

Photogrammetrie

von

Dr. Ing. habil. Gerhard Lehmann
o. Prof. an der Techn. Universität Hannover

Dritte, neubearbeitete Auflage

Mit 141 Abbildungen



Sammlung Göschen Band 1188/1188a

Walter de Gruyter & Co. · Berlin 1969

vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.



Copyright 1969 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin 30. — Alle Rechte, einschließlich der Rechte der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen, von der Verlagshandlung vorbehalten. — Archiv-Nr. 79 90 69 7

Druck: Deutsche Zentraldruckerei, Berlin. — Printed in Germany.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	Seite
11 Einleitung	7
11.1 Bildmessung und Bildinterpretation	7
11.2 Die Photogrammetrie als geodätisches Meßmittel und ihre Verfahrensarten	7
11.3 Die nicht-geodätischen Anwendungen der Photogrammetrie	9
12 Die Meßkammer	10
12.1 Die Lochkammer	10
12.2 Die Abbildung durch das Aufnahmeobjektiv	11
12.3 Die Bestimmung der inneren Orientierung durch den Benutzer der Meßkammer	14
12.4 Anforderungen und Ausführungsformen photogrammetrischer Objektive	16
13 Das photographische Bild	19
13.1 Schwarz-Weiß-Photographie	19
13.2 Infrarot- und Farbphotographie	24
14 Die äußere Orientierung der Meßbilder	25
14.1 Die Daten der äußeren Orientierung	25
14.2 Raumkoordinaten und Bildkoordinaten	26
14.3 Grundbegriffe der Einbildmessung	26
14.4 Bildmaßstab und Maßstabspunkte	29
14.5 Einflüsse kleiner Änderungen in den Daten der äußeren Orientierung	32
14.6 Kernpunkte und Kernstrahlen	35
15 Die Ausmessung der Bilder	37
15.1 Ausmessung von Einzelbildern	37
15.1.1 Bildkoordinaten und Bildwinkel	37
15.1.2 Der Einbild-(Mono-)Komparator	38
15.1.3 Der Bildtheodolit	40
15.2 Ausmessung von Bildpaaren	43
15.2.1 Natürliches räumliches Sehen	43
15.2.2 Stereoskopische Betrachtung photographischer Bilder	45
15.2.3 Einrichtungen zur stereoskopischen Ausmessung der Bilder	50
2 Terrestrische Photogrammetrie (Erdbildmessung)	
21 Aufnahmegерäte	56
22 Aufnahmearten	60
22.1 Meßtischphotogrammetrie	60
22.2 Stereophotogrammetrie	61
22.2.1 Aufnahmeanordnung	61
22.2.2 Fehlertheorie	62
22.2.3 Ausschaltung regelmäßiger Fehler durch Paßpunkte	64
23 Auswertung und Auswertegeräte für stereophotogrammetrische Aufnahmen	66

	Seite
23.1 Punktweise Auswertung (Parallaxenphotogrammetrie)	66
23.2 Linienweise Auswertung mit Stereokartiergeräten	67
23.21 Das Zeiss'sche Parallelogramm	67
23.22 Der Stereoaautograph	69
23.23 Sonstige Stereokartiergeräte der terrestrischen Photo- grammetrie	72
24 Praxis der Aufnahme und Auswertung	74
25 Vergleich der Erdbild- und der Luftbildmessung	77
3 Aerophotogrammetrie (Luftbildmessung)	
31 Die Luftbildaufnahme	79
31.1 Eigenschaften und Arten der Luftbilder	79
31.2 Aufnahmeanordnung	80
31.21 Grundbedingungen für Senkrechtaufnahmen	80
31.22 Elemente der Bildflugplanung	82
31.23 Grundsätzliches zum Typ der Aufnahmekammer	84
31.24 Einzelfragen zum Bildflug	86
31.3 Aufnahmekammern	87
31.4 Zusatzgeräte zur Bestimmung der äußeren Orientierung bei der Aufnahme und zur Navigation	92
31.41 Allgemeines	92
31.42 Bestimmung der Neigung und Kantung des Luftbildes	92
31.43 Bestimmung der Raumkoordinaten des Aufnahmeortes	95
32 Auswertung von Einzelbildern durch Entzerrung	97
32.1 Grundsätzliches zur Entzerrung von Einzelbildern	97
32.2 Graphische Entzerrung	99
32.21 Übertragung von Einzelpunkten	99
32.22 Übertragung des Bildinhalts	100
32.3 Umbildung durch subjektive optische Projektion	101
32.4 Entzerrung durch objektive optische Projektion	103
32.41 Die optischen Bedingungen der Entzerrungsgeräte	103
32.42 Die geometrischen Bedingungen der Entzerrungsgeräte	105
32.43 Die Entzerrung nach Einstellwerten	107
32.44 Die Ausführungsformen der Entzerrungsgeräte	108
32.45 Der praktische Vorgang bei der Entzerrung	110
32.46 Entzerrungsgeräte für unebenes Gelände (Orthophoto- verfahren)	111
33 Theorie der Doppelbildauswertung	113
33.1 Die Hauptaufgabe der Photogrammetrie	113
33.2 Die gegenseitige Orientierung	116
33.21 Die gegenseitige Orientierung unabhängiger Bildpaare	116
33.22 Die gegenseitige Orientierung beim Folgebildanschluß	122
33.23 Die gegenseitige Orientierung bei bergigem Gelände	122
33.24 Modellverbiegungen im genäherten Normalfall	123
33.3 Die absolute Orientierung	125
33.31 Unabhängige Bildpaare	125
33.32 Folgebildanschluß	128
34 Doppelbildauswertegeräte (Strenge Lösungen)	129
34.1 Überblick über die Verfahren und Geräte der Doppelbild- messung	129
34.2 Auswertegeräte mit Wiederherstellung der äußeren Orien- tierung	133

