

# **Neue Kalibrations- und Rechenverfahren zur direkten Georeferenzierung von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen eines hybriden Navigationssystems**

*Manfred Bäumker und Franz-Josef Heimes*

## **1 Einleitung**

Die direkte Georeferenzierung von Bild-, Video und Scannerdaten mittels eines GPS-gestützten Inertialsystems gewinnt für photogrammetrische Anwendungen zunehmend an Bedeutung [Schwarz 1995, Hutton et al. 1998, Cramer 1999]. Von besonderer Bedeutung sind dabei die mit dem Inertialsystem entsprechend der Luftfahrtnorm ARINC 705 [Airlines Electronic Engineering Committee 1982] bestimmten Winkel und deren Umrechnungen.

Die nach ARINC 705 festgelegten Kurs- und Lagewinkel eines für Luftfahrtanwendungen und andere Navigationsaufgaben konzipierten Strapdown-Inertialsystems, z.B. LCR88, LLN-G1, dienen u.a. zur Transformation der im körperfesten Koordinatensystem gemessenen Geschwindigkeitsinkremente ins sog. Navigationskoordinatensystem [Bäumker 1995]. Die Definition dieser Koordinatensysteme und Winkel, die z.B. für eine direkte Georeferenzierung von Luftbildern benötigt werden, ist jedoch nicht konform mit den in der Photogrammetrie benutzten Koordinatensystemen und Winkel (Bildneigungswinkel und Verkantungswinkel). Außerdem ist davon auszugehen, dass eine photogrammetrische Kamera und ein Inertialsystem nicht exakt parallel zueinander eingebaut und ausgerichtet werden können. Diese i.d.R. kleinen Winkel werden als Misalignments bezeichnet. Die Definition der verschiedenen Koordinatensysteme, der Winkel sowie die notwendigen Umrechnungen unter Berücksichtigung der Misalignments werden nachfolgend für verschiedene Standardfälle der Photogrammetrie hergeleitet. Neben diesen Grundlagen wird ein neues Ausgleichs- und Kalibrationsverfahren zur Bestimmung der Misalignments vorgestellt.

## **2 Definition der Koordinatensysteme und der Winkel eines Inertialsystems**

Für Hebelarmkorrekturen und andere Umrechnungen werden die aktuellen Winkel der Fahrzeughauptachsen (= körperfestes Koordinatensystem, Index b;  $x^b$  = Längsachse, positiv nach vorne;  $y^b$  = Querachse, positiv nach rechts;  $z^b$  = Hochachse, positiv nach unten) in Bezug auf das Navigationskoordinatensystem (= lokales nord- und lotrichtungorientiertes dreidimensionales Koordinatensystem, Index n;  $x^n$  = Nordachse,  $y^n$  = Ostachse,  $z^n$  = Vertikalachse) benötigt. Diese Winkel (Eulerwinkel) werden als Kurs-, Roll- und Nickwinkel (abgekürzt:  $\psi$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ) bezeichnet und werden insbesondere bei der Echtzeitnavigation zusätzlich zur Einhaltung vorgegebener Trajektorien (z.B. bei Bildflügen, Schiffsprofilen) benötigt. Die Definitionen der Fahrzeughauptachsen, des Roll-, Nick- und Kurswinkels sowie der positiven Drehrichtungen sind in Abb. 1 veranschaulicht.

Die Roll-, Nick- und Kurswinkel werden benötigt, um im körperfesten Koordinatensystem gemessene Vektoren in das Navigationskoordinatensystem zu überführen, wozu zunächst aus den drei Drehwinkeln die Transformationsmatrix (Reihenfolge der Drehungen: 1. Rollwinkel  $\phi$  um x-Achse, 2. Nickwinkel  $\theta$  um y-Achse, 3. Kurswinkel  $\psi$  um z-Achse) aufzustellen ist:

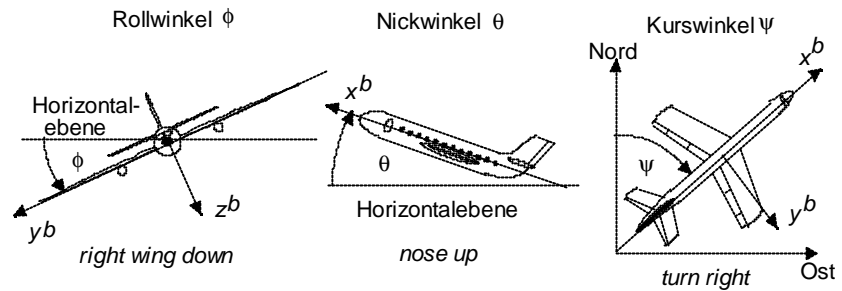


Abb. 1: Definition von Roll-, Nick- und Kurswinkel sowie der Fahrzeughauptachsen

$$C_b^n = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta \cos \phi & \cos \psi \cos \theta \sin \phi & \cos \psi \sin \theta & -\sin \psi \cos \theta \cos \phi & -\sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \\ -\sin \psi \cos \theta \cos \phi & -\sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \theta & \cos \psi \cos \theta \cos \phi & \cos \psi \cos \theta \sin \phi & \cos \psi \sin \theta & \cos \psi \cos \theta \cos \phi & \cos \psi \cos \theta \sin \phi & \cos \psi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta & -\sin \psi \cos \theta \cos \phi & -\sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \\ \cos \psi \cos \theta \cos \phi & \cos \psi \cos \theta \sin \phi & \cos \psi \sin \theta & \sin \psi \cos \theta \cos \phi & \sin \psi \cos \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta & -\sin \psi \cos \theta \cos \phi & -\sin \psi \cos \theta \sin \phi & -\sin \psi \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Der untere Index bei der Transformationsmatrix bezeichnet hier das Ursprungssystem und der obere Index das Zielsystem. Mittels dieser Transformationsmatrix lassen sich nun beliebige Vektoren (z.B. der Hebelarm der Kamera oder der GPS-Antenne) vom körperfesten Koordinatensystem ins Navigationskoordinatensystem (1) und umgekehrt (2) transformieren:

$$\mathbf{r}^n = C_b^n \mathbf{r}^b \quad (1) \quad \mathbf{r}^b = C_b^n^{-1} \mathbf{r}^n \quad (2)$$

Aus den Einzelelementen  $C_{ij}$  ( $i = \text{Zeile}, j = \text{Spalte}$ ) der orthogonalen Drehmatrix lassen sich die Kurs- und Lagewinkel ( $\phi = \text{Rollwinkel}, \theta = \text{Nickwinkel}, \psi = \text{Kurswinkel}$ ) wie folgt wieder zurückgewinnen:

$$\psi = \arctan \frac{C_{32}}{C_{33}} \quad \theta = \arcsin -C_{31} = \arctan \frac{-C_{31}}{\sqrt{C_{32}^2 + C_{33}^2}} \quad \phi = \arctan \frac{C_{21}}{C_{11}}$$

Das Navigationskoordinatensystem ist ein Koordinatensystem, das durch die aktuelle Lot- und Nordrichtung definiert ist und ändert sich infolgedessen, wenn das Fahrzeug eine Geschwindigkeit ungleich null aufweist (s. Abb. 2). Diese Änderung wird auch als Transportrate bezeichnet.

