



Navigation Systems

Inertialnavigation (Trägheitsnavigation)

Inhalte

- 
- Einführung
 - Sensoren
 - Plattform-Typen
 - Navigationsgleichungen
 - Plattform-Ausrichtung
 - Navigationsqualität

Einführung (1/8)

- Generelle Bemerkungen

- Historische Entwicklung

- **Ursprünge:** Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts
 - Entwicklung erster **Inertialer Zielführungssysteme** während des Zweiten Weltkriegs in Deutschland (V2-Raketen)
 - Konstruktion erster **Inertialer Navigationssysteme** (INS) für den Lufteinsatz um 1950 durch Charles Draper am MIT
 - Entwicklung **Inertialer Vermessungssysteme** (ISS) ab 1970

- Heutige Nutzung

- Verbreiteter Einsatz für zivile und militärische Anwendungen
 - Inertialnavigation wird sehr häufig **mit GPS integriert**

Einführung (2/8)

- Inertiale Messtechnik (1/3)
 - Grundsätzliche Fragestellungen
 - Aufgabe der Navigation?
 - Was bedeutet „**inertial**“?
 - Messungen
 - **Spezifische Kraft** entlang der Achsen eines wohldefinierten Referenzrahmens (Navigationsrahmen) unter Verwendung von Beschleunigungsmessern (Accelerometer)
 - „**Stabilisierung**“ (mechanisch bzw. analytisch) der Achsen des Referenzrahmens durch Drehratensensoren (Gyroskope bzw. Gyros)

Einführung (3/8)

- Inertiale Messtechnik (2/3)
 - Aus der Messung der spezifischen Kraft können **Beschleunigungen** abgeleitet werden
 - **Einfache Integration** der Beschleunigungen liefert Geschwindigkeit (bzw. Geschwindigkeitsdifferenzen)
 - **Zweifache Integration** der Beschleunigungen liefert Positionsdifferenzen (relative Positionierung)
 - Integrationskonstanten
 - Startposition
 - Startgeschwindigkeit
 - Startausrichtung (*attitude*) ist implizit enthalten

Einführung (4/8)

- Inertiale Messtechnik (3/3)
 - Probleme
 1. Präsenz von **Gravitationsfeldern** → kinematische Fahrzeugbeschleunigung wird durch Anziehungsbeschleunigung überlagert
 2. Abhängig von der Wahl des Referenzrahmens treten **Scheinkräfte** auf → werden durch Rotation des Referenzrahmens relativ zum inertialen Raum verursacht
 - Konsequenzen
 - Gesetze der Newtonschen Mechanik sind nicht mehr unverändert gültig
 - Störbeschleunigungen müssen bei der Lösung der Navigationsgleichungen berücksichtigt werden

Einführung (5/8)

- Plattformen (1/3)
 - Accelerometer und Gyros werden gemeinsam auf Plattformen montiert → typisch: orthogonale Dreibeine (*triads*) von Sensoren
→ **Inertiale Messeinheit (IMU)**
 - Navigationsrahmen
 - **Inertial nicht-rotierend**
 - Quasi-inertialer Bezugsrahmen ... *i*-Frame
 - **Inertial rotierend**
 - Local-level Bezugsrahmen ... *l*-Frame
 - Körper-Bezugsrahmen (*body frame*) ... *b*-Frame

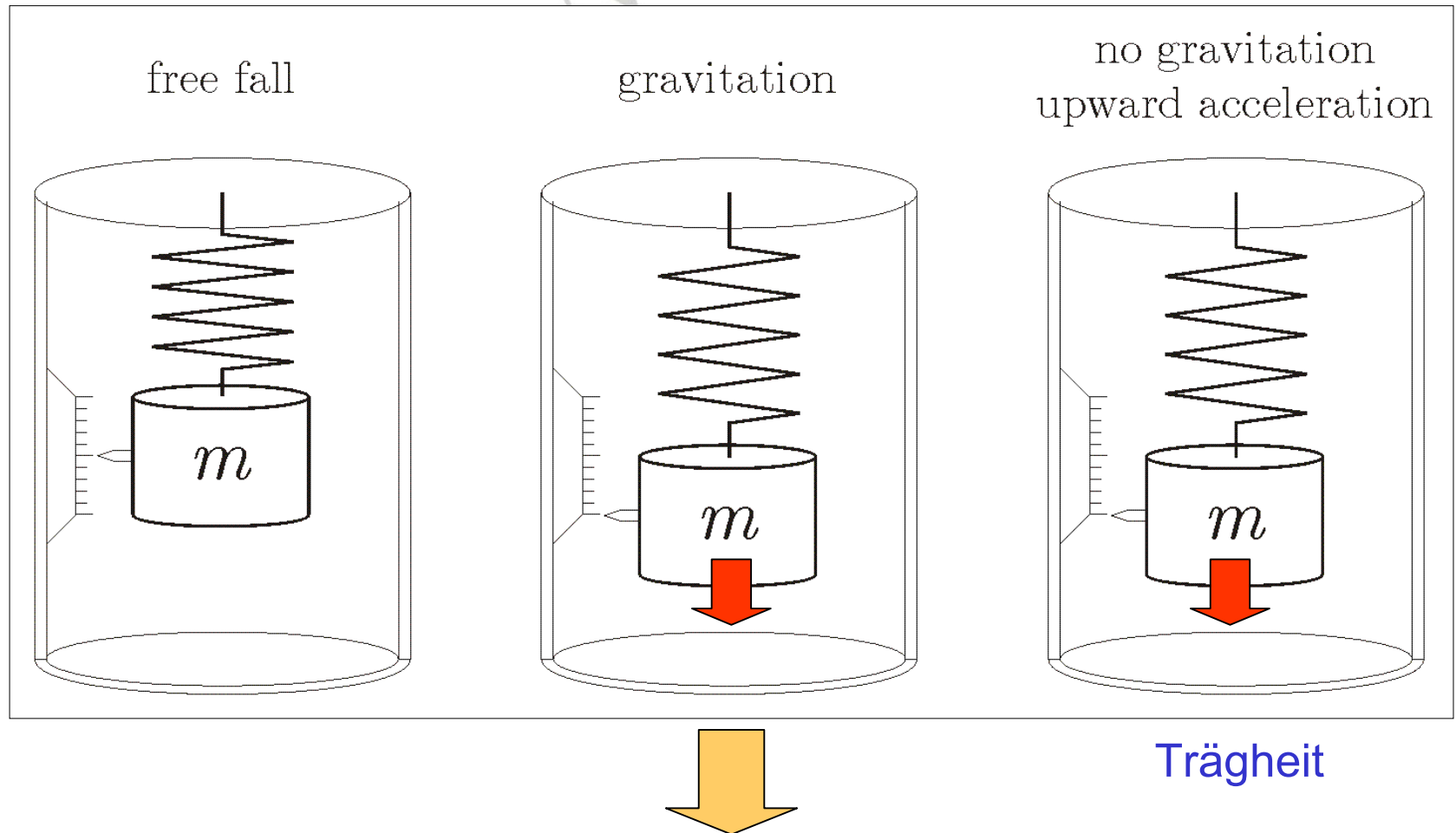
Einführung (6/8)

