



Inertiale Meßsysteme mit faseroptischen Kreiseln für Fahrdynamik und Topologiedaten-Erfassung

Dr.-Ing. Edgar von Hinüber

(erschieden in 6/2002 in der ATZ)



Die Entwicklung von Kraftfahrzeugen ist ohne den Einsatz sog. Kreiselplattformen zur Fahrdynamikanalyse heute 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 (Stichwort: "Elchtest").

Präzise Sensorik zur Vermessung auch hochdynamischer Fahrmanöver und ausgefeilte mathematische Verfahren unterstützen den Meßtechniker bei der Durchführung auch anspruchsvoller Meßprogramme.

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 der Zeit können hieraus prinzipiell Geschwindigkeit und Position des Körpers in einem sog. erdfesten Navigationskoordinatensystem berechnet werden.

Die ersten inertialen Meßsysteme waren sog. 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-Technologie¹ 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. 4 Jahre später folgt mit iDIS-FC eine Variante mit integriertem Mikrocontroller.

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 Newtonschen 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 Newtonschen Axiom über Beschleunigungsaufnehmer zu erfassen und aus

¹ Navigationssystem in Plattform-Technologie: Alle Kreisel und Beschleunigungsaufnehmer sind auf einer mechanisch aufwendigen und damit empfindlichen kardanschen Rahmenplattform montiert, welche durch die Kreisel raumfest stabilisiert und somit von den rotatorischen Bewegungen des Fahrzeugs entkoppelt ist.

ihnen auf die Bewegung zu schließen². Bei Navigation in einem Gravitationsfeld muss nun der Schwerevektor (Erdschwere $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ bei erdgebundener Messung) nach