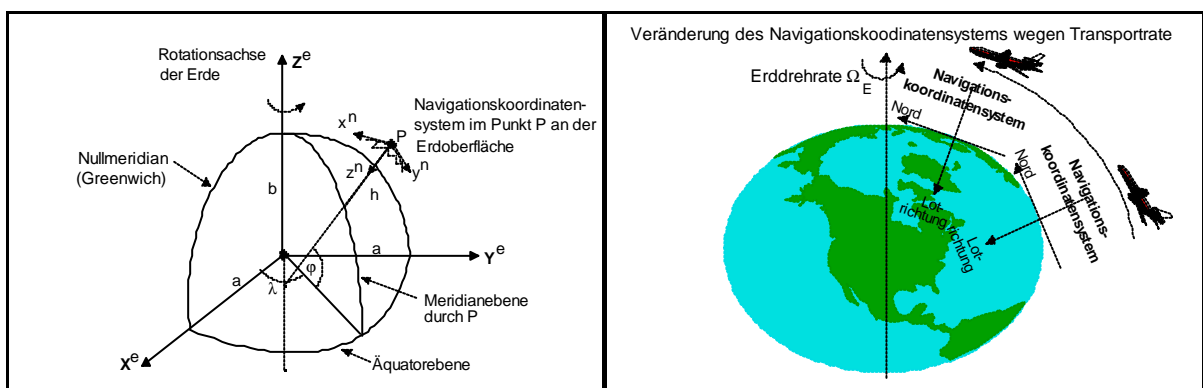


Abb. 2: links: Navigationskoordinatensystem (n-System) und erdfestes Koordinatensystem (e-System), rechts: Änderung des Navigationskoordinatensystems wegen Transportrate

Der Transportratenvektor  $\mathbf{W}_{en}^n$ , der hier für ein nordorientiertes Navigationskoordinatensystem definiert ist, beschreibt die Veränderung des Navigationskoordinatensystems gegenüber einem erdfesten Koordinatensystem und lässt sich aus der Geschwindigkeit des Fahrzeugs wie folgt berechnen:

$$\mathbf{W}_{en}^n = \begin{bmatrix} \mathbf{k} \cos w \\ -\mathbf{w} \\ -\mathbf{k} \sin w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_E}{R_E+h} \\ -\frac{V_N}{R_N+h} \\ \frac{V_E \sin w}{R_E+h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{en_x}^n \\ \mathbf{z}_{en_y}^n \\ \mathbf{z}_{en_z}^n \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} V_N: \text{ Nordgeschwindigkeit} \\ V_E: \text{ Ostgeschwindigkeit} \\ R_N, R_E: \text{ Hauptkrümmungsradien (Nord, Ost) des} \\ \text{Erdellipsoids} \end{array}$$

$\varphi$ : geographische Breite       $\lambda$ : geographische Länge      h: ellipsoidische Höhe

Zur Berechnung der Transportrate müssen die geographischen (ellipsoidischen) Koordinaten (zumindest die geographische Breite) bekannt sein. Diese können z.B. aus Gauß-Krüger-Koordinaten oder aus den geozentrischen Koordinaten des erdfesten Koordinatensystems (X, Y, Z) berechnet werden. Da das Navigationskoordinatensystem immer durch die örtliche Lot- und Nordrichtung definiert ist, ändert sich bei Bewegungen des Fahrzeugs nicht nur die Richtung des körperfesten Koordinatensystems gegenüber dem Navigationskoordinatensystem sondern auch infolge der Transportrate die Richtung des Navigationskoordinatensystems gegenüber dem erdfesten geozentrischen Koordinatensystem. Für die Transformation eines Vektors vom erdfesten Koordinatensystem ins Navigationskoordinatensystem und umgekehrt werden zwei Drehmatrizen, die wie folgt zu verwenden sind, benötigt:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_e^n = \mathbf{R}_y(w+90^\circ) \mathbf{R}_z(\mathbf{k}) &= \begin{bmatrix} \cos(w+90^\circ) & 0 & \sin(w+90^\circ) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(w+90^\circ) & 0 & \cos(w+90^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \mathbf{k} & -\sin \mathbf{k} & 0 \\ -\sin \mathbf{k} & \cos \mathbf{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -\sin w & 0 & \cos w \\ 0 & 1 & 0 \\ -\cos w & 0 & -\sin w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \mathbf{k} & -\sin \mathbf{k} & 0 \\ -\sin \mathbf{k} & \cos \mathbf{k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin w \cos \mathbf{k} & -\sin w \sin \mathbf{k} & \cos w \\ -\sin \mathbf{k} & \cos \mathbf{k} & 0 \\ -\cos w & -\cos w \sin \mathbf{k} & -\sin w \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Die Transformation eines Vektors vom erdfesten Koordinatensystem (e-System) ins Navigationskoordinatensystem (n-System) und umgekehrt wird wie folgt durchgeführt:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^n = \mathbf{C}_e^n \mathbf{r}^e = (\mathbf{C}_n^e)^T \mathbf{r}^e & \qquad \qquad \qquad \mathbf{r}^e = \mathbf{C}_n^e \mathbf{r}^n = (\mathbf{C}_e^n)^{-1} \mathbf{r}^n \\ \text{e-System} \rightarrow \text{n-System} & \qquad \qquad \qquad \text{n-System} \rightarrow \text{e-System} \end{aligned}$$

### 3 Definition der Koordinatensysteme und der Winkel in der Photogrammetrie

Dem körperfesten Koordinatensystem beim Inertialsystem entspricht das Bildkoordinatensystem in der Photogrammetrie, das durch die Rahmenmarken der Kamera realisiert wird. Ursprung dieses Koordinatensystems ist das Projektionszentrum O, das in z-Richtung um die Kammerkonstante c vom Bildhauptpunkt H' entfernt liegt (s. Abb. 3). An Stelle des Navigationskoordinatensystems tritt hier das terrestrische Objektkoordinatensystem und als Winkel sind hier die beiden Bildneigungswinkel  $\varphi$ ,  $\omega$  (im hier angenommenen Normalfall Längsneigungswinkel  $\varphi$ , Querneigungswinkel  $\omega$ ) und der Verkantungswinkel  $\kappa$  definiert. Der Zusammenhang und die Transformation der Parameter, z.B. für eine direkte Georeferenzierung, hängen von dem gewählten photogrammetrischen Auswertesystem sowie weiteren Randbedingungen ab. Die nachfolgenden Ableitungen beziehen sich auf verschiedene Standardfälle der Aerophotogrammetrie und können für terrestrische Anwendungsfälle sowie für spezielle Auswerteprogramme und Auswertegeräte unterschiedlich sein. Eine Modifikation für das entsprechende Auswertesystem lässt sich an Hand der Herleitungen und der Abbildungen leicht vornehmen. Hierzu müssen die Bildneigungswinkel und der Bildverkantungswinkel sowie die Definition des Bildkoordinatensystems (B-System) und des Objektkoordinatensystems (terrestrisches E-System) bekannt sein.

