

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 83 (1985)

Heft: 9: Sonderheft zum Rücktritt und 70. Geburtstag von Prof. Dr. Dr. h. c. H. H. Schmid

Artikel: Vergleichende Analyse von Aufnahmekammern

Autor: Kölbl, O.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-232616>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Im folgenden soll das Datum durch eine Auffelderung bestimmt werden, wie das zumindest bei Deformationsanalysen üblich ist. Die Matrix B in (2.9) wird also mit Hilfe der Matrix E derart aufgebaut, dass für die Auffelderungspunkte die Spalten der Matrix E übernommen werden, die dann mit E_2 bezeichnet wird, während in alle übrigen Spalten Nullen eingeführt werden [Koch 1983 a]. Stellt man die Koordinaten der Auffelderungspunkte an den Anfang des Vektors B , folgt

$$B = [E_2, O] \quad (4.2)$$

Für ein ebenes Streckennetz ergibt sich dann anstelle von (2.9), falls mit Δx_i und Δy_i für $i \in \{1, \dots, k\}$ die Koordinatendifferenzen zwischen den Epochen m und n der Punkte der Auffelderung bezeichnet werden,

$$\Delta x_1 + \dots + \Delta x_i + \dots + \Delta x_k = 0 \quad (4.3)$$

$$\Delta y_1 + \dots + \Delta y_i + \dots + \Delta y_k = 0 \quad (4.4)$$

$$-y_{10}\Delta x_1 + x_{10}\Delta y_1 - \dots - y_{i0}\Delta x_i + x_{i0}\Delta y_i - \dots - y_{k0}\Delta x_k + x_{k0}\Delta y_k = 0 \quad (4.5)$$

wobei x_{i0} und y_{i0} die für alle Messepochen identischen Näherungskoodinaten der k Punkte bedeuten. Es soll nun die Hypothese (4.1) getestet werden, dass die k Punkte der Datumsdefinition feste Punkte sind. Um eine lineare Abhängigkeit zwischen den Restriktionen zu vermeiden [Koch 1980, S. 178], werden nur die $2k-3$ Hypothesen eingeführt

$$\Delta x_1 = 0, \dots, \Delta x_{i-2} = 0, \Delta x_{i+1} = 0, \dots, \dots, \Delta x_k = 0 \quad (4.6)$$

$$\Delta y_1 = 0, \dots, \Delta y_{i-1} = 0, \Delta y_{i+1} = 0, \dots, \dots, \Delta y_k = 0 \quad (4.7)$$

Wird (4.7) in (4.4) eingesetzt, folgt

$$\Delta y_i = 0 \text{ für beliebiges } i \quad (4.8)$$

Aus (4.6) und (4.3) erhält man

$$\Delta x_{i-1} + \Delta x_i = 0 \text{ oder } \Delta x_{i-1} = -\Delta x_i \quad (4.9)$$

und aus (4.5) mit (4.6) bis (4.9)

$$-y_{i-1,0}\Delta x_{i-1} - y_{i0}\Delta x_i = \\ = (y_{i-1,0} - y_{i0})\Delta x_i = 0$$

oder, da $y_{i-1,0} \neq y_{i0}$ vorausgesetzt werden kann,

$$\Delta x_{i-1} = 0 \text{ und } \Delta x_i = 0 \text{ für beliebiges } i \quad (4.10)$$

Aus (4.3) bis (4.7) folgt also

$$\Delta x_i = 0 \text{ und } \Delta y_i = 0 \text{ für } i \in \{1, \dots, k\} \quad (4.11)$$

Ein mit (4.11) identisches Ergebnis wird auch dann erzielt, wenn nicht sämtliche k Punkte zur Datumsdefinition herangezogen werden, sondern nur eine Teilmenge dieser Punkte, wobei vorausgesetzt wird, dass die Punkte mit den Indizes i und $i-1$ in (4.6) und (4.7) Datumspunkte sind. Ausserdem sind diese Überlegungen nicht auf zweidimensionale Streckennetze beschränkt, sondern gelten auch für beliebige dreidimensionale Netze, sofern das Datum (4.2) entsprechend definiert wird. Man kann daher allgemein formulieren:

Der Test (4.1) der Identität der Koordinaten verschiedener Messepochen einer Menge von Punkten ist unabhängig vom Datum eines Netzes, falls die Menge selbst oder eine ihrer Teilmengen für die Datumsdefinition nach (4.2) herangezogen wird.

