

14. KONGRESS DER INTERNATIONALEN GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAMMETRIE
HAMBURG 1980

KOMMISSION IV, ARBEITSGRUPPE 5
FREIWILLIGER FACHBEITRAG

R. FINSTERWALDER
LEHRSTUHL FÜR KARTOGRAPHIE UND REPRODUKTIONSTECHNIK
TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

DIE GENAUIGKEIT VON STEREOORTHOPHOTOS

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Genauigkeit eines Stereoorthophotos hängt entscheidend von der Güte des Geländemodells (Hilfsfläche) ab, das zu seiner Erzeugung benutzt wird. Es werden die Beziehungen zwischen den Höhenfehlern des Geländemodells und den Höhenfehlern des Stereoorthophotos abgeleitet, die von der Neigung und Exposition eines Hanges sowie vom Öffnungswinkel der verwendeten Aufnahmen abhängen. Es zeigt sich, daß die Höhenfehler des Stereoorthophotos bei mäßigen Geländeneigungen um eine Größenordnung kleiner gehalten werden können als die Höhenfehler der zu seiner Erzeugung benutzten Hilfsfläche. Noch kleiner als die Höhenfehler sind die dem Stereoorthophoto anhaftenden γ -Parallaxen. Daraus folgt, daß Stereoorthophotos auch für genauere Höhenbestimmungen herangezogen werden können.

R. Finsterwalder, München

1. Einleitung

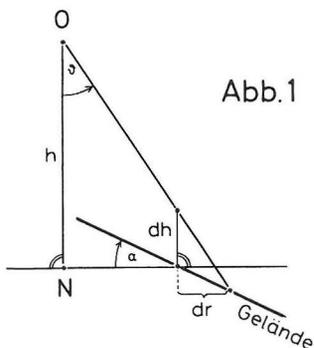
Stereorthophotos werden vor allem dort eingesetzt, wo neben einer grundrißtreuen Auswertung von Luftbildern auch Informationen über die Höhenverhältnisse gefordert werden. Vielfach wird die räumliche Betrachtung von Orthophotos (Stereorthophotos) jedoch nur dazu benötigt, um eine leichtere und sicherere Interpretation des Bildinhalts zu bekommen /2/. Für diese Zwecke genügt eine verhältnismäßig geringe Genauigkeit des Stereorthophotos hinsichtlich der Höhe. Sollen den Orthophotos jedoch genauere Höhen entnommen werden, oder sogar Schichtlinien aus ihnen gewonnen werden /1/, so sind Überlegungen über die erzielbare Höhengenaugigkeit notwendig.

Entscheidend dafür ist die Genauigkeit des Geländemodells (Hilfsfläche), das für die Differentialentzerrung benützt wird. Die jedem Geländemodell mehr oder weniger anhaftenden Abweichungen vom wahren Gelände hängen einmal ab vom Abstand der Stützpunkte, zum anderen, jedoch in geringerem Ausmaß, von der Art der Modellkonstruktion (z.B. Rechenprogramm).

Im folgenden soll versucht werden, die Genauigkeit des Stereorthophotos in Abhängigkeit von der Genauigkeit des zu seiner Erzeugung benutzten Geländemodells auszudrücken.

2. Lagegenauigkeit

Da die Lagebestimmung aus dem nach der Lotrichtung entzerrten Orthophoto erfolgt, kann der Stereopartner außer Betracht bleiben. Die durch einen Höhenfehler dh des für die Differentialentzerrung benützten Geländemodells (Hilfsfläche) entstehenden radialen Bildversetzungen eines Orthophotos wurden bereits öfters behandelt. Für die folgenden Untersuchungen soll vorausgesetzt werden, daß die Hangneigung bei der Differentialentzerrung berücksichtigt wird, was bei den Geräten im off-line-Betrieb möglich ist. Ein Höhenfehler dh bewirkt einen Lagefehler dr , der von der Nadirdistanz ϑ des Projektionsstrahls, der Geländeneigung α und der Hangexposition σ abhängt.