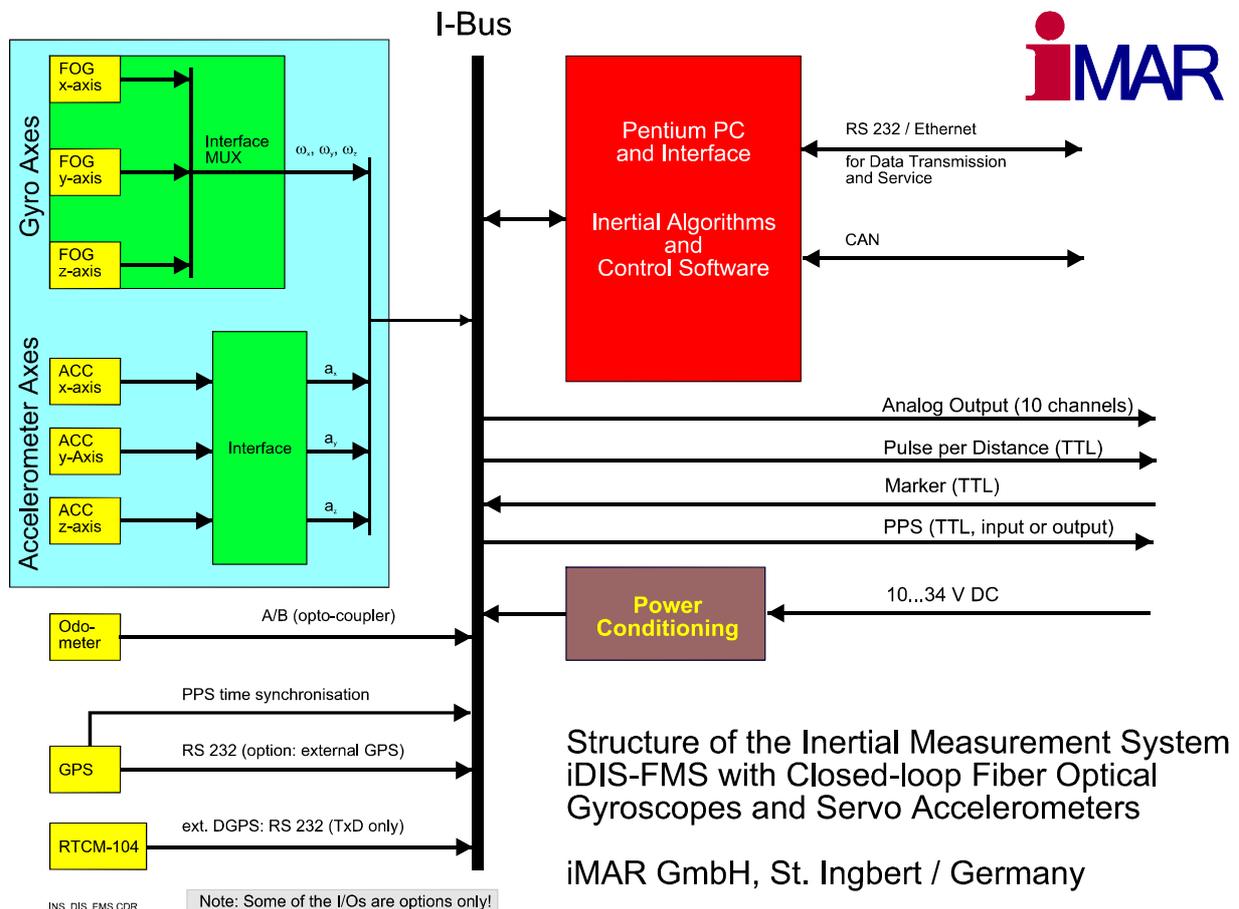


Bild 2: Blockschaltbild eines Inertialmeßsystems in Strapdown-Technik

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", d.h. "festgeschnallt") angebrachte Drehratensensoren erreicht wird. Somit besteht ein inertiales 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 Meßsy-

² Die *schwere* Masse eines Körpers ist die Ursache der Massenanziehung (Gravitation), während die *träge* Masse die Ursache derjenigen Kraft ist, die ein Körper einer Änderung seiner Geschwindigkeit entgegensetzt (Trägheit).

stems auf ein erdfestes Koordinatensystem, i.d.R. 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, welche es erlaubt, auch anwendungsspezifische Sonderwünsche zu integrieren.

Ein wesentliches Design-Aspekt des iDIS-FMS ist die hohe Abtastrate von 400 Hz, großer Meßbereich von ± 500 °/s und ± 10 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 (z.B. in Pipelines) eingesetzt.



Bild 3: iDIS-FMS (Höhe: 108 mm) mit Closed-loop-Faserkreislern in Multiplex-Technologie. Masse: 4.7 kg. P<30 W.

Bild 3 zeigt das entsprechende Meßsystem in leichter, handlicher und doch zugleich sehr robuster Ausführung. Es ist gemäß den Umwelanforderungen 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 Meßtechniker vor Ort stehen als Ergebnis der intern in Echtzeit durchgeführten Berechnungen u.a. folgende Größen zur Verfügung (alle mit Zeitstempel):

- Nutzdrehrate im fahrzeugfesten Koordinatensystem (erddrehratenkompensiert),
- Nutzbeschleunigung im fahrzeugfesten Koordinatensystem (erdschwerekompensiert),
- Orientierungswinkel (Wanken, Nicken, Gieren) des Fahrzeugs bzgl. dem lokalen, erdfesten Horizontal-Koordinatensystem (sog. 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.

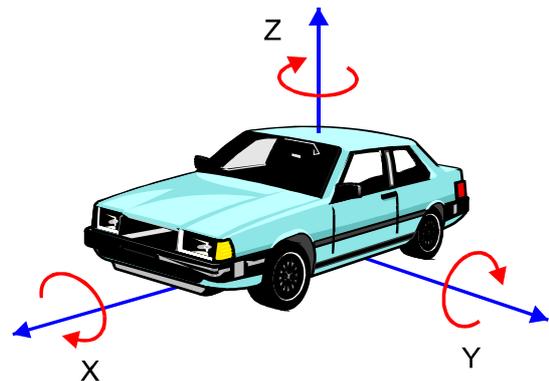
3 Koordinatensysteme

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 Versuchsortes, 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 das **Fahrzeugkoordinatensystem**, das in DIN 70 000 derart definiert ist. Seine x-Achse weist in Vorwärts-Fahrzeuginnenraumrichtung, 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.

