

ÜBER DIE GEOMETRISCHE GENAUIGKEIT VON LUFTBILDKAMMERN

von H.-K. Meier, Oberkochen

1. Einleitung

In der Photogrammetrie spielt die Zentralperspektive eine fundamentale Rolle. Abweichungen der physikalischen Wirklichkeit von diesem mathematischen Modell müssen jedoch keineswegs immer bekannt sein. Es genügt durchaus, die Verfahren der Auswertung so anzulegen, daß derartige Abweichungen ihren Einfluß auf das Meßergebnis wieder verlieren; über Größe und Ursache müssen dabei keinerlei Kenntnisse vorliegen. Das Porro-Koppe'sche Prinzip der Messung durch Umkehr des Aufnahmeprozesses ist hierfür ein elegantes Beispiel; ein weiteres aus neuerer Zeit ist die automatische Kompensation systematischer Fehler durch Selbstkalibrierung.

Die Bemühungen um Genauigkeitssteigerung können damit von zwei Seiten geführt werden; von der instrumentellen Seite um bestmögliche Annäherung der physikalischen Wirklichkeit an das mathematische Ideal, sowie die bestmögliche Ermittlung der unvermeidlichen Restabweichungen; von der verfahrenstechnischen Seite um Auswahl von Techniken, deren Einsatz den Einfluß dieser Restabweichungen auf das Endergebnis nach Kräften eliminiert.

Im folgenden soll von ersteren Bemühungen die Rede sein; es wird über die Geometrie moderner Hochleistungsobjektive, sowie deren Ermittlung durch Kalibrierung berichtet. Die Ergebnisse aber werden mit empirisch gefundenen Fehlerstrukturen verglichen und vermuteten Ursachen nachgegangen.

2. Die Kalibrierung von Luftbildkamern

Kalibrieren heißt, mit einem Standard vergleichen. Der Standard in der Photogrammetrie ist die Zentralperspektive. Das wesentlichste Ergebnis ist die Verzeichnung als Abweichung von diesem Ideal. In DIN 18716 [8] ist definiert:

"Die Verzeichnung wird allein bestimmt durch die Eigenschaften der Kammer (das ist die feste Verbindung von Objektiv und Rahmenebene). Soll in einem Bild die Gesamtheit aller von Objektiv, Filter, Verschuß, Kammerkonstruktion, Emulsionsträger, Aufnahmeanordnung u. a. m. abhängigen Abweichungen vom Tangensgesetz bezeichnet werden, so wird von Verbildung gesprochen."

Im photogrammetrischen Sprachgebrauch wird hierfür auch häufig die Bezeichnung "Bildefformation" verwendet. Zwischen Verzeichnung und Verbildung muß also klar unterschieden werden.

Weitere Ergebnisse der Kalibrierung sind

- die Kammerkonstante c ,
- die Abweichung des kollimierten Bildhauptpunktes vom Symmetriepunkt *) Δs ,
- die Bildmarkenabstände x, y .

2.1. Genauigkeitsmaße aus Vergleichskalibrierungen

Die Literatur zum Thema "Kalibrierung von Meßkamern" ist sehr groß; im Gegensatz hierzu jedoch die Zahl der Prüflabors, in denen routinemäßig kalibriert wird und welche deshalb über entsprechende Erfahrungen verfügen, verschwindend klein. Vergleichsmessungen zu den bekanntesten dieser Labors wurden für die nachfolgende Betrachtung herangezogen. Es waren dies:

- NBSt: U.S. Department of Commerce
National Bureau of Standards, Washington
- NRC: National Research Council
Applied Physics Division, Ottawa/Canada
- USGS: United States Department of the Interior
Geological Survey
Topographic Division, Branch of Research
and Design

Die eigenen Messungen wurden ausgeführt von

- CZ: Zentrale Prüfteilung
Fa. Carl Zeiss, Oberkochen [12].

*) Die Bezeichnung Symmetriepunkt ist in DIN 18716 nicht enthalten.

Für die durch Kalibrierung gewonnenen Parameter machen diese Labors in ihren Protokollen die in Tab. 1 zusammengestellten Angaben. Danach liegen die Genauigkeiten für

die Kammerkonstante zwischen ± 3 und $\pm 20 \mu\text{m}$

sowie

die Verzeichnung zwischen ± 2 und $\pm 5 \mu\text{m}$.

T a b e l l e 1

	N B S T	N R C	U S G S	C Z
Meßmethode	Photographisch auf Microflat, 1,4" dick	Photographisch mit interferometrischer Ebenheitskontrolle	Photographisch auf Microflat, 1,4" dick	visuell
^c letzte Einheit Genauigkeit	0,01 mm accurate within 0,02 mm	0,001 mm $\pm 0,003$ mm 99% confidence	0,01 mm accurate within 0,02 mm	0,01 mm $m = \pm 0,02$ mm
^v letzte Einheit Genauigkeit	0,001 mm accurate within 0,005 mm	0,001 mm $\pm 0,003$ mm 99% confidence	0,001 mm accurate within 0,005 mm	0,001 mm $m = \pm 0,002$ mm
Δs letzte Einheit Genauigkeit	keine Angabe	0,01 mm $\pm 0,01$ mm 99% confidence	keine Angabe	0,001 mm keine Angabe
^{x, y} letzte Einheit Genauigkeit	0,001 mm accurate within 0,01 mm	0,01 mm $\pm 0,01$ mm 99% confidence	0,001 mm accurate within 0,005 mm	0,01 mm $m = \pm 0,02$ mm

T a b e l l e 2

	NBST-CZ	A NRC-CZ	USGS-CZ	B CZ-CZ
c:	$m_c = \pm 7 \mu\text{m}$			$\pm 2 \mu\text{m}$
v: Mittelwerte aus 4 Radien $m_v =$	$\pm 1,5 \mu\text{m}$	$\pm 1,2 \mu\text{m}$	$\pm 1,5 \mu\text{m}$	$\pm 0,5 \mu\text{m}$
Einzelwerte in den 4 Radien ohne $m_v' =$ nach $m_v'' =$	$\pm 2,7 \mu\text{m}$ $\pm 2,2 \mu\text{m}$	$\pm 2,1 \mu\text{m}$ $\pm 1,4 \mu\text{m}$	$\pm 4,0 \mu\text{m}$ $\pm 1,8 \mu\text{m}$	$\pm 0,9 \mu\text{m}$ $\pm 0,8 \mu\text{m}$
Korrektur der Bezugspunktabweichung				
Δs :	$m_{\Delta s} = \pm 10 \mu\text{m}$			$\pm 1 \mu\text{m}$
x, y:	$m_{x,y} = \pm 8 \mu\text{m}$			$\pm 5 \mu\text{m}$

Eine Anzahl von RMK A 15/23 mit Zeiss-Pleogon A2 5,6/153 bzw. A4/153 wurden bei CZ vor Auslieferung routinemäßig kalibriert und nach Erhalt von den Eigentümern vorschriftsgemäß den zuständigen nationalen Labors zur Prüfung vorgestellt. Die vergleichende Analyse dieser Ergebnisse (A) sowie Wiederholungsmessungen bei CZ (B) lieferten die Werte der Tab. 2. Danach liegen die Genauigkeiten im Mittel für

die Kammerkonstante bei $m_c = \pm 7 \mu\text{m}$

sowie

die Verzeichnung bei $m_v' = \pm 1,4 \mu\text{m}$

und $m_v'' = \pm 1,8 \mu\text{m}$.

Bei den Werten handelt es sich um mittlere Fehler der jeweiligen, aus den Prüfprotokollen entnommenen Angaben, errechnet aus Beobachtungsdifferenzen. Die Genauigkeit der Prüflabors wurde dabei als gleichgewichtig unterstellt. Bezüglich der Verzeichnung ist der Einfluß des Bezugspunktes von besonderer Bedeutung. Auf dieses Problem wird später noch gesondert eingegangen werden. Nach obigem kann festgestellt werden:

- a) Aus den Vergleichskalibrierungen ergeben sich Fehlermaße, die gut innerhalb der von den Prüflabors angegebenen liegen.
- b) Der Unterschied zwischen visueller und photographischer Kalibrierung liegt für die hier geprüften Objektive in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$, ist also gering. Gegenüber früheren Entwicklungen ist dies ein echter Fortschritt [4].

