



Direkte Georeferenzierung von Luftbildern in konformen Kartenabbildungen

Camillo Ressler¹

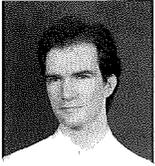
¹ *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **89** (2), S. 72–82
2001

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Ressler_VGI_200106,  
  Title = {Direkte Georeferenzierung von Luftbildern in konformen  
    Kartenabbildungen},  
  Author = {Ressler, Camillo},  
  Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
    Geoinformation},  
  Pages = {72--82},  
  Number = {2},  
  Year = {2001},  
  Volume = {89}  
}
```





Direkte Georeferenzierung von Luftbildern in konformen Kartenabbildungen

Camillo Ressler, Wien

Zusammenfassung

In diesem Aufsatz werden die Probleme diskutiert, die entstehen, wenn eine Aerotriangulation (nach der Bündelblockmethode) im System der Landesvermessung durchgeführt wird. Es sind dies die Erdkrümmung (P1), der Unterschied zwischen Lage- und Höhenmaßstab (P2) und die Änderung des Lagemaßstabes im Projektgebiet (P3). Problem P1 kann sehr gut durch die sogenannte Erdkrümmungskorrektur gelöst werden. Während der Einfluss von P2 und P3 bei der konventionellen Aerotriangulation über Pass- und Verknüpfungspunkte (sog. Indirekte Georeferenzierung) in Lage und Höhe wesentlich ist, kann er bei der direkten Georeferenzierung (über GPS/INS) in der Höhe nicht vernachlässigt werden.

Abstract

This paper deals with the problems that arise when an aerial-triangulation (with the bundle-method) is performed in the national coordinate system. These problems are the earth curvature (P1), the different scales in planimetry and height (P2), the variation of the scale in planimetry across the area of a given project (P3). Problem P1 may be solved by the so-called 'correction of the earth curvature'. Whereas P2 and P3 have negligible effects in planimetry and height when performing a conventional aerial-triangulation using control- and tie-points (so-called indirect georeferencing), their effect in height is not negligible when performing 'direct georeferencing' (using GPS/INS).

1. Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der Photogrammetrie ist die Rekonstruktion räumlicher Objekte mit Hilfe von (analogen oder digitalen) Luftbildern, wobei die Anzahl der benötigten Bilder von der Gebietsgröße und der geforderten Genauigkeit und Zuverlässigkeit abhängt. Bei dieser Rekonstruktion wird das Objekt durch eine Menge von Punkten und Linienelementen abstrahiert, aus denen in der Folge Kurven und Oberflächen abgeleitet werden können. Die 3D-Koordinaten dieser diskreten Punkte und Linienelemente sind aus den Bildern zu bestimmen und in Bezug zu einem gegebenen Koordinatensystem zu setzen. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um das System der staatlichen Landesvermessung.

Der erste (und wesentliche) Schritt bei dieser Objektrekonstruktion ist die Orientierung der Luftbilder, d.h. die Bestimmung der Aufnahme-position und -stellung der Bilder (= äußere Orientierung (XOR)). In jüngster Zeit wird dieser Vorgang auch gern als „Georeferenzierung“ bezeichnet. Die Parameter der inneren Orientierung (IOR), nämlich Bildhauptpunkt, Kamerakonstante und Verzeichnung, werden im Allgemeinen in Form eines Protokolls einer Laborkalibrierung vorgehalten.

Der zweite Schritt ist dann die eigentliche Objektrekonstruktion im Landeskoordinatensystem. Diese erfolgt nach dem Prinzip der Modellaus-

wertung [6] manuell oder automationsunterstützt an analytischen oder digitalen Stereoplottern.

Die Georeferenzierung selbst kann indirekt (über Pass- und Verknüpfungspunkte) oder direkt (über GPS/INS) durchgeführt werden. Die photogrammetrischen Beziehungen (z.B. die Formel der Zentralprojektion) beziehen sich auf ein kartesisches Koordinatensystem. Aus diesem Grund sollte die Georeferenzierung auch in einem solchen System durchgeführt werden, z.B. in einem passend gewählten Tangentialsystem. Da aber die Endergebnisse – jene oben erwähnten diskreten Objektpunkte – letztendlich im System der Landesvermessung anzugeben sind, erfolgt die Georeferenzierung oft gleich in diesem System. Da das Landeskoordinatensystem auf einer Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche basiert, bei der prinzipiell Verzerrungen nicht vermieden werden können, erhebt sich folgende Frage: Welche Fehler entstehen in den Objektpunkten wenn die direkte bzw. indirekte Georeferenzierung im System der Landesvermessung durchgeführt wird?

Für die indirekte Georeferenzierung wurde diese Problematik schon ausführlich in der Literatur untersucht; z.B. [10], [8]. Für die direkte Georeferenzierung soll diese Diskussion hier (mit Betonung der Höhenfehler) nachgeholt werden. Da nur die Fehler aufgrund der Verzerrungen im Landeskoordinatensystem von Interesse sind, wird in den folgenden Untersuchun-

gen davon ausgegangen, dass die Bild-, GPS- und INS-Beobachtungen fehlerfrei sind, und dass der Wert der Kamerakonstanten während des Fluges sich nicht von dem Wert unterscheidet, der bei einer Laborkalibrierung ermittelt wurde – d.h. Kamerakonstantenänderungen aufgrund atmosphärischer Parameter werden nicht berücksichtigt.

2. Indirekte und direkte Georeferenzierung

Standardmäßig erfolgt die Bestimmung der XOR eines Verbandes von Luftbildern im Rahmen einer Aerotriangulation (AT) unter Zuhilfenahme von Pass- und Verknüpfungspunkten. Die AT kann dabei in Form einer Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen oder einer Bündelblockausgleichung erfolgen. Im Weiteren wird unterstellt, dass eine Bündelblockausgleichung durchgeführt wird. Diese Art der Georeferenzierung wird gerne auch als „indirekte Georeferenzierung“ bezeichnet, da die XOR der Luftbilder indirekt über die Pass- und Verknüpfungspunkte ermittelt wird.

Dieser Methode gegenüber steht die sogenannte „direkte Georeferenzierung“, bei der die XOR der Luftbilder direkt über zwei spezielle Sensoren, die im Flugzeug eingebaut sind, anfällt. Der erste Sensor ist ein INS (Inertial Navigation System), das fest am Kameragehäuse montiert ist. Ein INS besteht aus einer sogenannten Inertialmesseinheit (IMU), welche aus drei Drehbeschleunigungsmessern (Kreisel) und drei linearen Beschleunigungsmessern aufgebaut ist, und zusätzlichen „positioning and guidance functions“ [2].