Der Maximalwert von dr tritt dann auf, wenn der Hang vom Projektionszentrum weg geneigt ist und die Falllinie dasselbe Azimut σ wie der Projektionsstrahl hat. Der Lagefehler dr_{max} lautet dann: (siehe Abbildung 1!)

$$dr_{max} = \frac{dh}{\cot \vartheta - \tan \alpha} \quad (1)$$

Im allgemeinen Fall beträgt der Lagefehler:

$$dr = \frac{dh}{\cot \vartheta \pm \tan \alpha \cdot \sin (\delta + \sigma)} \quad (2)$$

wobei das Pluszeichen für die Hangneigung z u m Projektionszentrum, das Minuszeichen für die Hangneigung vom Projektionszentrum weg gilt. Zerlegt man die Bildversetzung (Lagefehler) in ihre x- und y-Komponente (x-Richtung ist die Basisrichtung), so ergibt sich aus Gleichung (2):

$$dx = \frac{dh \cdot \sin \delta}{\cot \vartheta \pm \tan \alpha \cdot \sin (\delta + \sigma)} \quad (3)$$

$$dy = \frac{dh \cdot \cos \delta}{\cot \vartheta \pm \tan \alpha \cdot \sin (\delta + \sigma)} \quad (4)$$

Die Größen δ und σ sind aus der Abbildung (2) ersichtlich. Zahlenwerte für den Lagefehler dr sind in der folgenden Tabelle "Lagefehler und Restparallaxen" aufgeführt.

3. Höhengenaugigkeit (Restparallaxen)

Im folgenden soll untersucht werden, in wieweit das durch das Stereoorthophoto wiedergegebene Gelände vom tatsächlichen Gelände abweicht. Derartige Abweichungen rühren vor allem davon her, daß die für die Differentialentzerrung verwendete Hilfsfläche bereits mehr oder weniger von der tatsächlichen Geländeoberfläche abweicht. Die Abweichungen des durch das Stereoorthophoto definierten Geländes vom wahren Gelände können allerdings, wie im folgenden gezeigt wird, geringer gehalten werden als die Differenzbeträge zwischen der für die Entzerrung verwendeten Hilfsfläche und dem tatsächlichen Gelände. Voraussetzung dafür ist allerdings, daß für die Herstellung des Orthophotos u n d des Stereopartners ein und dieselbe Hilfsfläche verwendet wird, und daß der Stereopartner wie üblich nicht aus demselben Bild wie das Orthophoto sondern aus dem benachbarten Bild des Flugstreifens hergestellt wird. Die beiden Voraussetzungen sollen im folgenden gelten; außerdem wird zunächst davon ausgegangen, daß die beiden Aufnahmeorte für die zu entzerrenden Bilder in gleicher Höhe liegen, also kein bz vorhanden ist. (Der Einfluß von bz wird später untersucht, wobei sich zeigen wird, daß er im allgemeinen vernachlässigt werden kann).

Beim Vorgang der Differentialentzerrung werden die beiden zu entzerrenden Bilder zunächst durch Zentralprojektion auf die das Gelände approximierende Hilfsfläche abgebildet. Sodann erfolgt eine Orthogonalprojektion des einen Bildes auf die Grundrißfläche, wodurch das Orthophoto entsteht, und eine Parallelprojektion des anderen Bildes, wodurch der Stereopartner zustande kommt. Die Projektionsrichtung der Parallelprojektion liegt in der Vertikalebene durch die Basis, der Winkel zum Lot

wird durch das Basisverhältnis $b:h$ der beiden Aufnahmen festgelegt. *)

Bei der Projektion der beiden Bilder auf die Hilfsfläche entstehen bei Vorhandensein eines Höhenunterschiedes dh zwischen Hilfsfläche und tatsächlicher Geländeoberfläche durch Überlagerung radialer Bildversetzungen nach Gleichung (2) x - und y -Parallaxen. Erstere verfälschen bei der Betrachtung des Stereoorthophotos die Geländeformen, letztere können zu Schwierigkeiten bei der stereoskopischen Betrachtung führen. Ist das Gelände an dem betrachteten Punkt horizontal, so entsprechen die entstehenden x -Parallaxen dp_x gerade dem Höhenunterschied zwischen Hilfsfläche und tatsächlichem Gelände:

$$dp_x = \frac{b}{h} dh \quad (5)$$

d.h. der Höhenfehler der Hilfsfläche wird, nicht zu große Höhenunterschiede im Gelände vorausgesetzt, kompensiert. Außerdem treten keine y -Parallaxen auf, was auch noch zutrifft, wenn das Gelände parallel zur Basisrichtung geneigt ist.