2.2. Restverzeichnung moderner Hochleistungsobjektive

Moderne Hochleistungsobjektive sind das Ergebnis ständiger Verbesserungen durch die optischen Rechenbüros [11]. Um die Ergebnisse dieser Bemühungen bezüglich der Verzeichnung zahlenmäßig zu erfassen, wurden für den Zeitraum 1965 - 1972 drei Entwicklungsstufen des Standard-Weitwinkelobjektivs Pleogon A ausgewählt und für jeweils 30 Einzel Exemplare für jede Bildhöhe die mittlere Verzeichnung (Mittel der vier Radien) aus den Abnahmeprotokollen zur mittleren Verzeichnung des jeweiligen Objektivtyps gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt. Aus dieser mittleren Typenverzeichnung wurde sowohl der quadratische Mittelwert als auch die mittlere quadratische Streuung der Einzel exemplare gegen das Typenmittel errechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 nochmals zusammengefaßt. Danach liegt die mittlere Verzeichnung des neuesten Objektivs (Pleogon A4/153) bei $+ 0,7 \mu\text{m}$ mit einer Streuung der Einzelobjektive um das Typenmittel von $\pm 1,6 \mu\text{m}$. In der mittleren quadratischen Verzeichnung des jeweiligen Objektivtyps drückt sich der theoretische Fortschritt der optischen Korrektur aus. Man sieht, daß die typische Restverzeichnung unserer Hochleistungsobjektive unter die $1 \mu\text{m}$ -Grenze herabgedrückt werden konnte.

In der mittleren quadratischen Streuung gegen die Typenmittel kommt demgegenüber die fertigungstechnische Leistung zum Ausdruck. Man sieht, daß auch hier Fortschritte erzielt wurden, daß aber mit $1,5 \mu\text{m}$ eine Grenze erreicht ist, die offenbar nicht ohne weiteres unterschritten werden kann.

Zum Vergleich sind in Tab. 3 bzw. Abb. 2 noch die entsprechenden Daten für Objektive unterschiedlicher Bildwinkel gegenübergestellt (Überweitwinkel = 125° , Weitwinkel = 93° , Normalwinkel = 56°). Während die Werte für Normal- und Weitwinkel in etwa identisch sind, zeigen die Überweitwinkelobjektive sowohl in der mittleren Typenverzeichnung als auch in der Streuung etwa doppelt so große Restfehler. Dies ist nicht verwunderlich, sondern entspricht ganz dem anspruchsvollen Aufbau dieser Systeme.

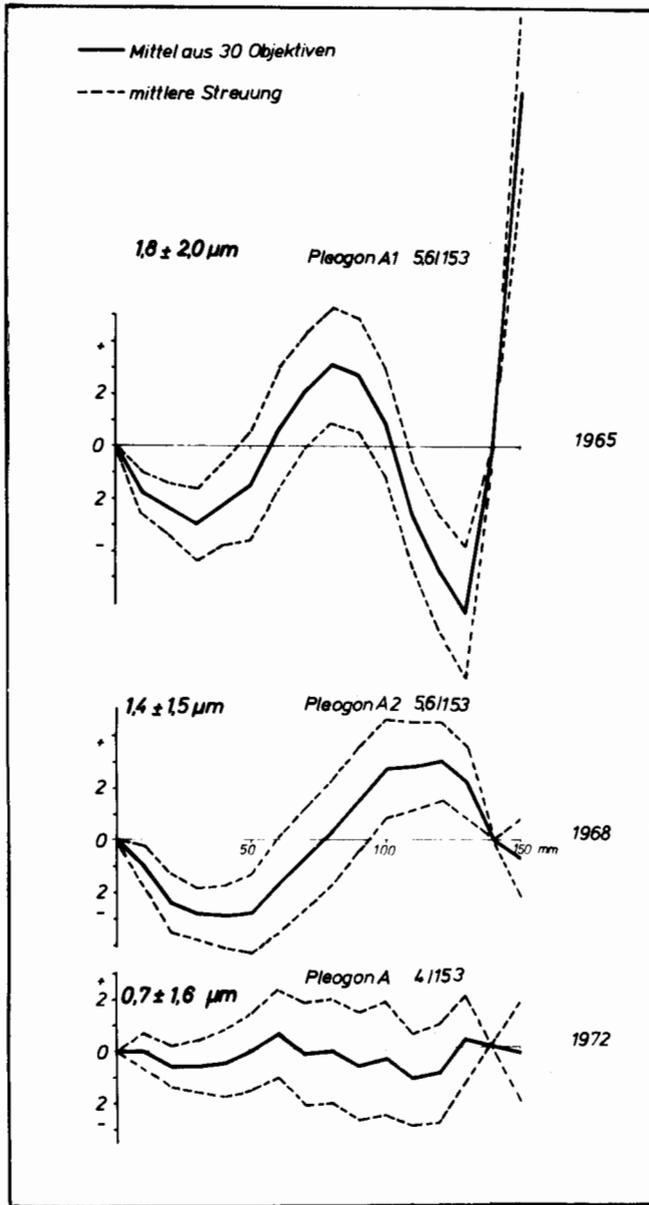


Abb. 1 Verzeichnung der Pleogonreihe

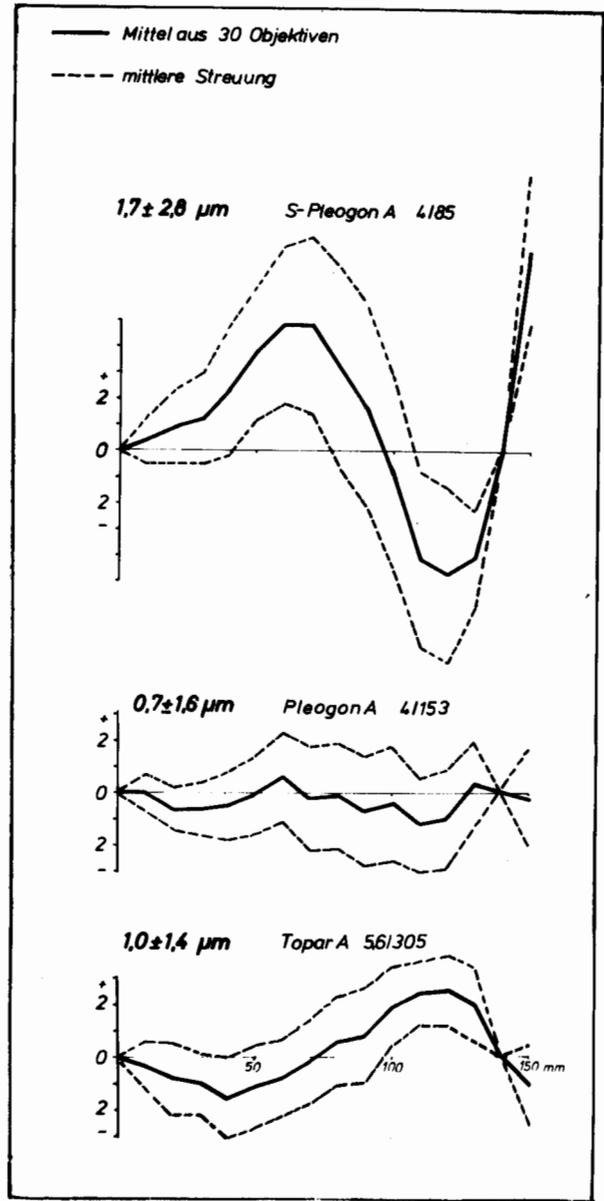


Abb. 2 Verzeichnung der Zeiss-Objektive
UWW/WW/NW

Tabelle 3

Objektivtyp	Entwicklungsstand	Mittlere Verzeichnung des Objektivtyps	Mittlere Streuung der Einzelobjektive gegen das Typenmittel
Pleogon A 1 1:5,6 f=153	1965	+ 1,8 μm	+ 2,0 μm
Pleogon A 2 1:5,6 f=153	1968	+ 1,4 μm	+ 1,5 μm
Pleogon A 1:4 f=153	1972	+ 0,7 μm	+ 1,6 μm
zum Vergleich:			
S-Pleogon A 1:4 f= 85 (125°)	1968	+ 1,7 μm	+ 2,8 μm
Pleogon A 1:4 f=153 (95°)	1972	+ 0,7 μm	+ 1,6 μm
Topar A 1:5,6 f=305 (56°)	1964	+ 1,0 μm	+ 1,4 μm

2.3. Probleme der Kalibrierung

Im Zusammenhang mit der geschilderten Verzeichnungsreduktion sind zwei Probleme aufgetaucht, von denen eines - die Wahl des Bezugspunktes - bereits kurz angesprochen wurde. Ein weiteres ist die sog. tangentielle Verzeichnung. Bisher war unter Verzeichnung stets von der radialen Komponente des Verzeichnungsvektors die Rede, im Abschnitt 2.32 soll deshalb der Gesamtkomplex behandelt werden.

