

Büßole die magnetischen Richtungswinkel der einzelnen Zugseiten bestimmt werden. Die Bestimmung der Instrumentstandpunkte, der Wechsellpunkte und der Seitenpunkte nach Lage und Höhe erfolgt wie bei der Theodolittachymetrie. Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Verfahren besteht darin, daß die Aufstellung des Meßtisches unbequemer ist und mehr Zeit erfordert als die des Tachymetertheodolits.

C. Phototachymetrie.

Das eigentliche Instrument der Phototachymetrie ist die Meßkammer¹. Das Verfahren der Phototachymetrie oder Photogrammetrie besteht darin, daß man die gesuchten Punkte mit Hilfe von Meßbildern festlegt.

1. Übersicht über die verschiedenen photogrammetrischen Verfahren.

Bei der Festlegung von Punkten mit Hilfe von Meßbildern hat man zweierlei zu beachten, die Aufnahme der Bilder und die Auswertung der Bilder.

Da die Aufnahme der Bilder entweder von festen Standpunkten auf der Erde oder von einem Luftfahrzeug aus erfolgen kann, so teilt man die Photogrammetrie dem Aufnahmeort entsprechend ein in Erdphotogrammetrie oder Photogrammetrie von der Erde aus und Luftphotogrammetrie oder Photogrammetrie vom Luftfahrzeug aus.

Im allgemeinsten Fall besteht die photogrammetrische Punktbestimmung im Grundgedanken darin, daß man von dem in Frage kommenden Gebiet von zwei, nach Lage und Höhe bekannten oder bestimmbarren Punkten aus je ein Meßbild aufnimmt. Bei der Auswertung der Bilder entnimmt man den Bildern diejenigen Größen, die zur Festlegung der gesuchten Punkte erforderlich sind; dabei kann man die beiden Bilder entweder getrennt oder gemeinsam auswerten. Man kann deshalb zwei Auswertungsverfahren unterscheiden, die man als Einbildverfahren und Zweibildverfahren bezeichnen kann.

Beim Einbildverfahren wird jeder Punkt unter einäugiger Betrachtung von jedem Bild durch Vorwärtseinschneiden bestimmt; das Verfahren heißt deshalb auch Einschneideverfahren oder Einschneidephotogrammetrie². Die für das Vorwärtseinschneiden erforderlichen Winkel erhält man am einfachsten mit Benutzung des Bildtheodolits, mit dessen Hilfe man auf Grund des Bildes Horizontal- und Vertikalwinkel nach den festzulegenden Punkten messen kann wie mit einem in dem Aufnahmeort des Bildes aufgestellten gewöhnlichen Theodolit.

Beim Zweibildverfahren werden die beiden Bilder gemeinsam oder zweiäugig betrachtet; jeder Punkt wird dabei auf Grund des entstehenden räumlichen oder stereoskopischen Bildes bestimmt. Das Ver-

¹ Daß man auch mit einer gewöhnlichen Kammer Punkte photogrammetrisch festlegen kann, spielt heute keine Rolle mehr.

² Das Verfahren wurde früher auch als Meßtischphotogrammetrie bezeichnet.

fahren heißt deshalb auch Raumbildmessung oder Stereophotogrammetrie¹.

Das Einbildverfahren gestattet nur punktweise Auswertung eines Bildpaares; beim Zweibildverfahren kann man bei Verwendung eines passenden Instruments die Auswertung eines Bildpaares auch linienweise durchführen; nachdem heute verschiedene erprobte Instrumente hierfür hergestellt werden, wird das Einbildverfahren nur noch ganz ausnahmsweise angewendet.

Bei jedem mit einer Meßkammer aufgenommenen Meßbild spricht man von seiner inneren Orientierung und von seiner äußeren Orientierung. Die innere Orientierung ist bekannt, wenn die Lage des hinteren Objektivhauptpunktes zur Bildebene, also z. B. der Hauptpunkt des Bildes und die Bildweite gegeben sind. Als äußere Orientierung bezeichnet man die räumliche Lage des Objektivhauptpunktes, der Kammerachse und der durch die beiden Markenpaare des Bildes bestimmten Bildachsen im Augenblick der Aufnahme.