Es ist jetzt noch der umgekehrte Fall zu untersuchen, dass die Testpunkte eine Teilmenge der Datumspunkte bilden. Die Restriktionen (4.6) und (4.7) eliminieren dann die Testpunkte aus den Restriktionen (4.3) bis (4.5). Doch es verbleiben Restriktionen, die je nach der Wahl der Datumspunkte unterschiedlich wirken, so dass diese Tests abhän-

gig sind von der Datumsdefinition. Schliesslich ist noch der Fall zu betrachten, dass die Menge der Testpunkte und der Datumspunkte eine Schnittmenge bilden, die die leere Menge sein kann, die aber weder identisch mit der Menge der Testpunkte noch mit der der Datumspunkte sein darf. Wieder verbleiben Restriktion (4.3) bis (4.5), die je nach Wahl der Datumspunkte unterschiedlich wirken, so dass auch diese Tests abhängig von der Datumsdefinition sind.

Literatur

Baarda, W.: S-transformations and criterion matrices. Netherlands Geodetic Commission, Publ. on Geodesy, 5, Nr. 1, Delft 1973

Grafarend, E. und B. Schaffrin: Equivalence of estimable quantities and invariants in geodetic networks. Zeitschrift für Vermessungswesen, 101, 485-491, 1976

Koch, K.R.: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler, Bonn 1980

Koch, K.R.: S-transformations and projections for obtaining estimable parameters. In "Forty Years of Thought", Anniversary Volume on the Occasion of Prof. Baarda's 65th Birthday, 1, 136-144, Delft 1982

Koch, K.R.: Die Wahl des Datums eines trigonometrischen Netzes bei Punkteinschaltungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 108, 104-111, 1983 a

Koch, K.R.: Rechenverfahren bei der Einschaltung von Punkten in ein trigonometrisches Netz. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 90, 99-107, 1983 b

Koch, K.R.: Ein statistisches Auswerteverfahren für Deformationsmessungen. In Vorbereitung, 1985

Schmid, H.H.: Three-Dimensional Triangulation With Satellites. NOAA Professional Paper 7, National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville, Md., 1974 a

Schmid, H.H.: Worldwide geometric satellite triangulation. Journal of Geophysical Research, 79, 5349-5376, 1974 b.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Karl-Rudolf Koch
Institut für Theoretische Geodäsie
Universität Bonn
Nussallee 17, D-5300 Bonn 1

Vergleichende Analyse von Aufnahmekammern

O. Kölbl

1. Problemstellung

In den vergangenen Jahren konnten beträchtliche Verbesserungen im Kamerabau und in der Entwicklung von photographischen Filmen erzielt werden. Zudem ist seit einem Jahr der Kodak Panatomic-X-Film auch in Europa auf einer dicken Polyester-Basis erhältlich (Panatomic-X 2412). Auflö-

sungsvermögen und Bildwiedergabe dieses Filmes scheinen erheblich besser zu sein als das Auflösungsvermögen der gängigen Aufnahmeobjektive von Luftbildkamern. Es sollte daher möglich sein, die Bildgüte von photographischen Aufnahmeobjektiven mit diesem Film zu analysieren. Vom Standpunkt der Bildwiedergabe

scheint der Panatomic-X-Film neue Perspektiven für die Luftbildphotographie zu eröffnen; zur gleichen Zeit machen sich aber neue Beschränkungen bemerkbar. So ist die Empfindlichkeit dieses Filmes etwa viermal geringer als von üblichen Luftbildfilmen. Kamern mit Einrichtungen zur Kompensation der Bildwanderung kommt

daher besondere Bedeutung zu. Für den vorliegenden Vergleichstest konnten drei verschiedene Luftbildkamern eingesetzt werden:

- 1) Zeiss Jena LMK mit automatischer Kompensation der Bildwanderung
- 2) Wild Heerbrugg RC10A
- 3) Zeiss Oberkochen RMK (zur Zeit der Flugkampagne stand die Kompensationseinrichtung der Luftbildkammer noch nicht zur Verfügung).

Die vorliegende Untersuchung erfolgte im Rahmen eines grösseren Forschungsprojektes, welches sich mit der photogrammetrischen Punktbestimmung im Katasterwesen befasst.

Die Genauigkeitsanforderungen sind im schweizerischen Kataster relativ hoch. Die Punktdichte variiert jedoch sehr stark, und insbesondere im Bergland können sich ausgedehnte Zonen ohne signalisierte Punkte ergeben. In diesen Regionen wechseln oft sehr schnell intensiv genutzte Gebiete mit grossen Ödland- und Waldregionen. In derartigen Regionen sollten möglichst kleine Bildmassstäbe verwendet werden, um eine grossräumige Überdeckung zu erzielen. Es sollten folglich Bildmassstäbe um 1:10 000 angestrebt werden. Auf der anderen Seite ist es wünschenswert, die Signalisierung auf das Bemalen der Steinköpfe zu beschränken und auf die Auslegung von Signaltafeln zu verzichten. Diese besonderen Bedingungen haben das Institut veranlasst, eine umfassende Studie zur Analyse des Genauigkeitsverhaltens in der Aerotriangulation zu unternehmen. In diesem Zusammenhang wurde in den vergangenen Jahren ein Präzisionstestfeld im Norden von Lausanne (Echallens) eingerichtet. In den letzten Jahren konnten auch bereits mehrere Bildflüge über dem Testfeld in verschiedenen Massstäben ausgeführt werden. Die Aufnahmen erfolgten jedoch ausschliesslich mit Bildkamern der Firma Wild, wobei durchwegs der Film PLUS-X eingesetzt wurde. Es ist daher von Interesse, den neuen Film von der Firma Kodak in die Untersuchungen miteinbeziehen und für die Bildaufnahme auch Kamern von anderen Herstellern zu verwenden.

