

## Zur Frage der Trägheitsnavigation in der Luftfahrt

Erwin Lertes, Rüsselsheim \*)

### 1 Einleitung

Ein Flugzeug, das sich über der Erdoberfläche bewegt, hat bekanntlich sechs Freiheitsgrade:

Drei Translations- und drei Rotationsmöglichkeiten.

Eine Trägheitsnavigationsanlage [1,2,3,4] ermittelt Navigationsdaten mit Hilfe von Beschleunigungsmessern und Kreisel. Die Beschleunigungsmesser dienen zur Messung der translatorischen Bewegungen eines Flugzeugs. Die Drehbewegungen eines Flugzeugs werden mittels Kreisel erfasst. Trägheitsnavigationsanlagen sind bordautonome Systeme. Sie sind unabhängig von der Beschaffenheit der Erdoberfläche. Reichweite und Flughöhe sind theoretisch unbegrenzt. Besonders für moderne Verkehrsflugzeuge ist die Trägheitsnavigation als Basissystem unverzichtbar.

$$v_x = \int_{t_0}^t a_x \cdot dt \quad (4)$$

$$v_y = \int_{t_0}^t a_y \cdot dt \quad (5)$$

$$v_z = \int_{t_0}^t a_z \cdot dt \quad (6)$$

$$s_x = \int_{t_0}^t v_x \cdot dt \quad (7)$$

$$s_y = \int_{t_0}^t v_y \cdot dt \quad (8)$$

$$s_z = \int_{t_0}^t v_z \cdot dt \quad (9)$$

### 2 Grundsätzliche Konzeption

Zum Zwecke der Navigation wird ein kartesisches Koordinatensystem x, y, z zu Grunde gelegt. Die Beschleunigungsfühler und die Kreisel werden entweder auf einer von der Flugzeugbewegung entkoppelten kreiselstabilisierten Plattform montiert oder am Flugzeugrumpf fahrzeufest eingebaut [5].

Ein Trägheitsnavigationssystem beruht auf dem Grundgedanken, die auf ein Fahrzeug einwirkende Beschleunigung  $\vec{a}$  zu messen und durch zeitliche Integration dieser Größe die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  zu bestimmen; durch eine weitere Integration von  $\vec{v}$  wird der zurückgelegte Weg  $\vec{s}$  des Fahrzeugs ermittelt.

Vor dem Start des Fahrzeugs muss dessen Standort genau bekannt sein. Ab dem Zeitpunkt des Starts  $t = t_0$  liefern die Beschleunigungsfühler laufend Messwerte der augenblicklichen Beschleunigung [6].

Das Gleichungssystem für die Translationsbewegung eines Flugzeugs lautet demnach [7]:

$$\vec{a} = a_x \cdot \vec{e}_x + a_y \cdot \vec{e}_y + a_z \cdot \vec{e}_z \quad (1)$$

$$\vec{v} = v_x \cdot \vec{e}_x + v_y \cdot \vec{e}_y + v_z \cdot \vec{e}_z \quad (2)$$

$$\vec{s} = s_x \cdot \vec{e}_x + s_y \cdot \vec{e}_y + s_z \cdot \vec{e}_z \quad (3)$$

( $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$  = kartesische Einheitsvektoren).

mit

### 3 Plattform-Systeme

Auf einer kreiselstabilisierten vollkardanisch aufgehängten horizontalen Plattform [8, 9, 10] sind drei Beschleunigungsmesser und drei Kreisel montiert. Die Kreisel dienen dazu, die Auswanderungen der horizontalen Plattform zu registrieren und mit Hilfe von Stellmotoren diese in ihrer ursprünglichen horizontalen Lage zu stabilisieren. Als Bezugssystem wird ein erdfestes Koordinatensystem mit  $\lambda$  (Meridiane) und  $\varphi$  (Breitenkreise) zu Grunde gelegt.

Der NS – Beschleunigungsmesser (y-Achse) wird nach einem Meridian und der OW – Beschleunigungsmesser (x-Achse) nach einem Breitenkreis ausgerichtet. Die z-Achse mit dem Beschleunigungsmesser der Höhe wird in Richtung des Ortslotes festgelegt.

Für die Standortbestimmung gilt nach einigen Umformungen:

$$s_x \Rightarrow \lambda \quad (10)$$

$$s_y \Rightarrow \varphi \quad (11)$$

$$s_z \Rightarrow h \quad (\text{Flughöhe}). \quad (12)$$

Die azimutale Orientierung der Plattform geschieht nach Geographisch-Nord. Eine Plattform benötigt Nachführungseinrichtungen. Diese haben u.a. die Aufgabe, Beschleunigungseinflüsse durch die Erddrehung und Kurvenflug, Einflüsse der

Erdkrümmung und Ungleichmäßigkeiten der Erdbeschleunigung zu kompensieren.