- Plattformen (2/3)

- Im i -Frame: spezifische Kraft ist **Differenz** zwischen:
 - (inertialer) kinematischer Beschleunigung des Fahrzeugs
 - Gravitation an der Position des Fahrzeugs
- Warum Differenz?
 - **Gedankenexperiment:**
Vertikal ausgerichteter Accelerometer auf Erdoberfläche
 - Konsequenz der Erdanziehung?
 - Konsequenz einer Beschleunigung „nach oben“?
 - Konsequenz eines „freien Falls“?
- Andere Frames
 - Zusätzliches Auftreten von **Störbeschleunigungen**

Einführung (6b/8)

- Verhalten des Accelerometers



Einführung (7/8)

- Plattformen (3/3)
 - Haupttypen
 - **Kardanisch gelagerte Plattformen** (*gimbaled platforms*)
 - Lagerung in meist drei oder vier Kardangelenken → **mechanische Isolation** der Plattform von den rotatorischen Bewegungen des Fahrzeugs
 - Einhaltung einer **festen Orientierung** (*alignment*) bzgl. des inertialen Raums (*i*) oder bzgl. der Erdoberfläche (*l*)
 - Realisierung durch motorisch betriebene Kardangelenke
 - Steuerung der Gelenke aufbauend auf Gyro-Messungen
 - **Analytische Systeme** (*strapdown systems*)
 - Keine mechanische Isolation (evtl. Schocklagerung)
 - **Voll-analytische** Lösung der Navigationsgleichungen (*b*)

Einführung (8/8)

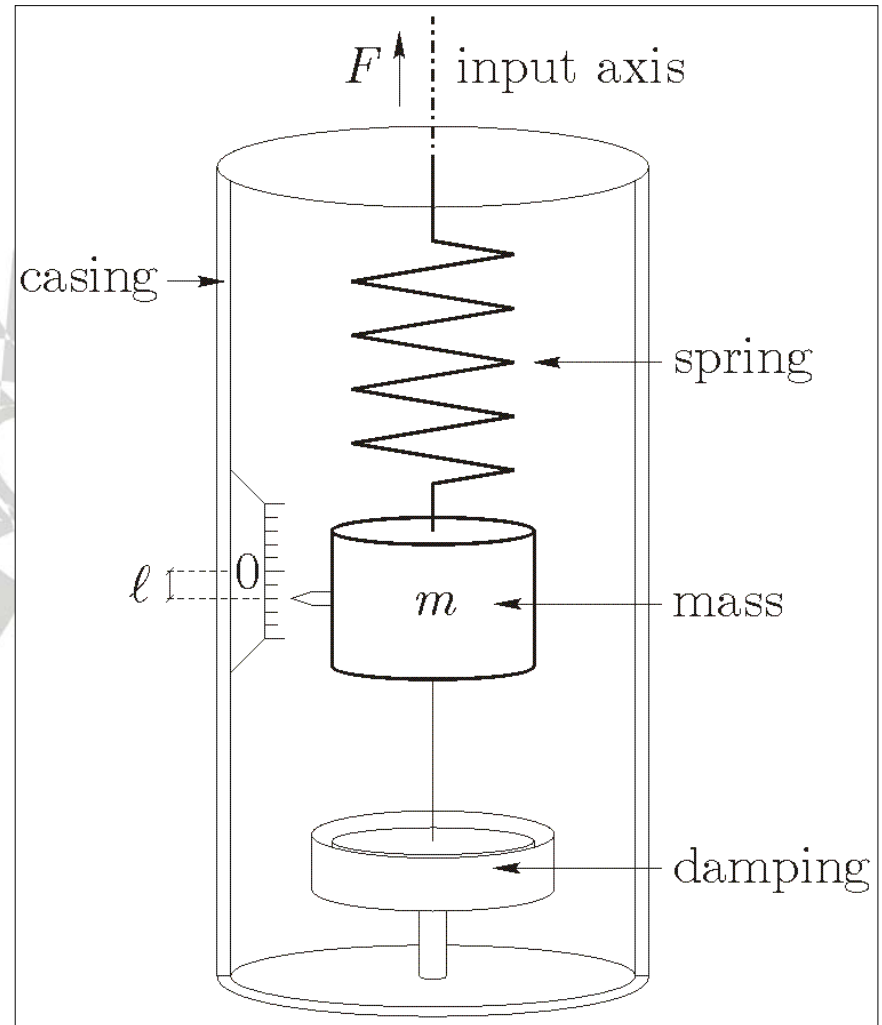
- Kritische Beurteilung der Inertialnavigation
 - **Vorteile**
 - Autonomes Verfahren
 - Hohe Datenraten
 - Keine *line-of-sight*-Problematik
 - Keine Störbarkeit von Außen (→ hohe Zuverlässigkeit)
 - Unabhängigkeit von Wetterbedingungen
 - Hohe Kurzzeitstabilität
 - Genaueste Technik zur Attitude-Bestimmung
 - **Nachteile**
 - Zeitliche Abnahme der Navigationsqualität (systematisch)
 - Bedarf nach Startwerten für den Zustandsvektor
 - Hoher Preis von hochqualitativen Systemen