Mittels Integration erlaubt ein INS die Geschwindigkeit, die Position und die Stellung des Systemträgers (= Flugzeug) relativ zu einem vorgegebenen Bezugssystem zu bestimmen. Da ein solcher Systemträger einer hohen Dynamik ausgesetzt ist, summieren sich die zufälligen und verbliebenen systematischen Fehler während des Integrationsprozesses auf, so dass sich die Genauigkeit eines INS rapid mit der Zeit verschlechtert. Je nach dem Verhalten der Systemgenauigkeit (hoch, mittel, niedrig) werden INS in 3 Gruppen eingeteilt („strategic grade“, „navigation grade“, „tactical grade“). Folgende Tabelle (entnommen aus [3]) gibt einen Überblick über die einzelnen Systemgenauigkeiten. Da die Absolutgenauigkeit zeitabhängig ist, wird diese meist auf unterschiedliche Integrationszeiten bezogen (Sekunde, Minute, Stunde):

Zeitintervall	Systemgenauigkeit		
	Hoch	Mittel	Niedrig
Position			
1 h	300–500 m	1–3 km	200–300 km
1 min	0.3–0.5 m	0.5–3 m	30–50 m
1 s	0.01–0.02 m	0.03–0.1 m	0.3–0.5 m
Neigung [°]			
1 h	0.003–0.008	0.01–0.05	1–3
1 min	0.0003–0.0005	0.004–0.005	0.2–0.3
1 s	<0.0003	0.003–0.005	0.01–0.03
Preis (US\$)	~1.000.000	~ 100.000	~ 10.000

Tabelle 1: Genauigkeitseinteilung für INS

Für die direkte Georeferenzierung von Luftbildern werden im Allgemeinen INS der mittleren Genauigkeitsklasse verwendet. Um die INS-Genauigkeit auf konstantem Niveau zu halten, ist es nun notwendig, dass die INS-Beobachtungen (Geschwindigkeit, Position) periodisch mit Referenzwerten verglichen werden. Ein System, das sich anbietet solche Referenzwerte zu liefern, ist GPS (Global Positioning System). Zu diesem Zweck wird als zweiter Sensor eine GPS-Antenne am Dach des Flugzeugs montiert. Mittels Kalmanfilterung können dann die Beobachtungen beider Systeme integriert werden, wobei die Vorteile beider Systeme bewahrt, die Nachteile hingegen eliminiert bzw. gemindert werden; [3].

Als Ergebnis dieser GPS-INS-Integration erhält man die Position des Flugzeugs auf ~ 5–10 cm (bei dGPS [3]) und die Stellung des Fliegers in etwa mit der Genauigkeit des verwendeten INS bei der Integrationszeit von einer Sekunde, also etwa 0.003–0.005°.

GPS, INS und die im Flugzeug eingebaute Messkamera arbeiten zunächst unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Datenraten (GPS: 1–10 Hz, INS: ~200 Hz, Kamera: <1 Hz). Für eine korrekte Verarbeitung der GPS/INS-Beobachtungen, um daraus die XOR der Luftbilder (zu den Belichtungszeitpunkten) abzuleiten, ist eine sehr genaue zeitliche Synchronisation dieser 3 Sensoren notwendig (besser als 1 msec).

Durch den Einsatz der direkten Georeferenzierung ergeben sich viele Vorteile, die einen großen zeitlichen (= finanziellen) Gewinn ermöglichen können: Die Photogrammetrie wird vom Zwang befreit, ein Projektgebiet zum Zweck der Blockversteifung rechteckig und weiter als notwendig zu befliegen. Die Messung von Pass- und Verknüpfungspunkten erscheint nicht mehr notwendig. Ebenso entfällt eine gemeinsame Ausgleichung *aller* Bilder vor der weiteren Bildauswertung. Somit ist die direkte Georeferenzierung besonders für Aufgaben geeignet, wo die

Genauigkeit nicht das primäre Ziel ist, sondern die rasche Verfügbarkeit von georeferenzierten Bilddaten.

Auf die weiteren Probleme der GPS/INS-Integration und auf den praktischen Einsatz dieses Systems bei der Luftbildvermessung wird hier nicht weiter eingegangen; so z.B. zeigt sich die (geringe) Verdrehung (das sog. ‚misalignment‘) zwischen Kamera und INS als z.T. zeitlich instabil. Darum müssen zur Sicherheit nach wie vor Pass- und Verknüpfungsmessungen und eine gemeinsame Ausgleichung aller Beobachtungen (GPS/INS, Bildmessungen, Bodenpasspunkte) vorgenommen werden.

An der direkten Georeferenzierung interessierte Leser seien auf z.B. [3], [2], [9] oder [5] verwiesen.

3. Das Landeskoordinatensystem

Wie eingangs erwähnt wurde, besteht die photogrammetrische Aufgabe darin, mittels gegebener Luftbilder der räumliche Objekte zu rekonstruieren, wobei diese Objekte durch eine Menge von Punkten abstrahiert und deren Koordinaten in Bezug zu einem gegebenen Koordinatensystem angegeben werden. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um das System der staatlichen Landesvermessung. Dieses System basiert darauf, dass die mathematisch nicht beschreibbare Form der Erdoberfläche durch ein passendes Rotationsellipsoid angenähert wird. Mit Hilfe dieses Bezugsellipsoids können 3D-Punkte durch deren geodätische Länge L und Breite B (d.h. der Richtung der Ellipsoidnormalen) und den Normalabstand der 3D-Punkte vom Bezugsellipsoid beschrieben werden. Die Abbildung eines Ellipsoids in die Ebene kann niemals zur Gänze streckentreu, sondern nur winkeltreu oder flächentreu sein. Aufgrund der großen Bedeutung der Winkelmessung in der Geodäsie basieren daher Landeskoordinatensysteme meist auf einer konformen Abbildung (z.B. nach Gauß-Krüger).

Die Gauß-Krüger-Abbildung ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet [1]:

1. Die Abbildung ist winkeltreu. Aufgrund einer endlichen Reihenentwicklung gilt diese Eigenschaft nicht in aller Strenge.
2. Es werden nur schmale Streifen (in Österreich: 1.5°) westlich und östlich eines Mittelmeridians abgebildet, mit einem $1/2^\circ$ Überlappungsbereich zu den benachbarten Streifen.
3. Der Mittelmeridian wird streckentreu als Gerade (= X_{LS} -Achse des Streifensystems) abgebildet.

Von einem gegebenen Punkt P in der Höhe H über dem Bezugsellipsoid, ist nur der Fußpunkt am Ellipsoid von dieser Abbildung betroffen. In den so erhaltenen Lagekoordinaten wirkt die Streckenverzerrung τ der Abbildung, wobei τ (und somit auch der Lagemaßstab) mit dem Abstand zum Bezugsmeridian quadratisch zunimmt. Die Ellipsoidhöhe H wird unverändert als Höhenkoordinate ins Landeskoordinatensystem übernommen – mit dem Effekt, dass die windschiefen Ellipsoidnormalen parallel gerichtet werden. Somit herrscht nur entlang des Mittelmeridians in aller Strenge in Lage und Höhe derselbe Maßstab; je weiter man sich von ihm entfernt, desto mehr unterscheiden sich diese beiden Maßstäbe. Aufgrund dieser Tatsachen stellt das Landeskoordinatensystem kein kartesisches Bezugssystem dar.

Bei der Gauß-Krüger-Abbildung berechnet sich die Streckenverzerrung τ im Abstand Y_{LS} vom Bezugsmeridian wie folgt (R ist der mittlere Krümmungsradius, abhängig von den Parametern des Bezugsellipsoids (a, b) und der geodätischen Breite B im Punkt $P(Y_{LS}, X_{LS})$), [1]:

$$\tau = 1 + \frac{Y_{LS}^2}{2R^2} + \frac{Y_{LS}^4}{24R^4} \quad \text{mit}$$

$$R = \frac{c}{1 + e'^2 \cdot \cos^2 B}, \quad c = \frac{a^2}{b}, \quad e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \quad (1)$$

Der Effekt von τ auf 1.000 m beträgt am Streifenrand ($L = 1.5^\circ, B = 48^\circ \rightarrow Y_{LS} \sim 112 \text{ km}$) $\sim +15 \text{ cm}$ und am Ende des Überlappungsbereiches ($L = 2.0^\circ, B = 48^\circ \rightarrow Y_{LS} \sim 150 \text{ km}$) $\sim +28 \text{ cm}$.