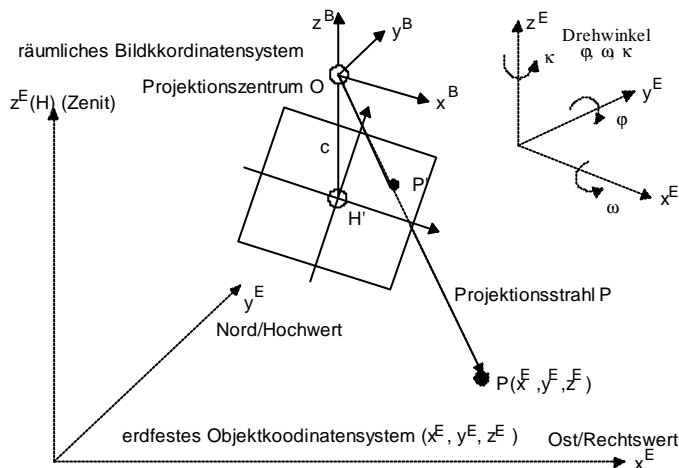


Abb. 3: Definition des Bildkoordinatensystems (B-Systems), des Objektkoordinatensystems (E-System) und der Orientierungswinkel: Querneigung  $\varphi$ , Längsneigung  $\omega$  Verkantung  $\kappa$

Als Objektkoordinatensystem kommen überwiegend Gauß-Krüger-Koordinatensysteme zum Einsatz, wobei zur Vermeidung eines Linkssystems die x-Achse durch den Rechtswert und die y-Achse durch den Hochwert repräsentiert wird. Bei Verwendung dieser Koordinatensysteme tritt allerdings die Problematik des nicht einheitlichen Abbildungsmaßstabs und der Meridiankonvergenz als Folge der Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche auf. Diese Problematik lässt sich bei Verwendung eines tangentialen kartesischen Koordinatensystems vermeiden.

Sowohl die Definition der Koordinatensysteme als auch die Reihenfolge und Vorzeichen der photogrammetrischen Drehwinkel unterscheiden sich bei den photogrammetrischen Auswertesystemen (vgl. Abb. 4). Nachfolgend werden die Definitionen und notwendigen Transformationen für das Bündelausgleichungssystem BLUH (Universität Hannover, [Jacobsen 1996]) und das System PATB (Universität Stuttgart, [INPHO GmbH 1999]), die in der Aerophotogrammetrie zum Einsatz kommen, beschrieben. Weitere Definitionen für unterschiedliche analytische und analoge Auswertesysteme der Aero- und terrestrischen Photogrammetrie finden sich in [Kraus 1997a, b]. Eine Anpassung an das jeweilige Auswertesystem lässt sich an Hand der nachfolgend beschriebenen Transformationsmatrizen leicht realisieren.

Bei den Bündelausgleichungssystemen BLUH und PATB sind die Bildneigungswinkel ( $\varphi, \omega$ ) sowie der Verkantungswinkel ( $\kappa$ ) wie folgt zur Bildung der orthogonalen Transformationsmatrix einzusetzen:

$$C_{E_{BLUH}}^B = R_z(\kappa) R_x(\omega) R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{PATB}}^B = R_x(\omega) R_y(\varphi) R_z(\kappa) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{BLUH}}^B = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \varphi + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \varphi - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \cos \kappa \\ -\sin \omega \cos \varphi + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi + \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \sin \kappa \\ \cos \omega \sin \varphi & -\sin \omega \sin \varphi & \cos \kappa \end{bmatrix}$$

$$C_{E_{PATB}}^B = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \varphi & -\cos \omega \sin \varphi & \sin \omega \\ \cos \omega \sin \varphi + \sin \omega \cos \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \kappa \\ \sin \omega \sin \varphi - \cos \omega \cos \varphi \sin \kappa & \sin \omega \cos \varphi + \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa \end{bmatrix}$$

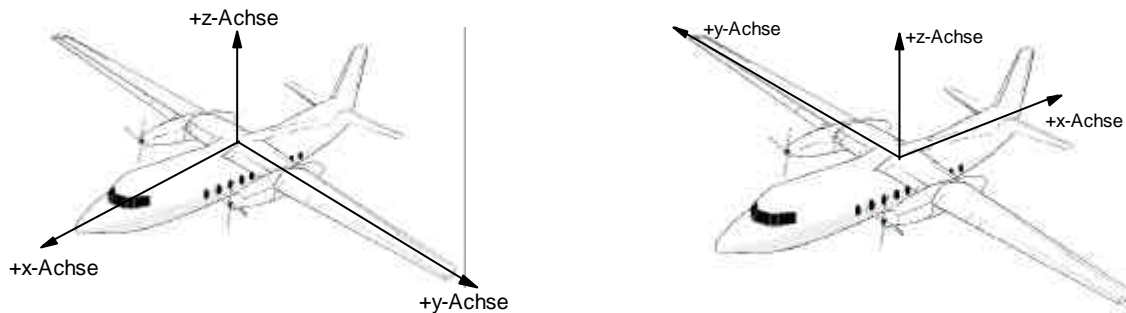


Abb. 4: Definition des Bildkoordinatensystems für BLUH (links) und für PATB (rechts)

Nach Aufstellung der entsprechenden Transformationsmatrix lässt sich nun ein Vektor vom Objektkoordinatensystem (E-System) ins Bildkoordinatensystem (B-System) und umgekehrt transformieren:

$$\mathbf{r}^B = \mathbf{C}_E^B \mathbf{r}^E = (\mathbf{C}_B^E)^T \mathbf{r}^E$$

E-System  $\rightarrow$  B-System

$$\mathbf{r}^E = \mathbf{C}_B^E \mathbf{r}^B = (\mathbf{C}_E^B)^{-1} \mathbf{r}^B$$

B-System  $\rightarrow$  E-System

Bei bekannter  $\mathbf{C}_E^B$ -Transformationsmatrix lassen sich wieder die einzelnen Drehwinkel wie folgt aus den Einzelementen  $C_{ij}$  zurückgewinnen ( $\varphi$  = Längsneigungswinkel,  $\omega$  = Querneigungswinkel,  $\kappa$  = Verkantungswinkel):

$$\text{System BLUH: } \mathbf{w} = \arctan \frac{C_{31}}{C_{33}} \quad \mathbf{z} = \arcsin -C_{32} = \arctan \frac{-C_{32}}{\sqrt{C_{12}^2 + C_{22}^2}} \quad \mathbf{x} = \arctan \frac{C_{12}}{C_{22}}$$

$$\text{System PATB: } \mathbf{w} = \arcsin C_{13} = \arctan \frac{C_{13}}{\sqrt{C_{23}^2 + C_{33}^2}} \quad \mathbf{z} = \arctan \frac{-C_{23}}{C_{33}}$$

$$\mathbf{x} = \arctan \frac{-C_{12}}{C_{11}}$$

Entsprechend diesen beiden Beispielen für BLUH und PATB sind für andere Auswertesysteme und Auswertegeräte die Drehmatrizen und Bildneigungs- und Bildverkantungswinkel aufzustellen. Ohne diese Kenntnisse ist eine Überführung der mittels eines Inertialsystems gemessenen Kurs- und Lagewinkel zur direkten Georeferenzierung nicht möglich.

## 4 Transformation der Kurs- und Lagewinkel zur direkten Georeferenzierung

In den beiden Kapiteln zuvor wurden die in der Navigation und in der Photogrammetrie verwendeten Winkel, Koordinatensysteme und Transformationsmatrizen erläutert. Für die Überführung der mit einem Inertialsystem ermittelten Winkel in der Photogrammetrie verwendeten Winkel sind nun die Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Koordinatensysteme und Winkel zu berücksichtigen. Kern der nachfolgenden Herleitung ist dabei, dass die o.a. Transformationsmatrizen dazu dienen, einen Koordinatenvektor von einem Koordinatensystem in ein anderes Koordinatensystem zu überführen, z.B. die Transformation eines Vektors vom Objektkoordinatensystem (E-System) ins Bildkoordinatensystem (B-System). Dieses gelingt mittels folgender Transformation:

$$\mathbf{r}^B = \mathbf{C}_E^B \mathbf{r}^E$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass das in der Photogrammetrie verwendete E-System ( $x$  = Ostwert (Rechtswert),  $y$  = Nordwert (Hochwert),  $z$  = Höhe), i.d.R. ein Gauß-Krüger-Koordinatensystem oder ein tangentiales Koordinatensystem ist, dessen Nullpunkt in die Mitte des Auswertgebietes gelegt wird. Die Lotrichtung dieser Ebene bzw. der Projektionsebene des Gauß-Krüger-Koordinatensystems kann durch die geographischen Koordinaten ( $\mathbf{w}_0, \mathbf{k}_0$ ) des Gebietsmittelpunktes angenähert werden. Neben der Wahl des Objektkoordinatensystems ist außerdem zu berücksichtigen, ob bei dem photo-

grammetrischen Auswertesystem eine Korrektur wegen Erdkrümmung und Meridiankonvergenz eingestellt wurde.

