsveränderungen aufgrund der Corioliskraft auf, lediglich die Form der Probemasse, die Art der Anregung und die Art der Schwingung unterscheiden sich von den anderen Typen.

Nach dem Modell der Biegeschwingung konzipierte Vibrationskreisel nutzen eine Probemasse, die entlang einer Achse zum Schwingen angeregt wird. Formen der Probemasse sind in Abb. 1 zu sehen. Bei einer Rotation um die sensitive Achse entsteht aufgrund der Corioliskraft eine zweite Schwingungskomponente rechtwinklig zur erzeugten Ausgangsschwingung, deren Amplitude proportional zur Eingangsdrehrate ist (s. Abb. 2).

Vibrationskreisel nach dem Modell der Formschwingung, auch *Vibrating Structure Gyroscopes* (VSG) genannt, nutzen Probemassen zumeist in Form eines Zylinders, Weinglases oder Rings, die in Schwingung versetzt werden. Die Schwingung weist vier Schwingungsbäuche und vier Schwingungsknoten auf; dies entspricht den Punkten, in denen die Masse zum Schwingen angeregt wird. Wie in Abb. 3 prinzipiell skizziert, befinden sich Detektoren in den Schwingungsknoten. Erfährt das System eine Rotation um die Symmetrieachse des Zylinders, verschieben sich aus Sicht eines mitrotierenden Beobachters Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten entgegengesetzt zur Eingangsdrehrate, was in den Detektor-

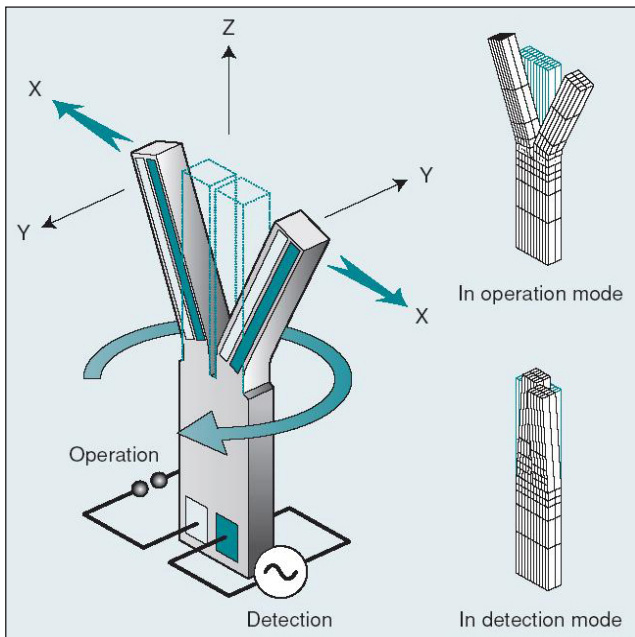


Abb. 2: Prinzip des Vibrationskreisels, Stimmgabel-Form (Fujitsu Ltd. 2004)

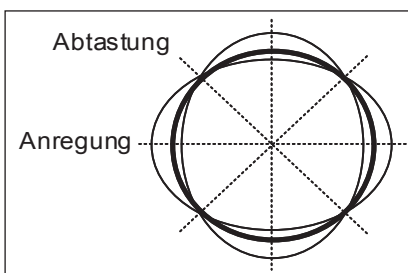


Abb. 3: Anregung und Abtastung bei Kreiseln mit Formschwingung

elementen erfasst wird (Geiger 2002; Czommer 2000). Bei einem dergestalt schwingungsfähigen Gebilde wird durch eine Drehung die Schwingungsebene verändert, so dass es sich um eine direkte Umsetzung des Foucault'schen Pendels handelt.

3 Qualifizierung von Gyroskopen für die Fahrzeugnavigation

Der Qualifizierungsprozess beginnt bereits bei der Sensorauswahl. Entwickler von Fahrzeugnavigationssystemen stehen dabei einer Vielzahl verschiedenster am Markt befindlicher Sensoren unterschiedlicher Hersteller gegenüber. Insbesondere im Bereich der Inertialsensoren existieren gewaltige preisliche und qualitative Spannen, in denen geeignete Modelle gefunden werden sollen, die sowohl den technischen als auch den wirtschaftlichen Anforderungen gerecht werden.

Eine Sensorauswahl kann nicht allein anhand der zugehörigen Datenblätter erfolgen, da die darauf angegebenen Genauigkeits- bzw. Kenndaten zum einen wenig aussagekräftig sind und zum anderen zumeist nur unter Laborbedingungen gelten. Daneben existieren voneinander abweichende Definitionen der Kenngrößen und

der Bedingungen, unter denen diese Kenngrößen gelten. Folglich ist es erforderlich, sich geeigneter Testverfahren und Szenarien zu bedienen, mit denen jeder Sensor eines Typs bei realistischen Arbeitsbedingungen im Rahmen der Fahrzeugnavigation untersucht und direkt mit anderen Sensoren verglichen werden kann. Insbesondere standardisierte Testverfahren sind notwendig, mit denen jede relevante Sensoreigenschaft bestimmt und beschrieben werden kann. Daneben müssen Grenzwerte definiert werden, die Anforderungen an den Sensor festlegen. Anhand dieser kann durch Vergleich über die Eignung eines Sensors entschieden werden.