2.3.1. Einfluß und Bedeutung des Bezugspunktes

Die radiale Verzeichnung wird in der Regel in den vier Radien der Bilddiagonalen gemessen und dabei in Übereinstimmung mit den "Recommended Procedures for Calibrating Photogrammetric Cameras ...!" [6] auf den kollimierten Bildhauptpunkt bezogen, da sich dieses meßtechnisch leicht durch Autokollimation realisieren läßt.

Eine erste Schwierigkeit ergibt sich hierbei aus der Genauigkeit. Abweichungen in der Kollimation gehen z. B. bei Weitwinkelobjektiven bei einer Bildhöhe von 153 mm, d. h. 45° Bildwinkel, voll in die radiale Verzeichnung ein, und zwar in der Diagonalen dieser Abweichung für deren Einzelradien gegenläufig. Die Mittelwerte aus den vier Radien und deren Fehlermaße m_V (Tab. 2) enthalten deshalb diesen Einfluß nicht mehr. Aus den Einzelwerten der vier Radien bei Vergleichskalibrierungen (m_V') kann jedoch der Unterschied in den Bezugspunkten errechnet werden. Die Genauigkeitsangabe für Δs ($m_{\Delta s} = + 10 \mu\text{m}$) in Tab. 2 wurde so errechnet. Es wurden außerdem neue radiale Verzeichnungswerte für die vier Radien - bezogen auf einen einheitlichen Bezugspunkt - ermittelt. Die Fehlermaße m_V aus diesen Einzelwerten sind also frei vom systematischen Einfluß des Bezugspunktes. Es verbleibt jedoch die Tatsache, daß unterschiedliche Prüflabors trotz gleicher Definition den Bezugspunkt durch Kollimation doch nicht so genau realisieren können, wie es die Restverzeichnung moderner Hochleistungsobjektive erfordern würde. (Radiale Restverzeichnung $\pm 1 \mu\text{m}$, Einfluß des Bezugspunktes $\pm 10 \mu\text{m}$).

Diese Betrachtung führt zu dem grundsätzlichen Problem der Bezugspunktdefinition; DIN 18716 [B] und die seinerzeitigen Fachveröffentlichungen [10], [14] und [15] spiegeln die Schwierigkeiten deutlich wieder. In der mathematischen Definition ist der Bildhauptpunkt "der Fußpunkt des Lotes vom Projektionszentrum auf die Bildebene", in der physikalischen "der Durchstoßungspunkt desjenigen Hauptstrahles durch die Bildebene, dessen objektivseitiger Teil - geradlinig verlängert - senkrecht auf der Bildebene steht". Abb. 3 versucht die Verhältnisse zu verdeutlichen. Nur der mathematisch definierte Hauptpunkt gewährleistet Rotationssymmetrie, doch nur der physikalisch definierte läßt sich (durch Kollimation) realisieren. Es läßt sich nur feststellen, wo die geradlinige Verlängerung des objektivseitigen Hauptstrahles durch das Objektiv hindurch senkrecht auf der Bildebene steht, nicht aber wo dies dieser Hauptstrahl selbst bildseitig tut.

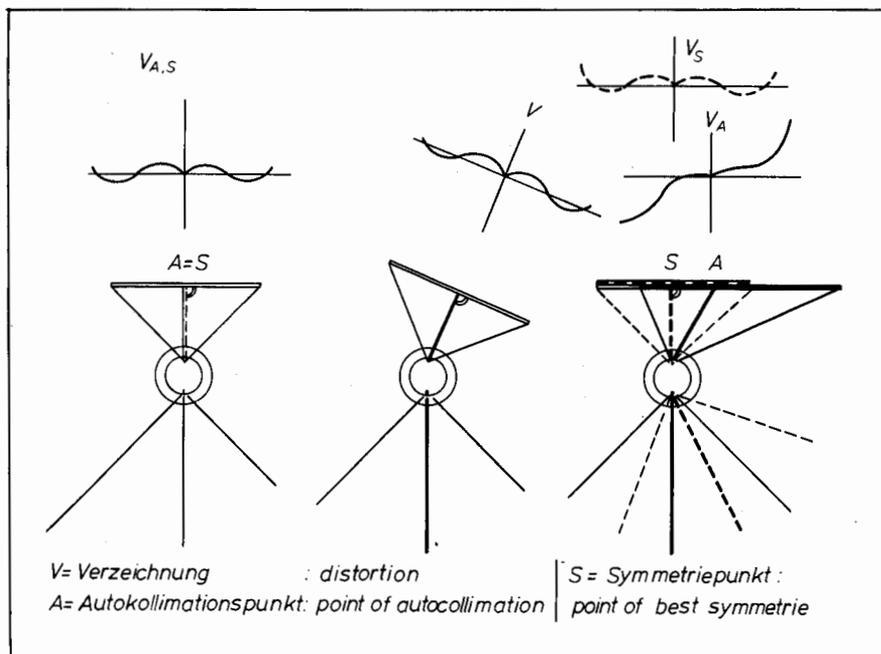


Abb. 3 Einfluß des Referenzpunktes auf die radiale Verzeichnung

Wird die bildseitige Zentralperspektive durch das Objektiv gegenüber der objektivseitigen geringfügig gedreht, aber insgesamt unverändert gelassen, so ergibt sich unsymmetrische (radiale) Verzeichnung, da der gewählte Bezugspunkt vom mathematisch definierten Hauptpunkt abweicht. Es wird ein Fehler vorgetäuscht, obwohl die Zentralperspektive durch die Drehung unverändert geblieben ist.

Dies führt zu dem Vorschlag, einen Symmetriepunkt zu definieren und die radiale Verzeichnung auf diesen zu beziehen. Für die Auswertung steht dieser Punkt zwar nicht zur Verfügung, aber der Hauptpunkt auch nicht, sondern lediglich der Bildmittelpunkt (Schnittpunkt der Bildmarken-Verbindungslinien) und dieser auch nur mit der Genauigkeit, mit welcher er, z. B. durch Zentrieren auf die Strichkreuze der Bildträger, rekonstruiert werden kann. Der Einfluß der Ablage des Symmetriepunktes von diesem "Bezugspunkt der Auswertung" wird nahezu vollständig bei der Orientierung durch Bildneigungen kompensiert. Die Verzeichnung - bezogen auf den Symmetriepunkt - zeigt den eigentlichen "Charakter" des Objektivs, und zwar sowohl bezüglich der radialen Verzeichnung selbst, als auch seiner Symmetrie, am unverfälschtesten. Eine derartige Darstellung der Objektivcharakteristik könnte vervollständigt werden durch Angaben zur Haupt- und Symmetriepunktlage im Bildkoordinatensystem. Bei einer zukünftigen Überarbeitung der ISP "Recommendations ..." /6/ sollte diese Frage nochmals diskutiert und überprüft werden.

