

Inertiale Messsysteme mit faseroptischen Kreiseln

für Fahrdynamik und Topologiedaten-Erfassung



Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen ist ohne den Einsatz so genannter Kreiselplattformen zur Fahrdynamikanalyse kaum mehr vorstellbar. Im Folgenden werden die Eigenschaften heutiger inertialer Messsysteme für den Einsatz in Bewegungsvermessung, Stabilisierung und in der 3D-Topologievermessung dargestellt. Exemplarisch wird die dynamische Vermessung von Kraftfahrzeugen mit der neuesten Generation von iMAR-Kreiselplattformen der iMAR GmbH, St. Ingbert, vorgestellt.



1 Vom Schiffskreisel zum Miniatur-Strapdown-System

Inertiale Messsysteme, auch Trägheitsmesssysteme genannt, werden seit vielen Jahren für Navigationsaufgaben in Luft- und Schifffahrt oder zur Landnavigation eingesetzt. Dabei wird über ein Sensorsystem die Bahnbeschleunigung des Fahrzeugs gemessen. Durch Integration über die Zeit können hieraus prinzipiell Geschwindigkeit und Position des Körpers in einem sogenannten erdfesten Navigationskoordinatensystem berechnet werden.

Die ersten inertialen Messsysteme waren so genannte nordsuchende Kreisel, 1913 wurde das erste Passagierschiff mit einem nach seinem Erbauer benannten Anschütz-Kreiselkompass ausgestattet, der aus zwei schweren gegenläufig rotierenden Zwillingkugeln bestand. Vierzig Jahre später, im Jahre 1953, erfolgte der erste erfolgreiche Flug mit einem Trägheitsnavigationssystem in Plattform-Technologie von Massachusetts nach Kalifornien. Fast 40 Jahre später wurde mit iMAR's iDIS-FV das erste inertielle Messsystem in Strapdown-Technik für die Fahrdynamikanalyse mit Faserkreiseltechnologie und VMEbus-Prozessor von Kraftfahrzeugen 1992 der Fachwelt in St. Ingbert / Saarbrücken vorgestellt. Vier Jahre später folgte mit iDIS-FC eine Variante mit integriertem Mikrocontroller, **Bild 1**.

Heute (2002) wird eine dritte Generation von Inertialmesssystemen für die Fahrdynamikanalyse am Markt eingeführt, die sich gegenüber den ersten beiden Versionen durch halbes Gewicht und über dreifach höhere Genauigkeit, höhere Abtastrate und somit geringere Signalverzögerung sowie einen erheblich erweiterten Funktionsumfang auszeichnet.

2 Was ist Inertialmesstechnik?

Nach dem zweiten Newton'schen Axiom kann die Bewegungsbahn eines Körpers eindeutig bestimmt werden, wenn zu jeder Zeit alle auf ihn einwirkenden Kräfte bekannt sind und zu Beginn der Beobachtung Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Es ist nun prinzipiell in einem bewegten System aber nicht möglich, zwischen träger und schwerer Masse zu unterscheiden. Grundlage der Inertialmesstechnik ist es, die auf einen bewegten Körper einwirkenden Kräfte gemäß dem zweiten Newton'schen Axiom über Beschleunigungsaufnehmer zu erfassen und aus ihnen auf die Bewegung zu schließen. Bei Navigation in einem Gravitationsfeld muss nun der Schwerevektor (Erdschwere $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ bei erdgebundener

Messung) nach Betrag und Richtung bzgl. des bewegten Körpers ständig bekannt sein und bei einem rotierenden Bezugssystem entsprechend auch dessen Drehratenvektor (Erddrehrate: $\omega_E = 15,041 \text{ }^\circ/\text{h}$).

Da bei terrestrischer Navigation die Erdschwerebeschleunigung als Störgröße von den Beschleunigungsaufnehmern stets mitgemessen wird, muss sie entsprechend kompensiert werden. Hierzu muss die Orientierung des Körpers gegenüber dem Erdschwerefeld ständig erfasst werden, was durch körperfest (daher kommt der Name „Strap-down“, das heißt „festgeschnallt“) angebrachte Drehratensensoren erreicht wird. Somit besteht ein inertielle Messsystem in seiner einfachsten Konfiguration aus drei orthogonal angeordneten Beschleunigungsaufnehmern zur Bestimmung des Beschleunigungsvektors und aus drei ebenfalls orthogonal angeordneten Drehratensensoren zur Bestimmung des Drehratenvektors des Körpers, wenn Bewegungen in allen sechs Freiheitsgraden des Körpers zugelassen sind. Da die Orientierung des Messsystems auf ein erdfestes Koordinatensystem, in der Regel das lokale Horizontalsystem, bezogen werden soll, ist zusätzlich der Vektor der Erddrehrate im durch die Drehratensensoren gemessenen Drehratenvektor zu kompensieren. Die Kompensationen erfolgen durch zwei gekoppelte Vektor-Differentialgleichungen.