Der Qualifizierungsprozess beinhaltet die Erfassung der sensorspezifischen Kenngrößen und -linien sowie eine Reihe von Tests, die verschiedene Betriebsituationen simulieren und externe potentielle Fehlereinflüsse untersuchen. Grundlegende Erläuterungen der einzelnen Kenngrößen und deren funktionaler Zusammenhang werden detailliert von Sternberg und Schwalm (2007) beschrieben.

Die entwickelten Testverfahren wurden in Zusammenarbeit mit Harman/Becker Automotive Systems im Zuge des laufenden Qualifizierungsprozesses für Drehratensensoren anhand von drei verschiedenen Sensortypen (im Folgenden als Typ A, B und C bezeichnet) validiert. Insgesamt wurden neun Sensoren getestet (je drei pro Typ) und auf einer Testplatte betrieben. Alle drei Typen basieren auf dem Prinzip der Biegeschwingung. Der Hauptunterschied der einzelnen Typen liegt in der Form der Probemasse; diese ist bei Typ A H-förmig (Doppelstimmgabel), bei Typ B prismenförmig und bei Typ C stimmgabelförmig. Alle Sensoren liegen in der Preisklasse um ca. 10\$ und weisen laut Datenblatt nur geringfügige Unterschiede in den technischen Daten auf. Anhand der entwickelten Testverfahren sollen diese auf den ersten Blick gleichwertigen Sensoren derart miteinander vergleichbar gemacht werden, dass eine Sensorauswahl in Hinblick auf die besonderen Anforderungen in der Fahrzeugnavigation getroffen werden kann. Nachfolgend werden die einzelnen Testverfahren und ausgewählte konkrete Testergebnisse vorgestellt.

3.1 Kennlinienaufnahme

Eine gründliche Kennlinienaufnahme ist für den Qualifizierungsprozess essentiell. Wird ein Navigationssystem im Winter in Betrieb genommen, kann die Sensortemperatur binnen weniger Minuten von -20°C auf $+60^{\circ}\text{C}$ und mehr steigen. Dieser Aufwärmprozess ist einer der neuralgischsten Punkte des Kreiselsbetriebs in der Navigationspraxis.

Die Kennlinienaufnahme umfasst Tests zur Bestimmung des Linearitätsverhaltens und der Drift des Nullpunktes bzw. *Zero Point Output* (ZPO) und des Maßstabsfehlers (Sensitivität) in Abhängigkeit von der Temperatur und der Betriebszeit.

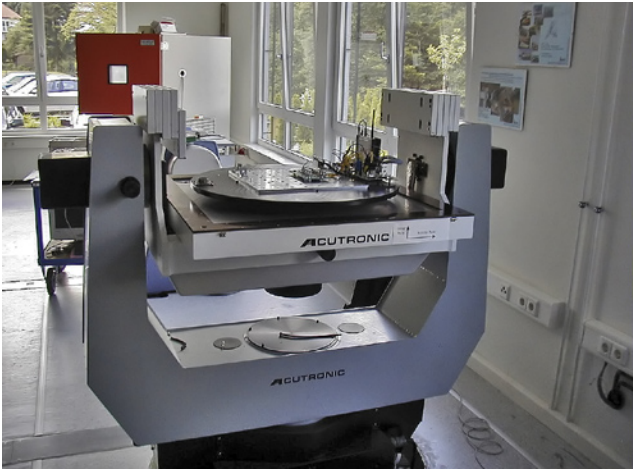


Abb. 4: Testaufbau des Gyroskop-Tests auf einem Dreiachs-drehtisch

Zur Kennlinienerfassung müssen verschiedene Drehraten generiert werden, mit denen die Sensorausgabe verglichen werden kann. Daneben muss die Möglichkeit bestehen, Temperaturen über einen Bereich von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ zu erzeugen. Idealerweise erfolgt dies über einen Präzisionsdrehtisch mit Klimakammer. Verschiedene Unternehmen haben sich auf die Herstellung von Testequipment für Inertialsensoren spezialisiert und bieten hochpräzise Drehtische mit einer bis drei beweglichen Achsen an. In Kombination mit einer Klimakammer sind diese für Gyroskop-Tests sehr geeignet (s. auch Abb. 4).

Tests zur Kennlinienbestimmung arbeiten das gewünschte Drehratenspektrum und den Betriebstemperaturbereich stufenweise so ab, dass für jede umgesetzte Drehrate (hier in Intervallen von $10^{\circ}/\text{s}$) bei jeder erzeugten Temperatur mindestens zwei unabhängige Messungen entstehen. Eine Testreihe ist in Abb. 5 exemplarisch dargestellt. Daraus lässt sich das Driftverhalten der Sensitivität und des ZPO über die Temperatur darstellen und das Linearitätsverhalten bzw. die Transferkurve bei jeder erzeugten Temperatur konstruieren. Zeitabhängiges Driftverhalten kann durch entsprechende Wartezeiten bei konstanter Temperatur zwischen zwei Testläufen aufgedeckt werden. Die Durchführung mehrerer unabhängiger Messungen ermöglicht eine Analyse bezüglich der Reproduzierbarkeit von Kennlinien.