Ziel dieser vergleichenden Analyse war es, die verschiedenen Aufnahmekamern im Hinblick auf Bildwiedergabe und metrische Genauigkeit zu untersuchen. Zur Analyse der Bildqualität wurde die Modulationsübertragungsfunktion unter Flugbedingungen mit Hilfe von besonderen Auflösungstafeln bestimmt. Ferner wurde die Abbildungsqualität von signalisierten Punkten in die Beurteilung mit einbezogen. Die Genauigkeitsanalyse stützt sich auf eine Aerotriangulation eines photogrammetrischen Blocks von sechs Linien zu je sieben Bildern (70%ige

Längs- und Querbedeckung). Der Bildmassstab im Blockverband betrug 1:5500. Die Aerotriangulation erfolgte über dem bereits erwähnten Testfeld Echallens.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst das Testfeld selbst und die Besonderheiten für die photographische Mission im Detail beschrieben. Im 3. Abschnitt wird dann über die Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion berichtet und über die Verfahren zur Analyse der Bildqualität. In Kapitel 4 folgt schliesslich eine Diskussion der photographischen Messungen und der Ergebnisse der Blockausgleichung.

2. Aufnahmebedingungen

2.1 Testfeld Echallens

Abb.1 gibt einen Überblick über das Testfeld Echallens mit der Verteilung der Pass- und Kontrollpunkte. Das Testfeld hat eine Grösse von 3x4 km und war

ausgelegt für eine Blockstruktur von sieben Streifen zu zehn Modellen mit je 60% seitlicher Überdeckung. Beim Testfeld wurde angestrebt, in der Nähe der Hauptpunkte und der Verknüpfungspunkte zumindest über zwei Fixpunkte zu verfügen, welche geodätisch eingemessen wurden. Zur Vermarkung der Fixpunkte wurden in Feldwegen mit Hartbelag Bolzen eingelassen, bei Schotterwegen und entlang von Hauptverkehrswegen wurden Betonblöcke von 80x80x80 cm bodeneben veretzt.

Die geodätische Punktbestimmung erfolgte in zwei Etappen. In der ersten Phase wurde ein Hauptnetz mit zwölf Punkten bestimmt. Es folgte die Messung des Detailnetzes, welches sämtliche Fixpunkte umfasste. Bei der Ausgleichung des Hauptnetzes ergab sich ein mittlerer Punktlagefehler von $\pm 1,5$ mm (grosse Halbachse der Fehlerellipse). Eine ähnlich hohe Genauigkeit