Die ebenfalls sehr verbreitete UTM-Abbildung (Universal-Transverse-Mercator) entspricht einer Gauß-Krüger-Abbildung, wobei die Streifenbreite auf $\pm 3^\circ$ vergrößert wird. Um den Einfluss der Streckenverzerrung zu verringern, werden die Lagekoordinaten um den Faktor 0.9996 künstlich verändert. Dadurch geht die Streckentreue im Mittelmeridian verloren und entsteht in X_{LS} -Parallelen im Abstand von $\sim 180 \text{ km}$ östlich und westlich des Mittelmeridians.

Der Effekt von τ bei der UTM-Abbildung auf 1.000 m beträgt im Mittelmeridian ($L = 0.0^\circ, B = 48^\circ \rightarrow Y_{LS} \sim 0 \text{ km}$) $\sim -40 \text{ cm}$, am Streifenende ($L = 3.0^\circ, B = 48^\circ \rightarrow Y_{LS} \sim 220 \text{ km}$) $\sim +20 \text{ cm}$ und am Ende des Überlappungsbereiches ($L = 3.5^\circ, B = 48^\circ \rightarrow Y_{LS} \sim 290 \text{ km}$) $\sim +65 \text{ cm}$.

In diesem verzerrten System der Landesvermessung sind die Koordinaten der diskreten Punkte, die ein zu rekonstruierendes Objekt abstrahieren, anzugeben. Die in der Photogrammetrie gültigen Formeln (der Zentralprojektion) und die daraus abgeleiteten Neupunkte beziehen

sich jedoch auf ein kartesisches System. Wie ist diese Problematik zu lösen?

Die erste (und sauberste) Methode besteht darin, die AT in einem kartesischen Hilfssystem (z.B. einem Tangentialsystem, gelagert in der Mitte des Projektgebietes) durchzuführen, und das Ergebnis danach ins Landeskoordinatensystem zu transformieren. Die zweite Möglichkeit ist, die AT bereits im System der Landesvermessung zu berechnen, wobei man die Diskrepanzen zwischen dem verzerrten Landeskoordinatensystem und der „kartesischen Natur“ der Photogrammetrie durch passende Korrekturen zu minimieren versucht.

Im Folgenden soll nur mehr die zweite Methode betrachtet werden. Welche Probleme entstehen nun, wenn man die kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie im verzerrten Landeskoordinatensystem anwendet? Abbildung 1 beschreibt die Sachlage schematisch.

In Skizze (A) ist der Schnitt durch 3 ausgewählte Projektionszentren eines entlang eines Breitenkreises von West nach Ost geflogenen Streifens dargestellt (wobei der Einfachheit halber die Schnittellipse durch einen Kreis ersetzt ist). Das Flugzeug fliegt dabei in konstanter Ellipsoidhöhe H_F . Die Kamerakonstante sei c , das Bildformat sei s und es handle sich um exakte Senkrechtaufnahmen. Unterwirft man den durch

diese Bilder abgedeckten Ellipsoidbereich der Gauß-Krüger-Abbildung, so wird dieser Ellipsoidbereich sozusagen konform abgewickelt. Die dabei entstehenden Streckenverzerrungen seien zunächst einmal außer Acht gelassen. Diese Abbildung der Ellipsoidoberfläche liefert die Lagekoordinaten des Landeskoordinatensystems. Als Höhenkoordinate dient die Ellipsoidhöhe der Geländepunkte. Diese beziehen sich aber auf das gekrümmte Referenzellipsoid der Landesvermessung. Diese Ellipsoidkrümmung verhindert, dass die kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie unmittelbar im Landeskoordinatensystem angewendet werden können.

In erster Näherung kann man aber die gekrümmte Ellipsoidoberfläche durch ein Polyeder aus Tangentialebenen ersetzen, wobei die Tangentialebenen in den Normalenfußpunkten der Projektionszentren ans Ellipsoid gelegt werden. Die Abwicklung dieser Tangentialpolyederfläche entspricht dann in erster Näherung der Gauß-Krüger-Abbildung der Ellipsoidoberfläche. Zusammen mit den auf die einzelnen Tangentialebenen bezogenen Höhen erhalte man dann für jedes Bild ein individuelles (kleines) kartesisches System. Die Korrektur, die aufgrund der Tangentialapproximation durchzuführen ist, behebt also die Effekte zufolge der Ellipsoidkrümmung. Die Skizze (B) soll die Wirkung dieser Korrektur wiedergeben. Dort ist als meridionaler Schnitt die

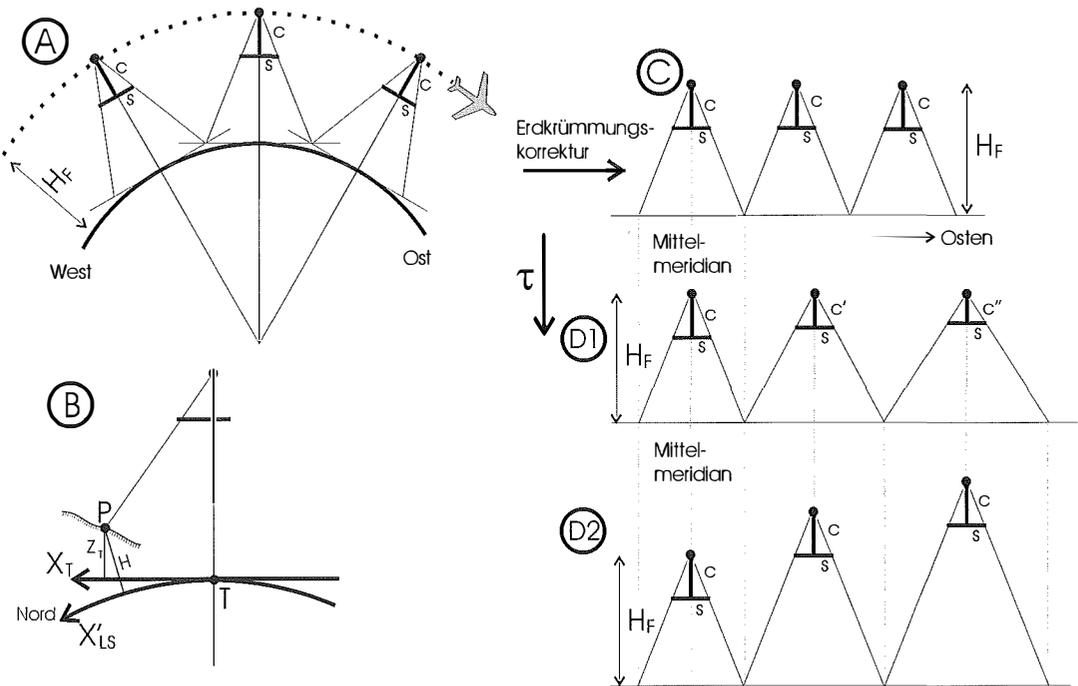


Abb. 1: Flugstreifen im Landeskoordinatensystem

Umgebung eines Normalenfußpunktes T mit zugehöriger Tangentialebene und gekrümmter Ellipsoidoberfläche dargestellt.

Ein Geländepunkt P ist ebenfalls dargestellt, und zwar bezüglich der Ellipsoidoberfläche mit Koordinaten (Y'_{LS}, X'_{LS}, H) ¹ und bezüglich eines kartesischen Tangentialsystems mit Koordinaten (X_T, Y_T, Z_T) . Kennt man die (genähernten) Landeskoordinaten von T und von den Punkten P, die im zu T gehörenden Bild liegen, so kann man diese Punkte P ins Tangentialsystem transformieren. In diesem Tangentialsystem gelten dann die kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie.

Diese Transformation wird als Erdkrümmungskorrektur bezeichnet, und ist standardmäßig in den gängigen AT-Programmen enthalten. Die Erdkrümmungskorrektur ist auch in der Weise durchführbar, dass nicht die Objektkoordinaten verändert werden, sondern die Bildkoordinaten. Näheres zur Erdkrümmungskorrektur findet man z.B. in [10], [7], [6].

