

# Inertiale Messtechnik in industriellen Anwendungen

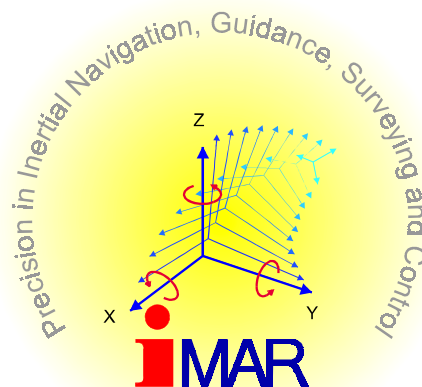
Skript zum CCG-Kurs TV 3.04 am 29. Juni 2001 in Braunschweig / DLR  
(Wiss. Leitung: Prof. Dr.-Ing. B. Stieler)

Dr.-Ing. Edgar v. Hinüber

iMAR GmbH  
Gesellschaft für inertielle Mess-, Automatisierungs- und Regelsysteme

Schlackenbergstraße 41  
D-66386 St. Ingbert

Tel. 06894-9657-0  
Fax 06894-9657-22  
[info@imar-navigation.de](mailto:info@imar-navigation.de)  
<http://www.imar-navigation.de>



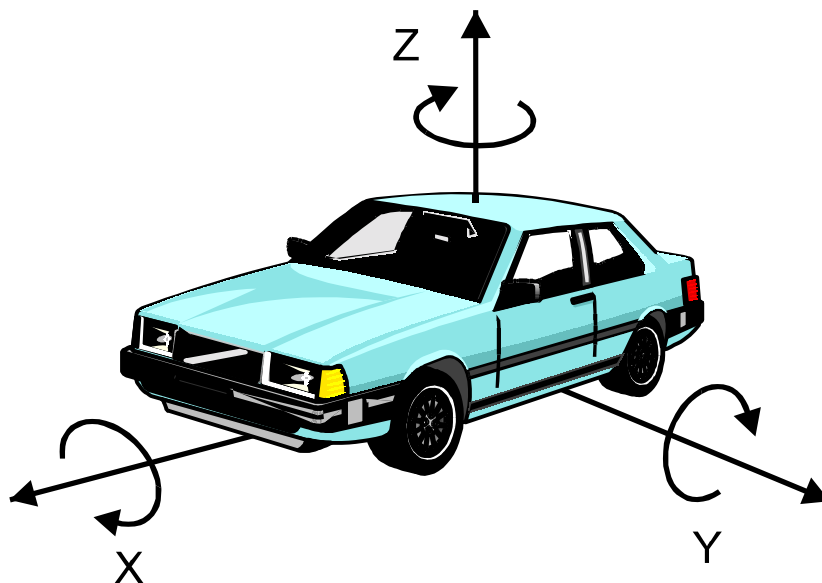
St. Ingbert, im Mai 2001

## Inhalt:

1. Definitionen und Terminologie, Grundlagen
2. Fiktion: Der inertielle Zollstock
3. Robotik: Vermessung von kinematischen Ketten
4. Kfz: Inertielle fahrdynamische Referenzmesssysteme
5. Stabilisierung von Antennen und Zieleinrichtungen
6. Dead Reckoning: Einsatz für Vermessung/GIS/FTF
7. Hochgenaue Bewegungsreferenz für SAR-Anwendungen
8. Marineanwendungen: Heave und Positionierung
9. Überwachung und Service: Pipeline-Vermessung
10. Sensor- und Maschinenausrichtung mit Kreiselssystemen

## 1. Definitionen und Terminologie, Grundlagen

Inertielle Messtechnik wird heute noch hauptsächlich im Bereich der Fahrzeugnavigation und -stabilisierung und in der Bereitstellung präziser Nordreferenzen eingesetzt. Aber es gibt insbesondere im industriellen Bereich viele neuartige Anwendungen, in



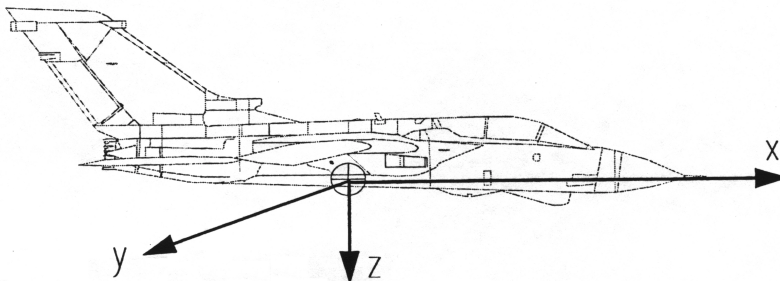
denen die sog. "Kreiseltechnik" vorteilhaft eingesetzt werden kann. Einige Anwendungen sollen im Folgenden skizziert werden, wobei diese Darstellung nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sondern lediglich Anregungen für den Einsatz der Inertialmesstechnik anhand von Realisierungen im industriellen Bereich gibt. Das große Gebiet "Nichtzivile Anwendungen", das natür-

lich die Wiege der Inertialmesstechnik ist, wird nur am Rande beleuchtet, obwohl es auch heute oft noch die Basis für industrielle Entwicklungen darstellt.

Zunächst aber soll ein kurzer Blick auf einige Definitionen geworfen werden, um das Verständnis der folgenden Darstellung zu vereinfachen.

Die Vereinbarung einer eindeutigen Terminologie vereinfacht die Diskussion über technische Inhalte. Da im Folgenden mehrfach auf geodätische Vermessung eingegangen wird, sei hier festgestellt, dass unter dem Begriff "Lage" die Orientierung eines Messsystems im Raum, beschrieben durch seine Lagewinkel, verstanden wird (z.B. "Kurs-Lage-Referenzsystem") und nicht - wie in der Geodäsie üblich - eine Position in geographischen Koordinaten.

Ein trivialer, aber immer wieder zu Verwechslungen führender Unterschied in Navigations- und Vermessungsaufgaben ist die Wahl oder Definition des Koordinatensystems. Im Bereich Luftfahrt bedient man sich des sog. NED Systems (North, East, Down), während



man in der Industrievermessung meist das ENU System (East, North, Up) verwendet (vgl. etwa DIN 70.000).

Wenn man sich der Navigation vom GPS her nähert, so stellt man fest, dass

dort ein Rechtssystem verwendet wird, dessen z-Achse nach oben zeigt, so dass GPS im ENU-Koordinatensystem arbeitet. Wenn man sich jedoch von der Kurswinkelmessung mit einem Magnetkompass her nähert, so erkennt man, dass der Kurswinkel im Uhrzeigersinn gezählt wird, womit die z-Achse nach unten zeigen muss, wenn es sich um eine math. positive Drehung handeln soll (resp. NED-Koordinatensystem). Hier ist besondere Vorsicht geboten, damit nicht bei der Regelung eines Objektes mit inertialen Messsystemen im "falschen" Koordinatensystem ungewollt ein Rollwinkel von  $180^\circ$  zu fatalen Effekten führt. Die Transformation zwischen beiden Systemen ist natürlich eindeutig. Auch ist die Zählpfeilrichtung der Erdschwere zu beachten.

In den folgenden Tabellen sind typische Kennwerte inertialer Sensoren angegeben. Sie sind nur als typische Werte zu verstehen und sollen dem Leser eine Einschätzung geben, welche Sensorgüte etwa zur Verfügung steht, um Aufgaben im Bereich der inertialen Messtechnik zu lösen. Weitere Informationen über die diversen Sensorparameter findet man in vielfältigen Literaturstellen.