Bild 4: Koordinatensystem nach DIN 70 000

Der Übergang vom Sensor- oder Fahrzeugkoordinatensystem zum erdfesten Koordinatensystem erfolgt systemintern durch sog. Quaternionen oder Richtungskosinusmatrizen. Da diese Winkeldarstellung 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 Meßbereich, 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 Drehratenaufnehmer können prinzipiell Sensoren eingesetzt werden, die nach zwei

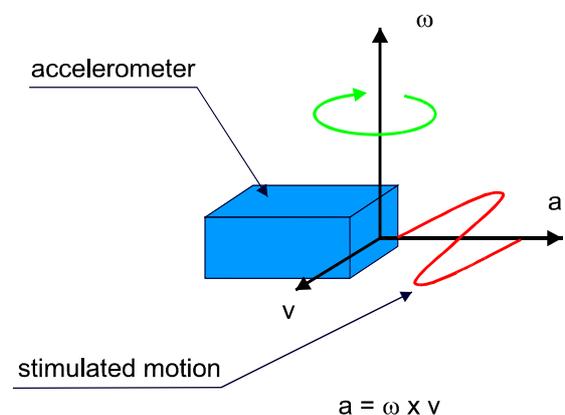


Bild 5: Vibrationskreisel (Prinzip)

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 wird 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 LowCost-Anwendungen eingesetzt, wo im Vergleich zu Faserkreiseln großes Rauschen, große temperaturabhängige Drift (bis zu 3 %/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

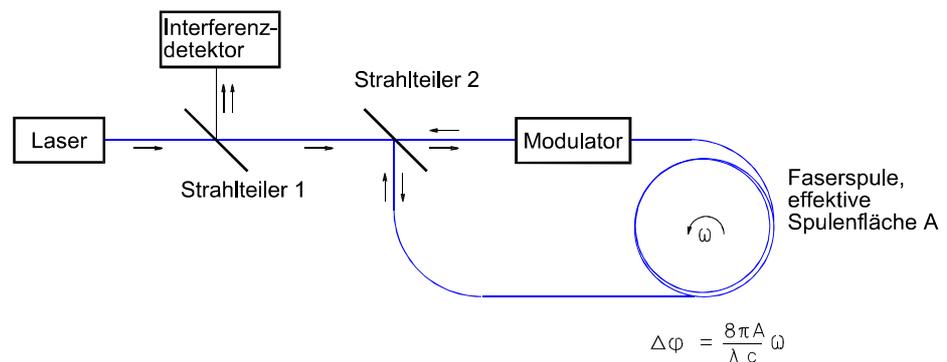


Bild 6: Schematischer Aufbau eines Faserkreisels

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 Faserspulenebene mit der Winkelgeschwindigkeit ω 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 sog. Closed-loop-Faserkreisel.

Die optischen Kreisel zeichnen sich gegenüber den mechanischen oder piezoelektrischen Kreiseln dadurch aus, dass das sensierende 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 z.B. auf www.imar-navigation.de verwiesen.

5 Meßunsicherheit und Meßergebnisse

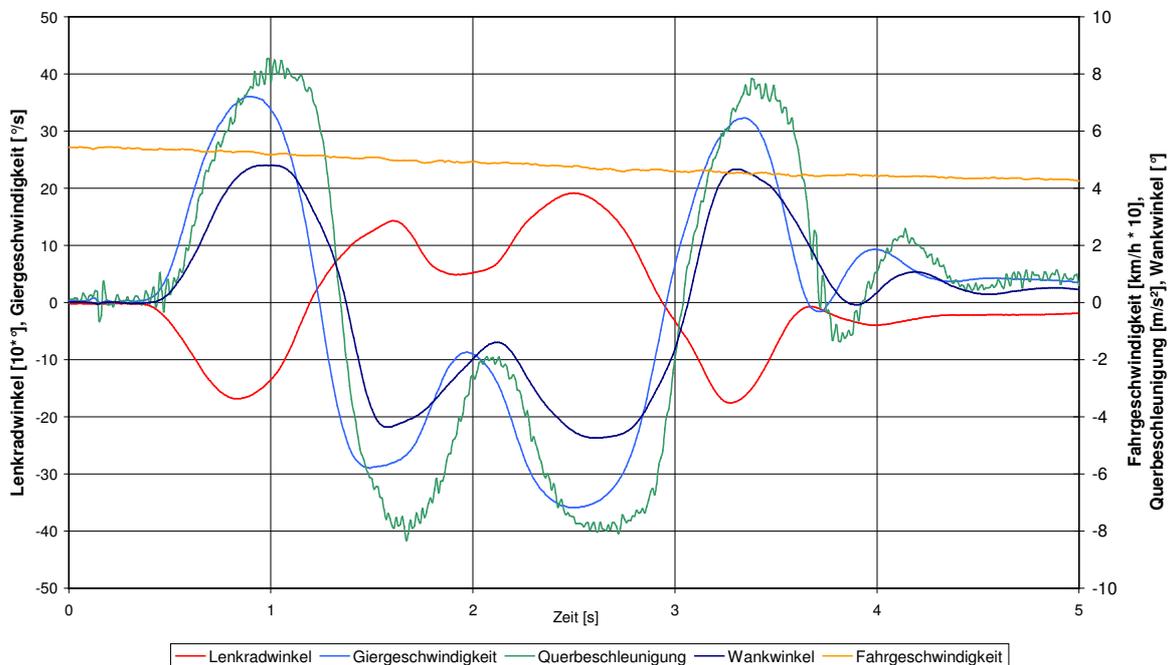
Für einen Einsatz inertialer Meßtechnik sollte der Anwender mit den grundsätzlichen Meßunsicherheiten solcher Systeme vertraut sein.