Mit Hilfe der Erdkrümmungskorrektur wird der in konstanter Ellipsoidhöhe H_F durchgeführte Flug verebnet; d.h. das Flugzeug fliegt jetzt horizontal in konstanter Höhe H_F über der Bezugsebene, in die das Tangentialebenenpolyeder ausgebreitet wird; Skizze (C).

Nun kommt noch die zuvor außer Acht gelassene Streckenverzerrung τ der Gauß-Krüger-Abbildung, deren Zunahme bei Entfernung vom Mittelmeridian und die unveränderte Übernahme der Ellipsoidhöhen ins Spiel. Sie erzeugen eine Diskrepanz, die in den Skizzen (D1) bzw. (D2) dargestellt ist: Einerseits sollten die Höhen der Projektionszentren der Bilder gleich groß sein, schließlich wurde in konstanter Ellipsoidhöhe befliegen. Das führt aber dazu, dass die Bildwinkel sich wegen (und dessen Zunahme nach Osten hin kontinuierlich vergrößern müssen, d.h. das Verhältnis zwischen Kamerakonstante c und Bildformat s müsste sich ändern (Skizze (D1)). Andererseits, wenn dieses Verhältnis konstant bleibt (da ja alle Bilder mit ein und derselben Kamera aufgenommen wurden), müsste die Flughöhe im Landeskoordinatensystem kontinuierlich nach Osten hin zunehmen (Skizze (D2)).

Zusammenfassend entstehen somit 3 Probleme, wenn man eine AT (nach der Bündelblockmethode) im System der Landesvermessung berechnen will:

- P1) Effekt der Erdkrümmung
- P2) Unterschied zwischen Lage- und Höhenmaßstab
- P3) kontinuierliche Veränderung des Lagemmaßstabes im Blockgebiet in lateraler Richtung

Während Problem P1 durch die Erdkrümmungskorrektur beseitigt wird, sind nach Wissen des Autors, die Probleme P2 und P3 bisher außer Acht gelassen worden. Die Frage ist nun, welche Fehler entstehen an den Neupunkten bei indirekter bzw. direkter Georeferenzierung, wenn P2 und P3 nicht berücksichtigt werden.

Anmerkung: Das Problem der Richtungsreduktion (d.h. die Abweichung zwischen der geradlinigen Verbindung zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt in der Karte und der Abbildung des entsprechenden Normalschnitts bzw. der entsprechenden geodätischen Linie) braucht nicht berücksichtigt zu werden. So ist der aufs Bild bezogene Effekt der Richtungsreduktion bei der Gauß-Krüger-Abbildung bei $(L = 2.0^\circ, B = 48^\circ; \rightarrow Y_{LS} \sim 150 \text{ km})$ für Bildmaßstäbe größer 1:45.000 kleiner als $1 \mu\text{m}$; bzw. bei der UTM-Abbildung bei $(L = 3.5^\circ, B = 48^\circ; \rightarrow Y_{LS} \sim 290 \text{ km})$ für Bildmaßstäbe größer 1:23.000.

4. Indirekte Georeferenzierung in konformen Kartenabbildungen

In diesem Fall sind 3D-Landeskoordinaten der Passpunkte, die Koordinaten ihrer Abbil-

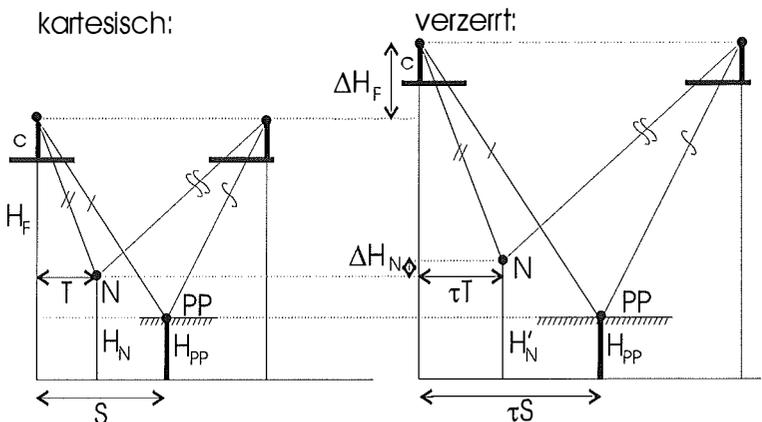


Abb. 2: Indirekte Georeferenzierung

¹ (Y'_{LS}, X'_{LS}, H) sollen ellipsoidische rechtwinklige Koordinaten sein im Stile der Gauß-Krüger-Abbildung mit Ursprung in T und mit X'_{LS} in Richtung des Meridians in T.

dungen in den Luftbildern, die Bildkoordinaten von Verknüpfungspunkten und die IOR gemäß einer gültigen Laborkalibrierung gegeben. Zu bestimmen sind zunächst die Parameter der XOR und anschließend die Koordinaten von Neupunkten. Problem P1 wird durch die Erdkrümmungskorrektur behoben. Wie sieht es mit P2 und P3 aus?

Die XOR der Luftbilder wird indirekt über die Pass- und Verknüpfungspunkte abgeleitet. Die freie Flughöhe passt sich dabei an die Pass- und Verknüpfungspunktsituation am Boden an; d.h. der lokale Lagemaßstab – verursacht durch τ und „realisiert“ in den Passpunkten – überträgt sich auf die Flughöhe. In der Abbildung 2 ist dieser Sachverhalt wiedergegeben (zwei Bilder, Vollpasspunkt PP, Neupunkt N).

In beiden Systemen sind die Bündel der Projektionsstrahlen kongruent, da jedesmal derselbe Wert für die Kamerakonstante c verwendet wird. Somit gilt:

$$\frac{H_F - H_{PP}}{S} = \frac{H_F + \Delta H_F - H_{PP}}{\tau \cdot S} \rightarrow \underline{\Delta H_F = (\tau - 1) \cdot (H_F - H_{PP})} \quad (2)$$

Für die Höhe H_N eines Neupunktes N – unter Verwendung von (2) – gilt:

$$\frac{H_F - H_N}{T} = \frac{H'_F - H'_N}{\tau \cdot T} = \frac{H_F + \Delta H_F - H_N - \Delta H_N}{\tau \cdot T} \rightarrow$$

$$\underline{\Delta H_N = (\tau - 1) \cdot (H_N - H_{PP})} \quad (3)$$

Man erkennt somit: Bei der indirekten Georeferenzierung im Landeskoordinatensystem von Luftbildern mit fester Labor-IOR erfahren die Projektionszentren eine Höhenversetzung ΔH_F proportional zur Flughöhe über Grund (genauer: über dem Niveau der Passpunkte), und da $H_F > H_{PP}$ und $\tau > 1$ bei der Gauß-Krüger-Abbildung, ist die bestimmte Flughöhe größer als in Wirklichkeit. Die Höhen von Neupunkten im Niveau der Bodenpasspunkte werden korrekt bestimmt. Für Neupunkte ober- oder unterhalb dieses Niveaus H_{PP} erhält man Fehler ΔH_N in den Neupunktshöhen H_N proportional zum Höhenunterschied ($H_N - H_{PP}$).