	Passiver Beschleunigungsaufnehmer	Aktiver Beschleunigungsaufnehmer	Schwingstab-Aufnehmer	Servo-Beschleunigungsaufnehmer
Messbereich	$\pm 2000$ g	$\pm 500$ g	$\pm 70$ g	$\pm 25$ g
Auflösung	0,1 g	0,01 g	10 $\mu$ g	< 1 $\mu$ g
Bandbreite	0...5.000 Hz	1...10.000 Hz	0...400 Hz	0...800 Hz
Linearitätsfehler	< 1 %	< 1 %	< 175 ppm <sup>1)</sup>	< 60-125 ppm <sup>1)</sup>
Bias	<50 g	---	< 2 mg <sup>1)</sup>	< 10-100 $\mu$ g <sup>1)</sup>
Schock	10.000 g	5.000 g	250 g	150 g
Gesamt-Masse	1 gr	25 gr	10 gr	80 gr

Tabelle 1: Typische Daten von Beschleunigungsaufnehmern  
<sup>1)</sup> Werte nach Korrektur mit polynomialem Fehlermodell

	Mechanischer, dynamisch abgestimmter Kreisel	Faseroptischer Kreisel (dreiaxsig)	Ringlaser-Kreisel	Oszillierender Kreisel	Magneto-hydrodynamischer Kreisel
Messbereich	$\pm 100$ °/s	$\pm 800$ °/s	$\pm 400$ °/s	$\pm 100$ °/s	$\pm 5000$ °/s
Auflösung	0,05 °/h	0,0001 °	0,0003 °	0,003 °/s	k.A.
Bandbreite	0...100 Hz	0...500 Hz	0...300 Hz	0...100 Hz	0,5...1000 Hz
Linearitätsfehler	< 0,1 %	< 300 ppm	< 10 ppm	< 0,5 %	< 0,1 %
Bias	< 0,1...20 °/h	< 3 °/h	< 0.01 °/h	< 1 °/s	k.A.
g-abhängige Drift	< 10 °/h/g <sup>1)</sup>	keine	keine	< 70 °/h/g	<1 °/s/g
Schock	60 g	100 g	40 g	200 g	1000 g
Gesamt-Masse	100 gr <sup>2)</sup>	800 gr	450 gr	50 gr	6 gr

Tabelle 2: Typische Eigenschaften von Drehratensensoren  
<sup>1)</sup> Störgröße durch Fehlermodell kompensierbar  
<sup>2)</sup> ohne Fessel-Elektronik

Auf die Prinzipien der Strapdown-Navigation soll hier nicht näher eingegangen werden, da sie in diversen Fachpublikationen ausgiebig erläutert werden (vgl. z.B. Referenzliste in [www.imar-navigation.de](http://www.imar-navigation.de)).

## 2. Fiktion: Der inertielle Zollstock

Die Anwendung, die den meisten Betrachtern spontan in den Sinn kommt, wenn man nach dem Einsatz der Trägheitsnavigation für industrielle Messaufgaben fragt, ist der "inertielle Zollstock". Man bewege ein (möglichst kleines) InertialMesssystem von A nach B und weiß dreidimensional den Abstand von A zu B mit einer Genauigkeit von 0,1 ... 1 mm.

Doch bereits mit der Grundgleichung der Kinematik, aus der sich direkt ableiten läßt, dass sich die Position bei ungestützter Inertialmessung als doppelte Integration der Beschleunigung über der Zeit ergibt, kann man unmittelbar zeigen, dass man bei endlichen Messzeiten die gewünschten Genauigkeiten mit verfügbaren Sensoren nicht annähernd erreichen kann.

$$\delta s = \frac{1}{2} \delta a T^2$$

Vereinfachend sei eine geradlinige Bewegung in eine Richtung angenommen. Sei  $\delta a$  der Fehler (z.B. Offset) des Beschleunigungsaufnehmers, dann erhält man mit einem recht guten Beschleunigungsaufnehmer (10  $\mu\text{g}$  Offset) nach  $T = 60$  Sekunden einen Fehler von 18 cm! Einen Positionsfehler von 1 mm erreicht man bereits nach 4 Sekunden, und dabei sind vereinfachend alle anderen (und teilweise erheblichen) Fehlereinflüsse unberücksichtigt geblieben. Man beachte z.B., dass die von den Beschleunigungsaufnehmern stets mitgemessene Erdschwere mit  $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$  um viele Zehnerpotenzen größer ist als die zu detektierende Nutzbeschleunigung!

Und um die Erdschwere korrekt im Messsignal des Beschleunigungssensors kompensieren zu können, muss deren Richtung im Sensor-Koordinatensystem äußerst präzise bekannt sein. Ein Fehler in dieser Richtungsbestimmung von  $0,0006^\circ$  (etwa 2 Bogensekunden) führt bereits zu einer Fehlkompensation der Erdschwere mit  $10 \mu\text{g}$ , und somit wird unmittelbar deutlich, weshalb zusätzlich äußerst genaue Drehratensensoren zur Richtungsbestimmung benötigt werden.

Drehen wir den "inertialen Zollstock" etwa um  $180^\circ$  über Kopf, muss die Erdschwere trotzdem mit - um bei dem obigen Beispiel zu bleiben -  $0,0006^\circ$  genau ermittelt werden, und das erfordert einen Skalenfaktorfehler von  $< 3 \text{ ppm}$  auf den Kreiseln, was nur höchst genaue (und entsprechend große/schwere) Laserkreisel erreichen.

Die Verfügbarkeit eines ungestützten "inertialen Zollstocks" im Format eines Kugelschreibers ist somit (leider) bis auf weiteres Utopie.

Aber wir haben an diesem Beispiel bereits wichtige Randbedingungen für die Auslegung inertialer Messtechnik für industrielle Anwendungen kennen gelernt.

### 3. Robotik: Vermessung von kinematischen Ketten

Industrieroboter sind i.d.R. auf eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit getrimmt, da sie gewöhnlich im Teach-in-Verfahren programmiert werden. Muss man aber in gewissen Anwendungen (z.B. Laserschweißen) sicherstellen, dass die Absolutgenauigkeit auch während dynamischer Bewegungen hinreichend gut ist und der Roboter von einem CAD-System aus programmiert werden soll, muss der Roboter zuvor kalibriert werden, um den Einfluss von Getriebefehlern, Fertigungstoleranzen, Steifigkeiten der Arme etc. zu eliminieren.

Eine Über-alles-Kalibrierung beliebiger kinematischer Ketten setzt voraus, dass Position und Orientierung des Endeffektors an beliebiger Stelle des Arbeitsraums des Roboters präzise, schnell und ohne großen externen apparativen Aufwand bestimmt werden können. Es gibt verschiedene Messsysteme für die Vermessung von Robotern, die aber obige Forderungen nur teilweise erfüllen. So unterliegen sämtliche optischen Messverfahren einerseits der Problematik der optischen Verdeckung, andererseits sind externe Aufbauten erforderlich (Theodoliten, Kamerasysteme, Laser, etc.), die die Durchführung der Positionsvermessung recht unhandlich und die genaue Bestimmung der Orientierungsfehler oft unmöglich machen.

Hier eignet sich u.U. der Einsatz eines InertialMesssystems, da sehr kurze Kalibrierfahrten definiert werden können, mit denen die Fehler des InertialMesssystems hinreichend gering gehalten werden können. Ferner kann die hohe Wiederholbarkeit des Roboters (z.B. 6-Achsen-Industrieroboter) selbst genutzt werden, um gewisse Parameter des IMS während der Messung zyklisch zu kalibrieren/identifizieren.