Die stufenlose Erfassung der ZPO-Drift über die Temperatur erfolgt durch einen eigenen Test, bei dem die Prüflinge über den gesamten Betriebstemperaturbereich erst erhitzt und anschließend wieder abgekühlt werden. Es entstehen dadurch zwei Kurven (Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Temperatur), die direkt verglichen werden können (Abb. 6). Zusätzlich ermöglicht dieser Test eine Analyse bezüglich eines Einflusses des Temperaturgradienten auf

das Driftverhalten, da er einen deutlich höheren Temperaturgradienten aufweist als die zuvor erläuterten stufenförmigen Tests.

Abb. 6 belegt, dass eine Kenntnis über die Temperaturabhängigkeit des ZPO unentbehrlich ist. In diesem konkreten Fall driftet der ZPO eines Sensors vom Typ A bei einer Sensitivität von $25\text{ mV pro }^{\circ}/\text{s}$ um bis zu $12^{\circ}/\text{s}$. Gleichzeitig lässt sich eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Temperaturabhängigkeit erkennen, die sich mit den Ergebnissen der diskreten, stufenförmigen Tests deckt und ferner durch die Testergebnisse der Typen B und C bestätigt wird. Ein Einfluss des Temperaturgradienten auf das Driftverhalten wird nicht beobachtet; leichte Abweichungen von wenigen mV werden darauf zurückgeführt, dass die Sensorinnentemperatur während des kontinuierlichen Tests der auf der Platine gemessenen Temperatur nachhängt.

Die Temperaturabhängigkeit der Sensitivität lässt sich aus den stufenförmigen Tests ableiten. Auch hier zeigt sich eine deutliche Systematik. Die durch Temperaturschwankungen auftretenden Abweichungen der Sensitivität von der Herstellerangabe von $25\text{ mV pro }^{\circ}/\text{s}$ liegen bei allen getesteten Sensoren bei maximal $1\text{ mV pro }^{\circ}/\text{s}$. Der Vergleich der Ergebnisse zweier unabhängiger Tests bestätigt auch hier eine hohe Reproduzierbarkeit mit Dif-

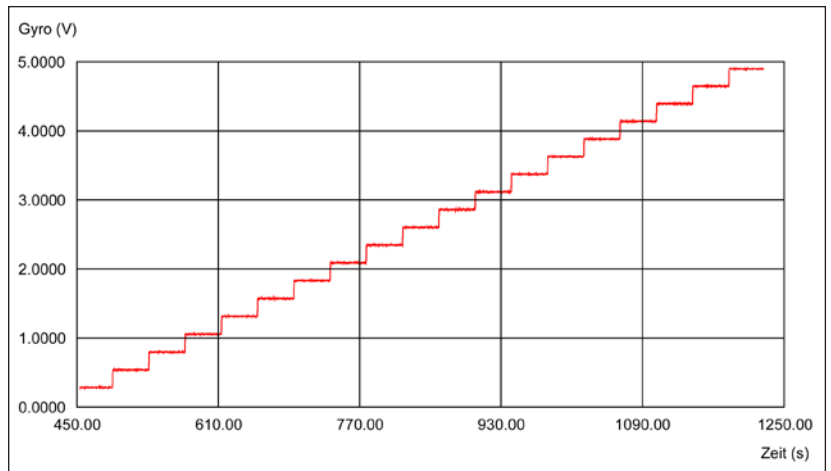


Abb. 5: Rohdaten eines einzelnen Tests (Typ A bei 0°C)