Die Plattform muss mit höchster Genauigkeit in der Horizontalen ausgerichtet werden. Bei Nachdrehung der Plattform kommt es hierbei zu Schwingungen um die Horizontale. Nach Schuler ist die Schwingungsdauer  $T$  vom Erdradius  $R$  und der Erdbeschleunigung  $g$  abhängig:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \approx 84,4 \text{ Minuten.} \quad (13)$$

## 4 Strapdown-Systeme

Bei den Trägheitsnavigationsanlagen der neueren Generation sind die Sensoren (Kreisel, Beschleunigungsmesser) fest mit dem Flugzeug verbunden [11, 12, 13].

Die Kreisel erfassen die Drehungen um die Flugzeugachsen, während die Beschleunigungsmesser die Beschleunigungen in Richtung der Flugzeugachsen messen. Um die Navigationsrechnungen durchführen zu können, müssen die ermittelten Messwerte vom Rechner in das Plattformsystem umgerechnet werden. An die Stelle der servomotorischen Nachstellung der Plattform tritt bei einem Strapdown-System somit die vom Rechner durchgeführte Koordinatentransformation.

## 5 Diskussion

Die Trägheitsnavigation gehört ihrem Wesen nach in das Gebiet der Koppelnavigation.

Die Koordinaten des Abflugortes und der Zeitpunkt des Abfluges müssen in die Trägheitsnavigationsanlage eingegeben werden.

Der Flugrechner liefert u.a. laufend folgende Daten [14]:

- Standort des Flugzeugs
- Geschwindigkeit über Grund
- Kurs über Grund
- restliche Entfernung zum Zielort
- Richtung zum Zielort
- Fluglage und Flughöhe.

Trägheitsnavigationssysteme sind weltweit und zeitunabhängig einsetzbar. Sie ermöglichen eine Navigation von einem beliebigen Standort zu einem beliebigen Zielort. Ein modernes Autoflight-System greift ständig auf inertielle Messdaten zurück. Sie werden auf das FMS (Flight Management System) aufgeschaltet.

Die Bausteine eines Trägheitsnavigationssystems weisen Fehler auf.

Dazu gehören:

- Kreisel drift
- Fehler bei der Koordinateneingabe
- Nullpunktsfehler der Beschleunigungsfühler.

Ein Eingriff in die Messvorgänge mit funktechnischen Mitteln (z. B. GPS) ist deshalb unbedingt erforderlich. Laser- und Faserkreisel lösen heute die hochgenauen mechanischen Kreisel weitgehend ab.

## 6 Schrifttum

- [1] Mensen, H.: Handbuch der Luftfahrt. Springer Berlin-Heidelberg 2003, S. 489-492.
- [2] Mensen, H.: Moderne Flugsicherung Springer, Berlin-Heidelberg 2004 (3. Auflage) S. 303-306.
- [3] Nüsseler, W.: Navigationstechnik in der Luftfahrt DSF Deutsche Flugsicherung, (5. Auflage). Langen 2003, S. 45.
- [4] Baer, K.: Flugsicherungstechnik. DSF Deutsche Flugsicherung, Langen 1997, S. 65-68.
- [5] Lorke, H.: Trägheitsnavigation. Lufthansa Flight Training Pilot School, Bremen 2003.
- [6] Nolin, I. P. in Farkas, L. L.: Testpraxis der Flugelektronik. R. Oldenbourg, München-Wien 1972, S. 178-189.
- [7] Lertes, E.: Funkortung und Funknavigation Vieweg, Braunschweig-Wiesbaden 1995, S. 117-118.
- [8] Hesse, F. und Hesse, W.: Flugnavigation (5. Auflage). Hitzeroth, Marburg 1988, S. 126-157.
- [9] Grabau, R.: Technische Aufklärung. Franckh, Stuttgart 1989, S. 330-337.
- [10] Mansfeld, W.: Funkortungs- und Funknavigationsanlagen Hüthig, Heidelberg 1994, S. 261-264.

- [11] Bundesministerium für Verkehr: Grundlagen der Luftfahrzeugtechnik in Theorie und Praxis.  
TÜV Rheinland, Köln 1992, Bd IV-3,  
S. 4 – 73 - 86.
- [12] In [5], S. 32-35.
- [13] Kracheel, K.:  
Die deutsche Luftfahrt –  
Flugführungssysteme – Blindfluginstrumente  
– Autopiloten – Flugsteuerungen.  
Bernard Graefe, Bonn 1997, S. 251–253.
- [14] In [8], S. 157 – 166.

\*)

*Prof. Dr. Erwin Lertes  
Fachbereich  
Informationstechnologie und  
Elektrotechnik  
Fachhochschule Wiesbaden*