	Positionsfehler [m] (Verfahrweg: 0,98 m)			
$T_v = 5 \text{ s}$	$f_g = 2 \text{ Hz}$	$f_g = 5 \text{ Hz}$	$f_g = 100 \text{ Hz}$	$f_g = 1 \text{ kHz}$
Butterworth	-0,141	-0,057	$-2,82 \cdot 10^{-3}$	$-280 \cdot 10^{-6}$
Bessel	-0,100	-0,040	$-2,00 \cdot 10^{-3}$	$-200 \cdot 10^{-6}$
IIV-Filter	$104 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$< 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

Tabelle 1: Durch Bandbegrenzung (Filterung) des Beschleunigungssignals verursachter Positionsfehler für ein typisches Beschleunigungsprofil (Bewegung translatorisch über 0,98 m in x-Richtung während 5 Sekunden Verfahrdauer)

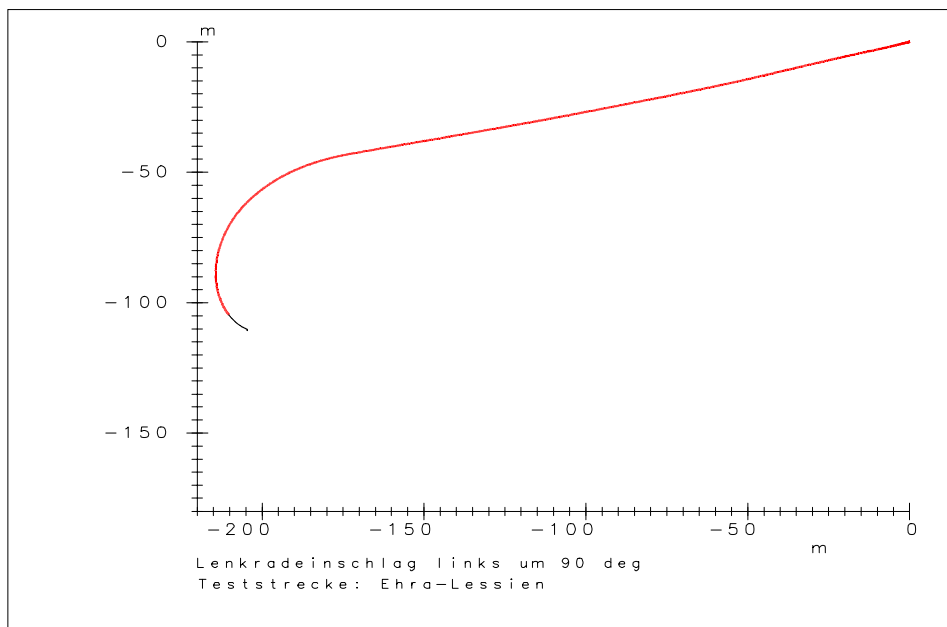
Dabei wird die mit einem Closed-loop-Analog-Digital-Umsetzer quantisierte Beschleunigung in den drei Raumachsen des Handkoordinatensystems des Roboters zweimal über der Zeit integriert, nach dem der Einfluss der Erdbeschleunigung orientierungsrichtig aus den Beschleunigungsmesswerten eliminiert wird. Da sich die Orientierung des Handkoordinatensystems beim Verfahren des Roboters gegenüber dem Weltkoordinatensystem ständig ändert, werden neben den drei Beschleunigungsaufnehmern zusätzlich drei Drehratenaufnehmer (Laserkreisel) eingesetzt, um durch die Lösung

der Transformationsdifferentialgleichung aus der Winkelgeschwindigkeit den Orientierungswinkel des Messsystems im inertialen Raum bestimmen zu können. Da die Sensoren in dem hier betrachteten Genauigkeitsbereich thermisch empfindlich reagieren, müssen umfangreiche Fehlerkorrekturalgorithmen eingesetzt werden, um die geforderten Genauigkeiten sicherzustellen. Aufgrund der hohen möglichen Beschleunigung (jede Messung sollte kürzer als 3...4 Sekunden sein) sind z.B. spezielle Signalfilter (sog. Integral-Invarianz-Filter) zu verwenden.

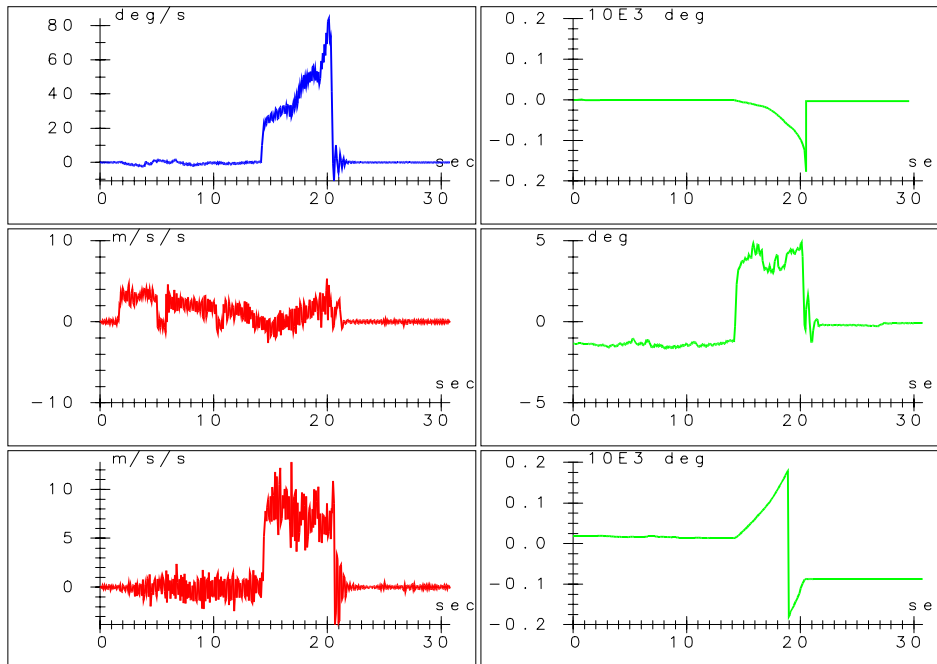
Erreichbare Genauigkeiten liegen bei etwa 0,1 mm, die Systemkosten sind jedoch aufgrund der eingesetzten Sensortechnologie vergleichsweise hoch.

#### 4. Kfz: Inertiale fahrdynamische Referenzmesssysteme

Inertiale Messsysteme bzw. sog. Kurs-Lage-Referenzsysteme werden seit vielen Jahren auch bei der Entwicklung von Landfahrzeugen als Fahrdynamik-Messsysteme eingesetzt. Bis 1992 waren diese Systeme, die dem Konstrukteur eines Fahrzeugs wertvolle Informationen über das dynamische Verhalten des Fahrzeugs auf der Straße durch Bestimmung der erddrehratenkompensierten Drehraten, der erdschwerekompensierten Beschleunigungen und der Lagewinkel (RPY) liefern, ausschließlich in Rahmenteknik (sog. Plattform-Systeme) mit mechanischen Kreiseln verfügbar. 1992 führte iMAR zusammen mit Mercedes-Benz das erste Fahrdynamische Referenzmesssystem in Strapdown-Technik mit Faserkreiseltechnologie ein.