Im allgemeinen Falle des geneigten Geländes treten kleine Abweichungen vom Sollwert der x -Parallaxen nach Gleichung (5) auf, außerdem auch kleine y -Parallaxen. Sie können mittels Gleichung (3) und Gleichung (4) durch Überlagerung zweier Bildversetzungen gerechnet werden und sind in der folgenden Tabelle "Lagefehler und Restparallaxen" zusammengestellt. Sie werden als "natürliche" Parallaxen bezeichnet, da sie durch Zentralprojektion entstanden sind, im Gegensatz zu den "künstlichen" Parallaxen, die durch Parallelprojektion zustande kommen. Auch solche "künstliche" Restparallaxen treten im Stereoorthophoto auf. Sie werden dadurch erzeugt, daß bei geneigtem Gelände korrespondierende Punkte des linken und rechten Bildes nach der Zentralprojektion auf die Hilfsfläche nicht genau in gleicher Höhe liegen, und daß diese Höhendifferenzen bei der Parallelprojektion in x -Parallaxen umgesetzt werden.

Die Höhenversetzung eines Punktes auf der Hilfsfläche infolge geneigten Geländes beträgt:

$$dz = \frac{dh \cdot \cot \vartheta}{\cot \vartheta \pm \tan \alpha \cdot \sin (\delta + \sigma)} \quad (6)$$

Durch Überlagerung der dz -Werte korrespondierender Punkte ergibt sich der Höhenunterschied dp_z , der am Stereoorthophoto wahrgenommen werden kann. Zahlenwerte für dp_z finden sich ebenfalls in der Tabelle "Lagefehler und Restparallaxen" (Seite 4).

*) Auch bei dem von Collins /1/ vorgeschlagenen nichtlinearen Anstieg der x -Parallaxen treffen die folgenden Überlegungen zu.

Tabelle: Lagefehler und Restparallaxen in Prozent des Höhenfehlers dh
(Geländeneigung = 20°)

Punkt Nr.	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°		0° 180°	
dr	42	61	47	68	60	86	23	28	32	39	51	61	0	0	25	25	50	50
dp _x	15	22	15	22	15	22	1	1	1	1	1	1	22	15	22	15	22	15
dp _y	0	0	4	6	8	11	0	0	5	5	9	9	0	0	6	4	11	8
dp _z	15	22	15	22	15	22	18	18	18	18	18	18	22	15	22	15	22	15
	45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°		45° 225°	
dr	44	57	47	69	56	95	23	27	31	41	47	69	0	0	23	27	44	57
dp _x	11	15	16	24	20	34	0	0	6	7	11	15	15	11	7	6	0	0
dp _y	0	0	2	4	4	10	0	0	3	4	5	9	0	0	3	3	6	7
dp _z	11	15	10	17	9	20	13	13	11	15	10	17	15	11	13	13	11	15
	90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°		90° 270°	
dr	50	50	51	62	60	86	25	25	32	39	47	68	0	0	23	28	42	61
dp _x	0	0	8	10	15	22	0	0	8	10	15	22	0	0	8	10	15	22
dp _y	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dp _z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mittelwerte der Restparallaxen für das gesamte Modell:

$$\overline{dp}_x = 12\% dh; \quad \overline{dp}_y = 3\% dh; \quad \overline{dp}_z = 11\% dh$$

(Die Restparallaxen für $\sigma = 45^\circ/225^\circ$ wurden bei der Mittelung zweimal gezählt, um eine gleichmäßige Verteilung der Hangneigungen über den Vollkreis zu erhalten.)