Unter Kreiseldrift versteht man den Fehlerwinkel pro Zeiteinheit eines Drehratensensors. Befindet sich der Drehratensensor in Ruhe und hat er am Ausgang einen

Doppelter Fahrspurwechsel (Elchtest)

ZF Lemförde, Januar 2002
Meßsystem: Inertialplattform iDIS-FMS (IMAR)

Fahrgeschwindigkeit bei Übergang in Schubbetrieb $v=54\text{km/h}$



Offset von 3 °/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 weißen Rauschens resultiert. Das Rauschen der Drehrate ergibt sich als 1-sigma-Wert bzgl. einer Ausgabe-Bandbreite f [Hz] zu

$$r[\%/s] = RW[\%/sqrt{h}] \times \sqrt{f[\text{Hz}]} \times 60/3600.$$

Betrachtet man eine Drift auf dem Nick- oder Wankkreisel (i.d.R. 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 (d.h. Nick- und Wankwinkel) entscheidenden Einfluß auf die Genauigkeit der Erdschwerekompensation in den gemessenen Beschleunigungssignalen hat, nimmt auch die Meßunsicherheit der ausgegebenen Beschleunigung nach der Erdschwerekompensation über der Meßdauer zu, und zwar ergibt sich je $0,06^\circ$ Winkelfehler ein Beschleunigungsfehler auf den Horizontalkanälen von annähernd 1 mg .

Allerdings ist eine auch noch so geringe Kreiseldrift meist nicht klein genug, um auch längere Meßzyklen mit der erforderlichen Meßgenauigkeit absolvieren zu können. Um die Drift aus den Meßdaten zu eliminieren, werden sog. adaptive Stützungsverfahren eingesetzt. Hierbei wird bei Landfahrzeugen optional eine externe Geschwindigkeitsinformation verwendet, um aus der daraus schätzbaren Längs- und Querschleunigung im Zusammenspiel mit dem Inertialmeßsystem 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 u.a. 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 Fahrdynamik und Fahrkomfort heranzuziehen.

6 iDRPOS: 3D-Toplogievermessung

Der optional in das iDIS-FMS integrierbare iDRPOS-Algorithmus nutzt neben der allg. Odometerstützung ein spezielles 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 dies in der Regel bei LowCost-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 Faserkreiseln und Servo-Beschleunigungsaufnehmern GPS lediglich

als Hilfsinformation und sind damit auch gegenüber Störungen des GPS (z.B. 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 Inertialmeßsystem 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 (z.B.