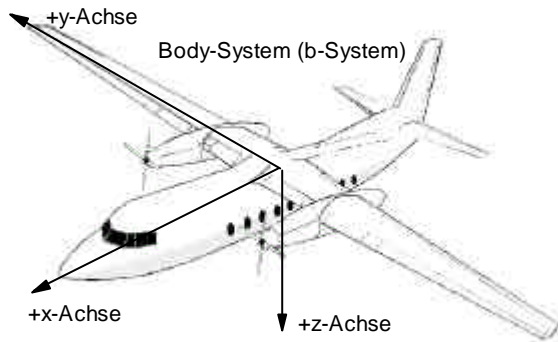


Abb. 5: Definition des körperfesten Body-Systems für ein Strapdown-Inertialsystem

Die Lage des Bildkoordinatensystems (B-System, vgl. Abb. 4) ist in der Photogrammetrie nicht einheitlich definiert und muss hinsichtlich der Lage des in der Navigation verwendeten körperfesten Koordinatensystems (Body-System, b-System, s. Abb. 5) korrigiert werden. Dieses kann mit einer Transformationsmatrix  $T_b^B$  erreicht werden, die hier exemplarisch für die o.a. Auswertesysteme präsentiert werden, wobei hier zunächst angenommen wird, dass im Flugzeug die Achsen des körperfesten Koordinatensystems (b-System) parallel zu den Achsen des Kamerasystems (B-System) ausgerichtet sind.

Transformationsmatrix für BLUH bzw. PATB:

$$T_{b_{BLUH}}^B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad T_{b_{PATB}}^B = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Mit Hilfe dieser Transformationsmatrizen lässt sich ein Vektor vom körperfesten Koordinatensystem (b-System) ins jeweilige Bildkoordinatensystem und zurück transformieren:

$$r^B = T_b^B \$r^b$$

$$r^b = T_B^b \$r^B = (T_b^B)^T \$r^B$$

Bodyssystem  $\rightarrow$  Bildkoordinatensystem

Bildkoordinatensystem  $\rightarrow$  Bodyssystem

Weiterhin sind die unterschiedlichen Ausrichtungen des Navigationskoordinatensystems (n-System, x = Nord, y = Ost, z = vertikal (positiv nach unten)) und des Objektkoordinatensystems (E-System, x = Ost, y = Nord, z = Höhe) zu berücksichtigen. Hierzu wird eine weitere Transformationsmatrix eingeführt. Mittels dieser Transformationsmatrix lassen sich Transformationen zwischen dem Navigationskoordinatensystem (n-System) und dem Objektkoordinatensystem (E-System) wie folgt ausführen:

$$T_n^E = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$r^E = T_n^E \$r^n$$

n-System  $\rightarrow$  E-System

$$r^n = T_E^n \$r^E = (T_n^E)^T \$r^E$$

E-System  $\rightarrow$  n-System

Dieses gilt nur für den Fall, dass eine Tangentialebene oder Gauß-Krüger-Koordinaten, bei denen die Erdkrümmung und Meridiankonvergenz korrigiert wurde, verwendet wird. Anderenfalls ist noch eine weitere Transformation anzuwenden:

$$C_n^A = \begin{bmatrix} 1 & e_v & -e_e \\ -e_v & 1 & e_n \\ e_e & -e_n & 1 \end{bmatrix}$$

$$e_n = -(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \$\cos w$$

$$e_e = (w_i - w_0)$$

$$e_v = (\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0^{GK}) \$\sin w$$

$\mathbf{k}_0^{GK}$  : Nullmeridian des Gauß-Krüger-Koordinatensystems

Zur direkten Georeferenzierung muss nun mittels der Daten des Inertialsystems eine äquivalente Transformationsmatrix zur Überführung der Bilddaten (B-System) in das Objektkoordinatensystem (E-System) aufgestellt werden (Transformationsmatrix  $C_E^B$  oder deren Inverse  $C_B^E = (C_E^B)^{-1} = (C_E^B)^T$ ).

Durch die hier angewandte Indizierung der Matrizen und Vektoren lassen sich die nachfolgenden Transformationen leicht nachvollziehen. Für die eigentliche Transformation sind zunächst folgende Transformationsmatrizen, für die neben den mit dem Inertialsystem gemessenen Winkeln auch die

geographischen Koordinaten des Gebietsmittelpunktes, des Projektionszentrums und der Nullmeridian des Gauß-Krüger-Koordinatensystems bekannt sein müssen, aufzustellen:

$$C_b^{n_i} = f(v_i, h, y_i) \quad C_e^{n_0} = f(w_0, k_0) \quad C_e^{n_i} = f(w_i, k_i) \quad C_{n_0}^{n_i} = f(w_i, k_i, w_0, k_0, k_0^{GK})$$

Folgende fünf Transformationen sind nun für jeden Aufnahmeort  $i$  durchzuführen:

1. b-System  $\rightarrow$  e-System:  $C_b^e = (C_e^{n_i})^T C_b^{n_i}$
2. b-System  $\rightarrow$   $n_0$ -System:  $C_b^{n_0} = C_e^{n_0} C_b^e$
3. b-System  $\rightarrow$   $n'$ -System:  $C_b^{n'} = C_{n_0}^{n'} C_b^{n_0}$
4.  $n'$ -System  $\rightarrow$  B-System:  $T_n^B = T_b^B (C_b^{n'})^T$
5. E-System  $\rightarrow$  B-System  $C_E^B = T_n^B (T_n^E)^T$

Sukzessives Einsetzen ergibt schließlich folgende Transformationsmatrix:

$$C_E^B = T_b^B (C_{n_0}^{n'} C_e^{n_0} (C_e^{n_i})^T C_b^{n_i})^T (T_n^E)^T$$

Aus den Elementen dieser Transformationsmatrix lassen sich nun wie in Kap. 3 beschrieben die Bildneigungs- und Verkantungswinkel  $\varphi, \omega, \kappa$  berechnen, wobei das zugrunde liegende Auswertesystem zu berücksichtigen ist.

## 5 Berücksichtigung und Bestimmung von Misalignments zwischen Inertialsystem und Kamera

Für hochgenaue Anwendungen sollte das Inertialsystem direkt auf oder an der Kamera installiert werden, wobei die Hauptachsen parallel zueinander auszurichten sind. Auch bei sorgfältigster Installation werden die Achsen nach der Installation nicht exakt parallel zueinander ausgerichtet sein. Diese kleinen Nichtparallelitäten werden als Misalignments, die als kleine Verdrehwinkel um die drei Achsen des körperfesten Koordinatensystems interpretiert werden können, bezeichnet (vgl. Abb. 6).