$$d\bar{r} = 45\% dh$$

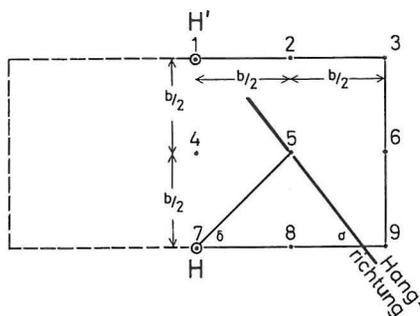
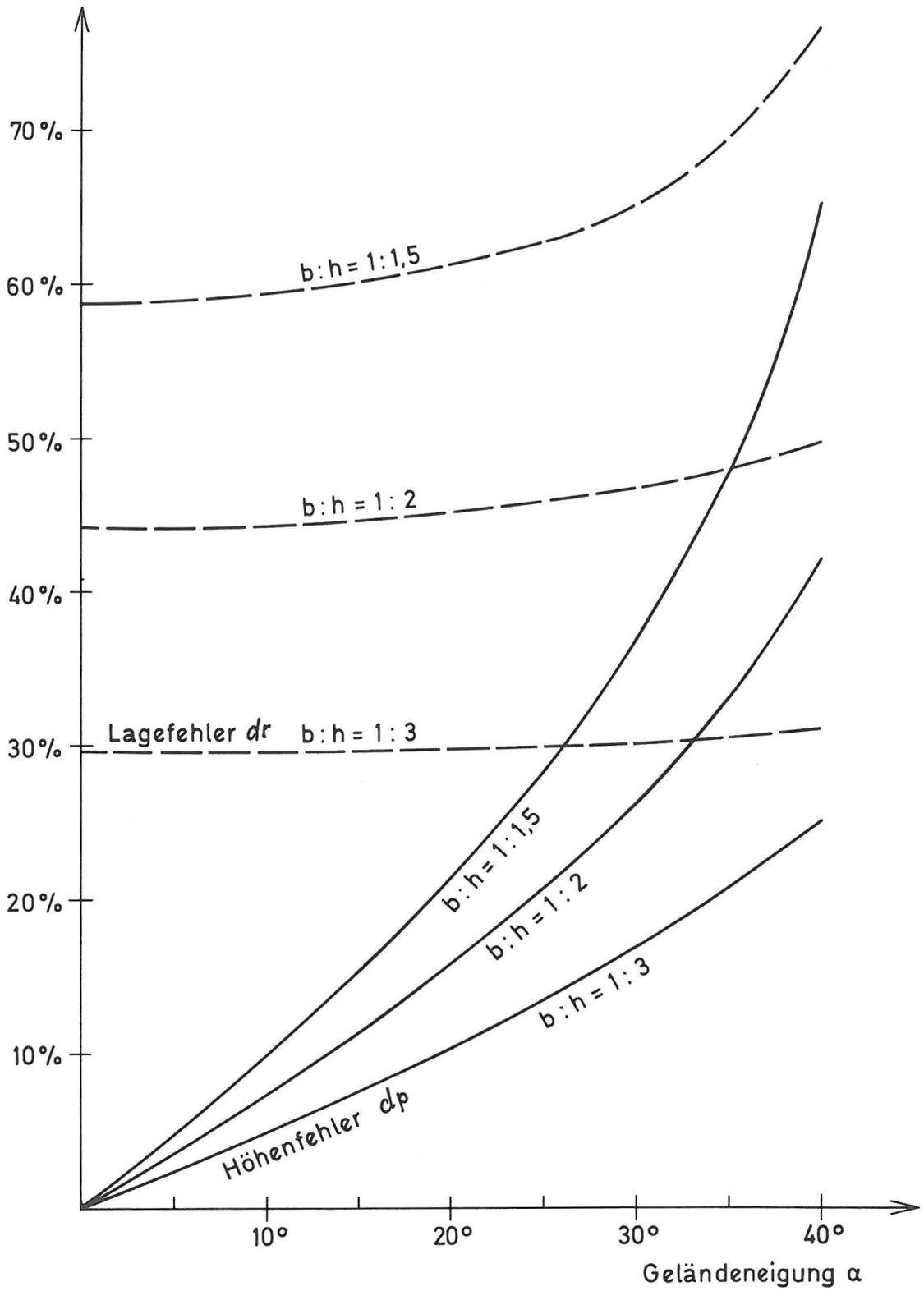


Abb. 2

Die Werte dr , dp_x , dp_y und dp_z sind für neun Punkte eines fiktiven Stereomodells (Abbildung 2) mit dem Basisverhältnis 1:2 aufgeführt. Das Modell liegt in seiner Konfiguration zwischen einem Normal- und einem Weitwinkelmodell und entspricht etwa dem Nettomodell aus zwei Aufnahmen mit der Kammerkonstanten 21 cm und dem Bildformat 23 x 23 cm. Die Werte der Tabelle sind in Prozent von dh ausgedrückt, die Größen dp_x in Höhenunterschiede entsprechend dem Basisverhältnis 1:2 umgerechnet. Die Geländeneigung ist zu 20° angenommen,

was etwa der Durchschnittsneigung für Mittelgebirge entspricht. Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die radialen Bildversetzungen (Lagefehler) die Größenordnung von dh erreichen (maximal 95%), während die Restparallaxen im Durchschnitt fast eine Größenordnung geringer als dh sind. Der größte Wert wird bei dp_x in der Modellecke bei Punkt 3 mit 34% erreicht.