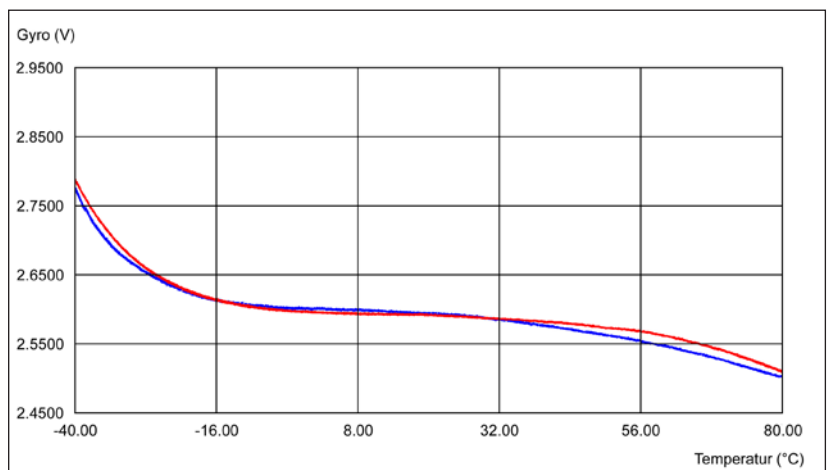


Abb. 6: ZPO-Drift stufenlos, Erhitzung (rot) & Abkühlung (blau), Typ A

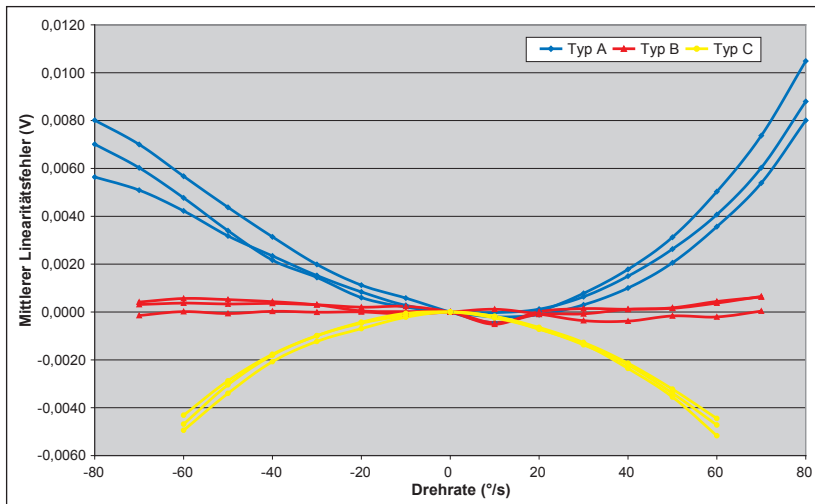


Abb. 7: Linearitätsfehler

ferenzen kleiner als 0,2 mV pro °/s für Typ A und geringer als 0,1 mV pro °/s für die Typen B und C.

Eine Langzeitstabilität wird durch die permanente Stützung während des Map-Matching-Prozesses nicht verlangt. Zeitabhängiges Driftverhalten bei verschiedenen Temperaturen wird daher für einen Zeitraum von 30 Minuten untersucht. Die erzielten Testergebnisse belegen, dass derartiges Driftverhalten bei den getesteten Sensoren nicht bzw. in nur geringem Maße vorhanden ist. So hat sich die ZPO-Lage am Ende des Untersuchungszeitraumes lediglich um durchschnittlich 1–2 mV (max. 5 mV) geändert, eine Drift der Sensitivität ist in diesem Zeitraum nicht zu beobachten. Ausgeprägtes Driftverhalten in diesem relativ kurzen Zeitraum deutet im Übrigen auf einen schadhafte Sensor hin.

Ebenso lässt sich aus den Testdaten der Linearitätsfehler jedes Sensors bei jeder erzeugten Temperatur bestimmen. Der über den gesamten Temperaturbereich gemittelte Linearitätsfehler aller Sensoren ist in Abb. 7 dargestellt. Die Sensoren eines Typs verhalten sich gleichartig; bemerkenswert ist, dass bei Typ B kein erkennbarer Linearitätsfehler vorliegt. Vor dem Hintergrund, dass in der üblichen Navigationspraxis nur selten Drehraten jenseits von 40 °/s erreicht werden, sind die auftretenden Messfehler von maximal 3 mV nicht gravierend, weshalb die Betrachtung der geringen Abweichungen im Linearitätsverhalten aufgrund einer Temperaturabhängigkeit (insbesondere bei Typ A) an dieser Stelle übergangen werden soll.

3.2 Schwankungen in der Versorgungsspannung

In der Praxis bleibt die Versorgungsspannung während des Betriebes nicht konstant. Dies liegt in erster Linie an Lastwechseln und Taktungen anderer Verbraucher sowie am Schalttakt des Spannungsreglers selbst. Daher sind entsprechende Tests durchzuführen, über die untersucht werden kann, inwieweit sich Schwankungen in der Versorgungsspannung auf den ZPO auswirken. Zum einen

werden in einem Test Spannungssprünge unterschiedlicher Größe realisiert, zum anderen wird die Versorgungsspannung mit Schwingungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude überlagert (*Ripple*). Diesbezügliche Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass es insbesondere bei *Ripple* auf der Versorgungsspannung durch Resonanzen mit mechanischen Teilen des Sensorelements zu großen Auswirkungen auf den ZPO kommen kann. Spannungssprünge und *Ripple* lassen sich durch einen geeigneten Spannungsregler jedoch so weit minimieren, dass sie keinen Einfluss mehr auf die Gyroskop-Messung ausüben.

3.3 Vibrationen

Die im Automotive-Bereich auftretenden Schwingungen hängen unter anderem von der Fahrgeschwindigkeit, der Straßenbeschaffenheit, der Motordrehzahl und der Zuladung ab und wandern über breite Frequenzspektren. Das hier relevante Frequenzspektrum liegt zwischen 50 und 2000 Hz, in dem die Karosserie bzw. die Fahrgastzelle zahlreiche Resonanzschwingungen aufweist (DeJong 1985). Dennoch werden auch Frequenzen unter 50 Hz in Tests einbezogen, da deren Auftreten z. B. bei langsamen Fahrten über Kopfsteinpflaster durchaus möglich ist. Die durchgeführten Tests beziehen daher den Frequenzbereich von 10–2000 Hz bei Beschleunigungen von 2–4 g ein. Diesbezügliche externe Untersuchungen belegen in einigen Fällen starke Auswirkungen auf die Sensoren. Insbesondere die Typen A und B erweisen sich als empfindlich, was sich in großen Sprüngen im ZPO bis hin zu irreparablen Beschädigungen auswirkt (Kies 2005).