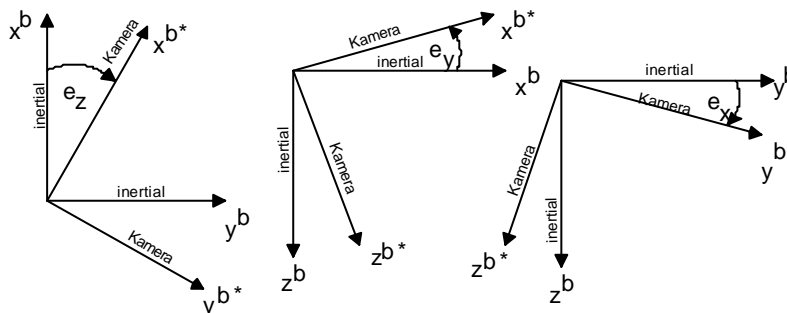


Abb. 6:  
Misalignments  
 $e_x, e_y, e_z$

Dieses hat zur Folge, dass die Transformationsmatrix, die aus den Kurs- und Lagewinkeln berechnet wird, vorab um diese kleinen Verdrehungswinkel in das Achssystem der Kamera korrigiert werden muss. Da es sich hier um kleine Verdrehungswinkel handelt, genügt die Aufstellung einer differentiellen Drehmatrix. Mit Hilfe dieser Drehmatrix wird nun ein körperfestes Koordinatensystem  $b^*$ -System realisiert, dessen Achsen exakt parallel zu den Achsen der Kamera verlaufen. Mittels dieser Misalignmentmatrix wird nun die Transformationsmatrix  $C_{b^*}^{n_i}$  gebildet, die nun für die weiteren Berechnungen an Stelle der originalen  $C_b^{n_i}$ -Matrix zu verwenden ist.

$$C_{b^*}^{n_i} = C_b^{n_i} T_{b^*}^b \quad \text{mit der differentiellen Drehmatrix} \quad T_{b^*}^b = \begin{bmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{bmatrix}$$

Die zusätzliche Berücksichtigung dieser Misalignmentmatrix führt zu folgender Transformationsmatrix:

$$C_E^B = T_b^B \left( C_{n_0}^{n_A} C_e^{n_0} (C_e^{n_i})^T C_b^{n_i} (T_b^{b^*})^T \right)^T (T_n^E)^T$$

Die Problematik, die sich hier stellt, ist weniger diese zusätzliche Transformation, sondern vielmehr die Bestimmung der in die Matrix eingehenden kleinen Drehwinkel  $e_x, e_y, e_z$ , da i.d.R. weder beim Inertialsystem noch bei der Kamera, deren Achsen durch die Rahmenmarken und die Filmebene realisiert werden, die Koordinatenachsen für eine Ausmessung der kleinen Differenzwinkel gut zugänglich sind.

Hier bietet sich eine *On-the-job*-Kalibration des gesamten Systems an. Dabei werden Kamera und Inertialsystem als komplette Messeinheit zur Aufnahme eines Passpunktfeldes verwendet und die Bilddaten anschließend einer Bündelblockausgleichung ohne Verwendung der Inertialdaten unterzogen. Die hierbei für jedes Photo ermittelten Bildneigungs- und -verkantungswinkel dienen nun zusammen mit den für jedes Photo ermittelten Kurs- und Lagewinkeln als Referenzwerte zur Bestimmung der drei Differenzwinkel der Misalignmentmatrix. Bei Verwendung der Winkel aus einer Bündelblockausgleichung ist zu beachten, dass bei relativ kleinen Kameraöffnungswinkeln hohe Korrelationen zwischen den Lagekoordinaten der Projektionszentren und den Bildneigungswinkeln auftreten. Hier können verbesserte Bildneigungswinkel über räumliche Rückwärtsschnitte bei festgehaltenen Projektionszentren ermittelt werden. Für jedes Photo müssen dann folgende Daten vorliegen:

- vom Inertialsystem gemessene Winkel:  $\mathbf{v}, \mathbf{h}, \mathbf{y}$
- Bildneigungs- und -verkantungswinkel der Bündelblockausgleichung:  $\mathbf{W}, \mathbf{Z}$ ,
- geographische Koordinaten der Projektionszentren:  $\mathbf{w}, \mathbf{k}, h$ , die z.B. aus den Gauß-Krüger-Koordinaten (Rechtswert, Hochwert) oder den geozentrischen Koordinaten  $X, Y, Z$  berechnet werden können

Da die Misalignments für sämtliche Photos konstant sein sollten, bietet sich hier eine Ausgleichung zur Bestimmung der drei Differenzwinkel an. Dieses erfordert die Aufstellung eines Gleichungssystems, in dem die Differenzwinkel als Unbekannte auftreten. Da für jedes Photo jeweils drei Winkel mittels der Photogrammetrie und drei Winkel mittels des Inertialsystems bestimmt wurden, liegt eine Überbestimmung von Beobachtungen vor, die nun einer Ausgleichung unterzogen werden können. Die Beobachtungsgleichungen werden aus den o.a. verschiedenen Transformationsmatrizen abgeleitet, wobei die  $C_E^B$ -Matrix aus den photogrammetrisch bestimmten Winkel aufzustellen ist. Dies führt nach einigen Umformungen zu folgendem Gleichungssystem:

$$C_E^B = T_b^B \left( C_{n_0}^{n_A} C_e^{n_0} (C_e^{n_i})^T C_b^{n_i} (T_b^{b^*})^T \right)^T (T_n^E)^T$$

$$(T_b^B)^T C_E^B = T_b^{b^*} (C_b^{n_i})^T C_e^{n_i} (T_n^E C_{n_0}^{n_A} C_e^{n_0})^T$$

oder in abgekürzter Schreibweise  $\mathbf{B} = T_b^{b^*} \mathbf{D}$  mit

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = (T_b^B)^T C_E^B \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} = (C_b^{n_i})^T C_e^{n_i} (T_n^E C_{n_0}^{n_A} C_e^{n_0})^T$$

Unter Berücksichtigung der Misalignmentmatrix  $T_b^{b^*}$ , die die unbekanntenen Differenzwinkel enthält, ergibt sich dann folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$$

Insgesamt lassen sich hieraus 9 Beobachtungsgleichungen für jedes Photo (Nr.  $i$ ) aufstellen, die nach einigen Umformungen zu folgendem Ausgleichungsmodell führen:

$$l_i + \mathbf{v}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{x} \quad \mathbf{x} = \left( \sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i) \right)^{-1} \left( \sum_{i=1}^n (\mathbf{A}_i^T \mathbf{l}_i) \right) \quad n: \text{Anzahl der Photos}$$

mit

$$l_i = \begin{bmatrix} b_{11} - d_{11} \\ b_{12} - d_{12} \\ b_{13} - d_{13} \\ b_{21} - d_{21} \\ b_{22} - d_{22} \\ b_{23} - d_{23} \\ b_{31} - d_{31} \\ b_{32} - d_{32} \\ b_{33} - d_{33} \end{bmatrix} \quad A_i = \begin{bmatrix} 0 & -d_{31} & d_{21} \\ 0 & -d_{32} & d_{22} \\ 0 & -d_{33} & d_{23} \\ d_{31} & 0 & -d_{11} \\ d_{32} & 0 & -d_{12} \\ d_{33} & 0 & -d_{13} \\ -d_{21} & d_{11} & 0 \\ -d_{22} & d_{12} & 0 \\ -d_{23} & d_{13} & 0 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix}$$

## 6 In Situ Kalibration des Luftaufnahmesystems LEO

In den vergangenen Jahren wurde an der FH Bochum das Luftaufnahmesystem LEO (Local Earth Observation) entwickelt [Bäumker et al. 1998, Bäumker et al. 1999, Bäumker et al. 2000]. Die neueste Entwicklung basiert auf einem GPS-gestützten Strapdown-Inertialsystem (LLN-G1, Genauigkeiten s. Tabelle 1) mit drei Pendelbeschleunigungsmessern und drei faseroptischen Kreiseln (FOG), einer digitalen Kamera (Kodak DCS 420 oder Kodak DCS 460) und einer hochdynamisch regelbaren Sensorplattform zur Stabilisierung der Kamera, das auch den Einsatz für photogrammetrische Aufnahmen unter turbulenten Wetterverhältnissen zulässt. Bei der neuesten Version befinden sich sowohl die Kamera als auch das modifizierte Inertialsystem (Abb. 7) direkt auf der geregelten Plattform (Abb. 8).