2.3.2. Tangentiale Verzeichnung

In DIN 18716 ist die Verzeichnung als radiale Abweichung von der Zentralperspektive definiert, über die tangentielle ist demgegenüber nichts ausgesagt. Objektive bestehen aus mehr oder weniger vielen Einzellinsen, jede von ihnen durch zwei Kugelflächen begrenzt. Bei der Montage werden die Krümmungsmittelpunkte dieser Flächen bestmöglich in einer Geraden, der optischen Achse (Symmetrieachse) des Objektivs, "aufgefädelt". Abweichungen vom angestrebten Ideal sind - obwohl die Arbeiten mit höchster Präzision ausgeführt werden - auch hier unvermeidlich, es entsteht Verzeichnung und zwar vektoriell mit einer radialen und einer tangentialen Komponente. Die tangentielle Komponente ist dabei senkrecht zum Radialabstand Bildpunkt - Bildhauptpunkt gerichtet. Die Relation zwischen Dezentrierung und Verzeichnung wird im 3. Abschnitt untersucht. Hier muß festgestellt werden, daß es - trotz vieler Versuche - Anordnungen, die die tangentielle Verzeichnung entsprechend der radialen genau genug zu messen gestatten, bisher nicht gibt. Auswertungen von Testfeld- oder Sternaufnahmen liefern definitionsgemäß Verbildungen oder Bilddeformationen, nicht aber die Verzeichnung als Anteil der Kammer allein. Labormessungen, mit denen dieser Anteil eliminiert werden könnte, hatten bisher nur orientierenden Charakter. Das Problem liegt einmal in der sehr kleinen tangentialen Verzeichnung moderner Hochleistungsobjektive und der damit erforderlichen, für Raumwinkel nicht realisierbaren hohen Genauigkeit, zum anderen aber wiederum im Bezugspunkt.

3. Optische Dezentrierungen

3.1. Ihr Einfluß auf Bild und Modell

Auf die radiale Verzeichnung, ihre bei modernen Hochleistungsobjektiven geringe Größe und die hohe Genauigkeit ihrer Ermittlung durch Kalibrierung wurde bereits ausreichend hingewiesen; die Problematik der tangentialen Verzeichnung wurde angedeutet. Es liegt nahe, als Ursache tangentialer Verzeichnung Dezentrierungen im Objektiv zu vermuten. Das Zeiss Pleogon A 4/153 wurde daraufhin rechnerisch speziell untersucht. Eine Anzahl von Flächen wurde um jeweils 1' dezentriert, die Verzeichnung sowie die daraus resultierenden Modelldeformationen nach Lage und Höhe berechnet. Für die empfindlichste Fläche zeigt Abb. 6a die radiale und tangentielle Verzeichnung und Abb. 6b die daraus entwickelten Bilddeformationen. Aus diesen Bilddeformationen wurden mit Hilfe der Stuttgarter Rechenprogramme Modelldeformationen gerechnet. (Abb. 7) Zur Wertung dieser Ergebnisse muß folgendes beachtet werden:

1. Optische Flächen können in Hochleistungsobjektiven mit einer Genauigkeit $< 5''$ zentriert werden.
2. Bei Dezentrierung einer Fläche entsteht radiale und tangentielle Verzeichnung; die tangentielle selten gleich der radialen, meistens deutlich kleiner; sie erreicht häufig nur 1/3 der radialen.
3. Dezentrierungen können in jeder beliebigen Richtung auftreten, spezielle Vorzugsrichtungen gibt es nicht. Die Modelldeformationen können deshalb ganz unterschiedliche Formen zeigen.

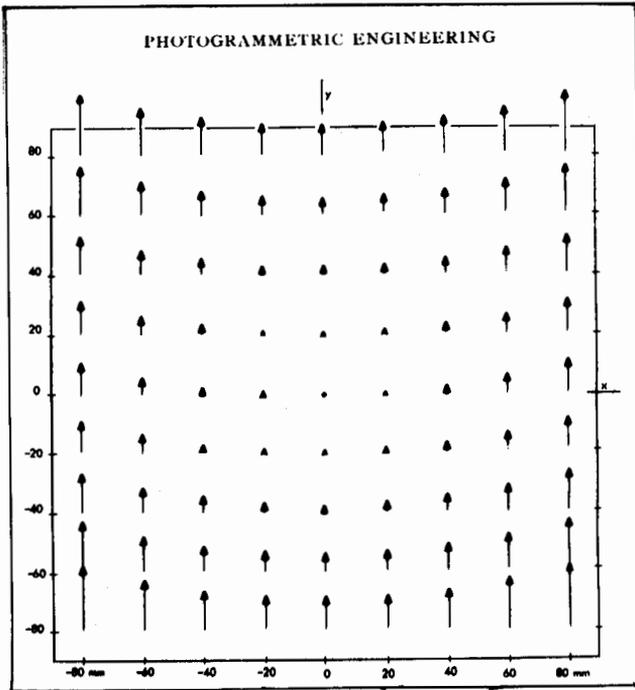


Abb. 4a Thin Prism Distortion
 D. Brown 1966

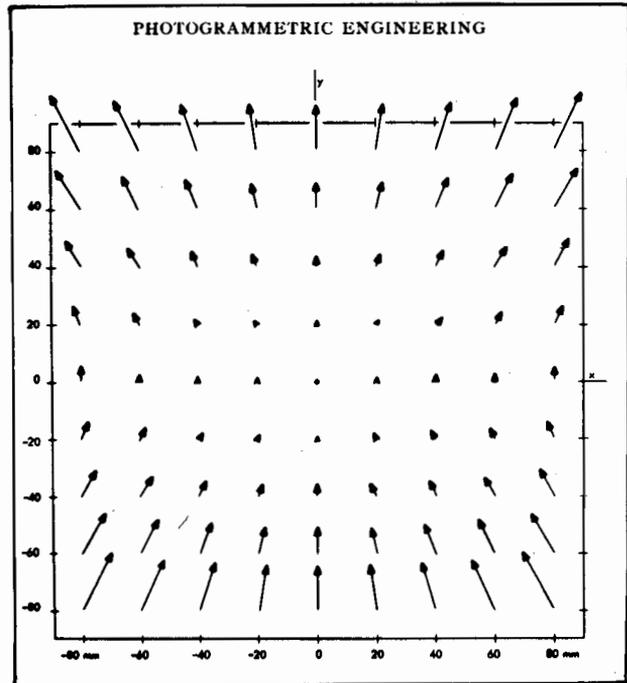


Abb. 4b Conrady's Model Distortion
 D. Brown 1966

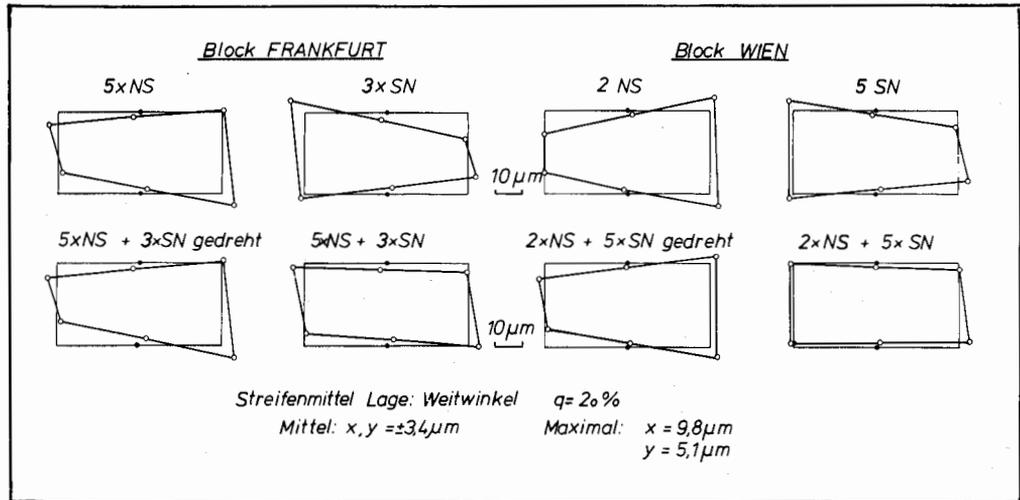


Abb. 5a

Systematische Modellfehler nach
 Blockausgleichung unabhängiger
 Modelle (OEEPE Oberschwaben)
 nach M. Schilcher, Stuttgart