Sensoren 1 – Accelerometer (1/2)

- Prinzip
 - Messung von Kräften, die auf eine Prüfmasse einwirken
- Sensorarchitektur
 - **Open-loop:** **Direkte Messung** der Bewegung der Prüfmasse
 - **Closed-loop:** **Kompensation** der einwirkenden Kräfte durch sensor-intern erzeugte Gegenkräfte → Prüfmasse bleibt im Gleichgewicht
- Gemeinsame Elemente
 - Instrumenten-„Hülle“
 - Prüfmasse
 - Kalibrierte Aufhängung der Prüfmasse

Sensoren 1 – Accelerometer (2/2)

- Einfaches Prinzip
 - **Kraft-Rückstellung**
 - Prinzip von Feder- oder Pendel-Accelerometern
 - **Beispiel: Feder-Accelerometer (linear)**



Sensoren 2 – Gyros (1/5)

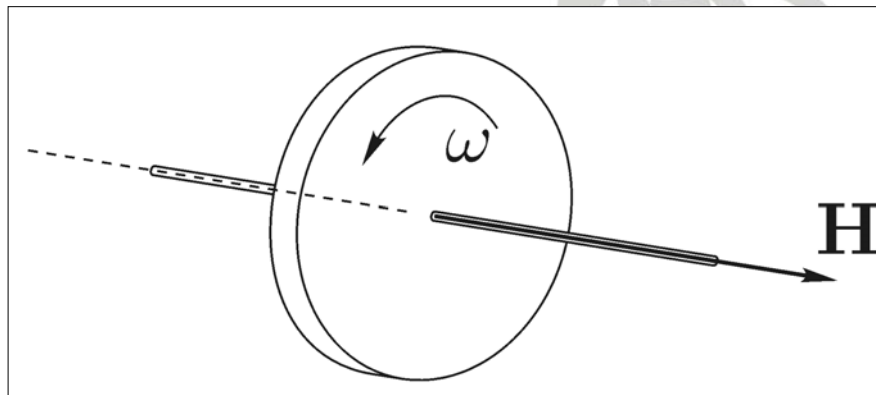
- Aufgabenstellung
 - Messung der Drehgeschwindigkeit (*angular rate*) des Navigationsrahmens relativ zum inertialen Raum
- Wichtigste Realisierungen
 - Mechanische Gyros
 - Schnell rotierender Körper
 - Vibrierender Körper (→ Foucault-Pendel)
 - Optische Gyros
- Einsatz
 - Kardanische Plattformen: meist mechanische Gyros
 - Analytische Systeme: meist optische Gyros

Sensoren 2 – Gyros (2/5)

- Rotations-Gyros (1/2)

- Prinzip

- Rotations-symmetrischer fester Körper rotiert mit hoher Geschwindigkeit um seine (Haupt-) **Symmetrieachse**
 - Bei (nahezu) **reibungsfreier Lagerung** symmetrisch zum Schwerpunkt (auf der Symmetrieachse) erzeugt das Erdschwerefeld kein Drehmoment auf den Körper



Sensoren 2 – Gyros (3/5)