In Ehra-Lessien (VW-Teststrecke, 1993) inertial gemessene Trajektorie eines Fahrzeugs mit iDIS-FV (oberes Bild) und Drehraten, Beschleunigungen, Schwimmwinkel, Fahrzeugwinkel im unteren Bild [links:  $\omega_z, a_x, a_y$  rechts:  $\beta, \phi_x(\phi), \phi_z(\psi)$ ]



Die Forderungen der industriellen Nutzer an ein solches System sind insbesondere hohe Zuverlässigkeit (ein Ausfall der Versorgungsspannung während der Messung darf das Gerät nicht schädigen, wie dies bei den bisherigen Systemen mit mechanischen Kreiseln der Fall war), einfachste Bedienung, robustes Design, analoge Datenausgabe, flexible Erweiterungsmöglichkeit, Wartungsfreiheit und niedrige Kosten.



Heute werden diese Systeme mit Faserkreisen in Multiplex-Technologie, Odometer- und GPS-Stützung und diversen kundenspezifischen Interfaces (CAN, HDLC, Ethernet, RS232 etc.) gefertigt. Dabei hat sich in den letzten 8 Jahren die Performance verdreifacht und die Baugröße trotz der erweiterten Eigenschaften mehr als halbiert.

Heute werden diese Systeme mit Faserkreisen in Multiplex-Technologie, Odometer- und GPS-Stützung und diversen kundenspezifischen Interfaces (CAN, HDLC, Ethernet, RS232 etc.) gefertigt. Dabei hat sich in den letzten 8 Jahren die Performance verdreifacht und die Baugröße trotz der erweiterten Eigenschaften mehr als halbiert.

## 5. Künstliche Horizonte hoher Bandbreite, Stabilisierung von Antennen und Zieleinrichtungen

Die Stabilisierung von Fahrzeugen, Sensoren, Antennen usw. ist ein wichtiges Thema der Anwendung der Inertialmesstechnik auch in industrieller Umgebung. Einsatzgebiete reichen von eher exotischen Anwendungen, wie der Stabilisierung von Strahlungssensoren auf einer kardanischen Miniatur-Plattform, die auf einem Höhenforschungsflugzeug montiert ist, über die Zentrierung von GPS-Antennen und Lagewinkelkompensation von Echoloten auf dynamisch bewegten Schiffen bis hin zur Stabilisierung von TV-Antennen, Zieleinrichtungen und IR-Teleskopen auf Fahrzeugen zu



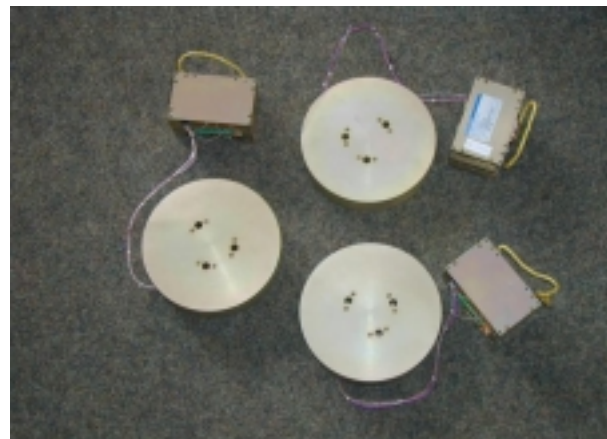
Land, in der Luft und auf hoher See. Andere Anwendungen sind die Stabilisierung von TV-Kameras unter Hubschraubern, Stabilisierung luftgestützter Laserscanner zur Landvermessung oder die Lageregelung von ferngelenkten Unterwasserfahrzeugen und Flugobjekten.



Jedes Einsatzgebiet verlangt hier eine besondere Analyse der Umgebungsbedingungen (Dynamik, Messbereich, Vibration) und ein umfassendes Systemverständnis von der Applikation, um mit geringst möglichem sensorischen Aufwand (Kosten!) die geforderte

Systemgenauigkeit unter allen Betriebsbedingungen zu gewährleisten.

Ein interessantes Beispiel aus dem Bereich der Forschung ist etwa die Entwicklung des Infrarot-Teleskopes SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy), das auf einer Boeing 747 montiert ist (wird), um mit nur geringen atmosphärischen Beeinträchtigungen Himmelskörper beobachten zu können. Dieses Teleskop mit einem Spiegeldurchmesser von 2,7 m muss auf 0,2 Bogen Sekunden stabilisiert werden, wozu drei Faserkreisel höchster Genauigkeit und Auflösung im gemischten Plattform/Strapdown-Betrieb eingesetzt werden (Konzept: iMAR).



## 6. Dead Reckoning: Einsatz für Vermessungsaufgaben und fahrerlose Transportsysteme

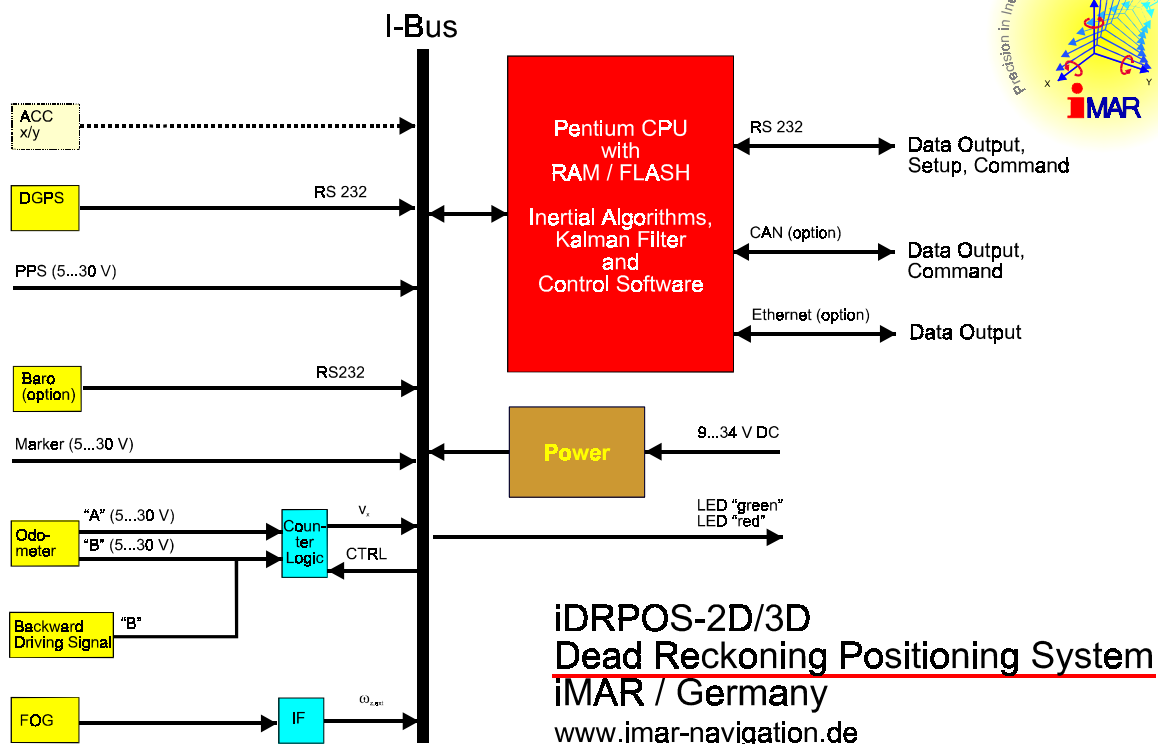
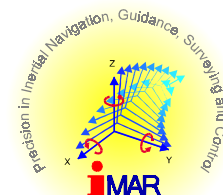
Um eine hinreichend hohe Positionsgenauigkeit mit inertialen Messsystemen zu erhalten, muss gewöhnlich ein sehr hoher Aufwand bzgl. Sensorik (Kreisel, Beschleunigungsaufnehmer) in Kauf genommen werden. Die Schuler-Schwingung, die bei globaler Navigation dazu führt, dass der Positionsfehler bei freier Navigation nicht unbegrenzt quadratisch über der Zeit anwächst, ist direkt proportional zur Genauigkeit der Inertialsensoren: Ein kleinerer Beschleunigungssensorfehler verringert die Amplitude der Schwingung, während ein kleinerer Kreiseloffset (Drift) das Auswandern des Mittelwertes der Schulerschwingung vom wahren Wert verlangsamt. Dennoch liegen beste Navigationssysteme heute noch immer bei Fehlern von etwa 1 nm/36 h, was zu lokalen Fehlern von mehreren 100 Metern führt.