In **Bild 2** ist das Blockschaltbild eines inertialen Messsystems der Familie iDIS-FMS wiedergegeben, das auch deutlich die modulare Systemarchitektur erkennen lässt, die es erlaubt, auch anwendungsspezifische Sonderwünsche zu integrieren.

Ein wesentlicher Design-Aspekt des iDIS-FMS ist die hohe Abtastrate von 400 Hz, großer Messbereich von $\pm 500 \text{ }^\circ/\text{s}$

Der Autor



Dr.-Ing. Edgar von Hinüber ist seit 1992 Geschäftsführer der iMAR Gesellschaft für Inertielle Mess-, Automatisierungs- und Regelsysteme und leitet den Bereich System-Entwicklung.

und $\pm 10 \text{ g}$, internes oder externes GPS, ein integriertes Odometer-Interface, CAN-Bus und Ethernet-Schnittstelle sowie eine Windows-basierte Bediensoftware mit offener Schnittstelle. iDIS-FMS ist für einen vielseitigen Einsatz konzipiert worden: Neben der Fahrdynamik-Analyse („Elchtest“) werden die Geräte dieser Systemfamilie von der Stabilisierung von Antennen auf Schiffen über die Führung von Luft- und Unterwasserfahrzeugen (Drohnen und RPVs) bis hin zur Positionsbestimmung und Regelung von Servicerobotern (zum Beispiel in Pipelines) eingesetzt.

Bild 3 zeigt das entsprechende Messsystem in leichter, handlicher und doch zugleich sehr robuster Ausführung. Es ist gemäß den Umweltafordernungen an derartige Systeme in Schutzart IP 67 gefertigt und wird mit einer Versorgungsspannung von 10...34 V bei einer Leistungsaufnahme von nur 30 W betrieben.

Entsprechend den Anforderungen der Messtechnik vor Ort stehen als Ergebnis der intern in Echtzeit durchgeführten Berechnungen unter anderem folgende Größen zur Verfügung (alle mit Zeitstempel):

■ Nutzdrehrate im fahrzeugfesten Koordinatensystem (erddrehratenkompensiert)

1 Vom Schiffskreisel zum Miniatur-Strapdown-System



Bild 1: iDIS-FC (1992 – 2001)

Figure 1: iDIS-FC (1992 - 2001)