Zahlenbeispiel:

Kamerakonstante $c = 150$ mm, Bildmaßstab 1:10.000 $\rightarrow (H_F - H_{PP}) = 1.5$ km $\rightarrow \Delta H_F = 40$ cm (am Rand des Überlappungsbereichs; $L = 2.0^\circ$)

In diesem Fall und bei einer angenommenen Bildmessgenauigkeit von ± 6 μ m liegt die bestenfalls erreichbare Höhengenaugigkeit bei $0.06\% \cdot (H_F - H_{PP}) = 9$ cm [6]. Für ($H_N - H_{PP}$) =

300 m ergibt sich $\Delta H_N = 8$ cm, d.h. für Neupunkte die um ± 300 m vom Niveau der (Höhen-)Passpunkte abweichen, erhält man aufgrund der Streckenverzerrung Höhenfehler ΔH_N , die im Bereich der Höhengenaugigkeit liegen. Befindet man sich im Hochgebirge mit ($H_N - H_{PP}$) = 1000 m, so wächst der Höhenfehler in den Neupunkten sogar auf $\Delta H_N = 28$ cm.

Dieses hier angeschnittene Problem der indirekten Georeferenzierung im System der Landesvermessung ist in der Photogrammetrie seit sehr langer Zeit bekannt (z.B. [8]). In der Arbeit [10] wird es ausführlich behandelt. Dort wird der Fehler in den Neupunkten in Abhängigkeit der Art der Kartenabbildung (Gauß-Krüger, Lambert, Stereographische (alle drei konform); Ordinatentreue (nicht konform)), der Blockgröße, der Blocklage relativ zum Bezugsmeridian oder -punkt, der Flugrichtung, des Bildmaßstabs, der Anzahl der Lage- und Höhenpasspunkte und der Anzahl der Verknüpfungspunkte empirisch über Simulationsrechnungen ermittelt. Das erfreuliche Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass bei konformen Kartenabbildungen der Einfluss der Lageverzerrungen (d.h. P2 und P3) auf die Neupunkte der AT von erdkrümmungskorrigierten Bildern vernachlässigbar ist; wobei der Einfluss auf die Neupunktshöhen bei der AT mit Bündeln etwas größer ist als bei der AT mit unabhängigen Modellen. Anzumerken ist, dass in diesen Untersuchungen stets horizontales Gelände angenommen wird, somit sind Fehler in den Neupunkten aufgrund deren Höhenunterschiede zur (mittleren) Höhenpasspunktebene nicht dokumentiert.

5. Direkte Georeferenzierung in konformen Kartenabbildungen

In diesem Fall sind die Parameter der äußeren Orientierung (XOR) der Luftbilder bezogen aufs Landeskoordinatensystem, die Bildmessungen von Neupunkten und die IOR gemäß einer gültigen Laborkalibrierung gegeben. Zu bestimmen sind die Koordinaten der Neupunkte. Das Problem P1 wird durch die Erdkrümmungskorrektur behoben. Wie sieht es mit P2 und P3 aus?

In diesem Fall ist kein Element der XOR frei und somit kann sich die Flughöhe nicht an den lokalen Lagemaßstab – verursacht durch τ und „realisiert“ in den bekannten Lagekoordinaten der Projektionszentren – anpassen. In der Abbildung 3 ist dieser Sachverhalt wiedergegeben (zwei Bilder, Neupunkt N):

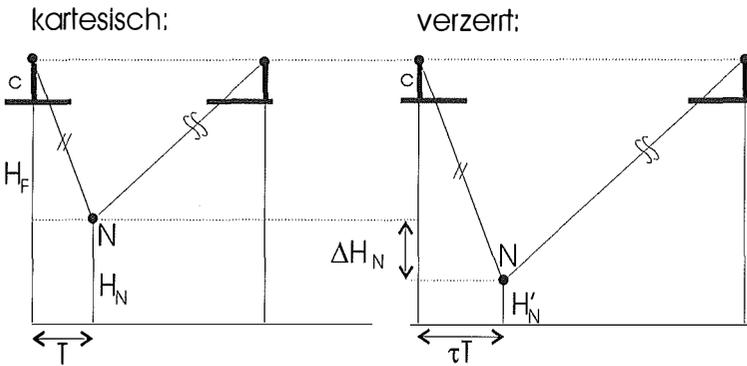


Abb. 3: Direkte Georeferenzierung

In beiden Systemen sind die Bündel der Projektionsstrahlen kongruent, da jedesmal derselbe Wert für die Kamerakonstante c verwendet wird. Somit gilt:

$$\frac{H_F - H_N}{T} = \frac{H_F - H'_N}{\tau \cdot T} = \frac{H_F - H_N - \Delta H_N}{\tau \cdot T} \rightarrow \Delta H_N = (1 - \tau) \cdot (H_F - H_N) \quad (4)$$

Man erkennt somit: Neupunkte erhalten Höhenfehler ΔH_N proportional zur Aufnahmeentfernung und da $H_F > H_N$ und $\tau > 1$ bei der Gauß-Krüger-Abbildung, liegen die Neupunkte immer zu tief.

Fortsetzung des Zahlenbeispiels:

Mit der Aufnahmeentfernung $(H_F - H_N) = 1.5 \text{ km}$ ergibt sich $\Delta H_N = 40 \text{ cm}$, was also deutlich größer ist, als die erreichbare Höhengenaugigkeit von 9 cm .

Im Gegensatz zur indirekten Georeferenzierung sind diese Höhenverfälschungen bei der direkten Georeferenzierung im Landeskoordinatensystem nicht zu vernachlässigen. Vergleicht man Formel (4) mit Formel (3) und ersetzt man H_F durch H_{PP} , so erkennt man deren Äquivalenz; d.h. die Höhenfehler der Neupunkte wachsen bei der direkten und der indirekten Georeferenzierung mit dem Unterschied zum Niveau der (Höhen-)Passpunkte. Bei der indirekten Georeferenzierung sind die Neupunkte annähernd im Niveau der (Boden-)Passpunkte, bei der direkten Georeferenzierung aber nicht, sondern um die Flughöhe tiefer.

Es stellt sich nun die Frage, wie diese Fehler beseitigt werden können. Drei Lösungsmöglichkeiten bieten sich dafür an:

- M1) Berechnung in einem Tangentialsystem
- M2) Korrektur der Höhen
- M3) Korrektur der Kamerakonstante

Methode M1 ist wohl die sauberste Variante, da hier ein kartesisches Bezugssystem verwendet wird, in dem die kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie angewendet werden können. Unter Umständen kann es hier in größeren Gebieten zu kleineren Problemen bei der Refraktionskorrektur und bei physikalisch orientierten Beobachtungen (z.B. tachymetrische Polaraufnahmen) kommen [6], bei der im All-

gemeinen angenommen wird, dass die Lotrichtung mit der Z-Richtung des Bezugssystems übereinstimmt – was im System der Landesvermessung stimmt, jedoch nicht im Tangentialsystem. Methode M1 wird hier nicht weiter betrachtet, da die Berechnung aus dem System der Kartenabbildung herausgenommen wird, und somit nicht mehr in den Rahmen dieses Aufsatzes fällt.

Methode M2 und M3 stellen Näherungslösungen dar, um die Probleme P2 und P3 bei der Berechnung einer AT (über die Bündelblockmethode) im System der Landesvermessung zu beseitigen. Bei M2 bleibt die Kamerakonstante unverändert, jedoch werden alle in die Berechnung eingehenden Höhen um den entsprechenden Lagemaßstab korrigiert ($H_{kor} = H_{Ell} \cdot \tau$). Ist das Projektgebiet nicht zu groß, sollte es reichen, τ für die Gebietsmitte zu bestimmen ($\rightarrow \tau_{global}$) und alle Höhen mit τ_{global} zu korrigieren. In diesem Fall wird nur P2 behoben und P3 vernachlässigt. Wenn das Projektgebiet sehr groß ist und P3 nicht mehr vernachlässigt werden kann, dann ist τ für jeden Punkt separat zu bestimmen ($\rightarrow \tau_{lokal}$) und für die Höhenkorrektur zu verwenden.