2. Erdphotogrammetrie.

Bei der Erdphotogrammetrie besteht die Festlegung eines Punktes P (Abb. 79) darin, daß man in zwei ihrer Lage nach bekannten, in beliebigen Höhen liegenden Punkten S_1 und S_2 die Meßbilder B_1 und B_2

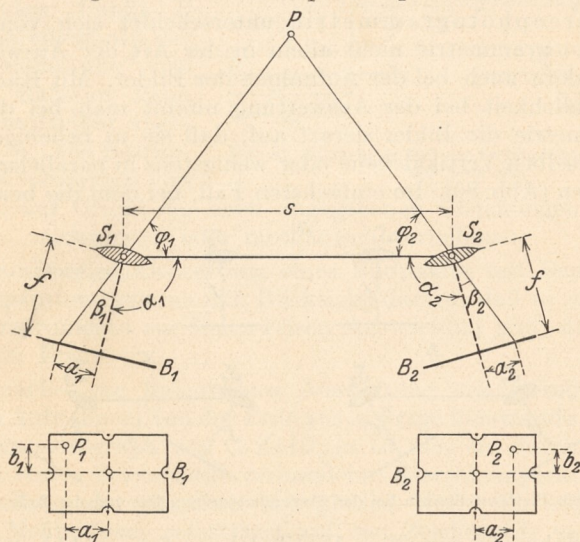


Abb. 79. Grundgedanke der Erdphotogrammetrie.

aufnimmt; dabei sorgt man mit Rücksicht auf eine einfache Auswertung der Bilder dafür, daß während der Aufnahme der Bilder die Bildebenen vertikal, die Kammerachse also horizontal und die durch die Bildmarken bestimmten Bildachsen horizontal bzw. vertikal liegen. Mißt

¹ Da bei einer gewissen Art der Auswertung „Parallaxen“ gemessen werden, so wurde das Verfahren auch schon als Parallaxenphotogrammetrie bezeichnet.

man bei der Aufnahme der Bilder die Horizontalwinkel α_1 und α_2 zwischen der Standlinie S_1S_2 und der horizontalen Kammerachse und bestimmt man die Winkel β_1 und β_2 auf Grund der Bilder, so erhält man die Winkel φ_1 und φ_2 aus $\varphi_1 = 180^\circ - (\alpha_1 + \beta_1)$ und $\varphi_2 = 180^\circ - (\alpha_2 + \beta_2)$. Mit φ_1 und φ_2 kann man die Lage von P nach dem Einschneideverfahren ermitteln. Die Winkel β_1 und β_2 erhält man nach Abmessen der horizontalen Abstände a_1 und a_2 in den Bildern¹ auf Grund der bekannten Bildweite f aus $\text{tg } \beta_1 = \frac{a_1}{f}$ und $\text{tg } \beta_2 = \frac{a_2}{f}$. Mißt man in den Bildern auch die vertikalen Abstände b_1 und b_2 der Bildpunkte P_1 und P_2 von den Bildhorizontalen, so kann man die Höhenunterschiede h_1 und h_2 zwischen P und S_1 bzw. S_2 berechnen aus

$$h_1 = b_1 \frac{S_1 P}{f \cos \beta_1} \quad \text{und} \quad h_2 = b_2 \frac{S_2 P}{f \cos \beta_2};$$

dabei erhält man S_1P und S_2P mit Hilfe von $S_1S_2 = s$ aus

$$S_1P = s \frac{\sin \varphi_2}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)} \quad \text{und} \quad S_2P = s \frac{\sin \varphi_1}{\sin(\varphi_1 + \varphi_2)}.$$

Sind demnach die N. N.-Höhen des Objektivhauptpunktes in S_1 und S_2 bei der Aufnahme der Bilder bekannt, so kann man die N. N.-Höhe von P doppelt berechnen.