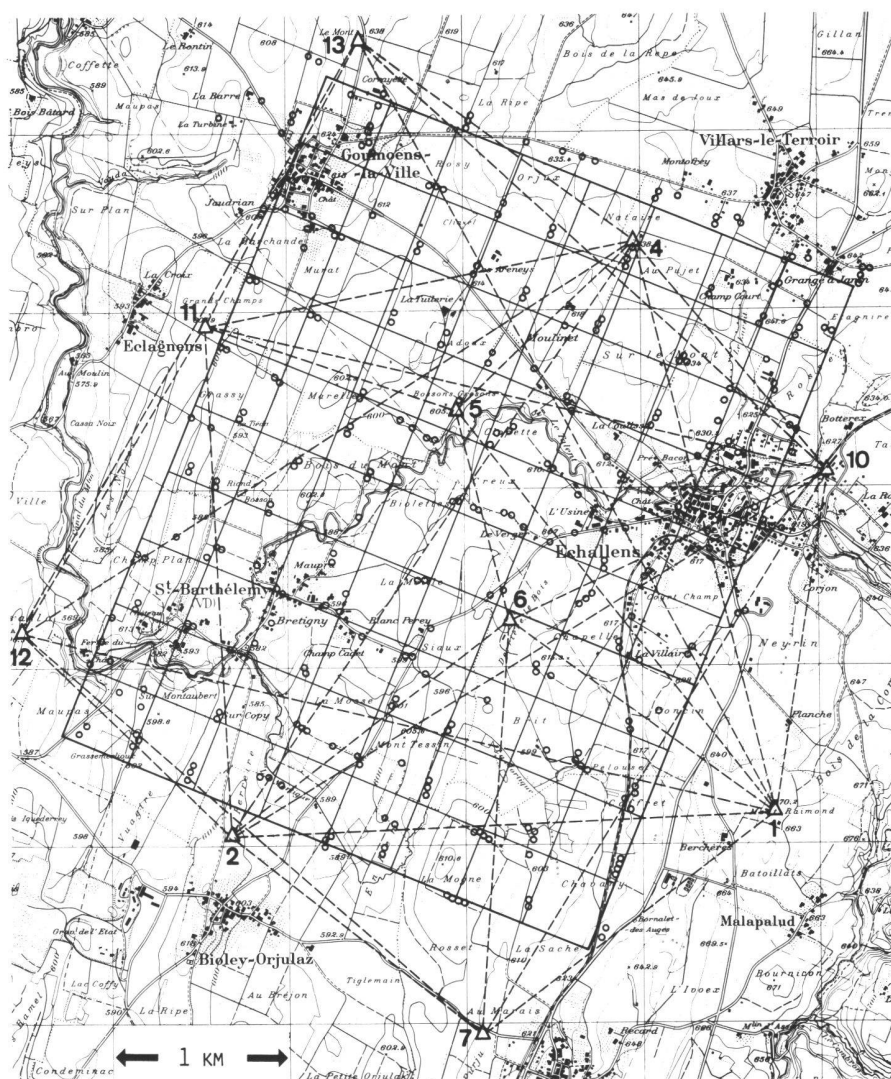


Abb.1 Übersicht über das Testfeld Echallens. Dargestellt wurden sämtliche im Gelände vermarkten Passpunkte sowie das Haupttriangulationsnetz (Dreiecke). Das Gitternetz mit einer Maschenweite von 400 m markiert die Idealposition der Hauptpunkte bzw. der Verknüpfungspunkte. Eine Netzmasche entspricht damit einem Halbmodell (Ausschnitt der Landeskarte 1:25 000, reproduziert mit freundlicher Genehmigung des Bundesamts für Landestopographie, Bewilligung vom 7.8.1985).

konnte auch für das Detailnetz erzielt werden, und es zeigte sich, dass lediglich 10% der Punkte eine Fehlerellipse aufwiesen, bei denen die grosse Halbachse den Wert von ± 2 mm überstieg (vgl. auch [1]).

2.2 Punktsignalisierung

Sämtliche für die Aerotriangulation benutzten Punkte wurden mit Farbe signalisiert, um eine möglichst hohe Lagegenauigkeit bei der Punktmarkierung sicherzustellen. Das Zentrum der Punkte wurde mit einer weissen Scheibe im Durchmesser von 18 cm markiert, rundherum wurde ein Kontrastring mit einer Breite von etwa 40 cm aufgebracht. Für das zentrische Anbringen der Farben wurden Schablonen verwendet. Das Aufbringen der Farbe beanspruchte relativ viel Zeit, und es ist offensichtlich, dass diese Art der Punktsignalisierung kaum für praktische Arbeiten empfohlen werden kann. Es scheint jedoch wichtig, vorerst die potentiellen Möglichkeiten des Aufnahmematerials zu analysieren und erst in einer späteren Phase Überlegungen für eine wirtschaftliche Punktsignalisierung anzustellen.

2.3 Das Filmmaterial

Für alle drei Flugmissionen wurde der Panatomic-X-Film (2412) verwendet. In Europa ist dieser Film auf einer dicken Polyesterbasis erst seit ungefähr einem Jahr erhältlich. Der Film hat ein beträchtlich höheres Auflösungsvermögen als beispielsweise der Kodak Plus-X-Film. Entsprechend technischer Datenblätter von Kodak beträgt das Auflösungsvermögen des Panatomic-X-Films ca. 125 Linien/mm bei einem Kontrast von 1,6 : 1, verglichen mit 50 Linien/mm für den Kodak Plus-X. Der Film ist jedoch beträchtlich weniger empfindlich (50 ASA verglichen mit 200 ASA für den Plus-X-Film). Die Empfindlichkeit des Panatomic-X-Films ist folglich lediglich ein Viertel der Empfindlichkeit von üblicherweise verwendeten Fliegerfilmen.

Die relativ hohe Bildqualität der neueren Generation von Aufnahmeobjektiven legt die Verwendung von hochauflösenden Filmen nahe. Es besteht jedoch die Gefahr, dass der Vorteil des höheren Auflösungsvermögens der Filme sehr rasch durch Effekte der Bildwanderung wieder eingebüsst wird.