Daher setzt man zur Reduzierung dieses Fehlers wenn möglich sog. Koppelnavigationsverfahren (Dead Reckoning) ein. Hier wird z.B. der zurückgelegte Weg mit einem externen Sensor (z.B. Odometer) gemessen und in der Positionsbestimmung berücksichtigt. Ferner können noch globale Positionstützungen (z.B. Baken, Transponder oder GPS) zur Verbesserung der Positionsbestimmung verwendet werden. Dieses Verfahren entspricht im Prinzip der Koppelnavigation auf See, wo man sich seit Jahr-



hunderten der Geschwindigkeitsinformation (Log), der Richtungsinformation (Kompass) und gelegentlichen Positionsbestimmungen (Peilung von Landmarken und Astronavigation, heute terrestrische Funkortung und GPS) bedient, um jederzeit zu wissen (oder schätzen zu können), wo man sich befindet.

Die Kalman-Filterung kann hier genutzt werden, um derartige Stützinformationen unterschiedlicher Quellen im Sinne einer Least-squares-Betrachtung optimal miteinander zu verknüpfen. Industrielle Anwendungen liegen vor allem in der Führung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF), im Verkehrs- und Flottenmanagement sowie in der effizienten Durchführung geodätischen Vermessungsaufgaben, wie etwa der Erstellung von Datenbanken für automotiv Navigationssysteme.



DRPOS.CDR

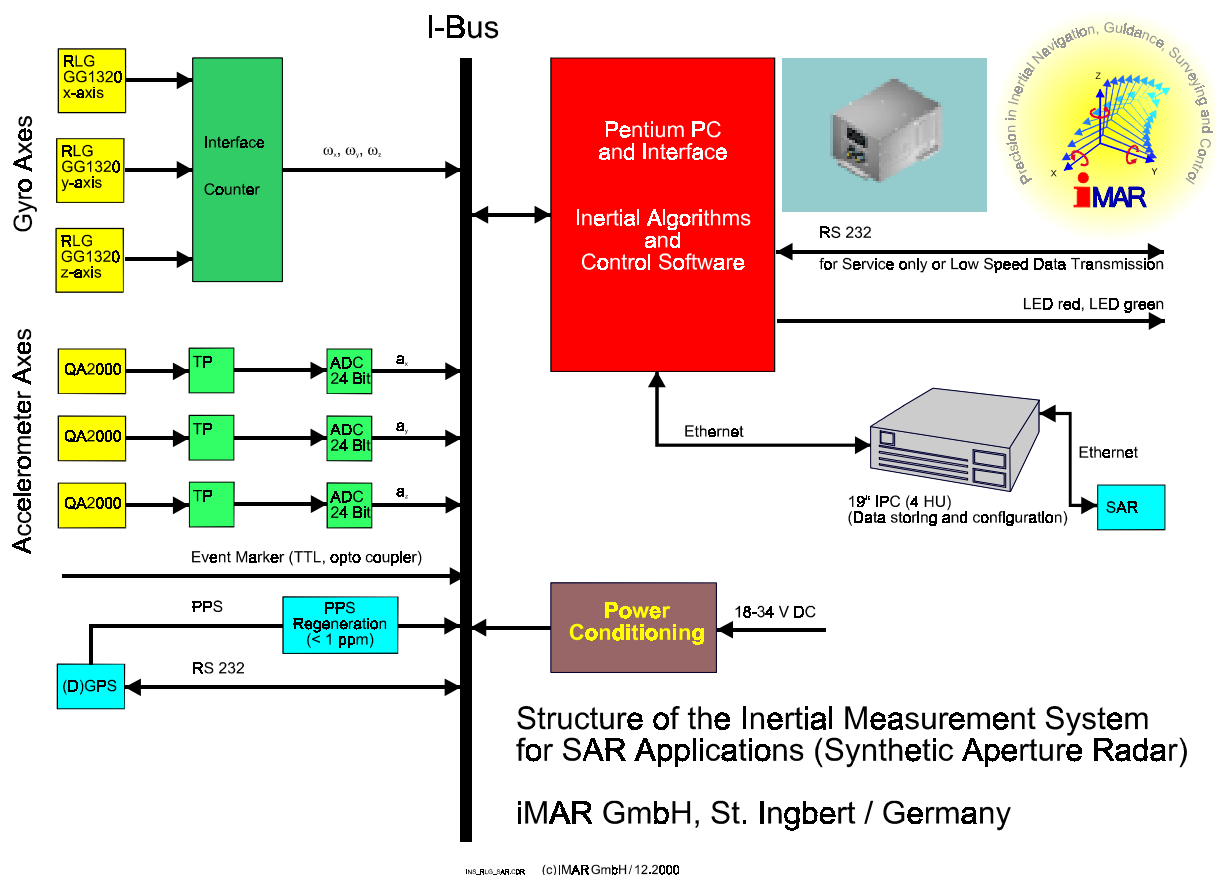
Entscheidend für den industriellen Einsatz ist eine robuste Implementierung des Optimalfilters, verbunden mit einer systemangepassten Heuristik zur Fehlererkennung

und -isolation, um z.B. fehlerhafte GPS-Datensätze selektieren und von der Verarbeitung ausschließen zu können. Die Darstellung zeigt das Blockschaltbild eines derartigen Systems in modularer Systemarchitektur.

Das Fehlerverhalten eines solchen Dead-Reckoning Systems kann recht gut beschrieben werden. Das folgende Bild (im Anhang wiedergegeben) zeigt die Einflüsse von Odometer-Schlupf, Kreiseldrift, Random Walk des Kreises und Geschwindigkeit des Fahrzeugs auf den Positionsfehler.

## 7. Hochgenaue Bewegungsreferenz für SAR-Anwendungen

Zur großräumigen dreidimensionalen Landesvermessung können effizient flugzeuggestützte Verfahren eingesetzt werden. Hierbei unterscheidet man zwischen gewöhnlichen bildverarbeitenden Methoden (Stereo-Photogrammetrie), scannenden Verfahren (z.B. Einsatz eines Laserscanners) oder radargestützten Verfahren (Synthetic Aperture Radar, SAR). Bei allen Verfahren ist es wesentlich, Position und Lagewinkel des Trägerflugzeuges präzise und mit hoher Bandbreite zu kennen.