2 Was ist Inertialmesstechnik?

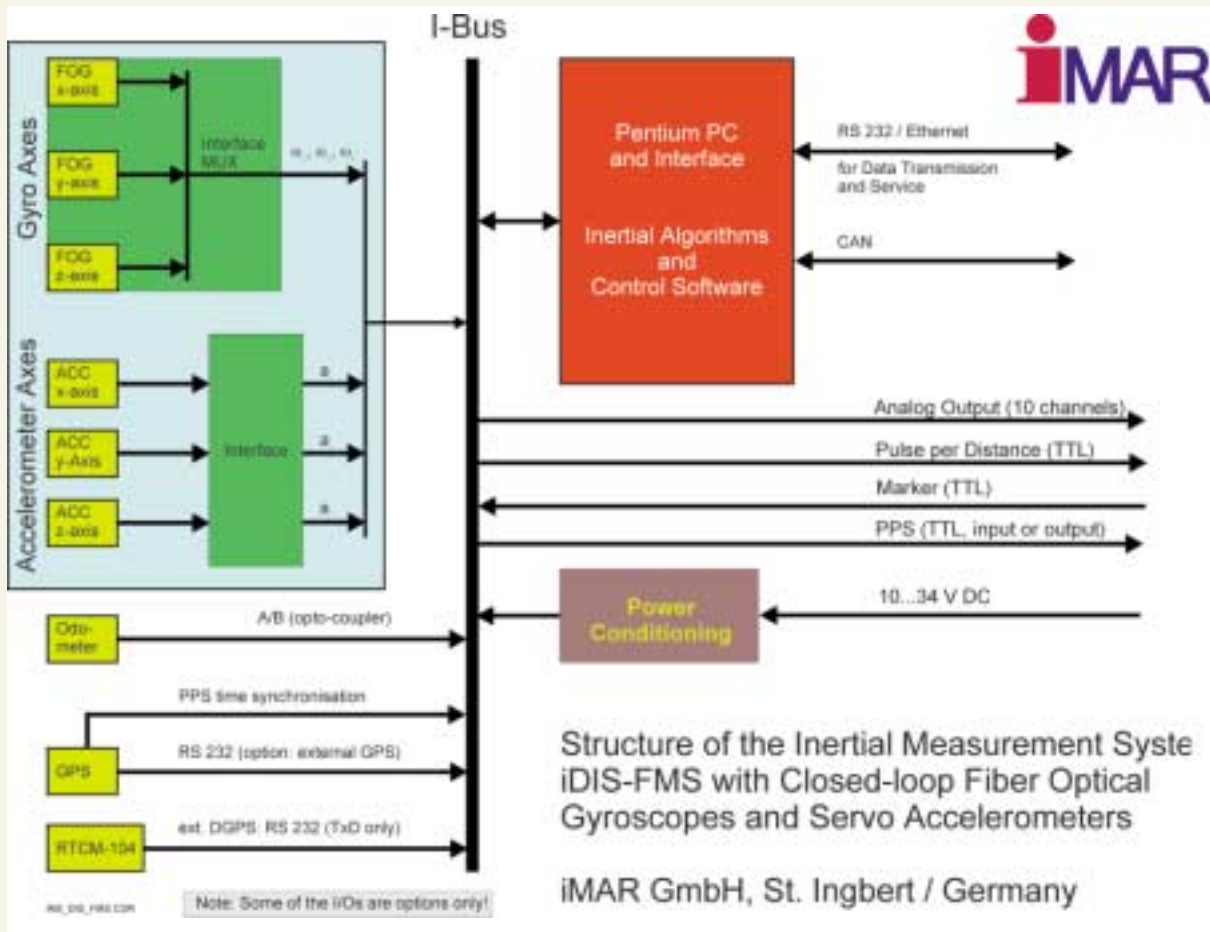


Bild 2: Blockschaltbild eines Inertialmesssystems in Strapdown-Technik
 Figure 2: Block diagram of an inertial measuring system in strap-down technology



Bild 3: iDIS-FMS (Höhe: 108 mm) mit Closed-loop-Faserkreisläufen in Multiplex-Technologie. Masse: 4,7 kg. P<30 W
 Figure 3: iDIS-FMS (height: 108 mm) with closed-loop fiber-optic gyroscopes, multiplex technology

- Nutzbeschleunigung im fahrzeugfesten Koordinatensystem (erdschwerekompensiert)
- Orientierungswinkel (Wanken, Nicken, Gieren) des Fahrzeugs bzgl. dem lokalen, erdfesten Horizontal-Koordinatensystem (so genannter Euler-Winkel)
- Odometer-Längsgeschwindigkeit im Fahrzeugkoordinatensystem
- Position im Lokal- und Weltkoordinatensystem (x/y/z und Längengrad/Breitengrad/Höhe)
- Auf den Fahrzeugschwerpunkt oder einen beliebigen anderen Punkt im Fahrzeug zentrierte Ausgabe der Messwerte.

3 Koordinatensysteme

In der Strapdown-Technik können wir zwischen mehreren Koordinatensystemen unterscheiden. Die vier wichtigsten sind

1. Erdfestes, globales Weltkoordinatensystem
2. Erdfestes, lokales Horizontalkoordinatensystem
3. Sensorkoordinatensystem
4. Fahrzeugkoordinatensystem (oder auch Body-Koordinatensystem genannt).

Ist man an der globalen Position des Fahrzeugs interessiert, so arbeitet man im WGS84-Koordinatensystem, das durch das GPS (satellitengestütztes Global Positioning System) unterstützt wird und in dem jede Position eindeutig durch Längengrad, Breitengrad und Höhe definiert ist (Weltkoordinatensystem).

Ist man hingegen an metrischen Distanzen interessiert, so arbeitet man oft in einem erdfesten lokalen Horizontalkoordinatensystem, das am Versuchsort mit seiner durch x- und y-Achse aufgespannten Fläche eine Tangentialebene zur Erdoberfläche bildet. Der Ursprung dieses ebenfalls erdfesten Koordinatensystem ist definiert durch Breitengrad und Längengrad des Versuchsorts, wobei für die Navigationsalgorithmen nur der Breitengrad von Interesse ist, da die Nord-Süd-Achse durch die Erdpole eine Symmetrieachse für das quasistationäre Navigationsproblem darstellt. Das Koordinatensystem ist so definiert, dass seine x-Achse ostwärts, seine y-Achse nordwärts und seine z-Achse nach oben zeigt (ENU).

Das Sensorkoordinatensystem, **Bild 4**, wird durch die Lage der Drehraten- und Beschleunigungssensoren im Messsystem definiert. Alle Messwerte fallen zunächst in diesem Sensorkoordinatensystem an und müssen in ein der Interpretation leichter zugängliches Koordinatensystem transformiert werden. Ein solches Koordinatensystem ist neben dem Welt- oder Horizontalkoordinatensystem im Automobilbereich