2.4 Aufnahmekammern

Wie bereits erwähnt, wurden für den Test drei moderne Aufnahmekammern von verschiedenen Kameraherstellern verwendet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Merkmale der drei verschiedenen Aufnahmekammern. Die Kamern der Firma Wild und Zeiss können als konventionelle Aufnahme-

	Firma		
	Zeiss Jena	Wild	Zeiss Oberkochen
Kammer	LMK	RC10A	RMK A2
Objektiv	Lamegon PI 4.5/150 c	Universal Aviagon 15/4 UAGA Nr. 13033 (Vorserienprodukt)	Pleogon A2 4/153
	Nr. 244679A		Nr. 127782
Maximale Öffnung des Objektivs und effektiver verwendeter Wert	1:4,5	1:4	1:4
	1:5,6	1:4	1:4

Tab. 1 Übersicht über die verwendeten Aufnahmekammern.

kammern betrachtet werden, wie sie üblicherweise für photogrammetrische Bildflüge verwendet werden. Eine Besonderheit weist die Aufnahmekammer von Zeiss Jena auf, denn sie erlaubt eine Kompensation der Bildwanderung durch die Bewegung der Ansaugplatte während der photographischen Aufnahme. Dazu wird zunächst im Überdeckungsregler die Winkelgeschwindigkeit über dem Aufnahmegebiet gemessen; dieser Messwert wird auf die Kamera übertragen, und in der Folge wird der Film zusammen mit der Andruckplatte während der Belichtung gegenüber den Kamerarahmen verschoben. Um trotzdem eine einwandfreie Abbildung der Rahmenmarken sicherzustellen, werden diese im Zentralpunkt der Belichtung mittels Blitz aufprojiziert. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die innere Orientierung einwandfrei reproduziert werden kann.

2.5 Der Bildflug

Nach einer Reihe von Vorversuchen zur Bestimmung der optimalen Belichtungszeit wurde der eigentliche Bildflug mit der Wild-Kammer und der Kammer von Zeiss Jena am 11. März 1984 ausgeführt. Beide Kamern waren im gleichen Flugzeug eingebaut. Die Sicht betrug an diesem Tag in Bodennähe 6–8 km und dürfte in 900 m Höhe über Grund 100 km überstiegen haben. Das Testfeld war mit Schnee bedeckt, und die Passpunkte und sämtliche Übertragungspunkte mussten freigeschaufelt werden. Aus technischen Gründen konnte der Flug mit der Kamera von Zeiss Oberkochen erst zwei Tage später stattfinden. Den Bildflug mit der Zeiss-Kammer führte die Hansa-Luftbild aus, wobei ähnlich gute Sichtbedingungen herrschten, Sicht in Bodennähe 6 km und in 900 m 10–15 km.

Da bei dem Testfeld sämtliche Haupt- und Verknüpfungspunkte signalisiert waren, musste auf eine dementsprechende Bildortung besonders geachtet werden. Bei früheren Flügen wurden zu diesem Zweck Kreuze ausgelegt, um

die Idealposition der Nadirpunkte dem Navigator anzuzeigen (Plastikplanen 4 m lang). Wegen der Schneebedeckung war es diesmal nicht möglich, diese Navigationshilfen auszulegen, und es wurde stattdessen durchwegs mit einer 90%igen Längsüberdeckung geflogen. Alle Filme wurden vom Bundesamt für Landestopographie in Bern auf einer Agfa Paketrone-Maschine entwickelt.

3. Beurteilung der Bildqualität

Die Beurteilung der Bildqualität konzentrierte sich auf die Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MÜF) mit Hilfe von speziellen Auflösungstafeln. Darüber hinaus wurde die Wiedergabe von signalisierten Punkten in die Beurteilung miteinbezogen. Dies einerseits, um die erhaltene MÜF zu überprüfen; zum andern ergibt sich dadurch eine anschauliche Interpretation dieser Funktion. Für die praktische Anwendung der Photogrammetrie ist es von besonderer Bedeutung, bis zu welchem Bildmassstab signalisierte Punkte oder andere kleine Objektdetails noch sicher im Luftbild ausgemacht werden können. Diese beiden Versuche ergänzen sich und sollten damit recht zuverlässige Angaben über die Bildqualität liefern.

3.1 Theoretische Überlegungen zur Bestimmung der MÜF

Bekanntlich besteht zwischen der Wiedergabe eines kleinen Signals im Objekt-raum und der MÜF ein sehr enger Zusammenhang; so kann das Dichteprofil über das photographische Bild eines signalisierten Punktes zumindest näherungsweise als die Fouriertransformierte der MÜF betrachtet werden. Umgekehrt gibt die MÜF zunächst theoretisch an, welche Kontrastreduktion sich im Bild ergibt, wenn ein Objekt mit sinusförmiger Hell-dunkel-Verteilung abgebildet wird. Diese Kontrastreduktion wird in Abhängigkeit der Frequenz der Sinusschwingungen ausgedrückt. Da sich jede beliebige Funktion mittels

Fourierreihe in eine Reihe von Sinus- und Cosinusschwingungen übertragen lässt, gibt die MÜF die Möglichkeit, die Bildwiedergabe eines beliebigen Objekts zu berechnen. Dazu wird zunächst die Hell-dunkel-Verteilung im Objekt-raum durch eine Fouriertransformation approximiert. Anschliessend werden die Amplituden der Sinus- und Cosinusschwingungen mit dem Reduktionsfaktor entsprechend der MÜF multipliziert. Aus den so erhaltenen Werten ergibt sich durch eine neuerliche Fouriertransformation die Hell-dunkel-Verteilung im Bild.