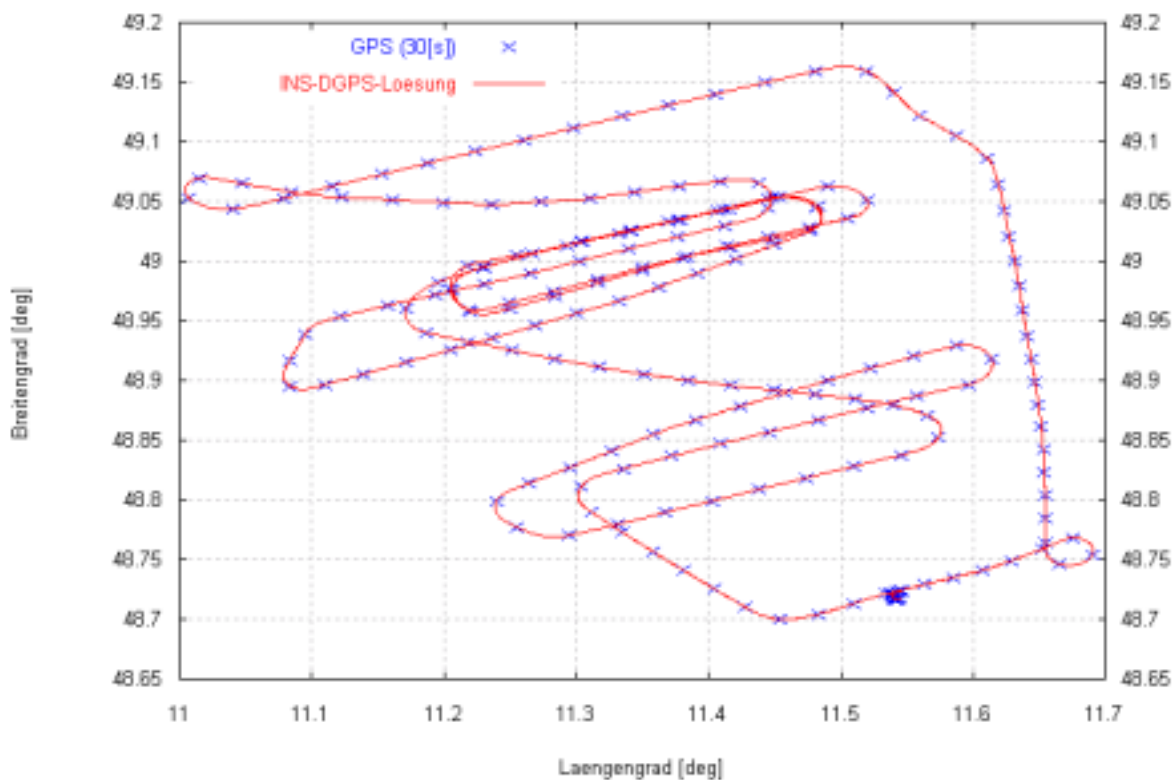
Bei SAR-Anwendungen, bei denen eine imaginäre große Radarantenne dadurch im Rechner gebildet wird, indem man viele sequentiell erzeugte Teilbilder einer einzigen kleinen Radarantenne "richtig" zusammenfügt, ist es besonders wichtig, dass über ein gewisses Zeitfenster von 2 - 10 Sekunden die Geschwindigkeit sehr exakt (d.h. mit ei-

nigen Millimetern pro Sekunde Restfehler bei einer Flugzeuggeschwindigkeit von etwa 80 m/s) bekannt ist, damit die Teilbilder phasenrichtig verarbeitet werden können. Die Lage in Roll/Pitch/Yaw muss darüber hinaus mit deutlich unter hunderstel Grad Genauigkeit bestimmt werden.

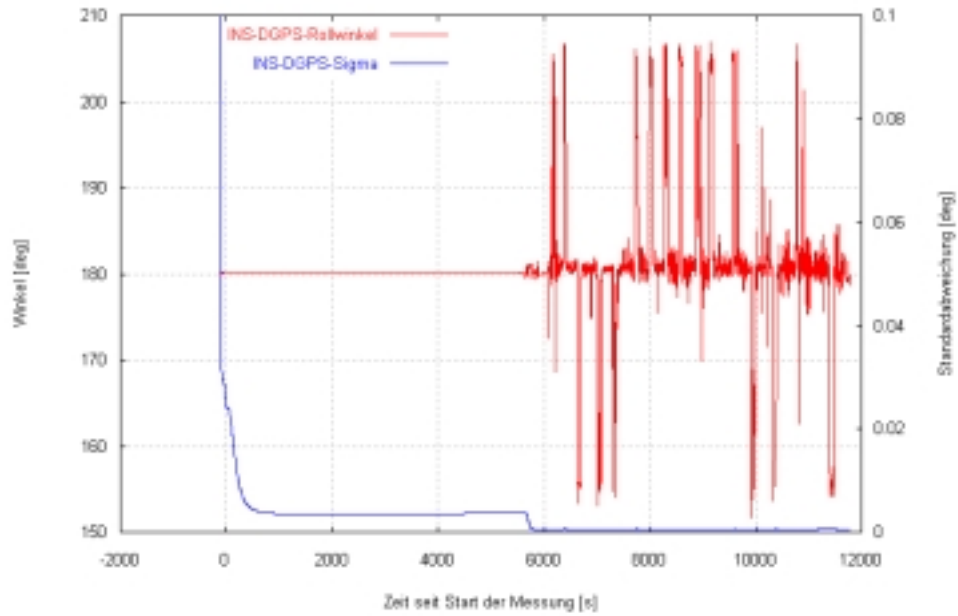
Diese Anforderungen werden durch den Einsatz hochoptimierter InertialMesssysteme mit offener Benutzerschnittstelle erreicht, die sich gegenüber konventionellen Navigationssystemen durch eine um Faktor 5...10 höhere Datenrate, eine Winkelauflösung von 1 arcsec ( $0,0003^\circ$ ), eine äußerst präzise Zeitsynchronisation und eine ausgefeilte Filtertechnik zur INS/GPS-Datenfusion auszeichnen. Dabei stehen während des Messvorgangs sog. Quicklook-Daten mit mittlerer Genauigkeit zur Verfügung und im Postprocessing werden die Ergebnisse mit höchster Genauigkeit berechnet. Als Sensorik werden Ringlaserkreisel und Servo-Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Das folgende Bild zeigt eine derartige Systemkonfiguration und die Realisierung.

Die Messdaten zeigen Plots einer typischen Trajektorie und Winkeldaten (Quelle: Dornier: DOSAR-NAV by iMAR; Flughafen der WTD61 in Manching), aufgezeichnet mit einem RLG-System. Unter Verwendung von Radarreflektoren als Referenz konnte gezeigt werden, dass der Geschwindigkeitsfehler der INS/GPS-Lösung über ein Fenster von 5...10 Sekunden im Bereich von 1...3 mm/s liegt.