3 Koordinatensysteme

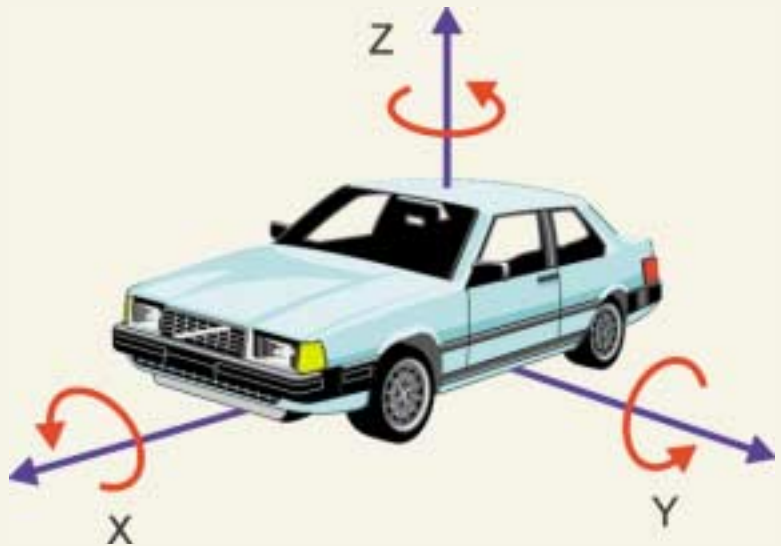


Bild 4: Koordinatensystem nach DIN 70.000
Figure 4: Coordinate system according to DIN 70 000

das Fahrzeugkoordinatensystem, das in DIN 70.000 derart definiert ist. Seine x-Achse weist in Vorwärts-Fahrzeuglängsrichtung, seine y-Achse nach links (bei Sicht in Vorwärtsrichtung des Fahrzeugs) und seine z-Achse steht orthogonal auf den beiden anderen Achsen und ist aufwärts gerichtet.

Der Übergang vom Sensor- oder Fahrzeugkoordinatensystem zum erdfesten Koordinatensystem erfolgt systemintern durch so genannte Quaternionen oder Richtungskosinusmatrizen. Da diese Winkel-darstellung zwar mathematisch sehr effizient, jedoch für den Anwender weitgehend unanschaulich ist, werden gewöhnlich die Eulerwinkel zur Darstellung der Lage eines Fahrzeugs im Raum verwendet. Diese mit Roll, Pitch und Yaw (RPY) oder Wanken, Nicken und Gieren bezeichneten Winkel sind wie folgt definiert.

RPY-Winkel gemäß DIN 70.000 (Body frame):

Gierwinkel ψ : Winkel „Psi“ um die z-Achse des Weltkoordinatensystems (zeigt nach oben). Dieses ist die „erste“ Drehung, um vom Weltsystem in das Sensorsystem zu gelangen.

Nickwinkel θ : Winkel „Theta“ um die y-Achse des um die z-Achse mit ψ gedrehten Weltkoordinatensystems (\approx Winkel um die y-Achse des Sensorkoordinatensystems für kleine Wankwinkel).

Wankwinkel ϕ : Winkel „Phi“ um die x-Achse des Sensorkoordinatensystems

(„dritte“ Drehung).

Wichtig ist das Verständnis, dass die Beschreibung der Lage des Fahrzeugs im Weltsystem mit den RPY-Winkeln durch drei nacheinander gedachte Drehungen erfolgt, beginnend mit dem Einheits-Welt-Koordinatensystem (ENU: x nach Osten, y nach Norden, z nach oben). Nach den drei Einzelachsen-Drehungen erhält man die Lage des Fahrzeugs im Raum. Dabei ist die Reihenfolge der Drehungen festgelegt und wesentlich. Das Messsystem selbst bestimmt die Winkel selbstverständlich auch bei simultanen Drehungen um alle Achsen durch Lösung einer verkoppelten Vektordifferentialgleichung

4 Sensoren für die Bewegungsvermessung

Als Beschleunigungssensoren kommen für die Anwendung einer präzisen Bewegungsvermessung ausschließlich Servo-Beschleunigungsaufnehmer zum Einsatz. Durch ihre interne Closed-loop-Struktur erreichen sie eine exzellente Linearität bei einem Maßbereich, der sich für diese Applikationen über einen Bereich von über 5 Dekaden erstreckt (± 20 g Messbereich bei $10 \mu\text{g}$ Auflösung). Sie sind schockfest (100 g) und beweisen in militärischen und zivilen Applikationen seit vielen Jahren ihre hohe Zuverlässigkeit.