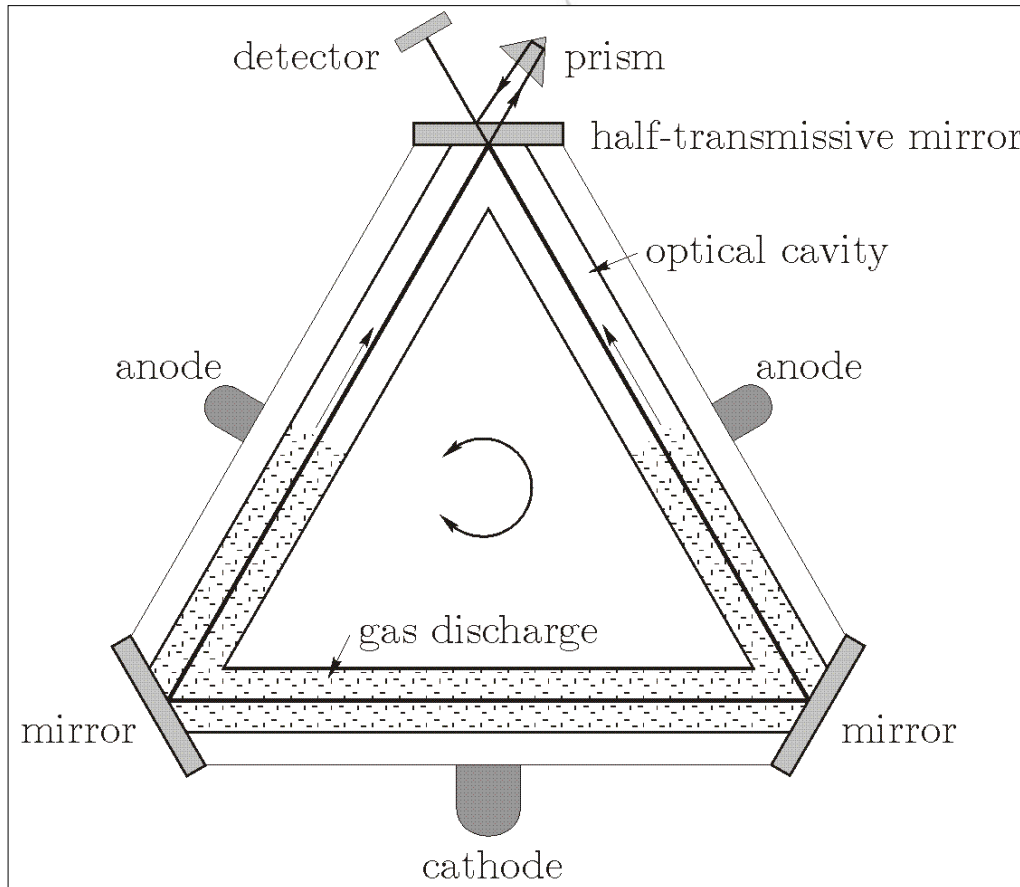
- Rotations-Gyros (2/2)
 - Haupteigenschaften solcher Körper
 - Tendenz zur **Beibehaltung der Rotationsachse** im inertialen Raum (erreichbar bei freier Lagerung)
 - Spezielle Reaktion auf äußere Kräfte bei nicht-freier Lagerung (→ **Präzession**)

Sensoren 2 – Gyros (4/5)

- Optische Gyros (1/2)
 - Prinzip: **Sagnac-Effekt** (Relativitätstheorie)
 - Zwei von derselben Diode erzeugte **Laserstrahlen** bewegen sich in **entgegen gesetzter** Richtung in einem geschlossenen und als eben angenommenen **Lichtweg**
 - **Stationärer Fall**: beide Strahlen müssen **gleich lange Wege** zurücklegen, um zur Diode zurückzukehren
 - **Verdrehung** der gesamten Anordnung (Drehachse orthogonal zur Ebene des Lichtwegs ist) → **Wege unterscheiden sich**
 - Der Weg des „gleich-rotierenden“ Strahls verlängert sich
 - Der Weg des entgegengesetzten Strahls verkürzt sich
 - Aufgrund der **Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit** kann dieser Wegunterschied gemessen werden (→ Rotation)

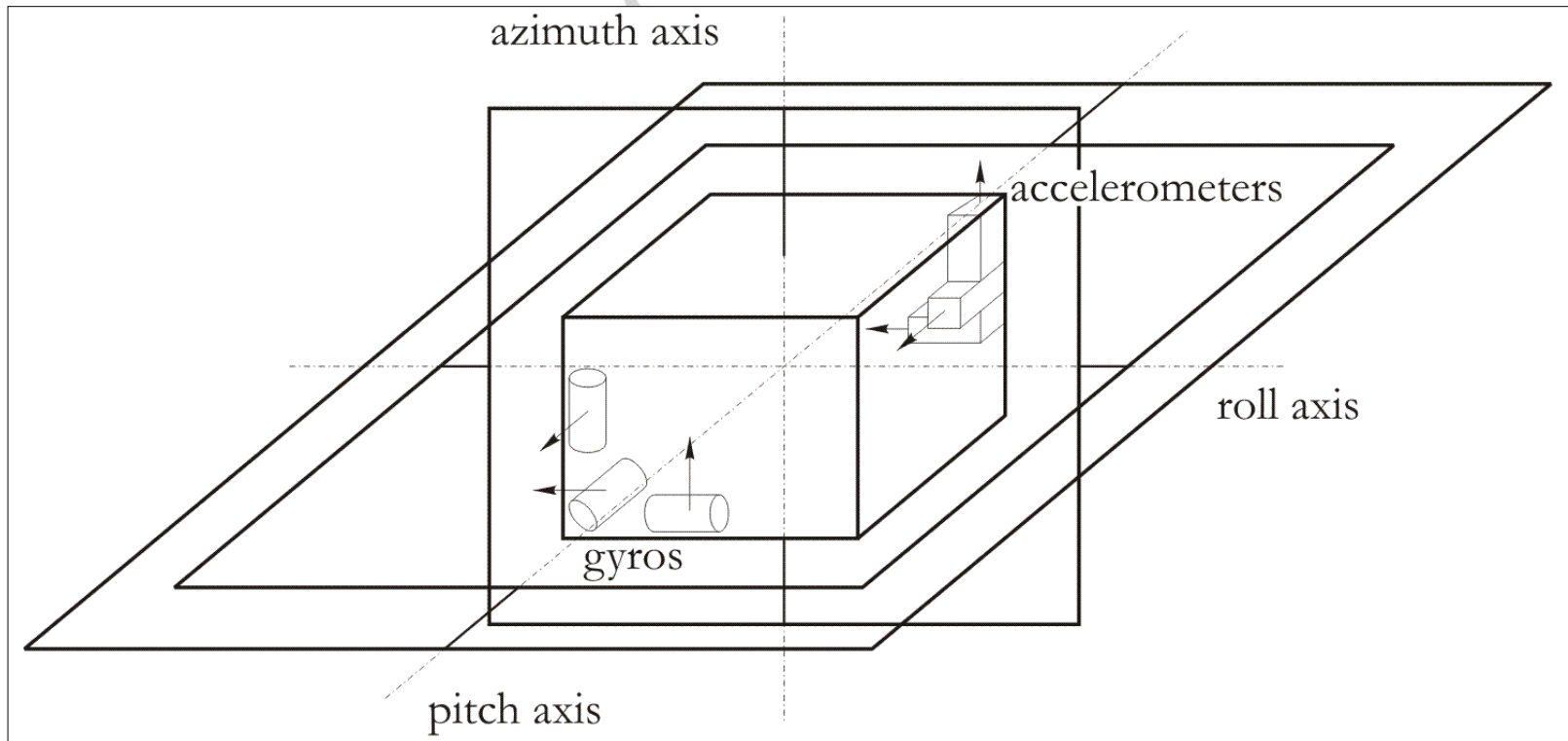
Sensoren 2 – Gyros (5/5)