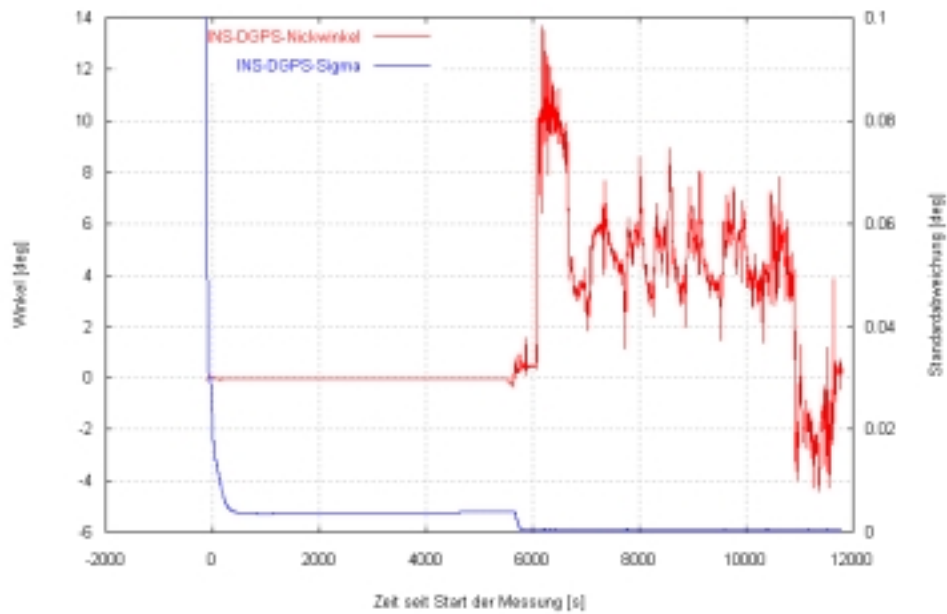
Flugbahn Dornier 24.7.2000



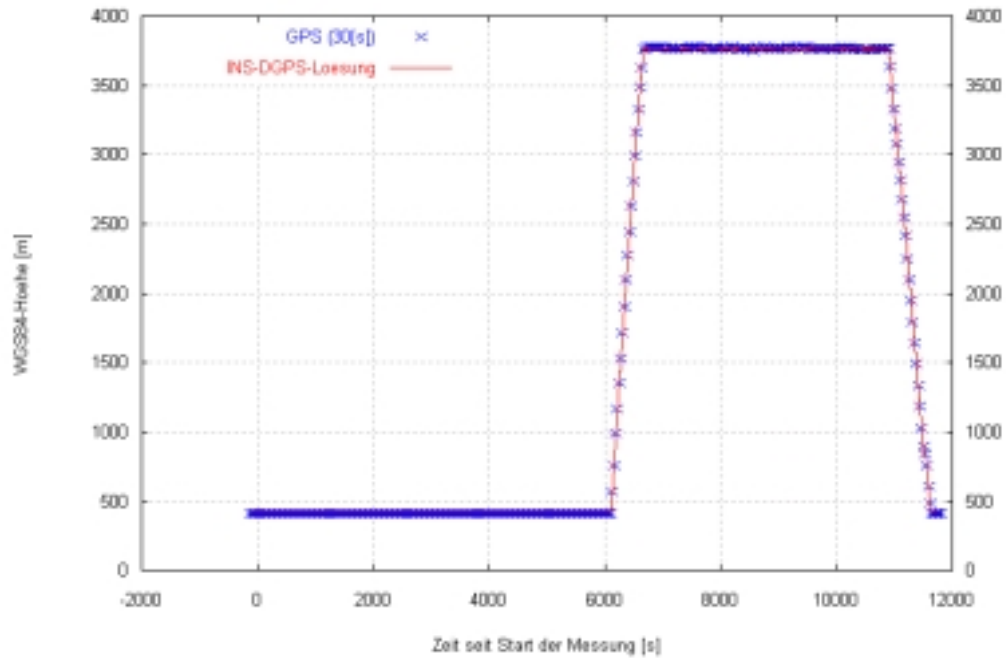
### Rollwinkel Dornier 24.7.2000



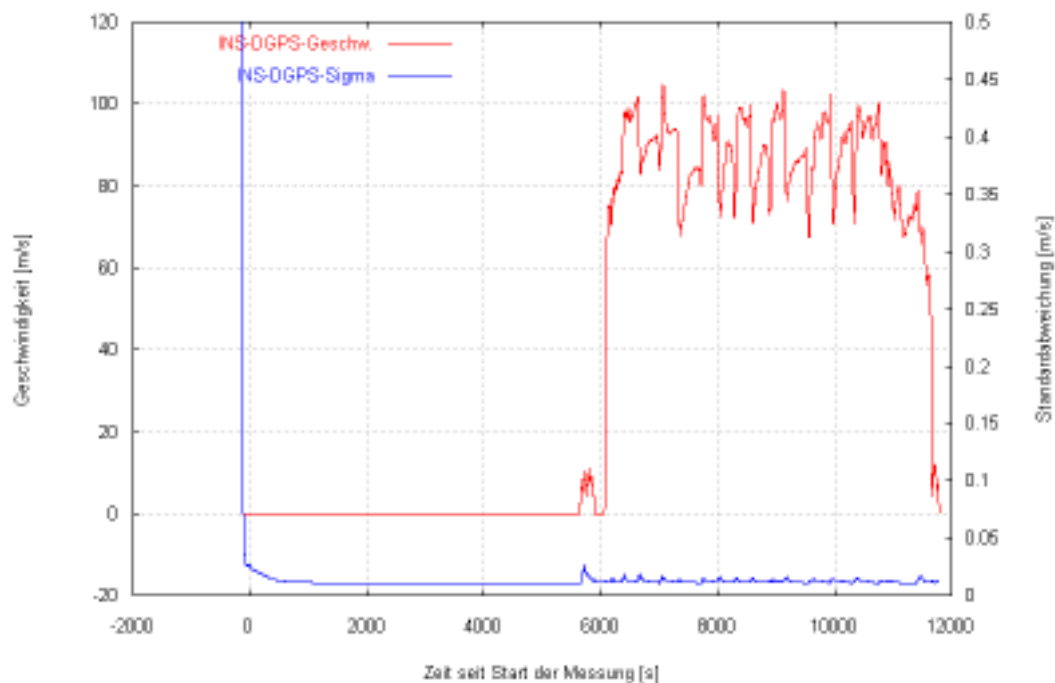
### Nickwinkel Dornier 24.7.2000



### Höhenprofil Dornier 24.7.2000

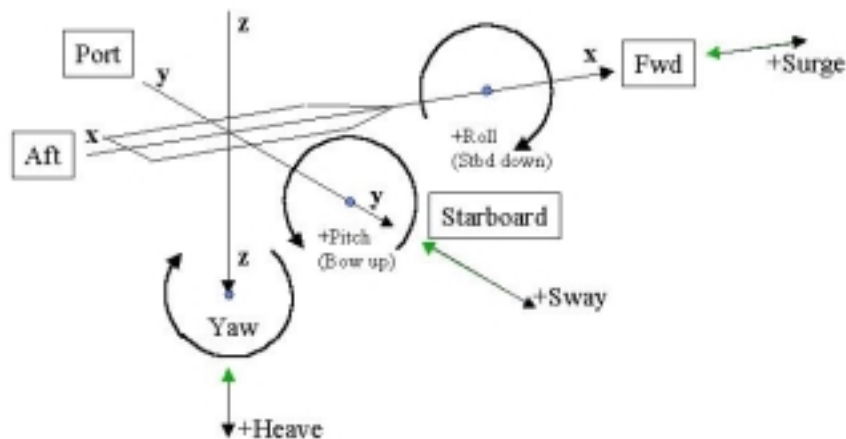


### Flugzeug-Längsgeschwindigkeit Dornier 24.7.2000



## 8. Marineanwendungen: Heave und Positionierung

In vielen Anwendungen im Marinebereich werden präzise Positions- und Lagereferenzen benötigt. Soll etwa die Topographie des Meeresbodens vermessen werden,



implementiert man auf einem Schiff einen (D)GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung und ein Echolot zur Tiefenmessung. Nun muss noch hinreichend genau die Lage (Roll, Pitch, Yaw) des Schiffes mit einem inertialen Messsystem bestimmt werden, um die Hebelarmeinflüsse der GPS-Antenne und die Strahlabweichung des Echo-Strahls kompensieren zu können.