	Seite	
34.21	Geräte mit optischer Projektion	133
34.22	Geräte mit mechanischer Projektion	138
34.23	Geräte mit optisch-mechanischer Projektion	142
34.3	Auswertegeräte ohne Wiederherstellung der äußeren Orientierung (Rechengерäte)	146
34.4	Automatisch arbeitende Geräte und Zusatzgeräte	149
35	Einfache Stereokartiergeräte (Näherungslösungen)	152
35.1	Bildauswertung mit Stereometergeräten	152
35.2	Die Fehler der Stereometermessungen	157
35.3	Das Stereotop	159
36	Paßpunktbestimmung und Aerotriangulation	161
36.1	Die Bedeutung der Paßpunkte für die Photogrammetrie	161
36.2	Radialtriangulation	163
36.21	Allgemeine Grundsätze	163
36.22	Wahl der Radialpunkte	165
36.23	Methoden der Radialtriangulation	167
36.3	Räumliche Aerotriangulation	169
36.31	Die Triangulationsverfahren	169
36.32	Streifentriangulationen und -ausgleichungen	172
36.33	Blockausgleichungen	178
36.34	Praktische Ergebnisse	182
37	Analytische Photogrammetrie	184
37.1	Aufgabenstellung, instrumentelle Voraussetzungen und allgemeine Erfahrungen	184
37.2	Möglichkeiten zum Ansatz der Rechenformeln für die analytische Aerotriangulation	186
37.3	Verfahren von G. H. Schut	187
37.31	Ausgangsgleichungen	187
37.32	Gegenseitige Orientierung eines Bildpaares	188
37.33	Maßstabsbestimmung und Streifenkoordinaten bei Streifentriangulationen	191
37.34	Absolute Orientierung	193
37.35	Zahlenbeispiel	195
38	Anwendungen	200
38.1	Einzelbilder und Orthophotos	200
38.11	Die Verwendung von Einzelbildern, Luftbildvergrößerungen und Entzerrungen	200
38.12	Die Verwendung von Orthophotos	204
38.2	Die Doppeltauswertung in der Katastervermessung	205
38.21	Allgemeine Voraussetzungen	205
38.22	Arbeitsablauf	207
38.3	Herstellung topographischer Karten durch Doppeltauswertung	209
38.31	Auswertung am Gerät	209
38.32	Überarbeitung und Feldvergleich	212
38.4	Die Photogrammetrie im Straßenbau	213
38.5	Auswerteleistung der Präzisions-Doppeltauswertegeräte	214
	Literaturverzeichnis	216
	Stichwort- und Namensverzeichnis	217

1 Grundlagen

11 Einleitung

11.1 Bildmessung und Bildinterpretation. Die Photogrammetrie oder Bildmessung ist die Vermessung irgendwelcher Objekte nach Lage und Form aus photographischen Bildern dieser Objekte. Häufig zielt die Verwendung von Photographien, vornehmlich von Luftbildern, jedoch gar nicht auf einen Meßzweck, sondern auf die Durchforschung und Deutung des Bildinhalts, die sog. *Bildinterpretation*, ab, so z. B. in der Geographie, der Geologie, der Vegetationskunde oder der Vorgeschichtsforschung*). Im folgenden wird nur die eigentliche *Bildmessung* behandelt.

11.2 Die Photogrammetrie als geodätisches Meßmittel und ihre Verfahrensarten. Die Photogrammetrie wird hauptsächlich und in ständig steigendem Maße zur Vermessung der Erdoberfläche und zu deren Darstellung in Plänen und topographischen Karten benutzt. Sie ist also in erster Linie ein *geodätisches Meßmittel*. Ihre Verfahrensarten sind die *Einbild-* und die *Doppelbildmessung*. Je nach der Lage der Aufnahmeorte unterscheidet man zwischen der *terrestrischen Photogrammetrie* (Erdbildmessung) und der *Aerophotogrammetrie* (Luftbildmessung).

Einbild- und Doppelbildmessung. Das photographische Bild ist eine Zentralperspektive des betreffenden abgebildeten Objekts. Es liefert also auch immer nur *einen* geometrischen Ort für die Lage der abgebildeten Objektpunkte, und es erlaubt eine Rekonstruktion des Aufnahmegegenstandes im allgemeinen nur dann, wenn dieser als Ebene angesehen werden kann. Ist diese Voraussetzung erfüllt und schneiden die Bildstrahlen die Gegenstandsebene unter günstigen Schnittwinkeln, so kann man aus der Vermessung von Einzelbildern geometrisch

*) Eine umfassende Einführung in die Luftbildinterpretation gibt das *Manual of Photographic Interpretation*. Herausgegeben von der American Society of Photogrammetry, Washington 1960.

ähnliche Darstellungen der Gegenstandsebene gewinnen. Die *Einbildmessung* ist ihrer Natur nach auf die Aerophotogrammetrie beschränkt; sie dient hier zur Herstellung von Lageplänen ebenen Geländes.

Ausmessungen *räumlicher* Objekte, die außer der Lage auch die Höhe der Objektpunkte liefern sollen, sind nur möglich, wenn das Objekt von zwei verschiedenen Aufnahmeorten photographiert wird und jeder Gegenstandspunkt durch den Schnitt zweier Bildstrahlen bestimmt werden kann. Die Messungsgrundlage ist dann ein Bildpaar. Die *Doppelbildmessung* kennt keine Beschränkung auf bestimmte Geländearten, sie ist das universellere und genauere Meßverfahren. In der terrestrischen Photogrammetrie wird ausschließlich die Doppelbildmessung benutzt. In der Aerophotogrammetrie verwendet man die Doppelbildmessung überall da, wo das Gelände nicht hinreichend eben ist oder wo besonders hohe Genauigkeiten verlangt werden.