Als Drehrataufnehmer können prinzi-

4 Sensoren für die Bewegungsvermessung

Vibrating Rotation Rate Sensor
(Coriolis Principle)

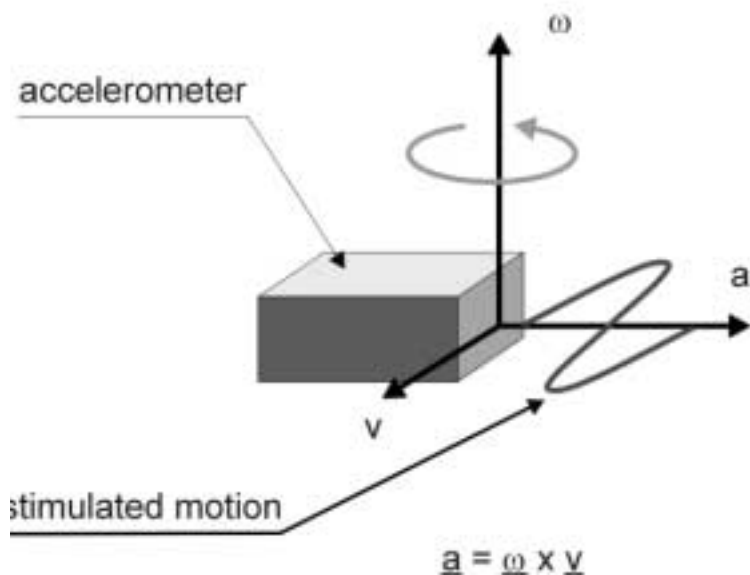


Bild 5: Vibrationskreisel (Prinzip)
Figure 5: Vibro gyroscopes (schema)

piell Sensoren eingesetzt werden, die nach zwei unterschiedlichen physikalischen Effekten arbeiten. Sie sollen hier mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen kurz skizziert werden.

Der Vibrationskreisel (das Wort „Kreisel“ wird hier als Synonym für „Drehratensensor“ verwendet und nicht mit „rotierenden Kreiselkörpern“ assoziiert!) beruht auf dem Coriolis-Satz der Mechanik: Ein Beschleunigungsaufnehmer, der in einer zu seiner sensitiven Achse orthogonalen Richtung mit der Geschwindigkeit v bewegt wird, erfährt eine Beschleunigung, wenn er eine Drehrate um die zu Geschwindigkeit und Beschleunigungsempfindlichkeit orthogonale dritte Raumachse erfährt, **Bild 5**. Üblicherweise erzeugt man die Geschwindigkeit in Form einer harmonischen Schwingung mit einem Piezoschwinger oder durch kapazitiven Antrieb. Der Vibrationskreisel wird heute vielfach in Low-cost-Anwendungen eingesetzt, wo im Vergleich zu Faserkreiseln großes Rauschen, große temperaturabhängige Drift (bis zu $3^\circ/s$ über Temperatur) und ein deutlich temperaturabhängiger Skalenfaktorfehler

bei zugleich geringer Bandbreite unkritisch sind. Einflüsse durch translatorische Beschleunigung, Vibration oder Körperschall können derartige Kreisel negativ beeinflussen, da ihr Messprinzip selbst auf Vibration und Beschleunigungsmessung beruht.

Den optischen Kreiseln liegt der Sagnac-Effekt zugrunde. Dieser kann anhand des Funktionsbildes eines Faserkreisels plausibel gemacht werden: In **Bild 6** ist schematisch ein faseroptischer Kreisel (FOG) dargestellt. Er besteht im Prinzip aus einer lichtemittierenden Superluminiszenzdiode (SLD), Strahlteilern, einem Modulator, der Glasfaserspule, die in n Windungen die effektive Fläche A umschließt, und einem Interferenzdetektor. Durch die Anordnung der Strahlteiler wird erreicht, dass das von der SLD emittierte Licht der Wellenlänge λ in zwei Lichtstrahlen geteilt wird, die beide die Faser durchlaufen, wobei einer im Uhrzeigersinn und der andere entgegen dem Uhrzeigersinn verläuft. Wird nun die gesamte Anordnung um den Normalenvektor der Faserspulebene mit der Winkelgeschwindigkeit w rotiert, so verkürzt sich der Weg für den einen Lichtstrahl, während

er sich für den anderen entsprechend verlängert. Die hieraus aufgrund der unterschiedlichen Laufzeit resultierende Phasenverschiebung zwischen beiden Lichtwellenzügen wird am Interferenzdetektor erkannt und ist ein Maß für die Winkelgeschwindigkeit. Führt man die gemessene Phasenverschiebung darüber hinaus auf ein optisches Phasenschieber-Element zurück, so dass der Sensor intern stets auf konstanter Phase arbeitet, gelangt man zum so genannten Closed-loop-Faserkreisel.

Die optischen Kreiseln zeichnen sich gegenüber den mechanischen oder piezoelektrischen Kreiseln dadurch aus, dass das sensorische Element keiner mechanischen Beanspruchung unterliegt und gegenüber Vibration und Beschleunigung weitestgehend unempfindlich ist. Aus dieser Betrachtung wird deutlich, warum für präzise Vermessungssysteme Faserkreisel eingesetzt werden.

Auch einachsige Faserkreisel werden in der Automobilindustrie häufig zur Ermittlung der Gierrate eingesetzt. Eine Beschreibung würde hier den Rahmen sprengen, der interessierte Leser sei zum Beispiel auf www.imar-navigation.de verwiesen.