Abb. 5b

Systematische Modellfehler in der Höhe
 (OEEPE Oberschwaben)
 nach M. Schilcher, Stuttgart

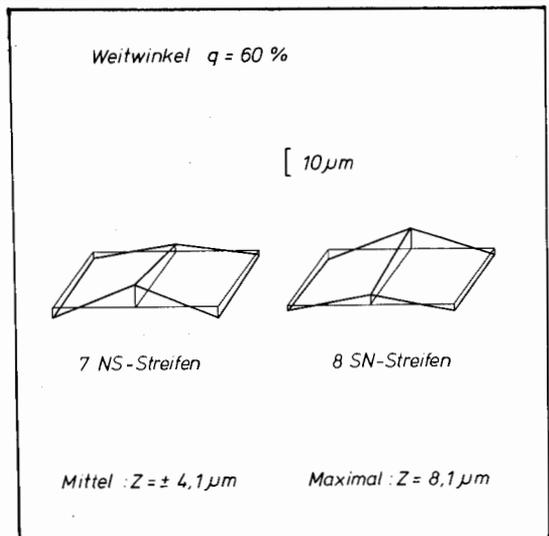


Abb. 6a

Verzeichnung
 durch Dezentrierung
 Pleogon A 4/153

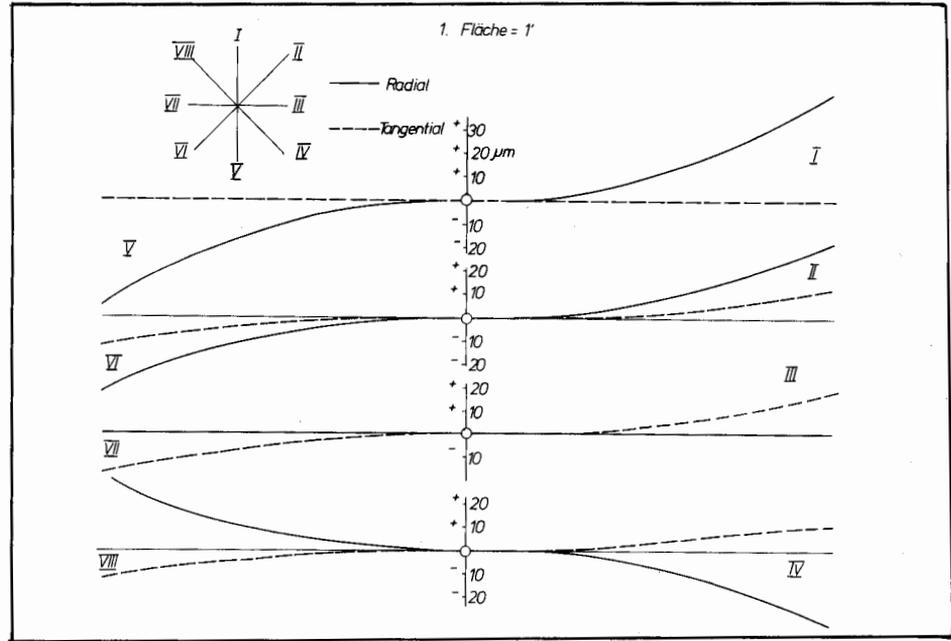


Abb. 6b

Gitter-Verzeichnung durch
 Dezentrierung

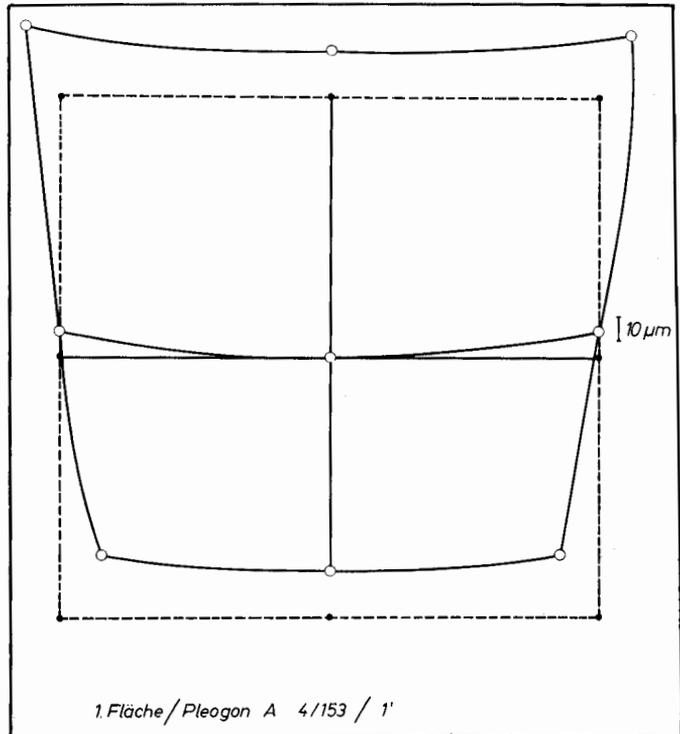
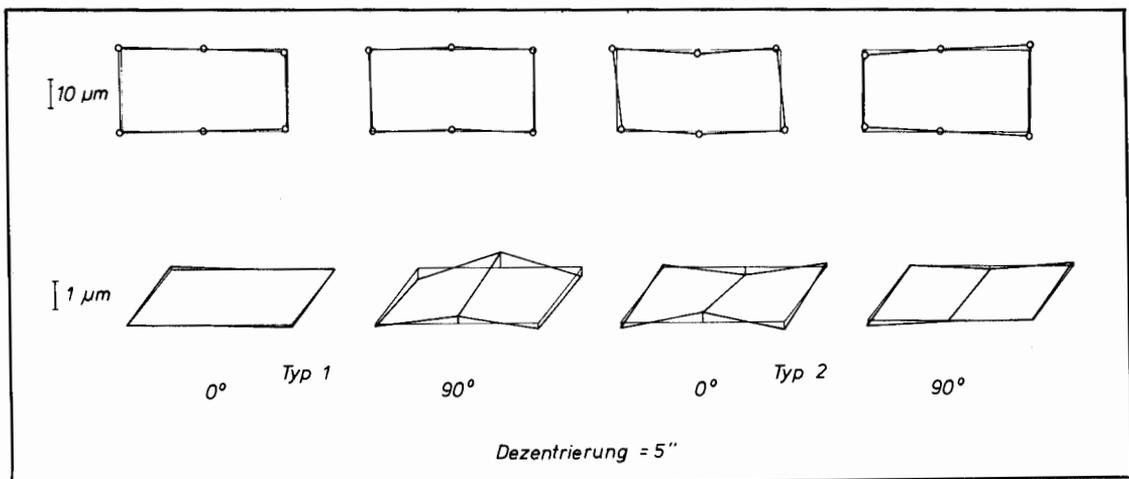


Abb. 7

Modelldeformationen durch Dezentrierung
 von optischen Flächen



Zusammenstellung der Ergebnisse:

Bei einer Dezentrierung von 5" ergeben sich folgende Werte:

	Maximal	Mittel
Verzeichnung: Radial	3,8 μm	1,3 μm
Tangential	1,3 μm	0,5 μm
Koordinatenfehler: im Bild		
x', y'	2,7 μm	1,6 μm
im Modell		
x, y	0,8 μm	0,5 μm
z	0,5 μm	0,3 μm

Folgendes ist zu beachten:

- Die Modelldeformationen in der Lage haben ganz unterschiedlichen Charakter, ganz abhängig vom Azimut/Richtung der Dezentrierung.
- Die Höhenfehler sind deutlich kleiner als die Lagefehler.
- Der Charakter der Modelldeformationen in der Höhe ist ebenfalls unterschiedlich in Abhängigkeit von der Richtung der Dezentrierung.

3.2. Frühere Untersuchungen

Erst nachdem unsere eigenen Untersuchungen die vorstehend mitgeteilten Ergebnisse gezeitigt hatten, fanden wir Zeit, uns in der Literatur nach entsprechenden Untersuchungen umzuschauen. Es fand sich eine erstaunliche Vielfalt: [77], [57], [187], [37]. Die Arbeit von Duane Brown [37] faßt die gesammelten Erkenntnisse gründlich zusammen und zieht Schlüsse bezüglich der Berücksichtigung von Dezentrierungseinflüssen bei Ballistischen Messkammern.