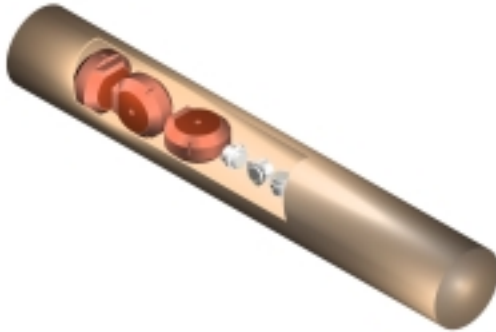
Da das Echolot eine wesentlich höhere Bandbreite hat als das GPS, soll das InertialMesssystem zusätzlich auch die relative Höhenänderung des Schiffes aufgrund von Wellenbewegungen (sog. Heave) ermitteln und zur Verfügung stellen. Eine Heave-Genauigkeit von 1...5 cm ist dabei ohne Einschränkung der Messdauer möglich - aber nur deshalb, weil man die Randbedingung (Voraussetzung) nutzt, dass das Schiff sich im Mittel in der Höhe um eine imaginäre Null-Linie bewegt, d.h. dass sich die Mittelwerte von vertikaler Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung über lange Zeiten zu Null ergeben.

Aus dieser Voraussetzung für die Heave-Berechnung folgt natürlich sofort, dass ein derartiges InertialMesssystem Heave nicht berechnen kann, wenn es z.B. auf einem U-Boot oder einem Landfahrzeug installiert ist.

## 9. Pipelinevermessung

Die Wartung und Kontrolle von Pipelines, die über/unter Land und im Wasser verlegt sind, ist sehr aufwendig. Eine Automatisierung erreicht man, indem man autonome Fahrzeuge (sog. Molche) durch die Pipeline schickt, die über entsprechende Sensorik verfügen, mit denen z.B. über Ultraschall- oder Magnetflussmessungen Schadstellen in der Pipeline erkannt werden können. Damit nun eine mögliche Reparatur an der richtigen Stelle der Pipeline vorgenommen werden kann, muss sehr genau eine Positionszuordnung zu den als schadhaft erkannten Stellen möglich sein. Hierfür können vorteilhaft inertielle Messsysteme eingesetzt werden.

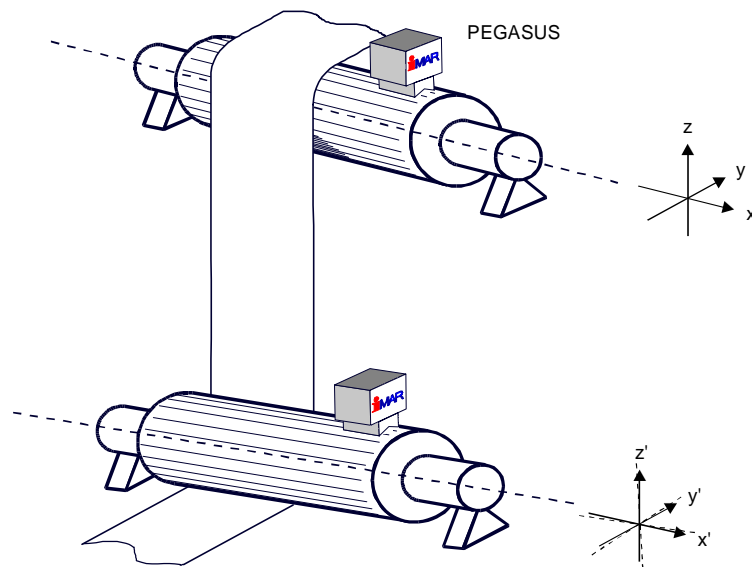
Diese Messsysteme arbeiten primär nach dem Dead-Reckoning-Verfahren, d.h. die zurückgelegte Distanz wird über Odometer (Messräder) bestimmt, während die Lage des Molches über das InertialMesssystem bestimmt wird. Um eine Drift des Messsystems (Kreisel drift, Schlupf der Odometer) zu kompensieren, werden regelmäßig an der Pipeline (z.B. alle 10 km) sog. Marker positioniert, deren geographische Koordinaten genau bekannt sind (z.B. mittels DGPS). Über eine entsprechend genaue Zeitsynchronisation ist es im Postprocessing dann möglich, zu jedem Zeitpunkt die Position des Messsystems in der Pipeline auf etwa 1 Meter genau zu bestimmen. Eingesetzt werden Laserkreisel oder Faserkreisel in Abhängigkeit der Messdauer und der geforderten Genauigkeit.



ter genau zu bestimmen. Eingesetzt werden Laserkreisel oder Faserkreisel in Abhängigkeit der Messdauer und der geforderten Genauigkeit.

## 10. Sensor- und Maschinenausrichtung mit Kreiselsystemen

Um eine Werkzeugmaschine im Rahmen ihrer technischen Möglichkeiten wirtschaftlich optimal einsetzen zu können, sollte ihre absolute Positioniergenauigkeit im Bereich der Wiederholgenauigkeit liegen. Bei derzeitigen Maschinen treten jedoch beispielsweise durch Fertigungstoleranzen teilweise deutliche Orientierungsfehler auf. Darüber hinaus gewinnt die Vermessung von Bearbeitungszentren, Werkzeugmaschinen und Industrierobotern, die präzise und zeiteffiziente Ausrichtung von Navigationsgeräten und Waffensystemen in Luftfahrzeugen oder etwa die Ausrichtung von Richtantennen in der Telekommunikationstechnik mit zunehmenden Qualitätsanforderungen immer stärker an Bedeutung.



Bei derzeitigen Maschinen treten jedoch beispielsweise durch Fertigungstoleranzen teilweise deutliche Orientierungsfehler auf. Darüber hinaus gewinnt die Vermessung von Bearbeitungszentren, Werkzeugmaschinen und Industrierobotern, die präzise und zeiteffiziente Ausrichtung von Navigationsgeräten und Waffensystemen in Luftfahrzeugen oder etwa die Ausrichtung von Richtantennen in der Telekommunikationstechnik mit zunehmenden Qualitätsanforderungen immer stärker an Bedeutung.

Das Bild veranschaulicht am Beispiel von zwei Walzen in einem Walzwerk den dreidimensionalen Winkelfehler, der nur über eine sog. "3D-Wasserwaage" einfach und sicher gemessen werden kann.

Das Bild veranschaulicht am Beispiel von zwei Walzen in einem Walzwerk den dreidimensionalen Winkelfehler, der nur über eine sog. "3D-Wasserwaage" einfach und sicher gemessen werden kann.



Stattet man ein hinreichend präzises InertialMesssystem mit entsprechender Algorith-  
mik aus, so läßt es sich unter Berücksichtigung einiger hardware-spezifischer Rand-  
bedingungen (u.a. Zugriff auf die Rohdaten der Kreisel mit 1 kHz Abtastrate) als 3D-  
Wasserwaage verwenden. Hiermit erreicht man in Abhängigkeit der Messdauer Win-  
kelgenauigkeiten von besser



0,005°. Auch hier besteht wieder die Forderung, dass das System äußerst einfach zu bedienen ist (von einem Industriemechaniker nach maximal 10 Minuten Einweisung) und bei Bedarf an die besonderen Bedürfnisse des Nutzers angepasst werden kann.

Die Kalibrierung kinematischer Ketten mit einem Laserkreisel-messsystem zeigt das folgende Bild (iPEGASUS @

Oerlikon-Contraves, Zürich). Hier wird die hohe Winkelgenauigkeit des Laserkreisel-systems (etwa 0,003 deg) zusammen mit einem Laser-Abstandsmesser verwendet, um in jedem Punkt im Raum die Orientierung und Position bestimmen zu können. Mit diesen Daten kann die Geschützsteuerung "gelernt" werden, so dass eine Verbesserung des kinematischen Modells nach der Kalibrierung um Faktor 5 erreicht wird.