5 Messunsicherheit und Messergebnisse

Für einen Einsatz inertialer Messtechnik sollte der Anwender mit den grundsätzlichen Messunsicherheiten solcher Systeme vertraut sein.

Unter Kreiseldrift versteht man den Fehlerwinkel pro Zeiteinheit eines Drehratensensors. Befindet sich der Drehratensensor in Ruhe und hat er am Ausgang einen Offset von $3^\circ/h$ (Drehratenoffset), dann ist die Kreiseldrift 3° pro Stunde oder 1° in 20 Minuten (ungestützt).

Der Random-Walk ist eine Messunsicherheit des Kreisels, die aus der Integration weißes Rauschens resultiert. Das Rauschen der Drehrate ergibt sich als 1-sigma-Wert bzgl. einer Ausgabe-Bandbreite $f[\text{Hz}]$ zu $r[^\circ/s] = RW[\sqrt{s}]\sqrt{f[\text{Hz}]} \times 60/3600$.

Betrachtet man eine Drift auf dem Nick- oder Wankkreisel (in der Regel y -Achse bzw. x -Achse), dann führt diese dazu, dass den wahren Winkeln ein über der Messdauer mit der Drift zunehmender Fehlerwinkel überlagert wird. Da die Genauigkeit der Lagebestimmung im Raum (das heißt Nick- und Wankwinkel) entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Erdschwerkompensation in den gemessenen Beschleunigungssignalen hat, nimmt auch die Messunsicherheit der ausgegebenen Beschleunigung nach der Erdschwerkompensation

4 Sensoren für die Bewegungsvermessung

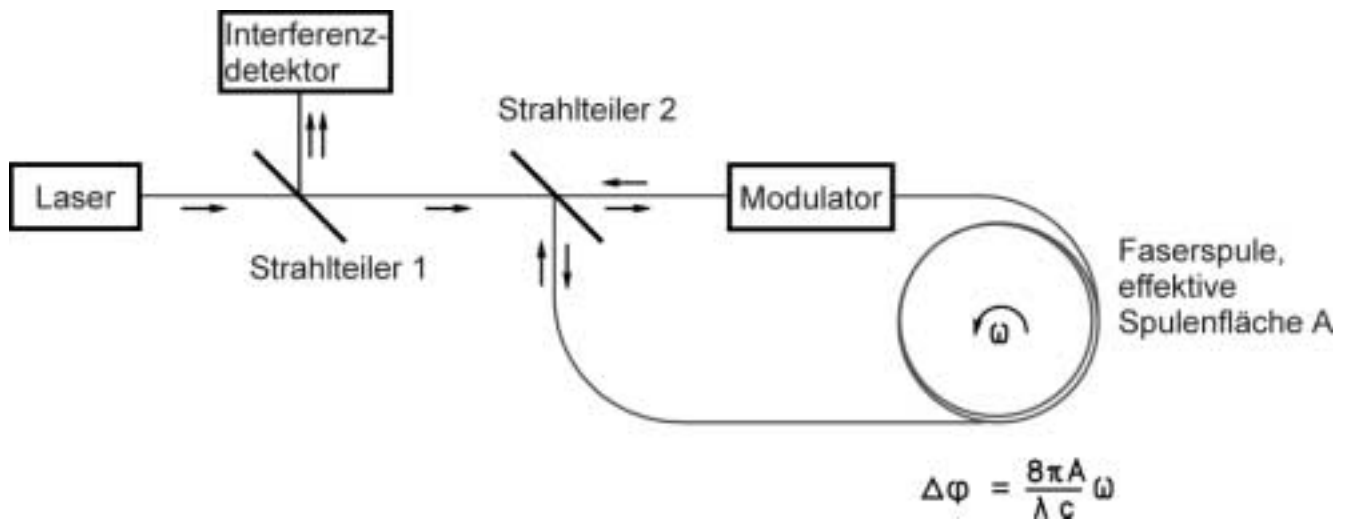


Bild 6: Schematischer Aufbau eines Faserkreisels
 Figure 6: Scheme of a fiber-optic gyroscope

pensation über der Messdauer zu. Es ergibt sich je $0,06^\circ$ Winkelfehler ein Beschleunigungsfehler auf den Horizontalkanälen von annähernd 1 mg.

Allerdings ist eine auch noch so geringe Kreisdrift meist nicht klein genug, um auch längere Messzyklen mit der erforderlichen Messgenauigkeit absolvieren zu können. Um die Drift aus den Messdaten zu eliminieren, werden so genannte adaptive Stützungsverfahren eingesetzt. Hierbei wird bei Landfahrzeugen optional eine externe Geschwindigkeitsinformation verwendet, um aus der daraus schätzbaren Längs- und Querschleunigung im Zusammenspiel mit dem Inertial-Messsystem die Lagewinkel zu korrigieren. Um die Drift des Kurskreisels zu kompensieren, wird, wenn verfügbar, GPS eingesetzt. Das iDIS-FMS erfordert jedoch aufgrund der hohen Sensorgenauigkeit im Gegensatz zu anderen Systemen keine kontinuierliche GPS-Verfügbarkeit.