- Optische Gyros (2/2)
 - Beispiel: **Ring Laser Gyro – RLG**



Plattform-Typen (1/3)

- Kardanisch gelagerte Plattformen
 - Schematische Darstellung: **Local-level Plattform**



Plattform-Typen (2/3)

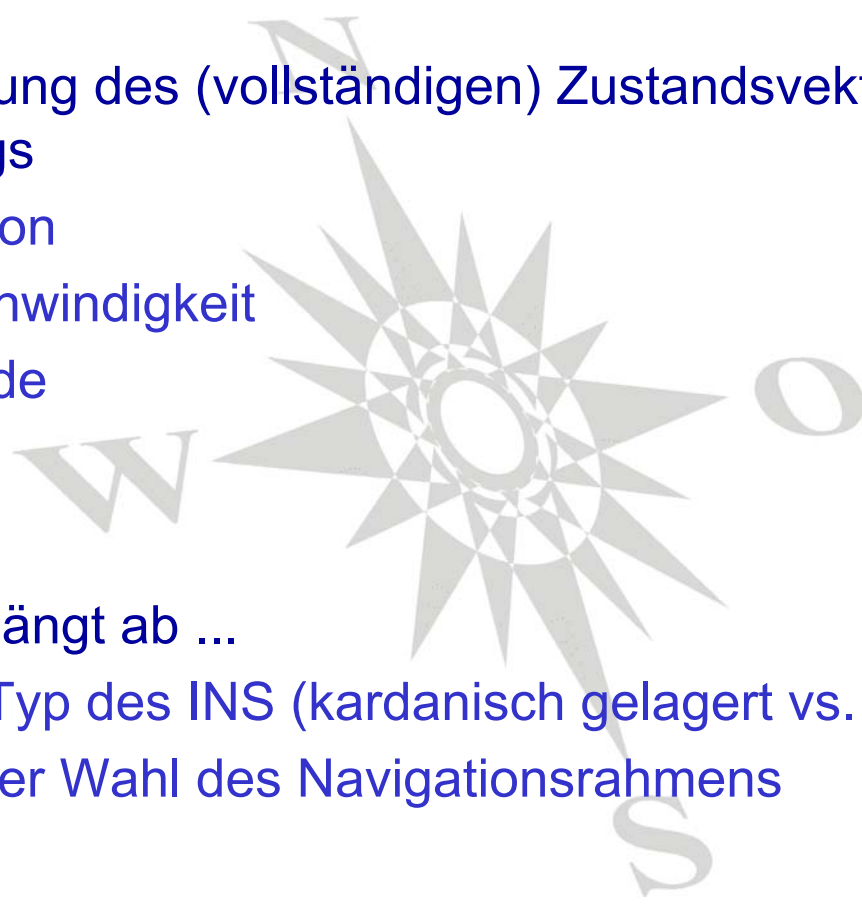
- Analytische Systeme (1/2)
 - Entwicklung etwa ab 1980
 - Verfügbarkeit optischer Gyros
 - Leistungsfähige Rechnertechnologie
 - Aufbau
 - **Direkte Montage** der Sensoranordnung auf dem Fahrzeug (*strapdown*) → alle Messungen werden im *b*-Frame getätigt
 - Die Gyros messen die **Winkelbewegungen** des Fahrzeugs und ihr Output wird dazu verwendet, um die Accelerometer-Messungen **analytisch** in den gewählten Navigationsrahmen zu transformieren
 - Im Prinzip kann ein beliebiger **Navigationsrahmen** verwendet werden → Praxis: quasi-inertialer und Local-level Bezugsrahmen

Plattform-Typen (3/3)

- Analytische Systeme (2/2)
 - Vorteile
 - Geringere mechanische Komplexität
 - Geringe Ausmaße und Masse
 - Geringerer Preis
 - Vereinfachte Wartung
- Aktuelle Situation
 - Heute dominieren die **analytischen** Systeme den INS-Markt.
 - Kardanisch gelagerte Systeme sind nur mehr in wenigen **Spezialanwendungen** vertreten.