Die Montage von Kamera und Inertialsystem erfolgt so, dass deren Hauptachsen annähernd parallel zueinander ausgerichtet sind. Die restlichen Nichtparallelitäten (Misalignments) werden anschließend in einer speziellen in situ bzw. On-the-Job-Kalibration nach dem o.a. Verfahren bestimmt und bei der späteren Bildverarbeitung, in der die Winkel und Positionen des Inertialsystems zur direkten Georeferenzierung einfließen, berücksichtigt.

Wie o.a. werden zur Kalibration der Misalignments die Aufnahmeposition der Kamera, die Winkel des Inertialsystems (Roll, Nick- und Kurswinkel) und die entsprechenden Winkel des photogrammetrischen Auswertesystems (Bildneigungswinkel, Verkantungswinkel) benötigt. Hierzu werden Aufnahmen über ein genau vermessenes Gebiet mit einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten durchgeführt. Zur Gewinnung dieser Daten ist i.d.R. ein spezieller Bildflug mit dem kompletten Aufnahmesystem in der später einzusetzenden Gerätekonstellation und einer anschließenden Bündelblockausgleichung notwendig (in situ, On-the-Job-Kalibration). Nachteilig bei diesem Verfahren ist die Abhängigkeit von der Wetterlage und der Verfügbarkeit eines Flugzeuges.

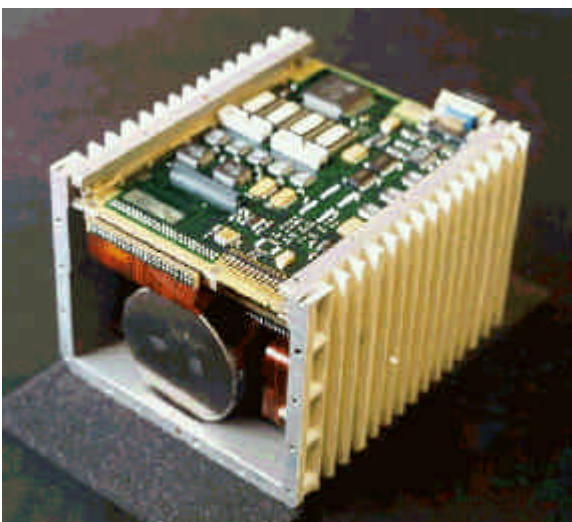


Abb. 7: Inertialsystem LLN-G1 mit drei faseroptischen Kreiseln (FOG); im Vordergrund: eine der drei Spulen mit 500 m Faserlänge

	FOG-Kreisel	B' messer
Drift/Bias	0.1°/h	0.5 mg
Skalenfaktorfehler	100 ppm	1000 ppm
Rauschen	0.02 °/√h	0.01 mg

Tabelle 1: Genauigkeiten der inertialen Sensoren

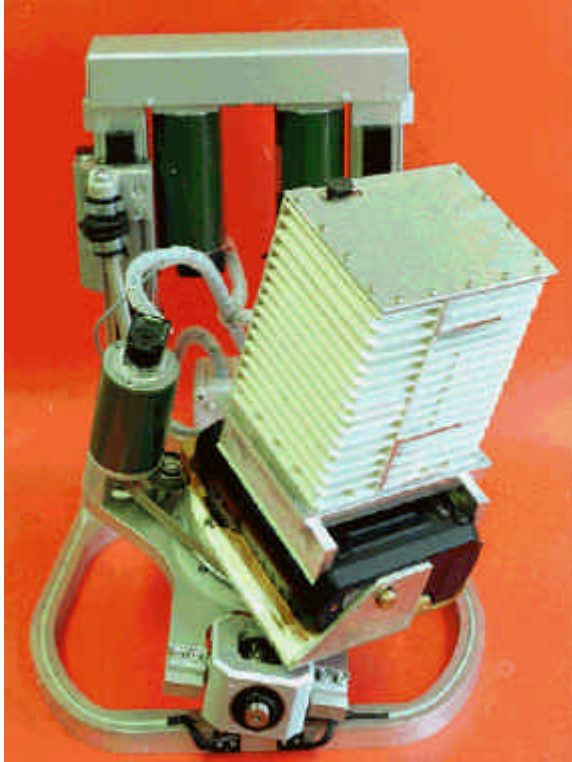


Abb. 8: regelbare Plattform mit digitaler Kamera Kodak DCS 460 ( $f = 28 \text{ mm}$ ,  $2000 \times 3000 \text{ Pixel}$ ) und Inertialsystem LLN-G1

Zur Vermeidung dieser Nachteile wurde an der FH Bochum ein Verfahren entwickelt, das eine in situ bzw. On-the-Job-Kalibration der Misalignments auch im Labor ermöglicht. Basis dieses Kalibrationsverfahrens bildet ein in einer Halle der FH Bochum (Baustofflabor) dreidimensional angelegtes Feld (Größe ca.  $10 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ) mit ca. 40 vermessenen Passpunkten (Abb. 9). Die Lage- und Höhenkoordinaten der Passpunkte, die in unterschiedlichen Höhen eingerichtet wurden, wurden mittels Tachymeter und Nivellier im System WGS84 eingemessen (Genauigkeit:  $< 1 \text{ mm}$ ). Zusätzliche Zielmarken dienen als sog. Verknüpfungspunkte für den späteren Bildverband. Die *Befliegung* des dreidimensionalen Passpunktfeldes (minimale bzw. maximale *Flughöhe über Grund*:  $3.5 \text{ m}$  bzw.  $7 \text{ m}$ ) erfolgt hier mittels einer fernsteuerbaren Kranbahn, auf der das komplette Inertial- und Aufnahmesystem (ohne Stabilisierungseinrichtung) montiert sind. Die Kranbahn wird in Abhängigkeit des Bildmaßstabes, der aufgrund der

unterschiedlichen *Flughöhen über Grund* zwischen  $1:250$  bis  $1:125$  variiert, so gesteuert, dass sich Flugstreifen mit einer Querüberdeckung von mindestens  $40\%$  und einer Längsüberdeckung von mindestens  $60\%$  ergeben. Im Gegensatz zum realen Bildflug wird die Kranbahn aber an den vorherbestimmten Aufnahmepositionen gestoppt und dann erst die Kamera ausgelöst. Gleichzeitig wechselt während dieser Zeit das Inertialsystem, das aufgrund der in der Halle nicht möglichen GPS-Stützung in der Betriebsart *frei inertial* operieren muss, in die Betriebsart *On-Ground*, in der eine sog. Zero-Velocity-Stützung im Kalmanfilter stattfindet. Während dieser Zeit erfolgt eine zusätzliche Schätzung und Korrektur der im Zustandsvektor des Kalmanfilters enthaltenen Sensor- und Systemfehler. Abb. 10 zeigt eines der insgesamt 28 Photos.