Erd- und Luftbildmessung. Die terrestrische Photogrammetrie wird im Vermessungswesen nur noch in Spezialfällen, z. B. für topographische Aufnahmen im Hochgebirge, insbesondere bei Expeditionen, eingesetzt. Sie braucht Aufnahmeortspunkte mit beherrschender Übersicht, andernfalls verdeckt der Vordergrund den Hintergrund. Außerdem sind die Entfernungen der Objektpunkte von den Aufnahmeorten und damit die Schnittwinkel entsprechender Bildstrahlen bei der terrestrischen Doppelbildmessung sehr unterschiedlich. Die Genauigkeit terrestrischer Aufnahmen nimmt also mit zunehmender Tiefe des Aufnahmebereichs stark ab. Von beiden Nachteilen ist die Luftbildmessung in fast allen Fällen frei. Vom Flugzeug aus bietet sich ein hervorragender Einblick in das Gelände, und die Objektentfernungen liegen, wenn man vom Hochgebirge absieht und genäherte Senkrechtaufnahmen unterstellt, für alle Punkte des Aufnahmebereichs in der gleichen Größenordnung. Sofern nur die Größe des Aufnahmegebietes die Flugkosten lohnt, werden heute Neuaufnahmen zum

Zwecke der Herstellung topographischer Karten überwiegend mittels der Luftbildmessung durchgeführt.

11.3 Die nicht-geodätischen Anwendungen der Photogrammetrie. Die Photogrammetrie hat im Vergleich zu anderen Meßmethoden eine Reihe entscheidender Vorteile, die sie außer in der Geodäsie auf vielen, ganz verschiedenartigen Gebieten der Wissenschaft und der Technik zu einem wertvollen, häufig unentbehrlichen Meßmittel machen. Insgesamt gesehen treten aber die „sonstigen“ Anwendungsfälle ihrem Umfang nach hinter der Geodäsie zurück. Für eine gründliche Orientierung über die Photogrammetrie auf nicht-geodätischen Gebieten sei auf das Buch von *O. Lacmann* (s. Lit. Verz.) verwiesen. Im Rahmen der vorliegenden Darstellung können für diesen Anwendungsbereich neben gelegentlichen Hinweisen im Text nur einige Beispiele angedeutet werden:

Photographische Bilder geben das *ganze* Aufnahmeobjekt mit allen Einzelheiten — nicht nur spezielle Punkte oder Strecken — mit voller Beweiskraft für seinen Zustand im Belichtungsmoment wieder. Die Aufnahmen und ihre Vorbereitung gehen schnell und äußerst bequem vonstatten. Diese Eigenschaften empfehlen die Photogrammetrie für die Festlegung von Tatbeständen, z. B. von Verkehrsunfällen, oder von Geländezuständen, z. B. der Begrenzungslinien eines Hochwassers, für Architekturaufnahmen u. a. m.

Das Aufnahmeobjekt braucht nicht berührt zu werden, da unmittelbare Messungen an ihm nicht erforderlich sind; es kann sogar ganz unzugänglich sein. Man kann so durch gleichzeitige Aufnahmen von zwei Standpunkten aus z. B. Wolkenformen festlegen, Tierkörper für Tierzuchtzwecke vermessen oder mittels der Röntgenphotogrammetrie Messungen innerhalb des menschlichen Körpers durchführen.

Durch entsprechend häufige Wiederholung photogrammetrischer Aufnahmen ist es möglich, schnell oder langsam ablaufende Bewegungsvorgänge meßtechnisch

zu verfolgen. Damit eignet sich die Photogrammetrie für die Vermessung von Flugbahnen, für die Erfassung von Wasserwellen in der Natur oder im wasserbautechnischen Laboratorium, für die Bestimmung von Gletschergeschwindigkeiten, für Deformationsmessungen an Bauwerken u. dgl.

Schließlich kann man mit der Photogrammetrie auch extrem kleine Objekte ausmessen. Ein Beispiel dafür ist die räumliche Auswertung von Meßbildern, die mit dem Elektronenmikroskop aufgenommen sind.

12 Die Meßkammer

12.1 Die Lochkammer. Wir nehmen zunächst an, daß die Aufnahmekammer statt eines Objektivs ein kleines kreisförmiges Loch trägt. Die Lochmitte ist das Projektionszentrum O der *Lochkammer* (Abb. 1). In der

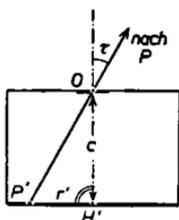


Abb. 1.
Lochkammer.

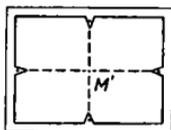


Abb. 2.
Anlegerahmen mit Rahmenmarken.

durch den Anlegerahmen gegebenen Bildebene entsteht das photographische Bild. Der Fußpunkt des von O auf die Bildebene gefällten Lotes ist der *Bildhauptpunkt* H' . Der Abstand $OH' = c$ heißt *Kammerkonstante*. Die in den Gegenstandsraum verlängerte Gerade $H'O$ ist die *Aufnahmerichtung*. Die Lochkammer liefert eine exakte Zentralprojektion; zwischen den Achsenwinkeln τ , die in O zwischen der Aufnahmerichtung und beliebigen Gegenstandspunkten P gemessen werden, und den entsprechenden Bildabständen vom Hauptpunkt r' besteht die Beziehung:

$$r' = c \tan \tau.$$

Der Anlegerahmen trägt 4 Rahmenmarken (Abb. 2), deren Verbindungsgeraden rechtwinklig zueinander stehen und das Bildachsenkreuz definieren. Der Schnittpunkt der Verbindungsgeraden ist der *Bildmittelpunkt* M' ; er soll möglichst mit dem Bildhauptpunkt H' zusammenfallen. Um aus den Bildabständen r' die Achsenwinkel τ zu erhalten, muß man die *innere Orientierung*, d. h. die gegenseitige Lage von Bildebene und Projektionszentrum kennen. Sie wird angegeben durch die Größe von c und die Lage von H' in bezug auf das Bildachsenkreuz. Ein Bild, dessen innere Orientierung bekannt ist, ist ein *Meßbild*. Meßbilder können nur mit *Meßkammern* aufgenommen werden. Diese unterscheiden sich von gewöhnlichen photographischen Kammern dadurch, daß sie durch ihre Bauart, insbesondere durch ihre Stabilität und durch den Anlegerahmen, eine eindeutige, unveränderliche innere Orientierung gewährleisten.