Die Stereophotogrammetrie unterscheidet sich von der Einschneidephotogrammetrie nicht allein in der Art der Auswertung der Bilder, sondern auch bei der Aufnahme der Bilder. Mit Rücksicht auf die Bequemlichkeit bei der Auswertung nimmt man bei der Stereophotogrammetrie die Bilder derart auf, daß sie in beliebigen Höhen, aber in derselben Vertikalebene oder wenigstens in parallelen Vertikal-ebenen liegen (Abb. 80). Im einfachsten Fall, bei dem die beiden Bilder

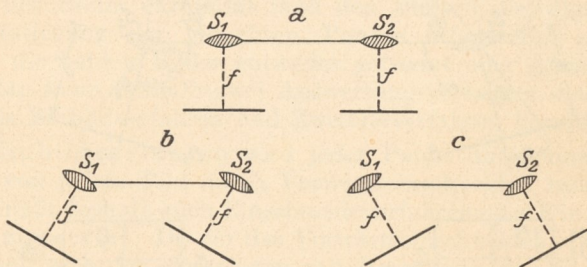


Abb. 80. Plattenstellungen bei der Stereophotogrammetrie von der Erde aus.

bei der Aufnahme in derselben Vertikalebene liegen (Abb. 80a), erhält man die Lage eines Punktes P (Abb. 81) mit Hilfe des als Parallaxe bezeichneten Unterschiedes p der beiden Abstände a_1 und a_2 von den Bildvertikalen. Ist s die Länge der Standlinie S_1S_2 , f die Bildweite und b_1 der Abstand des Bildes P_1 von P von der Bildhorizontalen im linken Bilde, so erhält man die Koordinaten x , y und z von P in bezug auf

¹ Alle Abmessungen in den Bildern werden am besten an Hand der bei der Aufnahme hergestellten Negativplatten ausgeführt.

die Standlinie S_1S_2 und den Punkt S_1 aus den einfach abzulesenden Gleichungen

$$x = \frac{sa_1}{p}, \quad y = \frac{sf}{p}, \quad z = \frac{sb_1}{p}.$$

Ist demnach vom linken Standpunkt S_1 die Lage und die N. N.-Höhe und vom rechten Standpunkt S_2 die Lage des Objektivhauptpunktes während der Aufnahme bekannt, so kann man einen Punkt P nach Lage und Höhe festlegen.

Die Auswertung oder Ausmessung des Bildpaares, bestehend in der Messung von a_1 , b_1 und p , geschieht mit Hilfe des Stereokomparators; a_1 und b_1 kann man dabei unmittelbar bestimmen auf Grund des im linken Standpunkt S_1 aufgenommenen Bildes. Die Parallaxe p erhält man mit Hilfe des bei zweiäugiger Betrachtung beider Bilder entstehenden stereoskopischen Bildes, in dem

man eine räumlich gesehene und räumlich bewegbare Marke durch entsprechendes Drehen einer Schraube räumlich auf den festzulegenden Punkt P einstellt; an einem mit der „Parallaxenschraube“ verbundenen Maßstab kann dann p unmittelbar abgelesen werden. Die Bestimmung der Koordinaten von

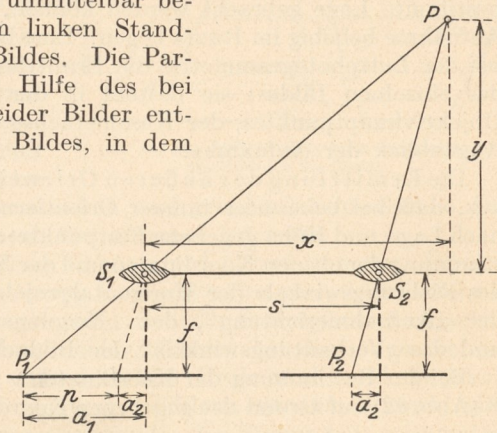


Abb. 81. Einfachster Fall der Stereophotogrammetrie von der Erde aus.

x , y und z auf Grund der oben angegebenen Gleichungen kann man rechnerisch, zeichnerisch oder mechanisch vornehmen.