Brown beginnt seine Untersuchung mit dem

Thin Prism Model: Dieses Modell geht davon aus, daß die durch Dezentrierung entstehende Verzeichnung simuliert werden kann durch ein dünnes Prisma vor einem idealen Objektiv. Dieses Modell war in der photogrammetrischen Literatur vielfach benutzt worden. Die ihm entsprechenden Bilddeformationen zeigt Abb. 4a.

Demgegenüber wenig bekannt und benutzt war bis dahin Conrady's Model geblieben. Conrady hatte 1919 eine strenge Ableitung der Formeln für die Strahlenablenkungen bei Dezentrierungen innerhalb des Objektivs geliefert. Die diesem Modell entsprechenden Bilddeformationen zeigt Abb. 4b. Man erkennt, daß diese Deformationen sehr gut mit den für das Pleogon gezeigten übereinstimmen. Brown vergleicht beide Modelle miteinander und kommt zu folgenden Schlüssen:

- 1a) Bezüglich der tangentialen Verzeichnung liefern beide Modelle das gleiche Ergebnis.
- b) Bezüglich der radialen Komponente liefert Conrady's Model 3x größere Werte. Beseitigt man jedoch solche Anteile, die durch Bezugspunktverschiebung und Kammerneigung beschrieben werden können, so sind beide Modelle wieder projektiv gleich.
2. Conrady's Model liefert für die radiale Verzeichnung etwa 3x größere Werte als für die tangentiale.
3. Durch projektive Kompensation mittels Bezugspunktverschiebung und Kammerneigung wird der größte Teil der radialen Verzeichnung eliminiert. Danach ist die tangentiale Komponente 1,7x größer als die radiale.

Ein Vergleich dieser Schlüsse mit den von uns in strenger Durchrechnung eines speziellen Objektivs, nämlich des Pleogon A4/153 gewonnenen Ergebnisse zeigt gute Übereinstimmung:

- a) Die Bilddeformationen D. Brown's nach Conrady's Model sind weitgehend deutlich mit den für das Pleogon gefundenen.
- b) Das Verhältnis Radial:Tangential = 3:1 stimmt ebenfalls überein. Allerdings darf hier nicht verallgemeinert werden. Es gibt auch Flächen mit dem Verhältnis 1:1. Eindeutige Aussagen können nur für den speziellen Fall nach Toleranzrechnung gemacht werden.
- c) Übereinstimmung besteht auch in der Erkenntnis, daß die radiale Komponente durch Bezugspunktverschiebung bzw. Kammerneigung weitgehend eliminiert werden kann, während die tangentielle Komponente davon unberührt erhalten bleibt. Der für das Pleogon von uns gefundene Compensationseffekt war allerdings noch deutlich größer. Das Verhältnis Radial:Tangential betrug vor der Bezugspunktverschiebung 3:1, danach 0,3:1.

Ohne die mathematischen Modelle miteinander verglichen zu haben, kann also in den wesentlichen Aussagen gute Übereinstimmung konstatiert werden.

4. Empirisch ermittelte Verbildungen; ihre Größe und mögliche Ursachen

Auf die Tatsache, daß Verzeichnungsfreiheit bzw. vollständige Kenntnis der Verzeichnung nicht notwendige Voraussetzung für hohe photogrammetrische Genauigkeiten ist, wurde bereits einleitend hingewiesen. Durch moderne analytisch-numerische Verfahren sind die Möglichkeiten, systematische Fehler zu erfassen und zu kompensieren, außerordentlich verbessert worden [2], [9], [16]. So wurden in Stuttgart mit dem Material des OEEPE Projektes "Oberschwaben" Testblöcke ausgeglichen und für Weitwinkelaufnahmen Standardabweichungen der Modellkoordinaten von $\sigma = 6_0 - 7 \mu\text{m}$, d. h. hohe Genauigkeiten erreicht. Durch Einführung zusätzlicher Ausgleichsparameter zur Kompensation systematischer Modelldeformationen konnte diese ohnehin bemerkenswert hohe Genauigkeit auf $\sigma_0 = 4,2 \mu\text{m}$ gesteigert werden.

Über die Ursachen der Modelldeformationen war dabei nichts bekannt, über ihre Größe und charakteristischen Merkmale konnten jedoch klare Aussagen gemacht werden. Abb. 5 zeigt die trapezförmigen Modelldeformationen für Weitwinkelmodelle aus der Arbeit Schilcher [16] mit maximalen Koordinatenfehlern in den Modellecken in x und y von 10 bzw. 5 μm und in der Höhe von etwa 8 μm . Die quadratischen Mittelwerte betragen in x und y 3 - 4 μm und in der Höhe 4 μm . Folgende charakteristischen Merkmale wurden festgestellt:

- a) Die Modelldeformationen waren typisch, in der Lage trapezförmig, in der Höhe zylindrisch mit einer Durchbiegung in der Modellmitte und einer Modellneigung.
- b) Sie waren erstaunlich konstant und in ihrer Lage vollständig abhängig von der Flugrichtung.
- c) Sie zeigten für Weit- und Überweitwinkel den gleichen Deformationstyp.
- d) Die zylindrische Durchbiegung in der Höhe war für Weit- und Überweitwinkel typisch gleich und relativ groß.

Für die Genauigkeitssteigerung photogrammetrischer Auswertungen sind diese Feststellungen wichtig; insbesondere die hohe Konstanz und Abhängigkeit von der Flugrichtung ermöglichen bei entsprechendem Ansatz beträchtliche Genauigkeitssteigerungen. Über die Ursache der systematischen Modelldeformationen kann bisher wenig ausgesagt werden. Die nachfolgende Zusammenstellung weist einige Möglichkeiten aus, denen im folgenden orientierend nachgegangen werden soll.

Verzeichnung, d. h. Einfluß der Kammer (das ist die feste Verbindung zwischen Objektiv und Rahmenebene);

Verbildung, durch Andruckplatte,
Filmverzug,
Bildwanderung,
Refraktion, insbesondere in der Grenzatmosphäre der Flugzeugzelle.

4.1. Frage: Kommt als Ursache durch Dezentrierung erzeugte Verzeichnung in Betracht?

Antwort: Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen muß dies verneint werden.

Begründung:

- a) Die durch Dezentrierungen möglichen Lage- und Höhenfehler sind deutlich kleiner als die empirisch ermittelten.
- b) Den Deformationen durch Dezentrierung fehlt der typische Charakter der empirisch gewonnenen.
 Entweder die Lagedeformation ist nicht trapezförmig
 oder die Höhendeformation nicht dachförmig.
- c) Die Relation Lagefehler:Höhenfehler ist deutlich unterschiedlich. Bei Dezentrierung sind die Höhenfehler deutlich kleiner als die Lagefehler. Die empirisch gewonnenen Höhenfehler sind jedoch größer als die Lagefehler.