Diese Methode hat allerdings den Nachteil, dass alle Ergebnishöhen um τ wieder „entkorrigiert“ werden müssen, um sie mit anderen Daten (z.B. terrestrischen Referenzmessungen) vergleichen zu können. Jedoch wäre es denkbar, dass diese Arbeit sowohl vom AT-Programm als auch von der Stereomodellauswertungs-Software im Rahmen einer erweiterten Erdkrümmungskorrektur übernommen wird. Der Programm-Benutzer sieht dann immer nur Ellipsoidhöhen, die, bevor sie in die Ausgleichung eingehen, um τ_{lokal} korrigiert werden. Die Höhen nach der Ausgleichung werden sofort wieder um die Wirkung von τ_{lokal} befreit, und in den entsprechenden Speichern

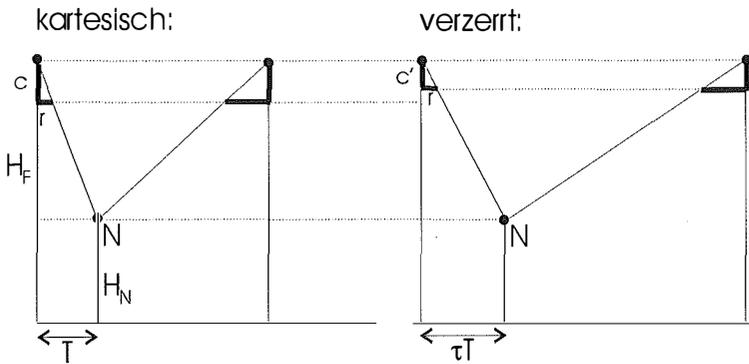


Abb. 4: Änderung der Kamerakonstante

abgelegt. Diese erweiterte Erdkrümmungskorrektur müsste dann wissen, um welche Kartenabbildung es sich handelt und wie die eingehenden Passinformationen vorweg reduziert wurden.

Bei M3 bleiben die Ellipsoidhöhen unverändert, jedoch wird die Kamerakonstante c angepasst, eigentlich verfälscht.

Aus den einfachen Beziehungen in Abbildung 4 sieht man, dass gilt:

$$\frac{H_F - H_N}{T} = \frac{c}{r} \text{ und } \frac{H_F - H_N}{\tau \cdot T} = \frac{c'}{r}, \text{ mit}$$

$$r = \text{Abstand zum Bildhauptpunkt} \rightarrow c' = \frac{1}{\tau} c \quad (5)$$

Auch hier kann man in Abhängigkeit von der Gebietsgröße für alle Bilder dieselbe veränderte Kamerakonstante c'_{global} (über τ_{global}) oder für jedes Bild einen eigenen Wert c'_{lokal} (über τ_{lokal}) verwenden. Und ebenso ist es denkbar, dass diese Arbeit im Rahmen einer erweiterten Erdkrümmungskorrektur durchgeführt wird.

Anzumerken ist, dass M2 und M3 nur Näherungslösungen sind, da die Variation von τ innerhalb des von einem Bild überdeckten Gebiets nicht berücksichtigt wird. Bei M3 ist weiters noch zu sagen, dass die Behebung von P2 über die Änderung der Kamerakonstante in aller Strenge nur für exakte Senkrechtaufnahmen gilt.

Vernachlässigt man die Bildneigungen bei der Verwendung von M3, so entstehen zusätzliche Lage- und Höhenfehler in den Neupunkten. In Tabelle 2 ist wiedergegeben, für welche Werte der Kamerakonstante c diese zusätzlichen Lage- bzw. Höhenfehler aufgrund der Bildneigungen kleiner sind als $10 \mu\text{m}$ im Bild bzw. 0.1% der Flughöhe über Grund, wenn M3 verwendet wird. Für die Abweichung von

der exakten Senkrechtaufnahme in Längs- bzw. Querneigung wurden die Werte 3^{gon} bzw. 5^{gon} gemäß [6] verwendet.

Anmerkung:

Dieses hier gefundene Höhenproblem bei der Verwendung von GPS/INS-Daten entsteht nur dann, wenn keine Bodenpasspunkte in die AT eingehen. In diesem Fall stellt sich das Höhenproblem unabhängig davon, ob die Neupunkte in einem Modell oder überbestimmt im ganzen Block vorwärtsgeschnitten werden. Und es ist ebenfalls unabhängig davon, ob die GPS/INS-Werte als Parameter der XOR festgehalten werden oder ob sie im Rahmen ihrer Genauigkeiten als Beobachtungen für die XOR dienen. Verwendet man aber zusätzlich noch (Höhen-)Passpunkte in der AT, so werden diese Höhenfehler (verursacht durch P2 und P3) aufgedeckt. Ist man sich der wahren Ursache für diese Fehler nicht bewusst, so würde man dann entweder eine „on-the-job“-Kalibrierung durchführen oder einen unbekanntem Verschiebungsvektor für die beobachteten Projektionszentren ansetzen. Beide Methoden würden dann P2 lösen – aber nicht P3.

6. Ein Beispiel

Die Effekte von P2 und P3 bei direkter und indirekter Georeferenzierung sollen an einem klei-

Abbildung	Gauß-Krüger-Abbildung		UTM-Abbildung		
	L = 1.5°	L = 2.0°	L = 0.0°	L = 3.0°	L = 3.5°
Lagefehler < $10 \mu\text{m} \cdot m_b$	$c < 729 \text{ mm}$	$c < 390 \text{ mm}$	$c < 273 \text{ mm}$	$c < 547 \text{ mm}$	$c < 168 \text{ mm}$
Höhenfehler < $0.1\% \cdot H_F$	$c > 21 \text{ mm}$	$c > 39 \text{ mm}$	$c > 55 \text{ mm}$	$c > 28 \text{ mm}$	$c > 90 \text{ mm}$

Tabelle 2: Werte für die Kamerakonstante c bei Verwendung von M3, so dass die zusätzlichen Lage- bzw. Höhenfehler aufgrund der Vernachlässigung der Längs- und Querneigung kleiner sind als $10 \mu\text{m}$ im Bild bzw. 0.1% der Flughöhe über Grund

nen Beispiel demonstriert werden. Die Berechnungen erfolgten mit dem am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien entwickelten hybriden Ausgleichungsprogramm ORIENT. Es handelt sich dabei um einen Block von Luftbildern im Maßstab 1:10.000, $c = 153.349$ mm, 85 Bilder mit ~ 25 Punkten/Bild, Befliegungsrichtung SW-NO (5 Streifen), 2 kongruente entgegengesetzte Querstreifen, Gebietsgröße $\sim 6 \times 9$ km², Höhe: 30 – 130 m, geographische Koordinaten der Gebietsmitte M: B = 59.22°, L = 10.93°, als Kartenabbildung wurde UTM/EUREF89 verwendet : in M ist die Streckenverzerrung $\tau_M = 0.999749$ und sie variiert übers Projektgebiet zwischen 0.999735 und 0.999762 – d.h. das Gebiet liegt zwischen dem Mittelmeridian und der X_{LS} -Parallelen mit $\tau = 1$. Die Genauigkeit der Bildkoordinaten beträgt ± 6 μ m, jene der GPS/INS-Beobachtungen ist ± 5 cm für die Koordinaten der Projektionszentren und $\pm 35^\circ$ für Längs- und Querneigung und $\pm 80^\circ$ für den Kurswinkel. Theoretisch sind somit Neupunkte im Rahmen einer Bündelblocktriangulation bestenfalls mit einer Genauigkeit von ± 6 cm in Lage ($10.000 \cdot 6 \mu\text{m}$) und ± 9 cm in Höhe ($0.06\% \cdot 10.000 \cdot c$) bestimmbar [6].