3.4 Magnetfelder

Durch den hohen Anteil ferromagnetischer Stoffe und die zunehmende Zahl elektronischer Komponenten im Fahrzeug sind integrierte Sensoren ständig von starken Magnetfeldern umgeben, die häufig ihre Intensität und Richtung ändern. Auf die Kreiselensoren wirken sich diese jedoch nur sehr bedingt aus, da deren sensitive Elemente in einem soliden Metallgehäuse gegen äußere Magnetfelder sehr gut abgeschirmt werden. Daher muss das Verhalten von Kreiseln unter Einfluss äußerer Felder nicht zwingend untersucht werden.

3.5 Rauschverhältnisse

Zur Untersuchung der Rauschverhältnisse wird das von Driften befreite ZPO-Signal genutzt. Durch Abgriff des Minimal- und Maximalwertes in einem bestimmten Zeitraum lässt sich das Maximum des Rauschens (*peak to*

peak) bzw. die dem Rauschen entsprechende Drehrate (noise equivalent rate) bestimmen. Eine harmonische Analyse des Rauschsignals bzw. eine Zerlegung dessen in seine Frequenzanteile gibt Auskunft darüber, ob es sich in etwa um ein weißes Rauschen handelt oder ob das Rauschen von einer oder mehreren Schwingungen überlagert wird. Die noise equivalent rate aller drei Typen liegt in den durchgeführten Tests bei maximal 1°/s.

3.6 Schrägstellung

In der Praxis sollen Drehraten um die z-Achse eines Fahrzeugs erfasst werden. Entsprechend sollte der Einbau des Sensors horizontal erfolgen. Oft ist dies jedoch nicht der Fall: Schräge Einbauschächte im Armaturenbrett mit einer Neigung von bis zu 40° erzwingen einen Gyroskop-Betrieb bei Schrägstellung. Dadurch wirkt nur noch eine Komponente der Fahrzeugdrehung auf das Gyroskop. Die Sensitivität nimmt mit dem Cosinus des Neigungswinkels ab. Einige Hersteller bieten Sensoren mit bereits geneigter Stimmgabel an, um derartige Effekte beim Schrägeinbau zu kompensieren. Wird kein Sensor mit geneigter Probe-masse verwendet, lassen sich die Schrägstellungseffekte entsprechend korrigieren. Um eventuelles Fehlverhalten bei einer Schrägstellung ausschließen zu können, empfehlen sich verschiedene Testläufe bei konstanter Drehrate mit unterschiedlichen Neigungswinkeln. Die in Abb. 8 demonstrierten Testresultate belegen, dass eine Schrägstellung kein erkennbares Fehlverhalten verursacht; ein Gyroskop-Betrieb ist nach einer rechnerischen Korrektur möglich.

3.7 G-Empfindlichkeit

Im Fahrbetrieb wirkt nicht nur der Vektor der Erdanziehungskraft auf den Sensor, sondern auch Trägheitskräfte, die beim Beschleunigen, Verzögern oder in Kurvenfahrten entstehen. Während die Erdanziehungskraft zumeist in etwa parallel zur sensitiven Achse des Sensors angreift, setzen Beschleunigungs- und Zentripetalkräfte orthogonal zu dieser an und können sie somit beeinflussen. Daher ist es von Interesse, das Sensorverhalten im Hinblick auf Beschleunigungen bzw. Trägheitskräfte zu untersuchen, die aus der Fahrdynamik hervorgehen. Man spricht hier von der G-Empfindlichkeit eines Gyroskops. Hierfür ist die Kenntnis der maximal auftretenden Beschleunigungen im Fahrbetrieb erforderlich. Ideale Bedingungen vorausgesetzt, liegen diese bei 10 m/s² bzw. knapp über 1 g in der Verzögerung und bei 0,73–0,8 g in Kurvenfahrten (Mitschke und Wallentowitz 2004). Es werden also Beschleunigungen, die größer

als die Erdbeschleunigung sind, selbst in Ausnahme-situationen selten erreicht. Zur Untersuchung der G-Empfindlichkeit von Kreiselensoren in der Fahrzeugnavigation reicht die Erdbeschleunigung demnach völlig aus. Entsprechende Tests drehen den Sensor um 90° geneigt um seine sensitive Achse, womit die Erdbeschleunigung senkrecht auf diese wirkt. Eine G-Empfindlichkeit äußert sich dann theoretisch in einer Schwingung entsprechend der angelegten Drehrate, die die Messung überlagert. Konkret ist eine G-Empfindlichkeit zwar bei mehreren Untersuchungsobjekten nachweisbar, tritt jedoch nicht zwangsweise bei allen Sensoren eines Typs auf. Typ C offenbart keine erkennbare G-Empfindlichkeit. In Abb. 9 ist das Ergebnis desjenigen Sensors vom Typ B mit der ausgeprägtesten G-Empfindlichkeit zu betrachten. Eine Schwingungsamplitude von deutlich unter einem mV ist für die Fahrzeugnavigation völlig unkritisch.