Mit der Lochkammer erhält man eine „ideale Abbildung“. Die oben angeführten *mathematischen Definitionen* gelten nur für diesen Idealfall. Tatsächlich gibt es weder eine für die Praxis brauchbare Lochkammer noch eine ideale Abbildung. Bei der Bilderzeugung durch ein Objektiv besteht das Gesetz der Zentralprojektion $r' = c \tan \tau$ nicht mehr in Strenge. Sofern man aber die Abweichungen von diesem Gesetz für die jeweils benutzte Meßkammer kennt und berücksichtigt, genügt es für alle praktischen Anwendungen, von der Vorstellung der idealen Abbildung auszugehen.

12.2 Die Abbildung durch das Aufnahmeobjektiv. Das Herz der Meßkammer ist das Objektiv. Es besteht aus einer Anzahl von Einzellinsen, deren Art und Anordnung man die Abbildungsfehler möglichst weitgehend zu korrigieren und über das ganze Bild gute Bildschärfe zu erhalten sucht (s. Bd. 468 Slg. Göschen).

Die Abbildung eines Gegenstandspunktes durch ein Objektiv geschieht mittels eines Strahlenkegels, für dessen Öffnung der Durchmesser der *Öffnungsblende* maß-

gebend ist. Die Bilder dieser reellen, in das Objektiv eingebauten Blende, die durch den ding- bzw. bildseitigen Objektivteil entworfen werden, sind die *Eintrittspupille* (E.P. bzw. A.P.). Diejenigen Strahlen, die durch den Mittelpunkt der Öffnungsblende hindurchgehen, heißen *Hauptstrahlen*. Die Hauptstrahlen oder ihre Verlängerungen laufen damit auch durch die Mitten

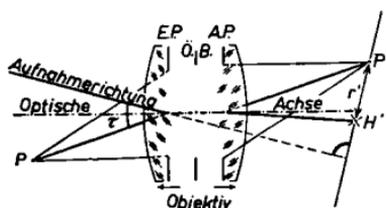


Abb. 3. Öffnungsblende Ö.B.,
Eintrittspupille E.P.
und Austrittspupille A.P.

der Bilder der Öffnungsblende, der E.P. und der A.P. (Abb. 3); auf ihnen liegen die einander zugeordneten Ding- und Bildpunkte. Man kann sich daher die abbildenden Strahlenkegel durch ihre Hauptstrahlen ersetzt denken.

Im Gegensatz zur Lochkammer hat die tatsächliche Meßkammer für den Dingraum und den Bildraum je ein besonderes Projektionszentrum, den Mittelpunkt der E.P. und den Mittelpunkt der A.P.

Unter Berücksichtigung des Abbildungsvorgangs durch ein Objektiv bedürfen einige der mathematischen Definitionen (12.1) einer Verfeinerung:

a) Die *Aufnahmerichtung* ist derjenige Hauptstrahl, dessen dingseitiger, in den Bildraum verlängerter Teil rechtwinklig zur Bildebene ist;

b) der *Bildhauptpunkt* H' ist der Durchstoßpunkt dieses Hauptstrahls durch die Bildebene. Ist die optische Achse des Objektivs rechtwinklig zur Bildebene, so fällt die Aufnahmerichtung mit ihr zusammen. H' ist dann der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bildebene;

c) die *innere Orientierung* gibt die Beziehung zwischen den in der Mitte der E.P. gemessenen Achsenwinkeln τ und den Bildabständen r' an. Diese Beziehung lautet allgemein:

$$r' = cF(\tau);$$

d) die Daten der *inneren Orientierung* sind:

1. die Koordinaten des Bildhauptpunktes H' ; sie werden in bezug auf das Bildachsenkreuz (12.1) angegeben; von H' aus werden die Bildabstände r' gemessen;
2. die Kammerkonstante c ; sie ist in erster Näherung gleich der Brennweite des Aufnahmeobjektivs;
3. die Funktion $F(\tau)$; diese Funktion unterscheidet sich von der für die Zentralprojektion geltenden tan-Funktion um die Verzeichnung des Objektivs $\Delta r'$

$$r' = c F(\tau) = c \tan \tau + \Delta r'.$$

Die übrigen in 12.1 gegebenen Definitionen (Bildmittelpunkt, Meßkammer, Meßbild) bleiben unverändert.

Die Verzeichnung ist eine Abbildungseigenschaft des Objektivs, die nur den Bildort, nicht die Bildgüte beeinflusst. Die Verzeichnung kann im allgemeinen als radialsymmetrisch unterstellt werden; sie ist dann für alle dem Betrage nach gleichen Bildabstände r' , unabhängig von deren Richtung, gleich groß.

In Abb. 4 sind die Verzeichnungsbeträge $\Delta r'$ eines Objektivs als Funktion von r' vielfach vergrößert dargestellt. Infolge der Verzeichnung werden alle Dinggeraden, die nicht die optische Achse schneiden, gekrümmt abgebildet; das Quadrat in Abb. 4 wird z. B. kissenförmig verzeichnet. Dinggeraden, welche die optische Achse schneiden, werden wieder als gerade Linien abgebildet. Auf Grund dieser Eigenschaften kann man ein Objektiv auf Abweichungen der Verzeichnung von der Zentralsymmetrie und auf eine etwaige tangential Verzeichnung prüfen.

Die maximalen Verzeichnungen der modernen Aufnahmeobjektive betragen wenige mm/100, für einige Objektive liegt sie sogar unter 0,01 mm.