Diese punktweise Auswertung eines Bildpaares mit Benutzung des Stereokomparators kommt mit Rücksicht darauf, daß es verschiedene erprobte Instrumente zur linienweisen Auswertung gibt, nur noch gelegentlich in Frage.

Das zunächst zur linienweisen Auswertung von stereophotogrammetrischen Aufnahmen von der Erde aus in Frage kommende Instrument ist der Stereoautograph von C. Zeiß; es ist dies ein durch ein Hebelsystem mit einem Zeichenstift verbundener Stereokomparator, bei dem jede Einstellung der räumlich bewegbaren Marke im stereoskopisch gesehenen Meßbildpaar selbsttätig auf den Zeichenstift und damit in die Zeichnung übertragen wird. Die Einrichtung des Stereoautographen ist derart, daß man mit der bewegbaren Marke jede Linie in dem räumlich gesehenen Bild verfolgen kann; der Zeichenstift zeichnet dann die Horizontalprojektion der betreffenden Linie selbsttätig auf. Insbesondere kann man bei dem Instrument die bewegbare Marke auf eine bestimmte N. N.-Höhe ein- und feststellen und die dieser entsprechende Höhenschichtlinie mit der Marke in dem räumlich gesehenen

Bild verfolgen; die Schichtlinie wird dabei von dem Zeichenstift aufgezeichnet¹.

Die von verschiedenen Seiten ausgeführten Genauigkeitsuntersuchungen haben einwandfrei ergeben, daß insbesondere bei der Geländedarstellung in Höhenschichtlinien das Ergebnis einer stereophotogrammetrisch durchgeführten Aufnahme ebenso genau ist wie dasjenige einer Aufnahme mit dem Tachymetertheodolit oder mit dem Meßtisch.

3. Luftphotogrammetrie.

Die Luftphotogrammetrie unterscheidet sich von der Erdphotogrammetrie bei der Aufnahme darin, daß die Bildebenen nicht in eine bestimmte Lage gebracht werden können, sondern im Augenblick der Aufnahme beliebig im Raum liegen. Eine besondere Rolle spielt deshalb bei der Luftphotogrammetrie die Ermittlung der äußeren Orientierung des einzelnen Bildes; sie besteht in der Bestimmung der Lage des Objektivhauptpunktes, der Kammerachse und der Bildachsen für den Augenblick der Aufnahme.

Die Ermittlung der äußeren Orientierung eines Bildes setzt voraus, daß bei bekannter innerer Orientierung das Bild mindestens drei, nach Lage und Höhe gegebene Festpunkte enthält; sie zerfällt in die Bestimmung der ebenen Koordinaten und der N.N.-Höhe des Aufnahmeorts, des Richtungswinkels der Horizontalprojektion der Kammerachse oder der „Aufnahmerichtung“, des „Neigungswinkels“ der Kammerachse und des „Verkantungswinkels“ der Bildachsen gegen die Horizontale.

Bei der Bestimmung der Koordinaten x , y und z des Aufnahmeorts S (Abb. 82) auf Grund der gegebenen Koordinaten (x_a, y_a, z_a) , (x_b, y_b, z_b)

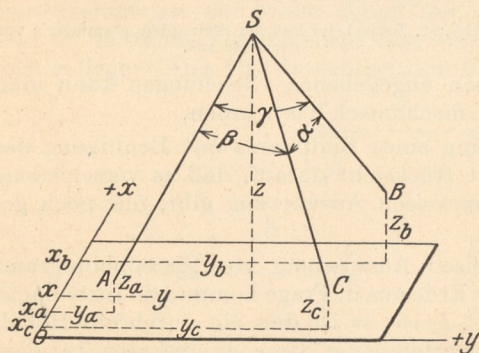


Abb. 82. Grundgedanke des Rückwärtseinschnittens im Raum mit Hilfe von Positionswinkeln.