3.8 Bewältigung von Drehszenarien

Neben den zahlreichen Tests bei konstanter Drehrate oder ZPO sollen darüber hinaus verschiedene Drehszenarien abgefahren werden. Hierbei werden sowohl langsame als auch rasche Drehraten und Drehratenveränderungen rea-

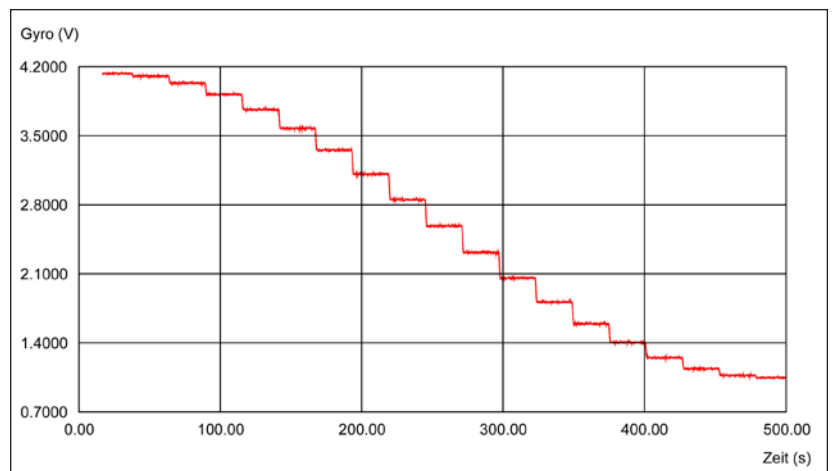


Abb. 8: Neigungstest bei einer Drehrate von 60°/s, Neigungen von 0–180°

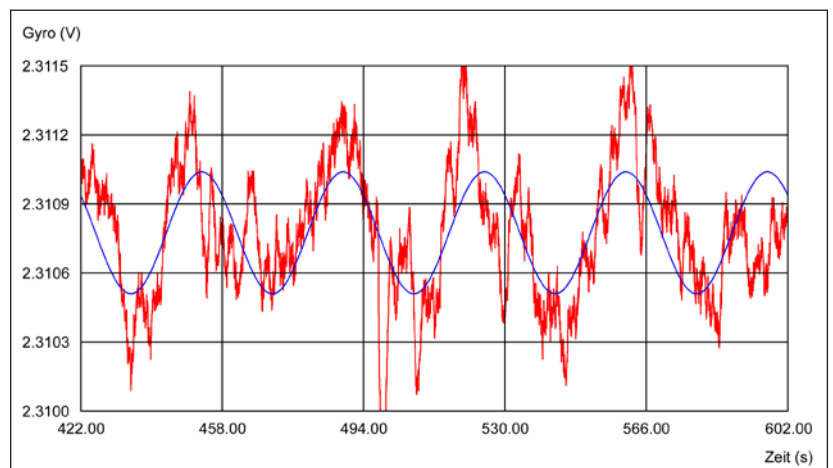


Abb. 9: G-Empfindlichkeit für einen Kreisel vom Typ B

liert. Auf diese Weise soll untersucht werden, wie präzise der Kreisel die Drehratenkurve erfasst, wie hoch die Latenzzeit ist und ob er Probleme hat, größere Beschleunigungen zu verfolgen. Derartige Bewegungstests erfolgen entweder auf geeigneten Drehtischen oder im Fahrzeug selbst, beispielsweise auf einer Teststrecke mit Zuhilfenahme eines Referenzkreisels (z. B. FOG oder RLG).

3.9 Produktstreuung

Sicher ist es nicht sinnvoll, die in diesem Beitrag aufgeführten Tests mit nur einem einzigen Sensor durchzuführen. Auch wenn Drehratensensoren heutzutage sehr präzise und gleichartig gefertigt werden, treten immer gewisse Unterschiede zwischen einzelnen Sensoren auf. Soll ein Sensor-Typ für den Einsatz in mehreren tausend Navigationssystemen bewertet werden, muss die auftretende Produktstreuung zumindest in Ansätzen erfasst werden. Für statistisch verlässliche Aussagen bezüglich der Produktstreuung müssen sämtliche Tests mit möglichst vielen Sensoren gleichzeitig durchgeführt werden. In der Praxis bleibt ein Messaufbau mit zehn Sensoren in der Messung und Auswertung noch überschaubar und ist ebenfalls technisch und hinsichtlich der begrenzten Raumverhältnisse innerhalb einer Klimakammer problemlos realisierbar.

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden im Erprobungsstadium lediglich je drei Sensoren eines Typs eingesetzt. Aussagen bezüglich der Produktstreuung sind daher im konkreten Fall nur eingeschränkt möglich. Dennoch lässt sich erkennen, dass diese insbesondere für das Linearitätsverhalten und die Sensitivitätsdrift bei allen drei Typen gering ausfällt, während die ZPO-Drift insbesondere bei Typ A eine deutliche Produktstreuung erkennen lässt.

4 Beurteilung des Qualifizierungsprozesses

Für die zuverlässige Beurteilung eines Sensors empfiehlt sich theoretisch ein Durchlaufen des gesamten Qualifizierungsprozesses. In der Unternehmenspraxis zielt dieser jedoch in erster Linie auf das ZPO-Verhalten eines Sensors ab. Tiefer gehende Informationen wie das Linearitätsverhalten, die G-Empfindlichkeit und verschiedene externe Einflüsse werden insbesondere in Verbindung mit Wirtschaftlichkeitsaspekten nicht als zwingend erforderlich eingeschätzt. Infolgedessen werden bei Drehraten-Messungen in Navigationssystemen bisher keine umfangreichen Kalibrierungen z. B. bezüglich der Linearität oder eine Temperaturkompensation durchgeführt. Zur Orientierung dienen lediglich Grenzwerte (max. Linearitätsfehler, max. Drift, max. Driftgradient usw.), die auf langjährigen Erfahrungen der entwickelnden Unternehmen basieren und von diesen nicht publiziert wer-

den. Diese Grenzwerte bzw. Spezifikationen stellen nach heutigem Stand die Rahmenbedingungen für die Nutzung von Gyroskopen in Fahrzeugnavigationssystemen dar.