Navigationsgleichungen

- Ziel
 - Bestimmung des (vollständigen) Zustandsvektors eines Fahrzeugs
 - Position
 - Geschwindigkeit
 - Attitude
- Kriterien
 - Lösung hängt ab ...
 - vom Typ des INS (kardanisch gelagert vs. analytisch)
 - von der Wahl des Navigationsrahmens



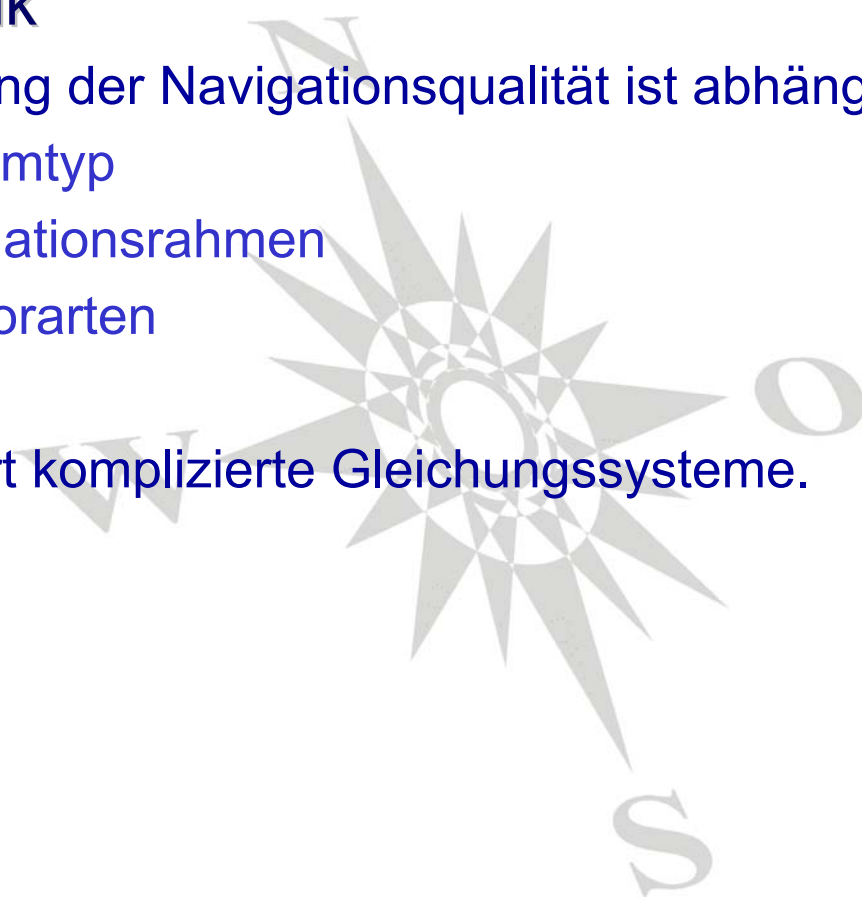
Plattform-Ausrichtung

- **Hauptaufgaben**
 - Bestimmung von **Startposition** und **Startgeschwindigkeit**
 - Position durch anderes System oder bekannten Startpunkt
 - Geschwindigkeit durch anderes System oder Null
 - **Initial Alignment**
 - Bestimmung von Startwerten für die **Attitude**
 - Ermittlung **systematischer** Fehlereinflüsse
 - **Fehlerkontrolle**
 - **Beschränkung** der Auswirkung der systematischen Fehlereinflüsse durch geeignete Techniken (ZUPT, CUPT)

Navigationsqualität (1/4)