Bild 7 zeigt die Aufmessung eines typischen „Elchtest“-Manövers. Diese mit einer bei ZF Lemförde (Zulieferer von Fahrwerkskomponenten, Modulen und kompletten Achssystemen) im Einsatz befindlichen iMAR-Plattform iDIS-FMS gemessenen Daten dienen dem Anwender in Verbindung mit dem gemessenen Lenkwinkel unter anderem zur Beurteilung des querdynamischen Übertragungsverhaltens und des Eigenlenkverhaltens eines Pkw. Darüber hinaus werden alle Bewegungen des Fahrzeugaufbaus erfasst, um die erhaltenen Ergebnisse als Bewertungskriterien für Fahr-

dynamik und Fahrkomfort heranzuziehen.

6 iDRPOS: 3D-Topologievermessung

Der optional in das iDIS-FMS integrierbare iDRPOS-Algorithmus nutzt neben der allgemeinen Odometerstützung einen speziellen Kalmanfilter für eine erweiterte Stützung, um neben den fahrdynamischen

Größen auch topologische Streckeninformationen bestimmen zu können. Dabei liefert das Messsystem auch dann zuverlässig Positionsinformationen, wenn GPS zeitweise abgeschattet ist. Die fahrdynamischen Messgrößen wie Drehraten, Beschleunigungen oder Lagewinkel werden aufgrund der hohen Genauigkeit der Kreisel nicht durch die zeitweise Abschattung von GPS in ihrer Genauigkeit beeinträchtigt, wie

5 Messunsicherheit und Messergebnisse

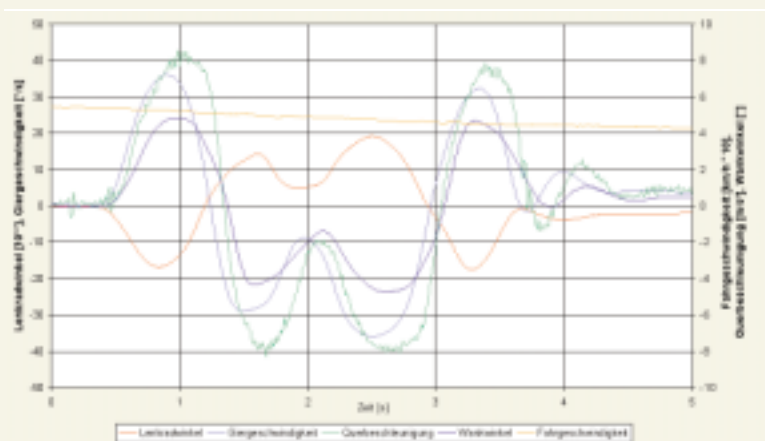


Bild 7: Fahrdynamische Aufmessung eines Elchtest-Manövers (Quelle: ZF Lemförder Fahrwerktechnik)
 Figure 7: Measurement of the driving dynamics during a moose test (taken from: ZF Lemförder Fahrwerktechnik)

dies in der Regel bei Low-cost-Systemen mit mikromechanischen Drehratensensoren oder Low-cost-Faserkreiseln der Fall ist, da jene ihre Genauigkeit primär aus dem GPS (Satellitenortung) beziehen.

Für die Fahrdynamikanalyse geeignete Systeme hingegen nutzen aufgrund der hohen Genauigkeit von Faserkreisel und Servo-Beschleunigungsaufnehmern GPS lediglich als Hilfsinformation und sind damit auch gegenüber Störungen des GPS (zum Beispiel Multipath) weitgehend unempfindlich. **Bild 8** zeigt die online geschätzten Standardabweichungen der Messgrößen (Odometer-Skalenfaktor, Position, Kurs).

Nähere Informationen findet man unter www.imar-navigation.de.

Ein Inertial-Messsystem ist aber nur so gut wie seine Schnittstelle zum Anwender. Daher wurde beim Design dieser neuen Messgeräte-Generation neben der Hardware auch besonderer Wert auf eine universelle und modular strukturierte Schnittstelle gelegt, die für alle iMAR-Messsysteme ab 2002 einheitlich ist und über die alle Parameter wie Abtastrate, Stützungskriterien, Schwellwerte usw. modifiziert, Kommandos (zum Beispiel Start/Stop der Ausrichtung) abgesetzt und Messdaten (zum Beispiel Lagewinkel, Beschleunigungen, Drehraten, Odometergeschwindigkeit usw.) zeit- oder wegbezogen ausgelesen werden können.