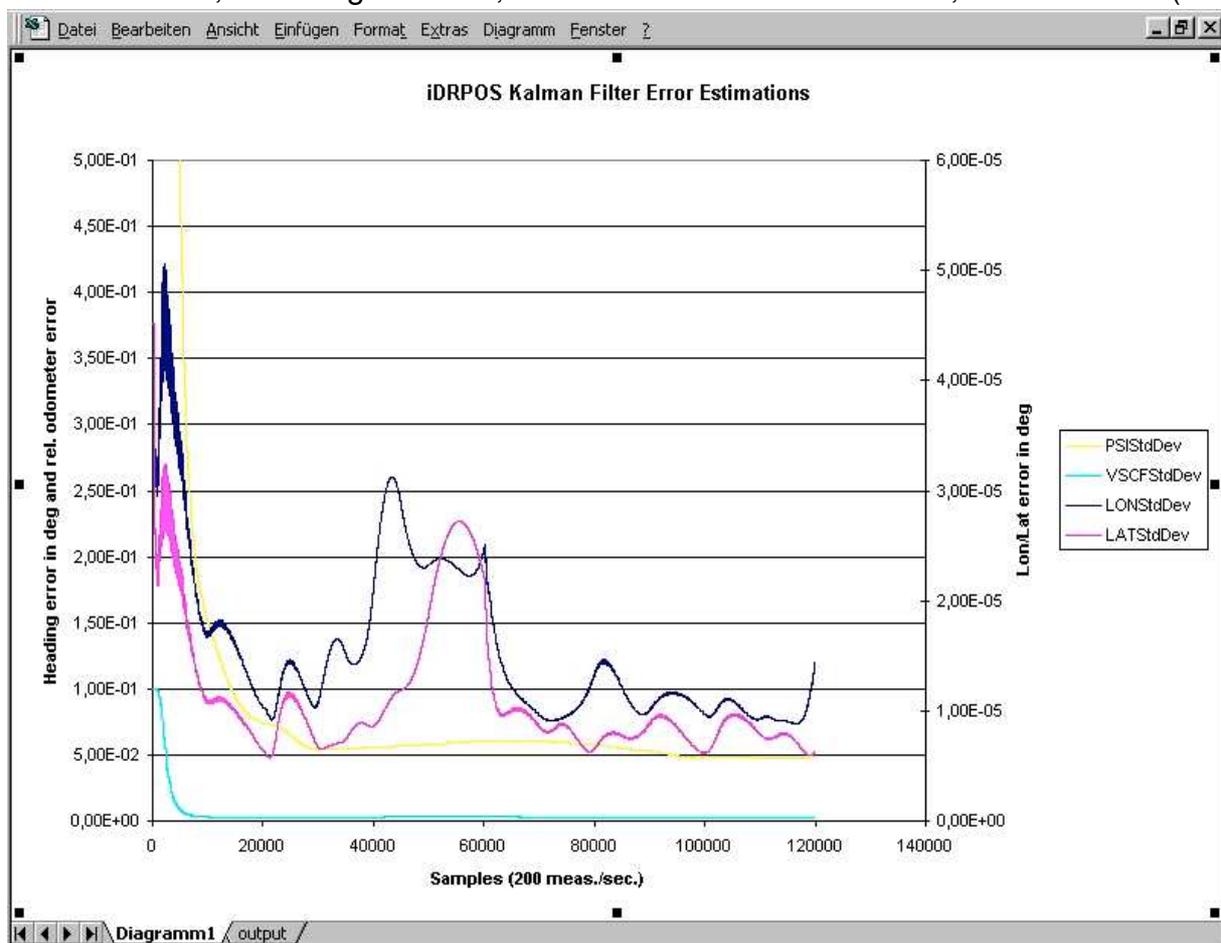


Bild 8: Geschätzte Standardabweichungen der Zustände (Kalmanfilter)

Start/Stop der Ausrichtung) abgesetzt und Meßdaten (z.B. 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 routinierten 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 noch-

mals 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 und Ausblick

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 Skalenfaktoren < 300 ppm und Driften von $1...3$ %/h neben klassischen Aufgaben der Stabilisierung und Navigation auch vorteilhaft für die dynamische und statische 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.