Die begleitenden Sensor-Untersuchungen haben gezeigt, dass einzelne Sensoren in ihrem Verhalten sehr gut zu beschreiben sind. Insbesondere das Linearitäts- und das Driftverhalten lassen sich sehr gut reproduzieren. Somit ist in Verbindung mit einem Temperatursensor eine Berechnung temperaturabhängiger Korrekturparameter möglich, mit denen Stabilität und Zuverlässigkeit eines Gyroskops deutlich gesteigert werden können.

Eine kritische Größe ist die Produktstreuung. Während diese im Bezug auf das Linearitätsverhalten und die Sensitivitätsdrift noch relativ gering ist, verhalten sich Sensoren gleichen Typs bezüglich der ZPO-Drift selten gleichartig. So ist eine vereinheitlichte Korrektur bezüglich Linearitätsverhaltens und Sensitivitätsdrift durchaus möglich, allerdings sind die resultierenden Fehler in der Regel so gering, dass eine Korrektur praktisch nicht zwangsweise notwendig erscheint. Die ZPO-Driftkurven baugleicher Sensoren verlaufen häufig sehr unterschiedlich, obwohl sie betraglich meist in einer Größenordnung liegen. Für eine Kompensation des ZPO-Driftverhaltens eines Sensors reicht also eine vereinheitlichte Driftkurve in den meisten Fällen nicht aus. Um eine deutliche Verbesserung zu erzielen, muss für jeden Sensor eine individuelle Kennlinienbestimmung durchgeführt werden. Für einen Massenmarkt sind ein derartiger Aufwand und die damit verbundenen Mehrkosten nicht zu rechtfertigen. Daher ist die Orientierung an den bewährten Grenzwerten nach wie vor die wirtschaftlichste Methode. Des Weiteren zeigt sich, dass die Gyroskop-Hersteller die Temperaturproblematik zunehmend in den Griff bekommen. Aktuelle Sensoren driften über den Temperaturbereich von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ lediglich um $1-2^{\circ}/\text{s}$.

Obwohl sich der Qualifizierungsprozess sehr auf das ZPO-Verhalten konzentriert, dürfen die anderen potentiellen Fehleinflüsse nicht außer Acht gelassen werden, wie z. B. die Ergebnisse der Vibrationsuntersuchungen zeigen. Diese belegen einmal mehr, dass sich die Navigationspraxis nicht unter Laborbedingungen abspielt. Trotz ständig steigender Leistungsmerkmale weist das Spektrum an potentiell geeigneten Gyroskopen gravierende Unterschiede auf.

5 Fazit/Ausblick

Ein aussagekräftiger Qualifizierungsprozess ist nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Überlegungen für eine korrekte Sensor-Auswahl essentiell. Einige Sensormängel werden durch andere Sensoren (Radsensoren, GPS) und den *Map-Matching*-Prozess weitgehend ausgeglichen, spätestens aber bei längerem GPS-Ausfall, wenn das System rein auf *Dead Reckoning* läuft, werden sich Mängel früher oder später als Navigationsfehler auswirken. Insbesondere im

Hinblick auf die eingangs dargestellte zunehmende Einbindung von Fahrzeugnavigationssystemen in die aktive Fahrerassistenz, die eine hohe Zuverlässigkeit fordert, dürfen in der Sensorwahl keine Kompromisse gemacht werden.

Im Zuge eines umfangreichen Qualifizierungsprozesses lässt sich ein Kreisel sensor weitestgehend beschreiben und verschiedene äußere Einflüsse auf ihn erfassen und bewerten. Die in diesem Beitrag erläuterten Testverfahren sind gut für die Aufgaben der Kennlinienbestimmung und Erfassung des Fehlerhaushalts der Sensoren geeignet. Somit ist es möglich, konkrete und präzise Aussagen über die Eignung eines Sensors zur Anwendung in der Fahrzeugnavigation sowie über seine Stärken und Schwächen zu treffen. Die Ergebnisse der durchgeführten Tests erlaubten es zudem, bezüglich der Auswahl eines Sensors eine klare Empfehlung auszusprechen.