Für Standardanwendungen steht für den Bediener die Software NAV-Command unter Windows zur Verfügung, mit der eine sehr intuitive Benutzung sowohl für den gelegentlichen wie auch für den routinieren Anwender ermöglicht wird, **Bild 9**. Durch die offene Schnittstelle kann der Anwender die Bedienung der Messsysteme aber auch direkt (optionale DLL) in seine eigene Applikation einbinden. Es ist aber nochmals zu unterstreichen, dass die inertialen Algorithmen selbst auf der Hardware (Prozessor) des Messsystems unter einem Echtzeitbetriebssystem ablaufen und Windows auf einem externen Laptop/PC lediglich der Benutzerführung und Visualisierung sowie Datenspeicherung dient.

7 Zusammenfassung

Die fortgeschrittene Entwicklung der Faserkreisel, verbunden mit ihrer kommerziellen Verfügbarkeit als Serienprodukt in großen Stückzahlen direkt aus deutscher Produktion, eröffnen dieser Kreiseltechnologie ein großes Feld innovativer Applikationen. Es wurde gezeigt, dass solche Faserkreisel mit Skalenfaktorfehlern <300 ppm und Driften von 1...3 °/h neben klassischen Aufgaben der Stabilisierung und Navigation auch vorteilhaft für die dynamische und stati-

6 iDRPOS: 3D-Topologievermessung

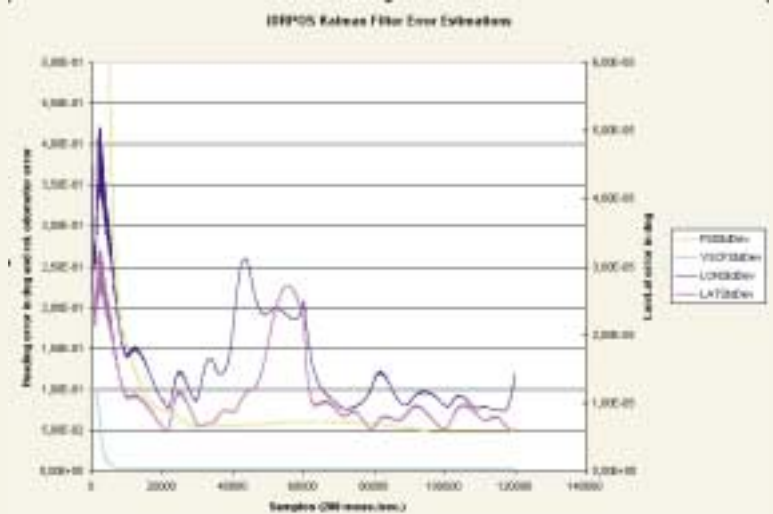


Bild 8: Geschätzte Standardabweichungen der Zustände (Kalmanfilter)
Figure 8: Estimated standard deviations of the conditions (Kalman Filter)



Bild 9: NAV-Command Software
Figure 9: Nav_Command software

sche Vermessung des Bewegungsverhaltens von Fahrzeugen aller Art und zur Topologievermessung eingesetzt werden können. Durch den Einsatz entsprechender Strapdown-Algorithmen und Signalverarbeitungsverfahren sowie die Einführung benutzerspezifischer Koordinatensysteme und die Bereitstellung einer anwenderorientierten Software wird die Durchführung der Messungen sowie die Interpretation der Messergebnisse für den Anwender erheblich vereinfacht.

Literaturhinweise

[1] v. Hinüber, E.; Janocha, H.: Inertiales Messsystem in Strapdown-Technik für Kraftfahrzeug-Anwendungen. In: Proceedings SENSOR '93, Nürnberg 1993
[2] v. Hinüber, E.; Janocha, H.: Leistungspotenzial moderner inertialer Messsysteme. In: ATZ 97

(1995) 1, S. 30ff
[3] v. Hinüber, E.; Kühl, B.: Faserkreisel für Industrieanwendungen. In: Sensor-Technik Heft 10/1997, S. 45-47
[4] Gevatter, H.-J. (Hrsg): v. Hinüber, E. u.a.: Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik. Springer, 1999, S. 99ff
[5] Apold, D. u.a.: Mobile Ermittlung von topologischen Straßendaten für dynamische Prüfstandsversuche und Rechnersimulationen. In: ATZ 102 (2000) 6, S. 410ff
[6] v. Hinüber, E.: New Approaches in High-Performance Navigation Solutions for AUVs. In: Underwater Magazine, Dec. 2001

For an English version of this article, see **ATZ worldwide**. For information on subscriptions, just call us or send an email or fax.

ATZ Vieweg Verlag, Postfach 1546, D-65173 Wiesbaden
Hotline 06 11/78 78-151 Fax 06 11/78 78-423
email: vieweg.service@bertelsmann.de