Bei theoretischen Überlegungen zur Abbildungsqualität kommt der Wiedergabe eines fiktiven Punktbildes beträchtliche Bedeutung zu. Dieses Punktbild hat grosse Helligkeit und ist unendlich schmal. Die Fouriertransformierte dieses idealisierten Punktbildes ist konstant, d. h. die Amplituden sämtlicher Sinusschwingungen sind gleich gross, und durch entsprechende Normierung kann der Wert eins erhalten werden. Die MÜF entspricht damit im Frequenzraum unmittelbar dem zu erwarteten Bild, und die Rücktransformation mittels Fouriertransformation ergibt die sogenannte Verwaschungsfunktion. Das Dichteprofil eines idealisierten Punktes im photographischen Bild entspricht damit zumindest näherungsweise der Verwaschungsfunktion.

Ein sehr einfacher rechnerischer Zusammenhang zwischen MÜF und Verwaschungsfunktion ergibt sich, falls die MÜF eine Gaussche Glockenkurve darstellt. In diesem Fall ist auch die Verwaschungsfunktion eine einfache Gauss-Funktion. Bei verschiedenen experimentellen Arbeiten mit der MÜF wurde bisher mit dieser Vereinfachung gearbeitet. Vorliegende Untersuchung zeigte jedoch, dass es sich hierbei um eine zu grobe Vereinfachung handelt. Es wurden daher zusammengesetzte Gauss-Funktionen mit einem recht breiten Fuss als Verwaschungsfunktion verwendet (vgl. auch Abb. 2).

$$(0) \quad O(x) = n_0 \cdot \exp \left[-4 \left(\frac{x-x_0}{\sigma} \right)^2 \right]$$

$$(1) \quad O(x) = n_1 \left\{ 0,85 \exp \left[-4 \left(\frac{x-x_0}{\sigma} \right)^2 \right] + 0,15 \exp \left[-4 \left(\frac{x-x_0}{2\sigma} \right)^2 \right] \right\}$$

$$(2) \quad O(x) = n_2 \left\{ 0,85 \exp \left[-4 \left(\frac{x-x_0}{\sigma} \right)^2 \right] + 0,15 \exp \left[-4 \left(\frac{x-x_0}{4\sigma} \right)^2 \right] \right\}$$

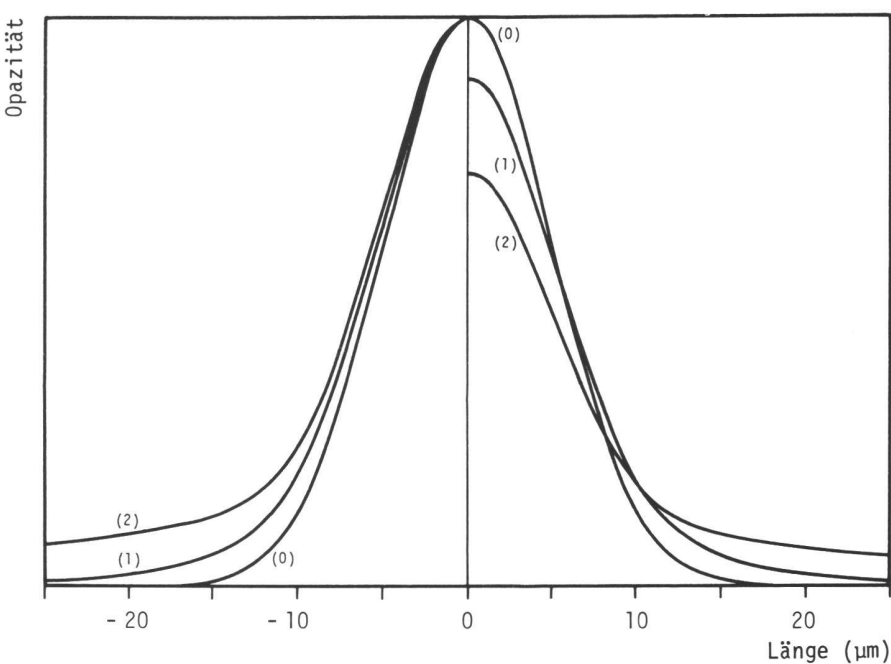


Abb. 2 Gegenüberstellung der Verwaschungsfunktionen entsprechend den Formeln (0), (1), (2) für eine Spreizung von $\sigma = 14 \mu\text{m}$; links ohne Normierung, rechts normiert. Man beachte die Kontrastreduktion bei den Signalen, wenn sich der Fuss der Glockenkurve verbreitert.