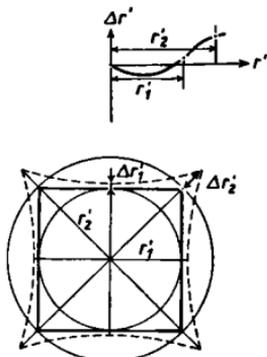


Abb. 4.
Die Verzeichnung.

Die innere Orientierung einer Meßkammer wird im allgemeinen von den Herstellerfirmen bestimmt. Dabei wird die Kammerkonstante c in der Weise festgelegt, daß für einen bestimmten Bildabstand r'_0 und den zugehörigen Achsenwinkel τ_0 die Verzeichnung Null ist, d. h.:

$$c = \frac{r'_0}{\tan \tau_0}.$$

Die Verzeichnung wird für jede Meßkammer – mindestens aber für jeden Objektivtyp – in Abhängigkeit von r' entsprechend Abb. 4 dargestellt. Außerdem werden die Rahmenmarken so justiert, daß Bildhauptpunkt H' und Bildmittelpunkt M' auf 0,01 bis 0,02 mm zusammenfallen.

12.3 Die Bestimmung der inneren Orientierung durch den Benutzer der Meßkammer. Der Benutzer einer Meßkammer wird in der Regel nicht über Laboreinrichtungen, wie sie die Herstellerfirmen zur Bestimmung der inneren Orientierung verwenden (15.13), verfügen. Er kann die Daten der inneren Orientierung folgendermaßen bestimmen bzw. überprüfen:

Man nimmt bei lotrechter Bildebene ein Meßbild auf, das eine Reihe von gut definierten gleichmäßig verteilten Punkten wiedergibt. Die Punkte sollen mit der Meßkammer etwa in einer Horizontalebene liegen. Nach denselben Punkten wird ein Richtungssatz gemessen, wobei der Theodolit mit seiner Stehachse am Ort der E.P. des Kammerobjektivs aufzustellen ist. Wenn die Lage der E.P. nicht genau bekannt ist, müssen die Entfernungen der Vergleichspunkte so groß sein, daß der Einfluß des Exzentrizitätsfehlers vernachlässigbar klein bleibt. Unter den Vergleichspunkten soll einer, P_2 , ungefähr in der Aufnahmerichtung liegen, während zwei weitere Punkte, P_1 und P_3 , möglichst große Achsenwinkel haben und möglichst symmetrisch zur Aufnahmerichtung liegen sollen (Abb. 5). Die Ver-

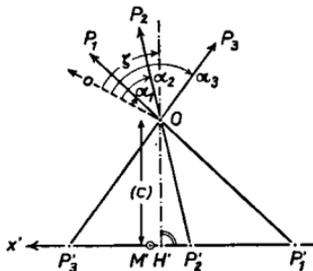


Abb. 5. Bestimmung der inneren Orientierung.

zeichnungen können dann in P'_2 zu Null und in P'_1 und P'_3 entgegengesetzt gleich angenommen werden. Wird unter (c) derjenige Näherungswert der Kammerkonstanten c verstanden, für den die Verzeichnung in P'_1 und P'_3 gleichfalls Null ist, so ist für P_1 , P_2 und P_3 :

$$\tan(\alpha_i - \zeta) = \frac{x'_i - x'_H}{(c)}; i = 1, 2, 3.$$

ζ ist der Winkel zwischen der Aufnahme- und der Nullrichtung des Richtungssatzes. Die Bildgrößen x' werden mit einem Komparator von einem beliebig gewählten Bezugspunkt aus gemessen.

Zur Bestimmung der 3 Unbekannten ζ , x'_H und (c) führe man die Hilfsunbekannte $\alpha_1 - \zeta = \tau_1$ ein. Mit $\tan \tau_1 = (x'_1 - x'_H) : (c)$ können die Gleichungen für die Punkte 2 und 3 auf folgende Form gebracht werden:

$$\tan[\tau_1 + (\alpha_2 - \alpha_1)] = \tan \tau_1 + \frac{x'_2 - x'_1}{(c)},$$

$$\tan[\tau_1 + (\alpha_3 - \alpha_1)] = \tan \tau_1 + \frac{x'_3 - x'_1}{(c)}.$$

Ihre Auflösung nach τ_1 ergibt:

$$\tan \tau_1 = \frac{(x'_2 - x'_1) \cot(\alpha_2 - \alpha_1) - (x'_3 - x'_1) \cot(\alpha_3 - \alpha_1)}{x'_2 - x'_3}.$$

Damit wird

$$\begin{aligned} \zeta &= \alpha_1 - \tau_1, \\ (c) &= \frac{x'_3 - x'_1}{\tan(\alpha_3 - \zeta) - \tan \tau_1}, \\ x'_H &= x'_2 - (c) \tan(\alpha_2 - \zeta). \end{aligned}$$

Beispiel:

	P_1	P_2	P_3	M'
α°	2,7500	40,8340	79,3475	
x' (mm)	1,02	106,40	212,76	107,00
$\tan \tau_1 = -$	$\frac{105,38 \cot 38,0840^\circ - 211,74 \cot 76,5975^\circ}{106,36}$			

$$\tau_1 = -38,3252^\circ; \zeta = 2,7500 + 38,3252 = 41,0752^\circ,$$

$$(c) = \frac{211,74}{\tan 38,2723^{\circ} + \tan 38,3252^{\circ}} = 154,22 \text{ mm},$$

$$x'_H = 106,40 + 154,22 \tan 0,2412^{\circ} = 106,98 \text{ mm}.$$

Der Bildhauptpunkt H' liegt also vom Bildmittelpunkt M' in der x' -Richtung um $-0,02$ mm entfernt.

Es empfiehlt sich, die Bestimmung der Unbekannten für eine ähnlich angeordnete Auswahl von 3 Punkten zu wiederholen*).