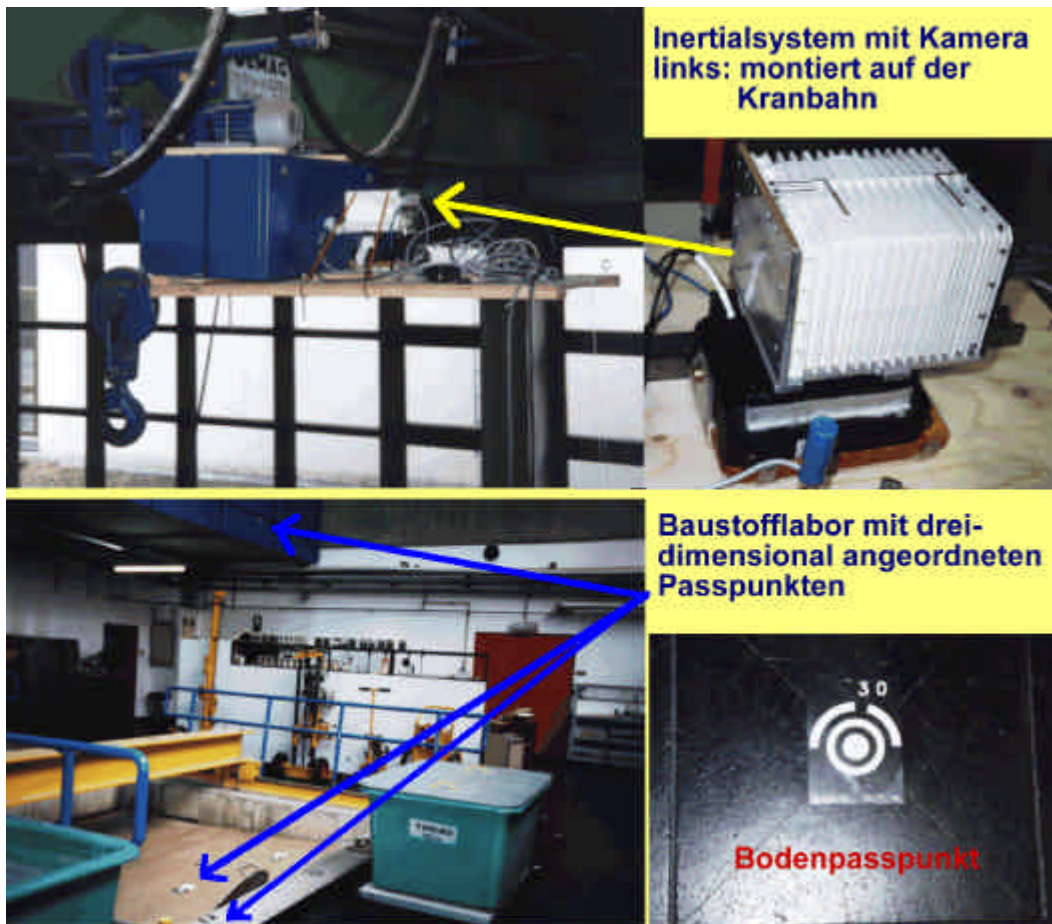


Abb. 9: Baustofflabor mit Kranbahn, Inertial- und Aufnahme- system und Passpunkten



Abb. 10: Eines der 28 Aufnahmen des Bildverbandes zur Bestimmung der Misalignments;



unten rechts: Zielmarke

Da aufgrund der Driften der faseroptischen Kreisel (vgl. Tabelle 1) eine autonome Anfangskursausrichtung mittels der Erddrehratenschätzung in mittleren Breiten nur mit einer Genauigkeit von ca.  $0.5^\circ$  möglich ist, die im realen Bildflug erst nach einigen Manövern durch die GPS-Stützung auf besser als  $0.05^\circ$  gesteigert werden kann, muss im Labor ein spezielles Verfahren zur Kursausrichtung angewendet werden, um eine gleichwertige Genauigkeit zur GPS-Stützung zu erreichen. Dieses geschieht mittels einer Zweipositionsausrichtung, bei der das Inertialsystem zu Beginn in zwei um  $180^\circ$  unterschiedlichen Kursausrichtungen ausgerichtet wird. Aus den so ermittelten Inertialdaten, die über einen Zeitraum von jeweils zwei Minuten integriert werden, erfolgt anschließend sowohl eine Schätzung der Anfangswinkel des Inertialsystems (Roll-, Nick-, Kurswinkel) als auch der Fehler der inertialen Sensoren (B' messerbiase und Kreiseldriften). Auf diese Weise lassen sich die Lagewinkel mit einer Genauigkeit von  $0.005^\circ$  und der Kurswinkel von  $0.025^\circ$  initialisieren.

Insgesamt wurden an 28 Positionen Photos aufgenommen und die dabei mit dem Inertialsystem ermittelten Winkel (Roll-, Nick- und Kurswinkel) und Koordinaten bestimmt (s. Tabelle 2). Die Photos wurden anschließend einer Bündelblockausgleichung unter Benutzung der Passpunkte unterzogen, wobei eine Genauigkeit bei der Bildkoordinatenmessung (automatische Bildkoordinatenmessung der codierten Zielmarken) von  $2 \mu\text{m}$  erzielt wurde. Als Ergebnis liegen nun für jedes Photo photogrammetrisch bestimmte Bildneigungswinkel und Verkantungswinkel vor. Die inertial und photogrammetrisch bestimmten Winkel bilden die Beobachtungen zur anschließenden Bestimmung der drei Misalignments entsprechend dem o.a. Ausgleichungsmodell. In Tabelle 2 sind die mit dem Inertialsystem für jede Aufnahme position bestimmten Roll-, Nick- und Kurswinkel und die dreidimensionalen Koordinaten der Projektionszentren aufgelistet. Die hiermit korrespondierenden photogrammetrisch bestimmten Bildneigungs- und Verkantungswinkel der Bündelblockausgleichung  $\mathbf{w}, \mathbf{z}, \mathbf{l}$  sind in Tabelle 3 aufgeführt. In dieser Tabelle sind auch die in der Ausgleichung ermittelten Misalignments  $e_x, e_y, e_z$  und die Restabweichungen der Bildneigungs- und Verkantungswinkel dargestellt. Aus den Restabweichungen resultiert eine Standardabweichung von  $0.003$  Gon für die Bildneigungswinkel bzw. von  $0.011$  Gon für den Bildverkantungswinkel.

Damit steht ein leistungsfähiges Kalibrationsverfahren zur Bestimmung der Misalignments zwischen Kamerasystem und Inertialsystem, das zur direkten Georeferenzierung eingesetzt wird, zur Verfügung. Das besondere an dem Verfahren ist, dass die Kalibration in situ im Labor erfolgen kann und dass auf aufwendige Messflüge über ein Messgebiet mit ausreichender Anzahl von Passpunkten verzichtet werden kann.