Wenn diese Überlegungen stimmen, so müssen andere Fehlerursachen - zumindest überwiegend - für die empirisch gewonnenen Deformationen verantwortlich zeichnen. Aus dem Katalog der möglichen Ursachen wurde der Einfluß von Andruckplatte und Filmverzug ausgewählt:

4.2. Frage: Wie groß ist die Verbildung durch Andruckplatte und insbesondere den Filmverzug?

Abb. 8 Restfehler aus Reseaumessungen
 (nach Ziemann 1967)

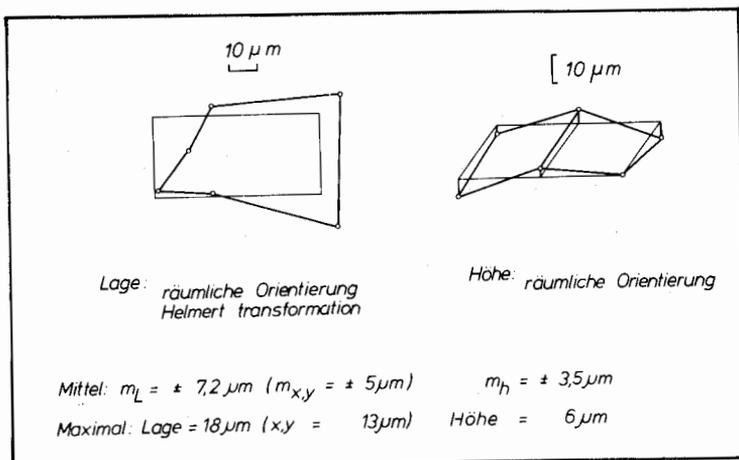
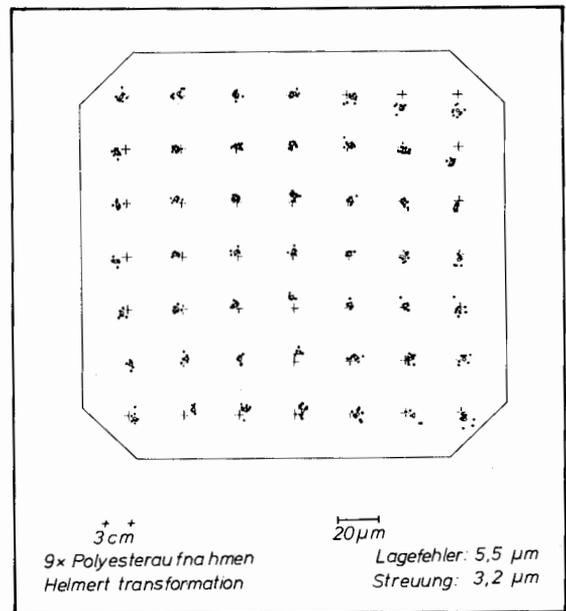


Abb. 9

Modelldeformationen aus Reseaumessungen
 (nach Ziemann 1967)

Zur Abtrennung der Verbildung durch Andruckplatte und Filmverzug können Reseau-Aufnahmen wertvolle Dienste leisten. Derartige Untersuchungen sind 1967 von Ziemann [19] ebenfalls in Stuttgart ausgeführt worden. Verglichen wurden die im Bildflug gewonnenen Reseau-Bilder mit ihrem Original. Nach Helmert-Transformationen zeigten die Restabweichungen in ihrer Systematik eine bemerkenswerte Konstanz. Abb. 8 macht dies deutlich.

Die hieraus resultierenden Modelldeformationen zeigt Abb. 9.

Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse kann festgestellt werden:

- a) Die Größenordnung der von Ziemann aus Reseaumessungen ermittelten Modelldeformationen stimmt mit den "Oberschwaben"-Deformationen gut überein. Insbesondere die Relation Lage:Höhenfehler.
- b) Auch der Charakter der Modelldeformationen
Lage = trapezförmig
Höhe = dachförmig
zeigt gute Übereinstimmung.

Die durch Reseaumessungen erkennbaren Verbildungen können sowohl durch Filmverzug als auch durch Unebenheiten der Andruckplatte verursacht sein. Beide Einflüsse können durch diese Methode nicht getrennt werden.

Bezüglich der Andruckplatte ist zunächst festzustellen, daß Unebenheiten nur radiale Verbildungen erzeugen können. Unebenheiten größer als $5 \mu\text{m}$ werden in der Produktion nicht toleriert. Eine statistische Untersuchung von ca. 500 Andruckplatten hat eine mittlere Unebenheit von $\pm 2,5 \mu\text{m}$ ergeben.

Der Filmverzug hat sich für den Photogrammeter zum offenbar unerschöpflichen Gegenstand von Genauigkeitsuntersuchungen entwickelt. Dies ist nicht verwunderlich, wenn die geringe Dicke des Filmes ($0,08 - 0,12 \text{ mm}$), die Probleme der Haftung zwischen Träger und Emulsion sowie die mit Entwickeln, Fixieren und Wässern verbundenen Feuchtigkeitsprobleme betrachtet werden. Unter diesem Gesichtspunkt gesehen sind die erreichten Genauigkeiten erstaunlich hoch.

4.3. Abschätzung weiterer Einflüsse

Als weitere mögliche Ursachen für Verbildungen war genannt: Bildwanderung und Refraktion in der Grenzatmosphäre der Flugzeugzelle. Über diese Einflüsse ist bisher so gut wie nichts bekannt.

Bildwanderung wird in der Regel nur in ihrem Einfluß auf die Bildqualität untersucht, bezüglich der Geometrie wurde ein solcher nicht vermutet. Tatsache ist jedoch, daß einerseits jedes Meßbild mit Bildwanderung von ca. $25 \mu\text{m}$ behaftet ist, andererseits systematische Fehler in der Größenordnung von $3 - 4 \mu\text{m}$ gesucht werden. Orientierende Untersuchungen wären sicherlich wertvoll.

Über den Einfluß der Grenzatmosphäre wissen wir ebenfalls wenig, die Abhängigkeit der gefundenen systematischen Fehler von der Flugrichtung könnte jedoch einen solchen vermuten lassen. Durch Mehrfachbefliegungen und Drehung der RMK in ihrer Aufhängung um 90° bzw. 180° sollte eine einfache Trennung von den unter 4.2. geschilderten Einflüssen versucht werden.

Zusammenfassung und Schluß

Moderne Hochleistungsobjektive haben mit radialen Restverzeichnungen von $1 - 2 \mu\text{m}$ mit Streuungen gegen das Typenmittel von $+ 1,5 \mu\text{m}$ einen hohen Grad von Verzeichnungsfreiheit erreicht. Die Meßgenauigkeit der Prüflabors liegt in der gleichen Größenordnung ($1,4 - 1,8 \mu\text{m}$). Unbefriedigend ist jedoch, daß die tangentiale Verzeichnung der direkten Messung nicht zugänglich ist. Man muß sich jedoch vor Augen führen, daß mit den heute realisierbaren Zentriergenauigkeiten die quadratischen Mittelwerte der tangentialen Verzeichnung $< 1 \mu\text{m}$ sind. Selbst wenn wir ein brauchbares Meßverfahren hätten, läge die tangentiale Verzeichnung noch unter der derzeitigen Nachweisgrenze für Verzeichnung.

Daß tangentielle Verzeichnung als Ursache empirisch ermittelter Modelldeformationen in Betracht zu ziehen ist, halte ich nach den vorstehenden Untersuchungen für unwahrscheinlich. Ihnen fehlt die Größe, insbesondere in der Höhe sowie der typische Charakter der "Oberschwaben"-Deformationen. Viel wahrscheinlicher ist demgegenüber als Ursache der Filmverzug. Weitere gezielt angelegte Bildflüge, insbesondere mit Reseaukammern, könnten weitere Erkenntnisse bringen. Nur mit solchen Kamern nämlich kann sauber zwischen Verzeichnung und Verbildung getrennt werden.

Inzwischen aber sollten wir uns unserer geodätischen Tugenden bedienen, nach denen man keineswegs alle Fehlerursachen kennen muß, um hohe Genauigkeiten zu erreichen. Das Geheimnis unserer Meßkunst liegt vielmehr darin, die Meßverfahren so auszuwählen und anzulegen, daß möglichst viele unbekannte Fehlerquellen wirkungslos gemacht werden.

Unsere Kollegen von der Numerischen Photogrammetrie sind hier mit ihren modernen Rechenverfahren bereits weit fortgeschritten.