In den Formeln stellt O die Opazität (Inverse der Transparenz) dar, x ist die räumliche Variable, x_0 die Position des Maximums und σ die Spreizung der Gauss-Funktion. Die Multiplikationsfaktoren (0.85 und 0.15) wurden entsprechend praktischen Untersuchungen festgelegt; n_0 , n_1 , n_2 sind Normierungsfaktoren.

Diesen Überlegungen kommt insofern Bedeutung zu, als bei der vorliegenden Untersuchung angestrebt wurde, primär die Verwaschungsfunktion zu bestimmen und erst daraus die MÜF abzuleiten. Dieser Umweg wurde ge-

wählt, da sich auf diese Weise eine höhere Zuverlässigkeit für die numerische Berechnung ergibt. So genügt es, bei der Bestimmung der Verwaschungsfunktion nur drei, gegebenenfalls fünf Parameter zu bestimmen, wohingegen bei der Ermittlung der MÜF die Werte für eine beträchtlich grössere Zahl von Frequenzen zu ermitteln sind.

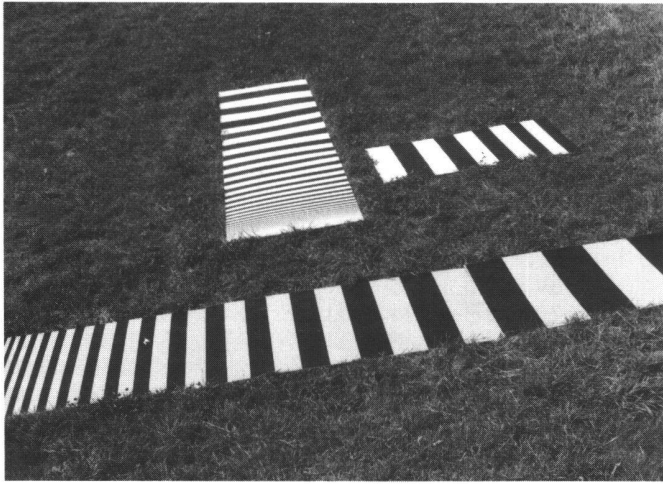
3.2 Praktisches Vorgehen

Zur praktischen Ermittlung der MÜF wurden spezielle Testtafeln mit graduell abnehmender Streifenbreite verwendet

Bereich (Abstand vom Hauptpunkt)	Lage der Testtafeln	LMK	RC10A	RMK
< 4 cm	f	14-1 14-1	14-1 20-1	14-1 14-1
	p	12-1 13-1	14-1 14-1	10-1 12-1
4-7 cm	f	-	12-2	14-1
	p	-	14-2	8-2
7-10 cm	f	14-1 16-1	14-2 16-2 18-2	16-1 18-1 20-1
	p	14-1 14-1	14-2 14-2	12-1 14-1 16-1

Tab. 2 Kurvenparameter der Verwaschungsfunktion, wie sie aus den Mikrodensitometermessungen abgeleitet wurden. Der erste Wert gibt die Breite der Verwaschungsfunktion an (14: $\sigma = 14 \mu\text{m}$), der zweite Wert bezieht sich auf die Breite des Fusses (1: Funktion (1), 2: Funktion (2)). Man erkennt, dass die reine Gaussche Glockenkurve (0) nicht vertreten ist. f kennzeichnet Testtafeln in Flugrichtung und p senkrecht zur Flugrichtung.

a)



b)

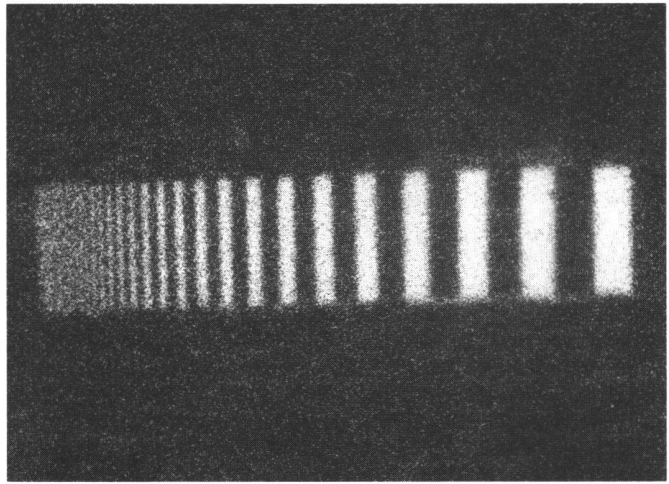


Abb. 3 a) Auflösungstafeln für die Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MÜF). Länge der Tafeln 6 m.
b) Mikrovergrößerung der Auflösungstafeln, aufgenommen mit der Kammer LMK von Zeiss Jena im Massstab 1 : 5500, 30 fach vergrössert.