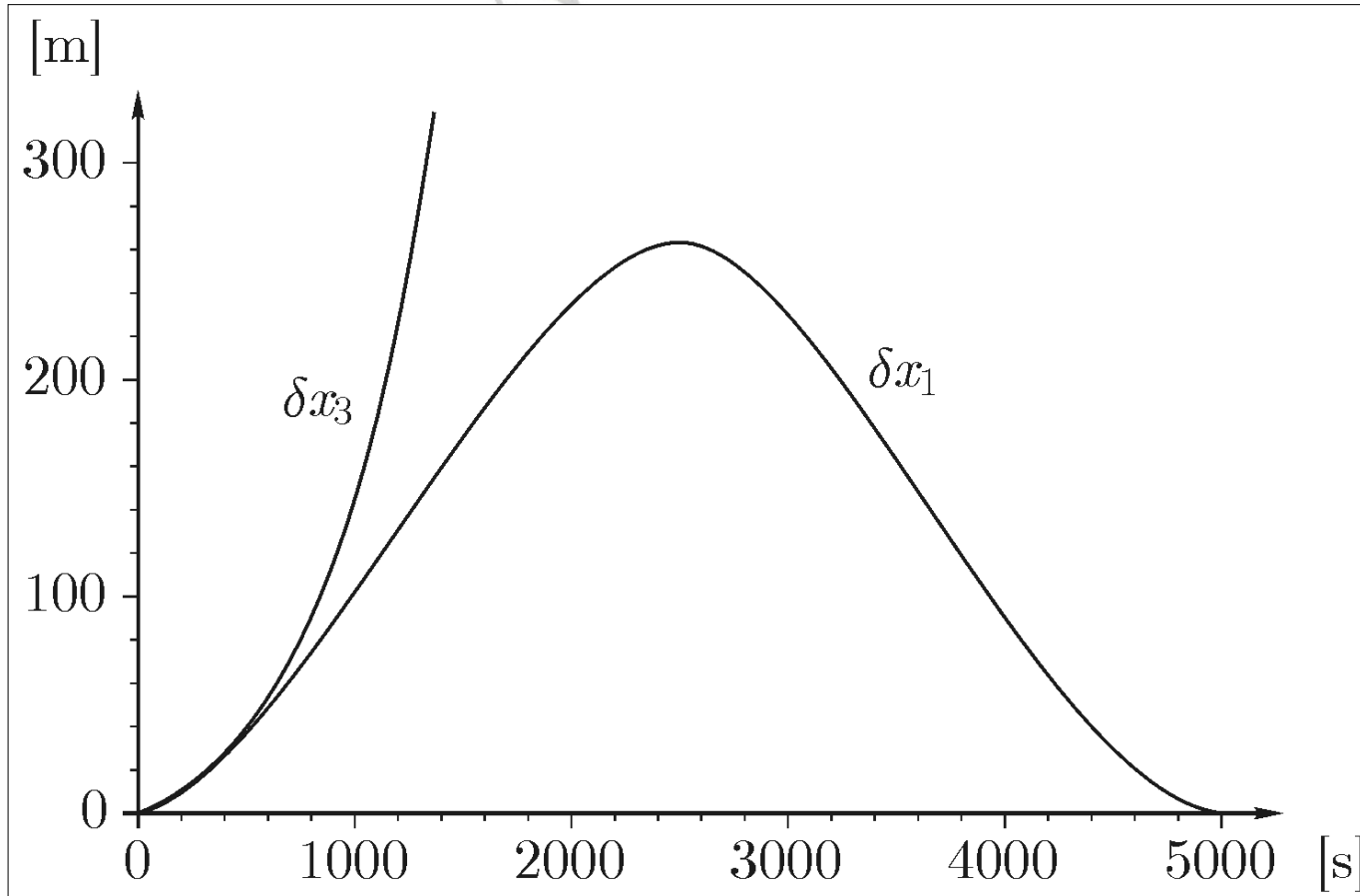
- Problematik

- Ermittlung der Navigationsqualität ist abhängig vom
 - Systemtyp
 - Navigationsrahmen
 - Sensorarten
 - ...
- und liefert komplizierte Gleichungssysteme.



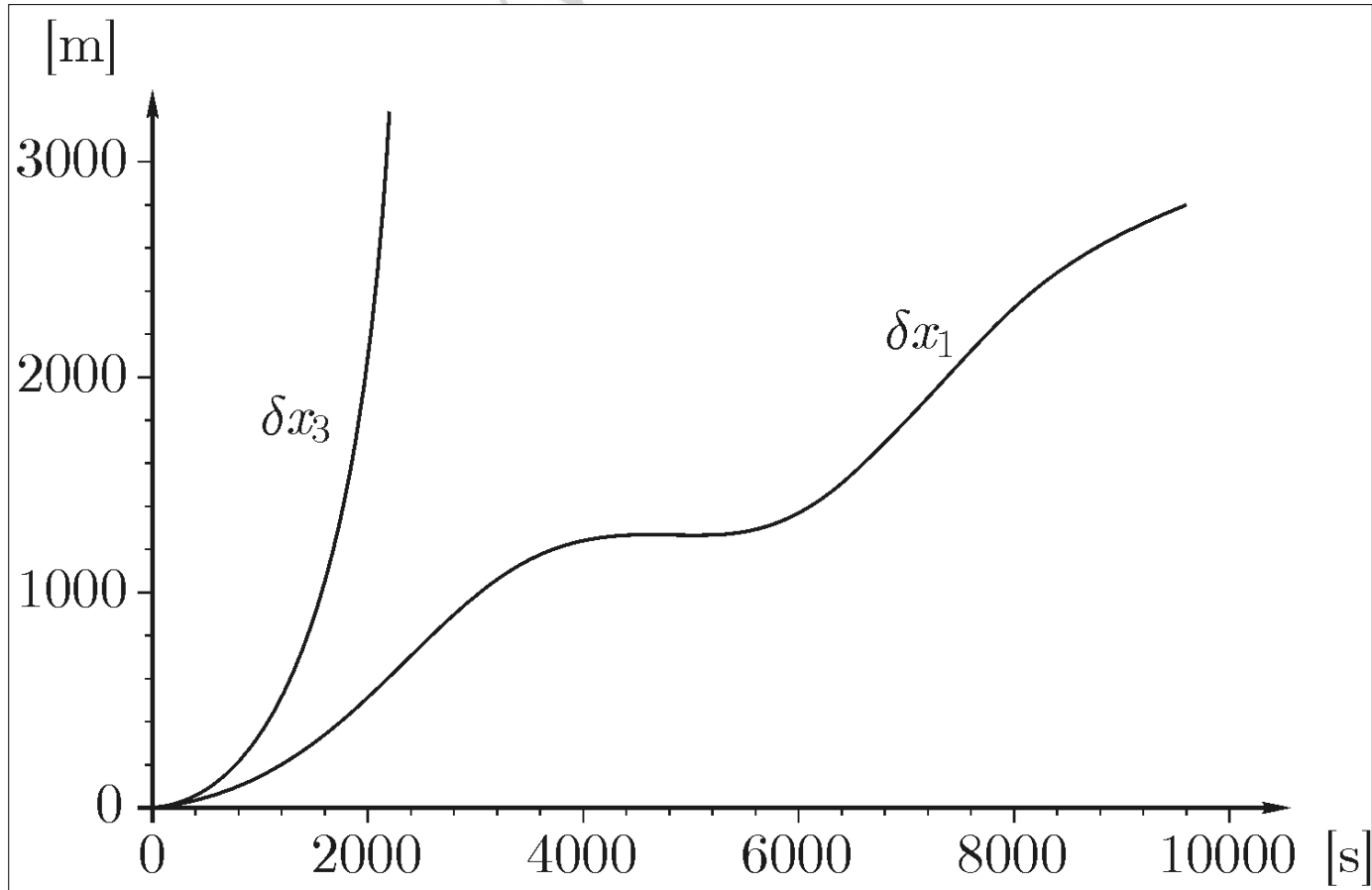
Navigationqualität (2/4)