Mit ζ werden sämtliche Richtungen α in Achsenwinkel τ überführt: $\tau = \alpha - \zeta$. Ebenso werden die x' -Werte — ohne ihre Bezeichnung zu ändern — auf den Bildhauptpunkt bezogen. Man berechnet dann für alle Punkte des Richtungssatzes

$$\Delta x' = x' - (c) \tan \tau.$$

Die graphische Darstellung der $\Delta x'$ als Funktion von x' liefert eine Verzeichnungskurve nach Art der Abb. 4. Sie gibt für den gewünschten Nullabstand, z. B. $x'_0 = 70$ mm, und den entsprechenden Achsenwinkel τ_0 die Verzeichnung $\Delta x'_0$. Um den endgültigen Wert der Kammerkonstanten c zu erhalten, muß man (c) so verändern, daß $\Delta x'_0 = 0$ wird. Man hat also:

$$\text{für } (c): \quad \Delta x'_0 = x'_0 - (c) \tan \tau_0,$$

$$\text{für } c: \quad 0 = x'_0 - c \tan \tau_0$$

$$\text{und damit:} \quad c = (c) + \frac{\Delta x'_0}{\tan \tau_0}.$$

Abschließend zeichnet man die c entsprechende neue Verzeichnungskurve:

$$\Delta x' = x' - c \tan \tau.$$

Es bleibt noch übrig, die Lage von H' in der zu x' senkrechten Richtung zu bestimmen. Dazu wird die Kammer um 100° gedreht; der Vorgang ist dann ganz derselbe wie für die erste Kammerlage. Falls — wie bei den terrestrischen Aufnahme-geräten — diese Kammerdrehung nicht möglich ist, verfähre man nach 21 (S. 59).

12.4 Anforderungen und Ausführungsformen photogrammetrischer Objektive. Je nach dem

*) Zur Bestimmung der inneren Orientierung durch Ausgleichung vgl. W. Großmann, Grundzüge der Ausgleichsrechnung, 3. Aufl. Berlin 1969, S. 273.

Winkelbereich, den ein Objektiv auszeichnet, unterscheidet man

Normalwinkelobjektive	(2 α etwa 65°)
Weitwinkelobjektive	(2 α etwa 100°)
Überweitwinkelobjektive	(2 α etwa 130°)

Hierin ist 2 α der sog. *Bildwinkel des Objektivs*, d. h. der doppelte Achsenwinkel τ für denjenigen Hauptstrahl, der zum äußersten Punkt der Bildbegrenzung führt.

An alle photogrammetrischen Objektive werden folgende Anforderungen gestellt:

a) *Große Bildschärfe und hohes Auflösungsvermögen.* Als Bildschärfe des Objektivs bezeichnet man seine Fähigkeit, Gegenstände des Dingraums in der Bildebene konturenscharf abzubilden. Das Auflösungsvermögen (A.V.) gibt die Grenze an, bis zu der benachbarte Einzelheiten im Bild auseinandergehalten werden können. Als Maß für das A.V. dient die Anzahl der Linien entsprechender Testfiguren, die je Millimeter im Bild noch getrennt wiedergegeben werden. Für die Praxis der Bildmessung interessieren nur die Bildschärfe und das A.V. im *photographischen* Bild. Beide sind dann nicht nur von der Güte der Optik, sondern auch vom Bildkontrast, von der Art der photographischen Emulsion, vom Entwickler, von der Entwicklungsdauer u. a. m. abhängig. Noch besser und sehr viel erschöpfender, allerdings auch weniger anschaulich als durch das A.V. wird die Bildgüte durch die in der Photographie in zunehmendem Maße benutzte sog. *Modulations- oder Kontrastübertragungsfunktion* gekennzeichnet; sie gibt an, wie die Kontraste des Objekts für verschiedene Detailgrößen im Bild wiedergegeben werden. Ihre Bestimmung erfordert umfangreiche Meßapparaturen*).

*) Über Kontrastübertragungs-Funktionen als modernes Bildgütemaß in der Photogrammetrie vgl. Schwidewsky, Bildmess. u. Luftbildwes. 1960, S. 86 ff.

Die Qualität moderner Objektive mag dadurch gekennzeichnet werden, daß selbst Luftaufnahmen, die im Vergleich zu terrestrischen Aufnahmen nur geringe Kontraste aufweisen, stets noch Einzelobjekte mit 0,02 mm Durchmesser im Bild klar erkennen lassen und Objektfiguren mit 20 Linien je Millimeter im Bild auch am Bildrand noch deutlich auflösen. Noch wesentlich höher als die Bildschärfe und das A.V. ist die Genauigkeit, mit der die Abstände benachbarter, getrennt wiedergegebener Einzelheiten im Bild bestimmt werden können. Die hier zu erwartenden mittleren Unsicherheiten liegen bei Anwendung geeigneter Meßvorrichtungen unter 0,005 Millimeter.

b) *Geringer Lichtabfall zum Rande hin.* Für Objektive, bei denen die Öffnungsblende vor dem Objektiv angebracht ist, sinkt die Beleuchtungsstärke zum Rande hin mit $\cos^4\tau$. Sie beträgt also für ein Weitwinkelobjektiv am Bildrand $\tau = 50^\circ$ — nur noch 25% der Beleuchtungsstärke in der Bildmitte. Bei den neuesten Konstruktionen photogrammetrischer Objektive mit Innenblende ist durch die Bauart dafür gesorgt, daß die Hauptstrahlneigungen für schräg einfallende Bündel im Innern des Objektivs möglichst flach sind (vgl. den Strahlengang in Abb. 7). Auf diese Weise wird der Lichtabfall gegenüber dem $\cos^4\tau$ -Gesetz erheblich vermindert.

c) *Geringe Verzeichnung.* Die Verzeichnung läßt sich zwar bei der Bildauswertung berücksichtigen. Die Auswertung wird aber vereinfacht, wenn die Verzeichnung von vornherein so klein gehalten wird, daß sie überall da, wo nicht höchste Genauigkeit gefordert wird, vernachlässigbar klein ist.