Literatur:

- [1] ABDEL-AZIZ Y, J.: Asymmetrical Lens Distortion
Phot. Eng. and Remote Sensing March 75
- [2] Ackermann, F.: "Zusätzliche Parameter oder Interpolation"
Lehrgang "Numerische Photogrammetrie"
Technische Akademie Esslingen 1975
- [3] Brown, D. C.: Decentering Distortion of Lenses
Phot. Eng. 3/1966
- [4] Carman, P. D.: Differences Between Visual and Photographic
Brown, H.: Calibrations of Air Survey Cameras
Phot. Eng. 22/4 Sept. 1956
- [5] Carman, P. D.: Phot. Errors from Lens Decentering
JOSA Vol. 39 1949
- [6] Commission 1 Recommended Procedures For Calibrating
ISP: Cameras and For Related Optical Tests
Adopted: Sept. 1960
Reaffirmed: Sept. 1964
- [7] Conrady, A.: Decentered Lens Systems
Monthly Notices of the Royal Astronomic
Society Vol. 79 1919
- [8] DIN 18716: Begriffe, Benennungen und Formelgrößen in der
Photogrammetrie (Bildmessung)
März 1959
- [9] Ebner, H.: Automatische Kompensation systematischer Fehler bei
der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen
Lehrgang "Numerische Photogrammetrie"
Technische Akademie Esslingen 1975
- [10] Gotthardt, E.: Zur Frage der Definition des Bildhauptpunktes
und der Aufnahmeachse
A.V.N. 1950, Heft 3
- [11] Meier, H.-K.: Developments in Photogrammetric Instruments
Construction During the past 30 Years
Personal Paper FIG-Kongress London 1968
- [12] Meier, H.-K.: Prüfung und Kalibrierung von Meßkammern
Veröff. d. Geod. Inst. d. Rhein. Westf.
TH Aachen Nr. 15, 1970

- [13] Meier, H.-K.: Ober den Einfluß der Umweltbedingungen auf die Verzeichnung von Luftbildkamern
BuL 2/1975
- [14] Roos, W.: Neue Definitionen für einige Grundbegriffe der Bildmessung
BuL 1941, Heft 16
- [15] Roos, W.: Über die Definition der photogrammetrischen Grundbegriffe
A.V.N. 1952, Heft 3
- [16] Schilcher, M.: Die systematischen Bild- u. Modellfehler der OEEPE Befliegungen "Oberschwaben"
Lehrgang "Numerische Photogrammetrie"
Technische Akademie Esslingen 1975
- [17] Schwidefsky, K.: Zur Charakteristik der neuen ZEISS-Objektive für Luftaufnahmen
BuL 1956, Sonderheft Stockholm
- [18] Washer, F.: The effect of prism...
Phot. Eng. 3/4 1957
- [19] Ziemann, H.: Untersuchungen an Reseau-Aufnahmen
DGK Reihe C, Heft 104, München 1967

Über die geometrische Genauigkeit von Luftbildkamern

von H.-K. Meier, Oberkochen

Zusammenfassung:

Aus umfangreichem, bei CARL ZEISS durch Kalibrierungen gewonnenen Zahlenmaterial wird nachgewiesen, daß moderne Hochleistungsobjektive mit einer mittleren Typenverzeichnung von 1 - 2 μm bei einer exemplarischen Streuung von 1,5 - 3 μm einen bemerkenswerten Stand erreicht haben. Die Meßgenauigkeit der Prüflabors wurde mit etwa 1,5 - 2,0 μm ermittelt, dem Einfluß des Bezugspunktes muß jedoch besondere Beachtung geschenkt werden.

Empirisch in Stuttgart aus OEEPE-Testauswertungen gewonnene systematische Modelldeformationen zeigen mit Mittelwerten von 3 - 4 μm deutlich größere Werte. Ihre Berücksichtigung ermöglichte spürbare Genauigkeitssteigerungen und regte darüber hinaus zur Analyse vermuteter Fehlerursachen an. Verbildungen, insbesondere durch Filmverzug, zeigten dabei nach Größe und Charakter große Ähnlichkeit mit diesen Fehlerstrukturen, Verzeichnung als Ergebnis optischer Dezentrierungen demgegenüber kaum. Die Einflüsse von Bildwanderung und Refraktion durch die Grenz-atmosphäre der Flugzeugzelle werden der Untersuchung empfohlen.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß die photogrammetrische Meßgenauigkeit in den letzten Jahren durch Einsatz moderner Instrumente und analytisch-numerischer Verfahren nahe an den "Rauschpegel" herangetrieben werden konnte. Weitere Erfolge werden deshalb nur mühsam und Schritt für Schritt erarbeitet werden können.

The geometrical accuracy of aerial cameras

Abstract

On the basis of extensive data obtained in the course of camera calibration work at CARL ZEISS, it is shown that modern high-performance lenses with an average nominal distortion of 1 - 2 μm and individual variations between 1.5 and 3 μm have reached a remarkably high degree of perfection. The measurement accuracy of the test laboratory was found to be about 1.5 - 2.0 μm . Special attention, must, however, be paid to the effect of the reference point.

Systematic model deformations empirically compiled in Stuttgart on the basis of OEEPE test projects reveal noticeably higher averages of 3 - 4 μm . Allowance for these values has made possible a noticeable increase in accuracy and, in addition, has prompted an analysis of suspected causes of errors. It has been found that deformations - particularly those due to film shrinkage - were very similar in magnitude and character with these error structures, contrary due distortion due to optical decentration. It is suggested that further investigations be made of image motion and refraction due to the boundary atmosphere of the aircraft fuselage.

In general it can be said that in the course of the past few years, photogrammetric accuracy has been brought very close to the "noise level" thanks to the use of modern equipment and analytical, numerical techniques. This is why further progress will probably be made only with difficulty and step by step.

Précision géométrique des chambres aérophotogrammétriques

Résumé

A partir de nombreuses données numériques recueillies par les usines CARL ZEISS au cours du calibrage des chambres aérophotogrammétriques, l'exposé démontre que les objectifs modernes à haut rendement qui présentent une distorsion nominale moyenne de 1 à 2 μm et des tolérances de fabrication de 1,5 à 3 μm , ont atteint un degré de perfection remarquable. La précision de mesure des laboratoire de test a été évaluée à environ 1,5 - 2,0 μm . Il faut cependant tout particulièrement tenir compte à l'influence du point de référence.

Les déformations systématiques du modèle plastique ont été calculées empiriquement à Stuttgart, sur la base de tests exécutés par l'O.E.E.P.E. Elles révélèrent des valeurs moyennes nettement plus élevées de 3 à 4 μm . Elles conduisirent ainsi à un accroissement sensible de la précision et incitèrent en outre à l'analyse des causes d'erreur supposées. Il fut constaté que les déformations dues surtout au retrait de la pellicule se rapprochaient fortement - par leur ampleur et leur caractère - des déformations causées par la distorsion de l'objectif, contrairement aux distorsions résultant d'un décentrage optique. Il a été suggéré de porter les recherches futures sur le flou de bougé et sur la réfraction qui découlent de l'atmosphère limitant le fuselage de l'avion-photographe.

On peut prétendre en définitive que, au cours de ces dernières années, la précision photogramétrique a pu être amenée au voisinage du "niveau de bruit", grâce à la mise en oeuvre d'appareils modernes et de méthodes analytiques-numériques. D'autres progrès ne pourront donc être réalisés que difficilement, et pas à pas.

Consideraciones sobre la exactitud geométrica de cámaras aéreas

Resumen

A base de gran cantidad de datos obtenidos en calibraciones efectuadas por CARL ZEISS se demuestra que los modernos objetivos de alto rendimiento con una distorsión nominal media de 1 - 2 μm con una variación individual de 1,5 - 3 μm han alcanzado una perfección considerable. La exactitud de medición del laboratorio de pruebas resultó ser de approx. 1,5 - 2,0 μm , pero hay que fijarse particularmente en la influencia del punto de referencia.

Las deformaciones sistemáticas del modelo obtenidas empíricamente en Stuttgart a base de restituciones de prueba de la OEEPE muestran resultados claramente mayores con valores medios de 3 - 4 μm . Tomándolos en consideración fue posible aumentar considerablemente la exactitud. Al mismo tiempo sirvió de motivo para analizar las causas supuestas de los errores. Las deformaciones, ante todo las debidas a la contracción de la película, mostraron un carácter y una magnitud muy parecidos a estas estructuras de errores, mientras que apenas sí sucedió lo mismo con la distorsión como resultado de descentrados ópticos. Se recomienda investigar las influencias del movimiento de la imagen y de la refracción debida a la atmósfera límite del fuselaje del avión.

En total se puede decir que en los últimos años el empleo de instrumentos modernos y métodos analítico-numéricos han impulsado la exactitud de medición fotogramétrica casi hasta el "nivel de ruido". Es por este motivo que sólo podrán conseguirse con mucho esfuerzo y paso a paso nuevos éxitos.