Pkt	Hochwert [m]	Rechtswert [m]	Höhe [m]	Roll [ $^\circ$ ]	Nick [ $^\circ$ ]	Kurs [ $^\circ$ ]
0	5700085.0	2580116.0	107.0	(Nullpunkt des Gebietes)		
101	5700088.2209	2580117.1066	107.2483	-1.45	-0.32	-28.68
102	5700087.7932	2580117.8857	107.2492	-1.45	-0.29	-28.81
103	5700087.3698	2580118.6747	107.2496	-1.45	-0.29	-29.08
104	5700086.9704	2580119.4247	107.2512	-1.45	-0.27	-28.99
....						
401	5700082.0422	2580119.2659	107.2381	-1.37	-0.71	-28.43
402	5700082.9423	2580119.7544	107.2400	-1.45	-0.57	-28.47
403	5700083.9653	2580120.3192	107.2447	-1.55	-0.45	-28.56
404	5700084.8925	2580120.8238	107.2474	-1.39	-0.44	-28.55
405	5700085.9316	2580121.3922	107.2486	-1.43	-0.49	-29.16

Tabelle 2: Aufnahme positionen und mit dem Inertialsystem bestimmte Winkel (Roll-, Nick- und Kurswinkel)

ausgeglichene Misalignments: $e_x = 0.2126^\circ$ , $e_y = 0.3138^\circ$ , $e_z = 0.0989^\circ$						
Pkt	$\varphi$ [Gon]	$\omega$ [Gon]	$\kappa$ [Gon]	$\delta\varphi$ [Gon]	$\delta\omega$ [Gon]	$\delta\kappa$ [Gon]
101	-1.2100	0.6500	131.7700	-0.0005	-0.0038	0.0117
102	-1.1900	0.6900	131.9000	0.0020	0.0043	-0.0022
103	-1.1900	0.6900	132.2000	-0.0013	-0.0013	-0.0022
104	-1.1800	0.7100	132.1000	-0.0010	0.0011	-0.0018
....						
401	-1.3400	0.2300	131.5000	0.0004	0.0048	0.0117
402	-1.3400	0.4100	131.5100	0.0043	0.0048	-0.0199
403	-1.3800	0.5800	131.6300	-0.0025	0.0025	0.0027
404	-1.2200	0.5000	131.6100	-0.0039	-0.0021	-0.0063
405	-1.2800	0.4900	132.2800	-0.0034	0.0019	-0.0149
Std.dev. (Phi, Omega, Kappa) [Gon]:				0.0026	0.0030	0.0107

Tabelle 3: ausgeglichene Misalignments  $e_x$ ,  $e_y$ ,  $e_z$ , Winkel aus der Bündelblockausgleichung und Restabweichungen nach Ausgleichung der Misalignments

## 7 Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurde an der FH Bochum das Luftaufnahmesystem LEO (Local Earth Observation) zur direkten Georeferenzierung von Bilddaten entwickelt. Die neueste Entwicklung basiert auf einer hochdynamisch regelbaren Plattform zur Kamerastabilisierung, auf der sowohl die digitale Kamera (Kodak DCS 420, Kodak DCS 460) als auch das Inertialsystem (Faserkreisel und Pendelbeschleunigungsmesser) installiert sind.

Zur direkten Georeferenzierung der Bilddaten müssen die mit dem Inertialsystem gemessenen Roll-, Nick- und Kurswinkel in die für das jeweilige photogrammetrische Auswertesystem benötigten Bildneigungs- und Verkantungswinkel transformiert werden. Dabei sind neben den unterschiedlichen Definitionen des Bildkoordinatensystems und des Objektkoordinatensystems in der Photogrammetrie auch die Misalignments (Nichtparallelitäten) zwischen den Hauptachsen des Kamerasystems und des Inertialsystems zu berücksichtigen. I.d.R. müssen die Misalignments dabei mittels eines aufwendigen und teuren Bildfluges über ein genau vermessenes Passpunktfeld kalibriert werden.

Aus diesem Grunde wurde zur Bestimmung der Misalignments ein labortaugliches und wetterunabhängiges Kalibrationsverfahren entwickelt. Bei dem Verfahren wird ein dreidimensional in einer Halle angelegtes Passpunktfeld verwendet, über das mittels einer fernsteuerbaren Kranbahn das Aufnahmesystem (Kamera mit Inertialsystem) bewegt wird. Die Bestimmung und Ausgleichung der Kalibrationsdaten und die Umrechnung der Winkel erfolgt nach einem streng mathematischen Ansatz, der auf beliebige anders definierte photogrammetrische Auswertesysteme übertragbar ist.

Zur genauen Ausrichtung des Inertialsystems, das in der Halle ohne die übliche GPS-Stützung operieren muss, wird ein spezielles Ausrichtverfahren zur Anfangskursschätzung und zur Kalibration der Biase und Driften der inertialen Sensoren praktiziert. Während der Stillstandphasen, in denen die Photos aufgenommen werden, wechselt das Inertialsystem in einen speziellen *On Ground Modus*, der ein zwischenzeitliches Wegdriften der Positionen, Geschwindigkeiten und Winkel kompensiert und eine weitere Schätzung der Sensorfehler ermöglicht.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Verfahren eine Genauigkeit für die Bildneigungswinkel von 0.003 Gon und für den Verkantungswinkel von 0.011 Gon nach Kalibration der Misalignments erreicht werden kann. Damit steht ein leistungsfähiges Verfahren zur Kalibration der Misalignments zwischen Inertialsystem und Kamerasystem und zur Umrechnung der Winkel, die neben den Positionsdaten zur direkten Georeferenzierung benötigt werden, zur Verfügung.

## 8 Literatur

- Airlines Electronic Engineering Committee (1982):* ARINC Characteristic 705 - Attitude and Heading Reference System. Aeronautical Radio INC., Annapolis, Maryland 1982.
- Bäumker, M. (1995):* Basiswissen Inertial- und Sensortechnik. In: Journal for Satellite-Based Positioning, Navigation and Communication, Vol. 4/95, pp. 147-152, Dezember 1995.
- Bäumker, M., R. Brechtken, F.-J. Heimes, T. Richter (1998):* Hochgenaue Stabilisierung einer Sensorplattform mit den Daten eines (D)GPS-gestützten Inertialsystems. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung ZPF, Heft 1/98, S. 15-22.
- Bäumker, M., R. Brechtken, F.-J. Heimes, T. Richter (1999):* Direkte Georeferenzierung mit dem Luftaufnahmesystem LEO. In: Proceedings 10. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, 21.2.-27.2.1999.
- Bäumker, M., F.-J. Heimes, H. Hahn, W. Klier, R. Brechtken, T. Richter (2000):* Mathematical Modeling, Computer Simulation, Control and Applications of a Stabilized Platform of an Airborne Sensor. In: Proceedings ISPRS 2000 Amsterdam, Volume XXXIII, Part B2, p. 278-286, Amsterdam, The Netherlands, 16 -23 July 2000.
- Cramer, M. (1999):* Direct Geocoding - Is Aerial Triangulation Obsolete? In: Photogrammetric Week '99 Stuttgart, S. 59 - 70. H. Wichmann Verlag Heidelberg 1999.
- Hutton, J. und E. Lithopoulos (1998):* Airborne Photogrammetry Using Direct Camera Orientation Measurements. In: Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation 6/1998, S. 363-370, 1998.
- INPHO GmbH (1999):* FAQ - PATB-GPS. In: Firmen Website unter <http://www.inpho.de> (1999).
- Jacobsen, K. (1996):* User Manual Programm System BLUH. Institute for Photogrammetrie and Engineering Surveys, University Hannover, 1996.
- Kraus, K. (1997a):* Photogrammetrie, Band 1: Grundlagen und Standardverfahren. 6. Aufl., Dümmlers Verlag, ISBN: 3-427-78646-3, 1997.
- Kraus, K. (1997b):* Photogrammetry, Vol. 2: Advanced Methods and Applications. 4th ed., Dümmlers Verlag, ISBN: 3-427-78694-3, 1997.
- Schwarz, K.P. (1995):* Integrated airborne navigation system for photogrammetry. In Photogrammetric Week 1995, S.139-154, Wichmann Verlag Heidelberg 1995.