und (x_c, y_c, z_c) der Festpunkte A , B und C handelt es sich um ein Rückwärtseinschneiden im Raum mit Hilfe der drei Positionswinkel α , β und γ , die bei bekannter innerer Orientierung des Bildes — Hauptpunkt H und Bildweite $OH = f$ (Abb. 83) — durch die Bildpyramide $O, A'B'C'$ bestimmt sind und in dieser z. B. mit Benutzung eines Bildtheodolits unmittelbar gemessen werden können.

Die Lösung der Aufgabe kann man graphisch, graphisch-numerisch, numerisch oder mechanisch vornehmen. Die mechanische Lösung geschieht mit Hilfe eines Auswertungsinstruments — Aerokartograph oder Stereoplanigraph —; sie besteht darin, daß man durch systematische Versuche oder durch allmähliche Annäherung der Bildplatte im Instrument

¹ Der Stereoaograph wurde deshalb auch schon als Schichtlinienzeichner bezeichnet.

eine solche Lage gibt, die derjenigen entspricht, die sie im Augenblick der Aufnahme im Raum hatte. Die mechanische Lösung mit Hilfe des Aerokartographen oder des Stereoplanigraphen bietet den Vorteil, daß man zwei zusammengehörige Bildplatten gemeinsam im Instrument einpassen, also zwei Aufnahmeorte zugleich bestimmen kann, und daß dann für beide Bilder die gesamte äußere, am Auswertungsinstrument im einzelnen ablesbare Orientierung bestimmt ist. Die Aufgabe des gemeinsamen Rückwärtseinschneidens von zwei Punkten im Raum kann mechanisch mit einem Auswertungsinstrument bedeutend rascher gelöst werden als nach einem anderen Verfahren; die numerischen und graphisch-numerischen Lösungen haben deshalb nur noch theoretisches Interesse.

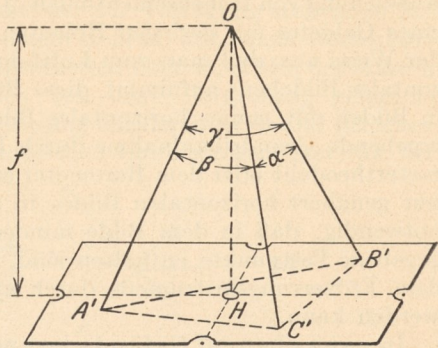


Abb. 83. Die Bildpyramide beim Rückwärtseinschneiden im Raum.

Die Festlegung von Neupunkten auf Grund von zwei Bildern mit bekannter äußerer Orientierung kann entweder nach dem Verfahren der Einschnidephotogrammetrie oder dem der Stereophotogrammetrie ausgeführt werden. Das Einschneideverfahren, bei dem man die zur Festlegung der Neupunkte erforderlichen Horizontal- und Vertikalwinkel mit Hilfe des Bildtheodolits den Bildern entnehmen kann, wird nur noch ganz ausnahmsweise angewandt; die Stereophotogrammetrie bietet den Vorteil, daß man bei Benutzung des Aerokartographen oder des Stereoplanigraphen die Bilder nicht nur punktweise, sondern auch linienweise auswerten kann.

Bei den beiden wichtigsten Instrumenten zur stereophotogrammetrischen Auswertung von Bildpaaren, dem Aerokartograph von Aerotopograph G. m. b. H. und dem Stereoplanigraph von C. Zeiß, ist eine räumlich gesehene und räumlich bewegbare Marke vorhanden, deren Einstellungen auf einen mit ihr verbundenen Zeichenstift selbsttätig übertragen werden. Die Einrichtung ist ähnlich wie beim Stereautograph derart, daß mit der im Gesichtsfeld bewegbaren Marke jede Linie in dem stereoskopisch gesehenen Bild verfolgt werden kann; der Zeichenstift zeichnet dabei die Horizontalprojektion der betreffenden Linie selbsttätig auf. Insbesondere kann man auch hier die bewegbare Marke auf eine bestimmte N. N.-Höhe ein- und feststellen; verfolgt man dann die entsprechende Höhenschichtlinie mit der Marke in dem räumlich gesehenen Bild, so wird von dem Zeichenstift die Schichtlinie aufgezeichnet.