Das Datenmaterial dieses Blockes (Bildpunkte und GPS/INS-Beobachtungen für die äußere Orientierung) entstammen den Daten des OEEPE-Tests „Integrated Sensor Orientation“ [4], an dem das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien teilgenommen hat. Um ausschließlich die Effekte der Kartenabbildung aufzuzeigen, wurde zunächst in einem Tangentialsystem (gelagert in M) eine Bündelblockausgleichung mit festgehaltenen GPS/INS-Werten berechnet. Die sich dabei ergebenden Bildverbesserungen wurden dann an die Bildmessungen angebracht. In dieser Weise erhält man ein widerspruchsfreies System. Die Koordinaten der Verknüpfungspunkte dieser Ausgleichung wurden daraufhin nach UTM transformiert und dienen dort als Referenzwerte. Ebenso wurden die Parameter der XOR (Koordinaten der Projektionszentren und 3 Drehwinkel) vom Tangentialsystem nach UTM transformiert.

Mit den um die Verbesserungen korrigierten Bildern wurden daraufhin in UTM verschiedene Varianten von Bündelblockausgleichungen unter dem Gesichtspunkt der direkten Georeferenzierung durchgeführt. Die Ausgangssituation dieser Bündelblöcke wurde in zweierlei Hinsicht variiert: Zum einen blieben die XOR-Werte der Luftbilder fest oder wurden frei gelassen und zusätzlich über die GPS-INS-Werte beobachtet. Zum anderen wurde die Kamerakonstante der Bilder ent-

weder vorgegeben als $c = c_{\text{Labor}} = 153.349$ mm (der Wert, der im Tangentialsystem verwendet wurde) oder sie wurde mittels Streckenverzerrung τ in c' verändert. Wobei hier noch die Möglichkeit besteht, für alle Bilder dasselbe $c' = c'_{\text{global}} = 153.388$ mm (über $\tau_M = 0.999749$) oder für jedes Bild ein eigenes $c' = c'_{\text{lokal}}$ (über das τ des entsprechenden Projektionszentrums) zu verwenden.

Die im Zuge eines UTM-Bündelblocks bestimmten Neupunkte wurden dann mit den Referenzwerten verglichen. In der Tabelle 3 ist die Statistik der Differenzwerte der Neupunkte für die einzelnen Bündelblock-Varianten wiedergegeben (Mittelwert (mittl), Standardabweichung (stabw), Maximalwert (max)).

direkte Georef.	Lage [cm]			Höhe [cm]		
	mittl	stabw	max	mittl	stabw	max
XOR-fest, c_{Labor}	0.2	0.1	0.6	38.6	1.0	40.5
c'_{global}	0.2	0.3	1.6	0.4	0.8	2.6
c'_{lokal}	0.2	0.3	1.7	0.1	0.3	1.7
XOR-frei, c_{Labor}	0.1	0.2	0.7	38.7	1.0	40.6
c'_{global}	0.2	0.3	1.2	0.4	0.6	2.0
c'_{lokal}	0.4	0.2	1.3	0.1	0.2	0.9

Tabelle 3: Statistik der Neupunktdifferenzen, direkte Georeferenzierung

Weiters wurden mit diesem Testdatensatz auch noch 3 Bündelblockvarianten mit 4 vorgegebenen Vollpasspunkten ($\sigma_{XYZ} = \pm 1.5$ cm) am Blockrand durchgeführt. Die GPS/INS-Werte für die XOR der Bilder wurden dabei nicht verwendet (\rightarrow indirekte Georeferenzierung). Die 3 Varianten unterscheiden sich in der Vorgabe der Kamerakonstante (c_{Labor} , c'_{global} oder c'_{lokal}). In der Tabelle 4 ist die Statistik der Neupunktdifferenzen wiedergegeben.

indirekte Georef.	Lage [cm]			Höhe [cm]		
	mittl	stabw	max	mittl	stabw	max
XOR-frei, c_{Labor}	0.3	0.4	2.1	0.1	0.7	1.7
c'_{global}	0.3	0.4	2.1	0.1	0.3	1.1
c'_{lokal}	0.3	0.5	2.2	0.1	0.3	1.1

Tabelle 4: Statistik der Neupunktdifferenzen, indirekte Georeferenzierung

In den Werten dieser beiden Tabellen spiegeln sich schön die Erkenntnisse der theoretischen Überlegungen der vorangegangenen Kapitel wider. Bei der indirekten Georeferenzierung (Tabelle 4) treten praktisch keine bzw. nur geringe Differenzen auf (in Relation zur theoretisch erreichbaren Punktgenauigkeit von ± 6 cm in Lage und ± 9 cm in Höhe), wenn für die Kamerakonstante der Laborwert c_{Labor} verwendet wird.

Die Höhen-Differenzen verbessern sich etwas (die Standardabweichung deutlicher als der Maximalwert), wenn c_{Labor} durch c'_{global} ersetzt wird. Der Grund dafür ist, dass die Neupunkte bei c_{Labor} einen Höhenfehler proportional zu ihrem Höhenunterschied gegenüber dem (mittleren) Passpunktniveau erfahren (Formel (3)). Das mittlere Passpunktniveau liegt hier in ~ 70 m Höhe, somit ergeben sich Höhenunterschiede von -40 m bis $+60$ m. Bei τ_{global} ist dann $\Delta H_N \sim +1.0$ bis -1.5 cm. Diese maximalen Höhenfehler findet man bei der Variante mit $c = c_{\text{Labor}}$ und sie vergrößern dort die Standardabweichung. Bei $c = c'_{\text{global}}$ ist die Standardabweichung halbiert und der Maximalwert zumindest verkleinert. Die Wahl von c hat auf die Lagefehler praktisch keinen Einfluss.

Bei der direkten Georeferenzierung (d.h. bei den Bündelblöcken mit GPS/INS-Beobachtungen für die XOR und ohne Bodenpasspunkte) (Tabelle 3) erkennt man schön, wie durch die Wahl von $c = c_{\text{Labor}}$ ein konstanter Höhenfehler von ~ 40 cm entsteht (Formel (4)). Dieser konstante Höhenfehler verschwindet, wenn man $c = c'_{\text{global}}$ bzw. $c = c'_{\text{lokal}}$ setzt. Interessant dabei ist, dass die Differenzen durch die Freiheit der XOR noch einmal verkleinert werden und das, obwohl die GPS/INS-Beobachtungen ja die nach UTM transformierten fehlerfreien XOR des Tangentialsystems darstellen. Die Konsequenz daraus ist, dass für höchste Genauigkeitsansprüche die GPS/INS-Beobachtungen der direkten Georeferenzierung nie als feste Werte für eine Bildauswertung im Landeskoordinatensystem verwendet werden sollten. Es sind die Verbesserungen der Positions- und Rotationsbeobachtungen zwar sehr klein (Position: < 5 mm, Rotation: $< 10^\circ$), jedoch ist die Verbesserung in den Neupunkten sichtbar.

Auffällig ist bei der direkten Georeferenzierung noch, dass beim Übergang von c_{Labor} über c'_{global} zu c'_{lokal} die Statistik in der Höhe besser, jene in der Lage aber geringfügig schlechter wird. Praktisch sind diese Verschlechterungen bedeutungslos, wenn man sie mit den theoretisch erreichbaren Lage-Genauigkeiten von ± 6 cm vergleicht.