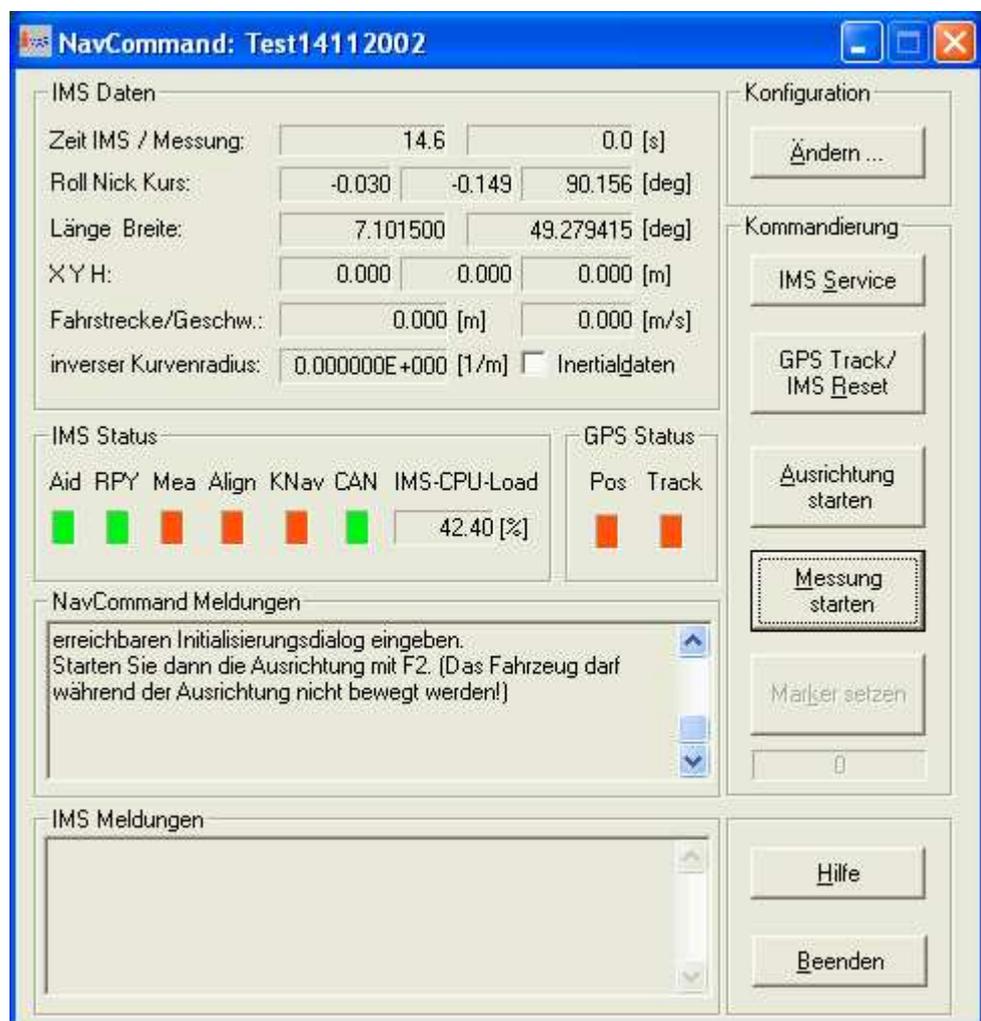


Bild 9: Nav_Command Software

Neben den hier vorgestellten Meßsystemen fertigt iMAR eine Reihe anderer Systeme für Aufgaben in der Roll-over-Vermessung (iTGAC-ROV), in der Crash-Meßtechnik oder unter Einsatz ultrapräziser Laserkreisel für den Einsatz in der hochgenauen Gleisvermessung (iNAV-RQH-RAIL).



8 Literaturverzeichnis

- v. Hinüber, E.; Janocha, H.: Inertiales Meßsystem in Strapdown-Technik für Kraftfahrzeug-Anwendungen. In: Proceedings SENSOR '93, Nürnberg 1993
- v. Hinüber, E.; Janocha, H.: Leistungspotential moderner inertialer Meßsysteme. In: ATZ 97 (1995) 1, S. 30ff
- v. Hinüber, E.; Kühl, B.: Faserkreisel für Industrieanwendungen. In: SensorTechnik Heft 10/1997, S. 45-47
- Gevatter, H.-J. (Hrsg); v. Hinüber, E. u.a.: Handbuch der Meß- und Automatisierungstechnik. Springer, 1999, S. 99ff
- Apold, D. u.a.: Mobile Ermittlung von topologischen Straßendaten für dynamische Prüfstandsversuche und Rechnersimulationen. In: ATZ 102 (2000) 6, S. 410ff
- v. Hinüber, E.: New Approaches in High-Performance Navigation Solutions for AUVs. In: Underwater Magazine, Dec. 2001
- v. Hinüber, E.: Inertiale Meßsysteme für militärische und industrielle Einsatzgebiete. In: Soldat + Technik, August 2002