Auch für stereophotogrammetrische Aufnahmen aus der Luft haben eingehende, von verschiedenen Seiten ausgeführte Untersuchungen gezeigt, daß die Ergebnisse in bezug auf die Genauigkeit von Grundriß und Geländedarstellung den mit dem Tachymetertheodolit und dem Meßtisch ausgeführten Aufnahmen mindestens gleichkommen.

In einem Gelände mit geringen Höhenunterschieden versagt das stereophotogrammetrische Auswertungsverfahren bei der Bestimmung der N. N. -Höhen einzelner Punkte und insbesondere bei der Aufsuchung von Höhenschichtlinien. Die photogrammetrische Aufnahme eines Gebietes mit geringen Höhenunterschieden führt man deshalb in der Weise aus, daß man vom Luftfahrzeug aus Bilder mit nahezu horizontaler Bildebene aufnimmt, diese Bilder mit einem Einbildinstrument in Bilder mit genau horizontaler Bildebene umformt, und die so sich ergebende Grundrißaufnahme durch Höhenmessungen mit dem Tachymetertheodolit oder dem Barometer ergänzt. Für die Umformung eines nur genähert horizontalen Bildes in ein genau horizontales Bild ist es notwendig, daß in dem Bilde mindestens drei, nach Lage und Höhe gegebene Festpunkte enthalten sind, mit deren Hilfe die Bildplatte in dem Entzerrungsinstrument durch systematische Versuche eingepaßt werden kann.

In ganz ebenem Gelände legt man Punkte und Linien ihrer Lage nach mit nahezu horizontal aufgenommenen Bildern fest, die man mit Hilfe eines Entzerrungsinstruments zu genau horizontalen Bildern umformt.

Die zum Einpassen der Meßbilder im Auswertungsinstrument oder zur Bestimmung ihrer äußeren Orientierung erforderlichen Paßpunkte können entweder nach der Herstellung der Bilder durch entsprechende Messungen im Gelände oder auch photogrammetrisch mit Hilfe der Bilder selbst horizontal und vertikal festgelegt werden¹.

D. Meßverfahren für flüchtige Aufnahmen.

Bei der Ausführung von flüchtigen Aufnahmen, also von Aufnahmen mit geringerer Genauigkeit oder von Aufnahmen zu Ausarbeitungen in kleineren Maßstäben², bei denen die Anwendung der Theodolittachymetrie und der Meßtischtachymetrie zuviel Zeit in Anspruch nehmen würde und die oben angegebenen photogrammetrischen Verfahren nicht in Frage kommen, hat man ebenfalls Punkte sowohl in horizontalem als auch in vertikalem Sinne festzulegen. Das wichtigste Verfahren zur Höhenbestimmung bei flüchtigen Aufnahmen ist die barometrische Höhenmessung.

Zur Ausführung von Aufnahmen in kleinen Maßstäben können auch photogrammetrische Verfahren verwendet werden.

1. Horizontale Festlegung von Punkten.

Hat man eine Reihe einer Linie AB entlang liegender Punkte festzulegen, so geschieht dies mit Hilfe eines Polygonzuges, bei dem man mit der Bussole Richtungswinkel der Seiten mißt. Bei der Messung eines solchen Bussolenzuges zwischen zwei Punkten A und B (Abb. 84) kann man bei der Messung der magnetischen Richtungswinkel je einen

¹ Vgl. III A 6 und 9.

² Vgl. auch z. B. Neumayer, G. v.: Anleitung zu wissenschaftlichen Beobachtungen auf Reisen.