Seit 1950 sind u. a. von den Firmen *Zeiss/Oberkochen* und *Wild/Heerbrugg* (Schweiz) sog. Hochleistungsobjektive für Luftaufnahmen entwickelt worden, die die Forderungen a) bis c) in hervorragendem, früher nicht gekanntem Maße erfüllen.

Die hauptsächlich verwandten Hochleistungsobjektive der Firmen Zeiss und Wild für Luftaufnahmen sind:

Firma	Name	Bild- winkel 2α	Brennweite [cm]	Öffnungs- verhältnis
Zeiss	Telikon	33°	61	1 : 6,3
Zeiss	Topar	63°	30,5	1 : 5,6
Zeiss	Topar	69°	21	1 : 4
Zeiss	Pleogon	104°	11,5; 15,3	1 : 5,6
Zeiss	S-Pleogon	139°	8,5	1 : 4
Wild	Aviotar	67°	17; 21	1 : 4
Wild	Aviogon	100°	10; 11,5; 15,3	1 : 5,6
Wild	Superaviogon	133°	8,8	1 : 5,6

Hierbei ist das Öffnungsverhältnis der Quotient aus dem Durchmesser der E.P. und der Brennweite. Das Öffnungsverhältnis muß für Luftaufnahmen groß sein, weil bei den hohen Flugzeuggeschwindigkeiten kurze Belichtungszeiten erforderlich sind. Die in der terrestrischen Photogrammetrie verwandten Objektive haben, da hier mit festen Aufnahmestandpunkten gearbeitet wird, in der Regel ein kleineres Öffnungsverhältnis, z. B. 1 : 25.

Die Abb. 6 bis 8 geben Beispiele für einige spezielle Objektivtypen.

13 Das photographische Bild

13.1 Schwarz-Weiß-Photographie. Die photographische Schicht besteht aus kleinen Bromsilberkörnern, die in Gelatine eingebettet sind. Durch ihre Belichtung erhält man ein „latentes“ Bild. An den belichteten Stellen ist eine Spaltung des Bromsilbers in Silber und Brom eingeleitet, die durch die Entwicklung auf chemischem Wege fortgesetzt wird. Unbelichtetes Bromsilber wird durch die Fixierung gelöst und durch die Wässerung entfernt. Man erhält ein Negativ, das die Helligkeitsunterschiede des aufgenommenen Objekts als Schwärzungsunterschiede der photographischen Schicht sichtbar macht.

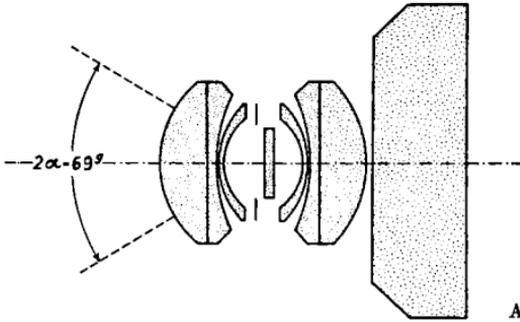


Abb. 6. Normalwinkel-Objektiv Zeiss-Topar, 1 : 4, $f = 21$ cm (ca. $\frac{1}{4}$ nat. Größe) mit Verzeichnungskurve.

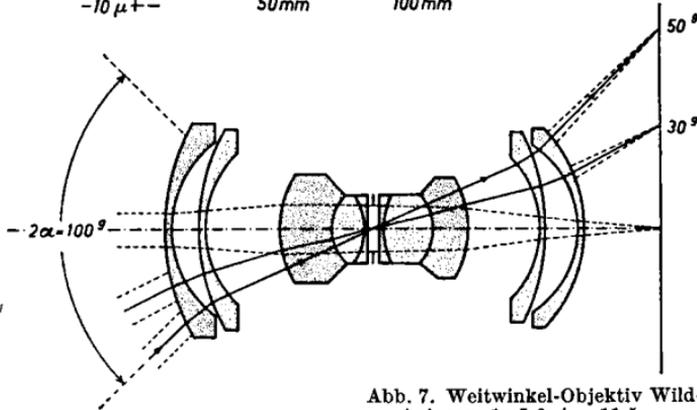


Abb. 7. Weitwinkel-Objektiv Wild-Aviogon, 1 : 5,6, $f = 11,5$ cm ($\frac{1}{5}$ nat. Größe) mit Strahlengang.

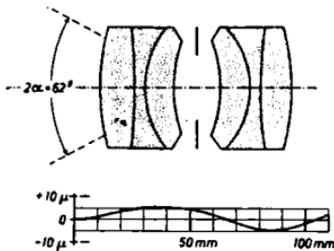


Abb. 8. Normalwinkel-Objektiv (Orthoprotar) von Jenoptik Jena, 1 : 25, $f = 19$ cm, für terrestrische Aufnahmen ($\frac{1}{25}$ nat. Größe) mit Verzeichnungskurve.

Von Natur aus sind die photographischen Schichten im wesentlichen blauempfindlich. Sie müssen durch Zusatz von Farbstoffen auch für andere Farben empfindlich gemacht, d. h. „sensibilisiert“ werden. Emulsionen, die außer für Blau auch für Grün und Gelb empfindlich sind, heißen „*orthochromatisch*“; sind sie außerdem noch für Rot empfindlich, nennt man sie *panchromatisch*.

Den Zusammenhang zwischen den vom Objektdetail kommenden Helligkeitsabstufungen und den Schwärzungen der Schicht gibt die *Schwärzungskurve*. Man erhält sie, wenn man die Schwärzung in Abhängigkeit von den Logarithmen der *Belichtung* (Produkt aus der auf die Schicht treffenden Beleuchtungsstärke und der Belichtungszeit) graphisch darstellt (Abb. 9). Die logarithmischen Werte der Belichtung sind nämlich den vom Auge empfundenen Helligkeitsunterschieden proportional. Der mittlere Teil der Schwärzungskurve verläuft nahezu geradlinig. Der tan-Wert der Steigung dieses geradlinigen Stückes ist die Gradation γ . Bei $\gamma = 1$ ($\alpha = 50^\circ$) wird das Verhältnis der Helligkeitswerte richtig wiedergegeben. Bei flacher Gradation, $\gamma < 1$, erhält man ein „weiches Bild“ mit verringerten Kontrasten, bei steiler Gradation, $\gamma > 1$, ein „hartes Bild“ mit übertriebenen Kontrasten.