Die Ursache, warum die maximalen Lage-Fehler der direkten Varianten (Tabelle 3) kleiner sind als jene der indirekten Varianten (Tabelle 4), liegt

gewiss im unterschiedlichen Verhältnis zwischen der Anzahl der Passinformation und der Anzahl der Bildbeobachtungen begründet. Die Passinformationen geben die Verzerrungen der UTM-Abbildung wieder. Die Bildbeobachtungen gehorchen aber den kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie. Bei der direkten Variante steht nun wesentlich mehr Passinformation in Form der GPS/INS-Beobachtungen zur Verfügung. Somit ist dort der Zwang für die Bündel sich an die Verzerrungen der UTM-Abbildung anzupassen größer und die Differenzen zu den Referenzwerten der Neupunkte werden kleiner sein. Bei der indirekten Methode mit nur 4 Vollpasspunkten ist dieser Zwang geringer und die Bündel werden somit weniger verzerrt.

7. Zusammenfassung

In diesem Aufsatz wurde eine alte Problemstellung wieder ins Bewusstsein gerufen: Die Berechnung einer Aerotriangulation (AT) nach der Bündelmethode im System der Landesvermessung. Die Lagekoordinaten im Landeskoordinatensystem resultieren praktisch immer aus einer konformen Abbildungen des Ellipsoids und als Höhenkoordinaten fungieren die unverändert übernommenen Ellipsoidhöhen. Bei der Durchführung der AT (eigentlich bei jeder Auswertung von geodätischen Beobachtungen) im Landeskoordinatensystem hat man drei wesentliche Einflüsse zu berücksichtigen²:

- Erdkrümmung
- Streckenverzerrung τ
- Variation von τ über größeren Projektgebieten

Aufgrund dieser 3 Tatsachen stellt das Landeskoordinatensystem kein kartesisches Bezugssystem dar und es ergeben sich somit prinzipiell Probleme, wenn in ihm Photogrammetrie betrieben wird, die sich ja auf kartesische Beziehungen stützt.³

Das Problem des Einflusses der Erdkrümmung kann sehr gut durch die sogenannte Erdkrümmungskorrektur behoben werden [10], [7]. Die Problematik der Streckenverzerrung τ und ihrer Änderung im Projektgebiet wurde in diesem Aufsatz näher untersucht. *Eine Konsequenz, die aus der Streckenverzerrung τ und der unveränderten Übernahme der Ellipsoidhöhen entsteht, ist, dass eine im Zuge einer Laborkalibrierung (d.h.*

² Die in der terrestrischen Vermessung u.U. notwendige Richtungsreduktion spielt in der Photogrammetrie keine Rolle.

³ Allerdings ist es auch möglich, die kartesischen Beziehungen der Photogrammetrie so abzuändern, dass sie im verzerrten Landeskoordinatensystem gelten – indem implizit die Berechnung über ein Tangentialsystem geleitet wird [10].

in einem kartesischen System) bestimmte Kamerakonstante c_{Labor} im Allgemeinen nicht für eine AT (nach der Bündelmethode) im Landeskoordinatensystem verwendet werden kann.

Allerdings stellte bisher die Verwendung einer Laborkalibrierung für eine AT im Landeskoordinatensystem kein echtes Hindernis dar, da im Zuge der indirekten Georeferenzierung (bei der die äußere Orientierung (XOR) der Luftbilder über Bodenpasspunkte abgeleitet wird) der Einfluss der Streckenverzerrung τ durch die freien Projektionszentren größtenteils beseitigt wird. Die Korrektur durch die freie Flughöhe ist um so wirksamer, je flacher das beflogene Gelände ist. Für Neupunkte, die außerhalb des Höhenniveaus der Passpunkte liegen, ergeben sich dennoch Höhenfehler – besonders im Hochgebirge.

Bei der Methode der direkten Georeferenzierung im Landeskoordinatensystem (bei der die Elemente der XOR direkt über eine GPS-Antenne und einen INS-Sensor bestimmt werden und die deshalb in letzter Konsequenz ohne Bodenpasspunkte auskommen kann), ist der Effekt der Streckenverzerrung τ auf die Höhen aller Neupunkte wesentlich größer und im Allgemeinen nicht vernachlässigbar.

Diese Höhenfehler ergeben sich unabhängig davon, ob die GPS/INS-Werte als feste Werte für die XOR der Luftbilder vorgegeben werden und nur mehr die Neupunkte im Modell bzw. überbestimmt im Block vorwärts-geschnitten werden; oder ob sie im Rahmen einer Bündelblockausgleichung (OHNE Bodenpasspunkte) als Beobachtungen mit entsprechenden Genauigkeiten (Position: $\sim 5 - 10$ cm, Stellung: $\geq 50^\circ$) für freie XOR eingeführt werden. Nur dann, wenn bei der letzten Variante auch Bodenpasspunkte beteiligt sind, wird man anhand großer Z-Verbesserungen merken, dass etwas im Block nicht stimmt (und dann – wenn man sich der wahren Ursache nicht bewusst ist – eine „on-the-job“-Kalibrierung durchführen oder bei den Projektionszentren eine Z-Verschiebung ansetzen).

Die Lösung des Höhenproblems bei der direkten Georeferenzierung im Landeskoordinatensystem kann man sich auf 3 Arten vorstellen:

- Übergang zur Berechnung in einem Tangentialsystem
- Korrektur der Ellipsoidhöhen
- Korrektur der laborkalibrierten Kamerakonstanten

Die erste Methode stellt sicher die sauberste Lösung dar, da hier ein kartesisches Bezugssystem verwendet wird, allerdings fallen hier die Ergebnisse nicht sofort im System der Landesvermessung an und müssten somit erst in dieses transformiert werden. Jedoch sollte das bei der heutzutage verfügbaren Computerunterstützung kein echtes Problem darstellen. Verbleibt die Berechnung im Landeskoordinatensystem, so stellen die letzten beiden Methoden Näherungslösungen dar und könnten im Rahmen einer erweiterten Erdkrümmungskorrektur während der AT und der anschließenden Stereoauswertung durchgeführt werden.

Danksagung

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Helmut Kager für seine konstruktiven Hinweise im Rahmen der Arbeiten zu diesem Aufsatz aussprechen.

Literatur:

- [1] Bretterbauer, K., (1991) Skriptum zur Vorlesung Mathematische Lehre vom Kartenentwurf, Institut für Höhere Geodäsie, TU Wien
- [2] Colomina, I. (1999) GPS, INS and Aerial Triangulation: What is the best way for the operational Determination of Photogrammetric Image Orientation?, IAPRS, Vol. 32, Part 3-2W5, „Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery“, München, September 8 – 10
- [3] Cramer, M. (2000) Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart
- [4] Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., Andersen, Ø., Nilsson, B. (2000) Integrated Sensor Orientation – An OEEPE Test, IAPRS, Vol. XXXIII, WG III/1, Amsterdam
- [5] Jacobsen, K. (2000) Potential and Limitation of Direct Sensor Orientation, IAPRS, Vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam
- [6] Kraus, K. mit Beiträgen von P. Waldhäusl (1994) Photogrammetrie Band I – Grundlagen und Standardverfahren, Dümmler Verlag, Bonn
- [7] Kraus, K. mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager. (1996) Photogrammetrie Band II – Verfeinerte Methoden und Anwendungen, Dümmler Verlag, Bonn
- [8] Rinner, K. (1959) Einfluß der Definition der Landeskoordinaten auf die Photogrammetrische Triangulation, DGK Reihe A Nr. 34 / Teil II, München
- [9] Skaloud, J. (1999) Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment, Invited Paper for ISPRS Workshop on „Direct versus indirect methods of sensor orientation“, Commission III, WG III/1, Barcelona, Spain, November 25 – 26
- [10] Wang, S. (1980) Einfluß der geodätischen Abbildungsverzerrungen auf die photogrammetrische Punktbestimmung, Dissertation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 263

Anschrift des Autors:

Dipl.-Ing. Camillo Ressel, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstrasse 27–29, 1040 Wien, car@ipf.tuwien.ac.at