In Anbetracht eines ständig expandierenden Marktes wird die Qualitätssicherung im Bereich der Fahrzeugnavigation einen immer höheren Stellenwert einnehmen. Es existieren mittlerweile zahlreiche Unternehmen, die in der Fahrzeugnavigation- und Multimedia-Branche aktiv sind. Dieser Konkurrenzdruck, verstärkt durch Unternehmen aus dem asiatischen Raum, die mit Low-Cost-Produkten auf den europäischen Markt drängen, werden dem Qualitätsfaktor eine gänzlich neue Bedeutung zukommen lassen. So werden Aspekte wie Qualität, Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Stabilität, Bedienbarkeit, Aktualität und Sicherheit entscheidende Faktoren sein, um sich auf dem Markt in der Oberklasse halten und von der Konkurrenz abheben zu können. Einen nicht unbedeutenden Faktor stellt hier die Qualifizierung von Positionsbestimmungssensoren dar. Auch im Markt der Low-Cost-Inertialsensorik und der Satellitennavigation stehen große Veränderungen an, beginnend bei dem europäischen Satellitennavigationssystem Galileo bis hin zu neuen, immer kleiner, präziser und preiswerter werdenden Kreisel- und Beschleunigungssensoren. Ständige Qualifizierungsarbeiten werden nötig sein, um stets einen Überblick über verfügbare Sensoren zu behalten und um Navigationssysteme mit der idealen Sensorik ausstatten zu können.

Auch im Bereich der Indoor-Personennavigation ist man auf miniaturisierte Sensoren angewiesen, so dass der Einsatz von Vibrationskreisel zur Orientierungsbestimmung sinnvoll erscheint. Hier werden ähnliche Qualifizierungsarbeiten nötig werden, die dann auf die speziellen Anforderungen der Personenbewegungen zugeschnitten werden (andere Dynamik, unterschiedliche Fehlereinflüsse).

Neben der Qualifizierung von Kreiselsensoren wird auch die Qualifizierung von Beschleunigungssensoren oder anderen Sensoren zur Höhenbestimmung wie Barometern in den Mittelpunkt der Arbeit rücken. Insbesondere für die Navigation in den expandierenden Metropolen des asiatischen Raums, in denen Straßen in mehreren Ebenen übereinander gebaut werden, wird der Aspekt der Höhenüberwachung zunehmend relevanter. Entspre-

chende Qualifizierungsprozesse werden auch in diesem Bereich unabdingbar sein.

Literatur

- Bachmann, T., Bujnoch, S.: ConnectedDrive – Driver Assistance Systems Of The Future. BMW AG, München, 2001.
- Czommer, R.: Leistungsfähigkeit fahrzeugautonomer Ortungsverfahren auf der Basis von Map-Matching-Techniken. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Heft 535, München, 2000.
- DeJong, R. G.: A Study of Vehicle Interior Noise Using Statistical Energy Analysis. Surface Vehicle Noise and Vibration Conference Proceedings, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1985.
- Foucault, L.: Démonstration physique du mouvement de la Terre au moyen du pendule. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, p. 135–138, 1851.
- Foucault, L.: Sur une nouvelle démonstration expérimentale mouvement de la terre fondée sur la fixité du plan de rotation. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, p. 421–427, 1852.
- Fujitsu Ltd. Electronic Devices: Small Piezoelectric Gyro Sensors – FAR S1BG-Series. Fujitsu Electronic Devices News, 2004.
- Garus, D.: Brillouin-Ringlaserkreisel. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- Geiger, W.: Mikrotechnische Drehratengyrokope mit hoher Genauigkeit. Shaker Verlag, Aachen, 2002.
- Honda Motor Co., Ltd.: The Car Navigation System (1988). Gyro Research: The World's First Automotive Navigation System, 2006. <http://world.honda.com/history/challenge/1988navigationssystem/index.html>
- International Organization for Standardization: ISO 9000:2005. Quality Management Systems – Fundamentals and Vocabulary, 2005.
- Kies, P.: Testresultate zum Gyro-Vibrationstest. Unveröffentlichter Messbericht, Harman/Becker Automotive Systems, Ittersbach, 2005.
- Lefèvre, H. C.: The Fiber-Optic Gyroscope. Artech House, Boston, 1993.
- Mitschke, M., Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2004.
- Paoletti, F., Grétilat, M.-A., de Rooij, N.F.: A Silicon Micromachined Tuning Fork Gyroscope. Symposium Gyro Technology 1996, Stuttgart, 1996.
- Robert Bosch GmbH: Bosch Automotive – Produktgeschichte im Überblick. Magazin zur Bosch-Geschichte, Sonderheft 2, Stuttgart, 2005.
- Sagnac, G.: L'ether lumineux démontré par l'effet du vent relatif d'ether dans un interféromètre en rotation uniforme. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, p. 708–710, 1913a.
- Sagnac, G.: Sur la preuve de la réalité de l'ether lumineux par l'expérience de l'interféromètre tournant. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, p. 1410–1413, 1913b.
- Sternberg, H., Schwalm, C.: Qualification Process for MEMS Gyroscopes for the use in Navigation Systems. Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT07), Padua, 2007.
- Zhao, Y.: Vehicle Location and Navigation Systems. Artech House, Boston, 1997.

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Harald Sternberg
HafenCity Universität Hamburg
– Universität für Baukunst und Raumentwicklung –
Department Geomatik
Hebebrandstraße 1, 22297 Hamburg
Tel.: +49 (40) 42827-5300, Fax: +49 (40) 42827-5399
harald.sternberg@hcu-hamburg.de

Dipl.-Ing. Christian Schwalm
Universität der Bundeswehr München
Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
Tel.: +49 (89) 6004-3432, Fax: +49 (89) 6004-4090
christian.schwalm@unibw.de