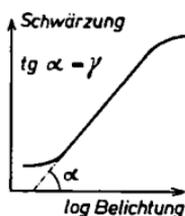


Abb. 9.
Gradation γ .

Während die Helligkeitsunterschiede im Bildbereich bei terrestrischen Aufnahmen im Regelfall im Verhältnis 30 : 1 und größer stehen, ist bei Luftbildern der auf die Schicht einwirkende Helligkeitsumfang wesentlich kleiner. Er sinkt mit zunehmender Flughöhe. Um trotzdem in Luftbildern feinste Tönungsunterschiede erkennen zu können, muß man eine um so steilere Gradation anstreben, je größer die Flughöhe ist, z. B. $\gamma = 2$. Darauf hat man Emulsion, Entwickler und Entwicklungsdauer abzustimmen.

Der geringe Helligkeitsumfang von Luftbildern ist vornehmlich durch das Streu- oder *Luftlicht* verursacht, das sich dem vom Gelände kommenden Licht überlagert. Es entsteht durch diffuse Reflexion des Sonnenlichts an den feinen Staub- und Wasserteilchen der zwischen Flugzeug und Gelände liegenden Luftschicht. Man sieht also vom Flugzeug aus den Erdboden durch einen bläulichen, kontrastmindernden Schleier.

Zur Zurückhaltung des kurzwelligen Blaulichts bei der Aufnahme sind *Filter* notwendig. Bei Luftaufnahmen mit panchromatischen Emulsionen werden Gelb- oder Orange-Filter verwendet, z. B. das Zeiss-Filter *D*, das nur Licht mit größerer Wellenlänge als $0,53 \mu$ — also die Rot-, Orange- und Gelb-Strahlung — durchläßt.

Die photographischen Emulsionen müssen zur Trennung benachbarter Bildpunkte ein hohes *Auflösungsvermögen* besitzen. Das A.V. der Schicht ist um so höher, je feinkörniger die Emulsion ist. Andererseits sinkt aber mit abnehmender Korngröße die Allgemeinempfindlichkeit der Schicht. Für Luftaufnahmen ist daher wegen der notwendigen kurzen Belichtungszeiten ein Kompromiß zwischen den Forderungen nach Feinkörnigkeit und hoher Allgemeinempfindlichkeit notwendig. Für terrestrische Geländeaufnahmen werden dagegen in der Regel sehr feinkörnige Emulsionen verwendet, die wegen ihrer geringen Empfindlichkeit lange Belichtungszeiten erfordern.

Spezielle, für Luftaufnahmen geeignete Emulsionen tragen u. a. die Filmsorten Perutz Pervola mit 20 bzw. Pervola-Rapid mit 25 DIN Empfindlichkeit sowie Kodak Double-X Aerographic und Gevaert Aviphot Pan je mit etwa 21 DIN Empfindlichkeit. Für terrestrische Aufnahmen werden vorwiegend hervorragend feinkörnige Topo-Emulsionen mit etwa 4 DIN oder Silbereosinplatten von Perutz mit 12 DIN Empfindlichkeit und breitem Belichtungsspielraum verwandt.

Die *Schichtträger* der Emulsionen (Film oder Glas) müssen maßhaltig sein, um das durch die Meßkammer erzeugte, weitgehend verzeichnungsfreie Bild nicht zu verfälschen. Verzerrungen sind hauptsächlich bei *Film* zu befürchten. Man hat zu unterscheiden:

- a) Maßstäbliche Filmschrumpfungen; sie sind ungefährlich, weil sie bei der Bildauswertung leicht berücksichtigt werden können;
- b) Affinitäten, d.h. Maßstabsunterschiede in der Längs- und Querrichtung des Films; sie bleiben bei sachgemäßer Filmbehandlung unter 0,4‰;
- c) großflächige Filmdeformationen, z. B. infolge ungleichmäßiger Klimateinwirkung;
- d) lokale Störungen, u. a. durch Trocknungsfehler, z. B. ange-trocknete Wassertropfen;
- e) Fehler in der Ebenheit, d. h. Filmbuckel oder Aufwölbungen durch unzureichendes Anliegen des Films in der Anlegeebene.

Um die Filmfehler klein zu halten, muß man, insbesondere beim Aufnahme- und beim Trocknungsvorgang, ungleichmäßige Klimabedingungen und unregelmäßige Einwirkungen mechanischer Kräfte zu vermeiden trachten*).

Bei der Auswertung wird der Bildinhalt üblicherweise durch Vorgänge, die einer ebenen Koordinatentransformation entsprechen, auf Punkte eingepaßt, deren Sollage bekannt ist, sog. *Paßpunkte*. Unter dieser Voraussetzung kann der aus den Filmfehlern insgesamt folgende mittlere Lagefehler in einer beliebigen Richtung zu

$$m_{[\text{mm}]} = \pm 0,006 B; \quad B = \text{mittlere Seitenlänge des ausgemessenen Formats in dm}$$

angenommen werden (vgl. Fußnote), wenn es sich, wie bis vor kurzem allgemein üblich, um Filmmaterial auf Zellulose-Azetat-Basis handelt. Neuerdings wird als Filmbasis vielfach der Kunststoff Polyester benutzt, der wesentlich weniger temperatur- und feuchtigkeitsempfindlich ist als die älteren Filmbasen und daher eine größere Maßhaltigkeit gewährleistet. Filme auf Poly-

*) Vgl. M. Ahrend, Zur Wahl des Schichtträgers bei Luftbildaufnahmen, Deutsch. Geod. Komm., Reihe C, Heft 23, München 1957.