Graphische Veranschaulichung: Accelerometer-Bias von $2 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$



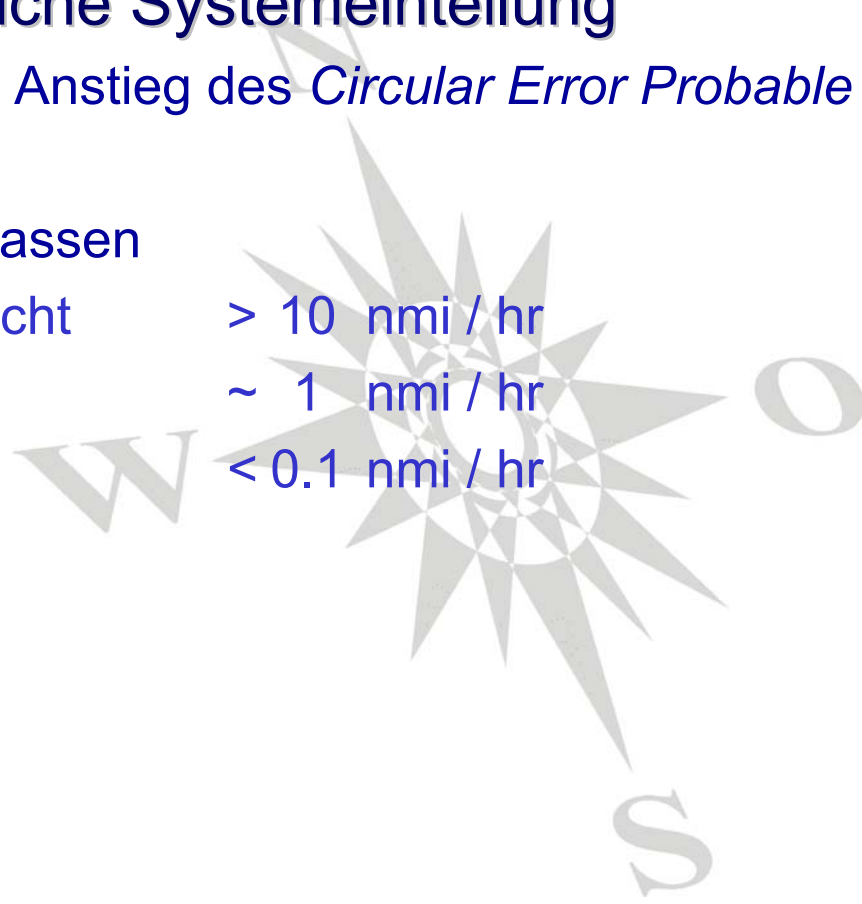
Navigationsqualität (3/4)

Graphische Veranschaulichung: Gyro-Bias von $0.1^\circ/\text{hr}$



Navigationsqualität (4/4)

- Gebräuchliche Systemeinteilung
 - Zeitlicher Anstieg des *Circular Error Probable* (Konfidenz: 50%)
 - Systemklassen
 - Schlecht $> 10 \text{ nmi / hr}$
 - Mittel $\sim 1 \text{ nmi / hr}$
 - Gut $< 0.1 \text{ nmi / hr}$



Literatur (1/2)

- Beyer J, Wigger B (2001): Grundlagen der Navigation und Anwendungen I+II. Lecture Notes, Technical University Darmstadt, Darmstadt, Germany.
- Britting KR (1971): Inertial navigation system analysis. Wiley, New York.
- Farrell JA, Barth M (1999): The Global Positioning System and inertial navigation. McGraw-Hill, New York.
- Greenspan RL (1995): Inertial navigation technology from 1970–1995. Navigation 42(1): 165–185.
- Greenspan RL (1996): GPS and inertial integration. In: Parkinson BW, Spilker JJ (eds): Global Positioning System – theory and applications, vol 2. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC: 187–220.
- Grewal MS, Weill LR, Andrews AP (2001): Global positioning systems, inertial navigation, and integration. Wiley, New York.
- Hofmann-Wellenhof B, Legat K, Wieser M (2003): Navigation – principles of positioning and guidance. Springer, Wien.

Literatur (2/2)

- Jekeli C (2001): Inertial navigation systems with geodetic applications. Walter de Gruyter, Berlin.
- Lawrence A (1998): Modern inertial technology – navigation, guidance, and control, 2nd edition. Springer, New York.
- May MB (1993): Inertial navigation and GPS. GPS World, 4(9): 56–66.
- Schwarz KP (1983): Inertial surveying and geodesy. Reviews of Geophysics and Space Physics, 21(4): 878-890.
- Schwarz KP (1986): The error model of inertial geodesy – a study in dynamic system analysis. In: Sünkel H (ed): Mathematical and numerical techniques in physical geodesy. Springer, Berlin.
- Straßer G (1963): Der Kreisel. Sonderdruck, Soldat und Technik, Frankfurt.
- Tazartes DA, Kayton M, Mark JM (1997): Inertial navigation. In: Kayton M, Fried WR (eds): Avionics navigation systems, 2nd edition. Wiley, New York: 313–392.