Abb. 3: Lagefehler dr und Höhenfehler dp



Um den Einfluß des Bildwinkels und der Geländeneigung festzustellen, wurden die Höhenfehler und restlichen y -Parallaxen für Normalwinkel, Zwischenwinkel und Weitwinkelaufnahmen in Intervallen von jeweils 5° berechnet. Das Ergebnis zeigen die Kurven der Abbildung 3; dp_x und dp_z sind dabei durch Überlagerung zu dp zusammengefaßt. Der Wert dp bedeutet also den Gesamthöhenfehler (durchschnittlicher Fehler) des Stereoorthophotos. Er ist ausgedrückt in Prozent des Höhenfehlers eines Geländemodells, das zur Erzeugung des Stereoorthophotos verwendet wurde.

E i n f l u ß e i n e s H ö h e n u n t e r s c h i e ß z w i s c h e n d e n A u f n a h m e o r t e n

Ein zwischen den Aufnahmeorten vorhandener Höhenunterschied bz bewirkt, daß sich in den Gleichungen (1) bis (4) der Winkel ϑ des Projektionsstrahls gegen die Aufnahme-richtung geringfügig ändert. Nimmt man ein bz von 2% der Flughöhe an, was bei dem Basisverhältnis von 1:2 ("Zwischenwinkelmodell") einem Winkelbetrag von $2,5^\circ$ entspricht, so ergibt sich in den Modellecken eine maximale radiale Bildversetzung von $dr = 3\% dh$. Dieser Betrag liegt wesentlich unter den Maximalwerten von dp_x , dp_y und dp_z der Tabelle auf Seite 4 und kann demnach im allgemeinen vernachlässigt werden.

4. Folgerungen

Da die Höhenfehler des Stereoorthophotos wesentlich kleiner sind als die der Hilfsfläche, kann das Stereoorthophoto in der Praxis auch für Höhenmessungen herangezogen werden. Die Hilfsfläche braucht nicht alle Kleinformen des Geländes enthalten, vielmehr genügt eine glatte Fläche. Zur Erzeugung der Hilfsfläche eignet sich sehr gut ein auf Höhenlinien basierendes digitales Geländemodell. Da bei diesem, wegen der engeren Scharung der Schichtlinien im steilen Gelände, eine neigungsabhängige Punktverteilung vorliegt, wird dem nach der Fehlerformel von Koppe mit der Geländeneigung steigenden Höhenfehler entgegengewirkt. Außerdem liegt der Maximalfehler eines solchen Geländemodells innerhalb des verwendeten Schichtlinienintervalls. Um bei der Differentialverzerrung die Genauigkeit des Geländemodells möglichst gut ausnützen zu können, empfiehlt sich die Verwendung eines möglichst geringen Streifenabstands (der durch den Streifenabstand a bedingte maximale Höhenfehler der Hilfsfläche beträgt: $dh_{\max} = \frac{a}{2} \cdot \tan \alpha$, wenn α die maximale Geländeneigung ist).

Der verhältnismäßig kleine Wert der verbleibenden y -Parallaxen eines Stereoorthophotos läßt auch bei größeren Abweichungen der Hilfsfläche noch eine einwandfreie stereoskopische Betrachtung zu. Dies ist von Bedeutung, wenn das Stereoorthophoto nur für Interpretationszwecke verwendet wird /2/.

Die Tatsache, daß das Stereoorthophoto noch alle Kleinformen des Geländes zeigt, läßt eine vielseitige topographische Nutzung zu. So können z.B. stark geglättete oder abgeleitete Hö-

henlinien hinsichtlich markanter Geländeformen nachträglich noch verbessert werden. Auch kann das Stereoorthophoto in Verbindung mit exakten Höhenlinien zur Anfertigung einer lagetreuen Felszeichnung in nicht zu steilem Felsgelände, wie z.B. in Karstgebieten oder Gletschervorfeldern, mit Erfolg benutzt werden.

Literatur

- /1/ Blachut, J.B.: Mapping and Photointerpretation System Based on Stereo-Orthophotos. Mitteilungen aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Nr. 14, Juris Verlag Zürich 1971.
- /2/ Finsterwalder, Rü.: Eine Kartierungsmethode unter Zuhilfenahme von Stereoorthophotos. Kartographische Nachrichten, Nr. 27 (1977), S. 164 - 166.