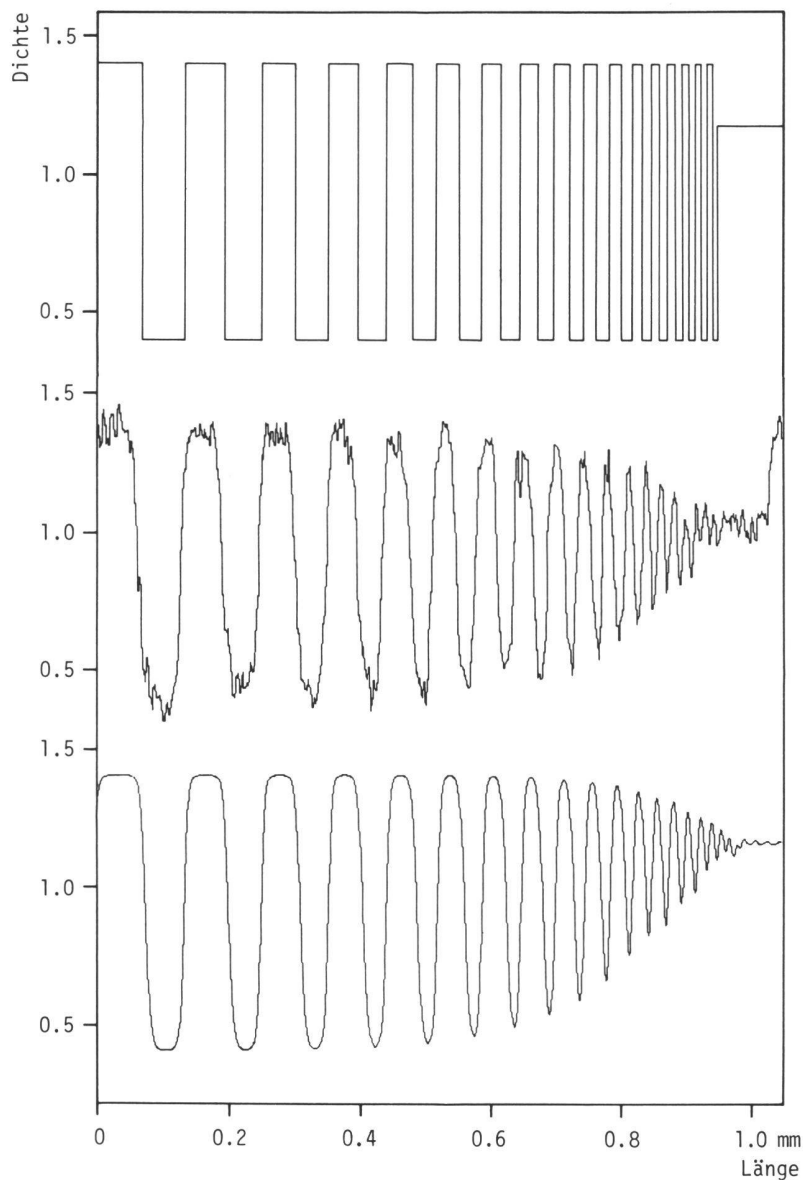


Abb. 4 Dichteprofile der original Auflösungstafel (a), Dichtemessung im Luftbild (b) und Dichteprofil der entsprechenden simulierten Kurve (c). Das gemessene Dichteprofil entspricht der in Fig. 3b wiedergegebenen Mikrovergrößerung (Kammer LMK, Bildmitte).

(vgl. Abb. 3). Streng genommen ergibt sich dabei eine Helligkeitsverteilung nach einer Rechtecksfunktion (vgl. auch Abb. 4). Ähnliche Signaltafeln wurden bereits in zahlreichen früheren Versuchen verwendet (vgl. [2], [3]). Die Tafeln hatten eine Länge von 6 m und eine Breite von 1,3 m.

Für die dichtemässige Durchmessung der Luftbilder wurde mit einem Abtastmikroskop gearbeitet (Leitz Dialux 20 mit Kompakt-MPV und Schrittmotor am Kreutztisch). Die Messungen wurden automatisch mit einem angeschlossenen Tischrechner registriert. Abb. 4 zeigt ein auf diese Weise registriertes Dichteprofil.

Zur numerischen Analyse dieser Dichteprofile wurden Modellkurven gerechnet, welche durch Simulation aus der im Objektraum vorliegenden Rechtecksfunktion und einer grossen Zahl von verschiedenen Verwaschungsfunktionen bestimmt wurden. In der Folge wurde durch rein visuellen Vergleich die sich am besten anschmiegende Modellkurve ausgewählt.

Die erhaltenen Parameter für die Verwaschungsfunktion wurden in Tabelle 2 zusammengefasst. Im allgemeinen konnten für jede Kamera mehr als zehn Bilder der Testtafeln analysiert werden. Abb. 5 zeigt eine Gegenüberstellung der MÜF für die verschiedenen Aufnahmekammern. Es sei darauf hingewiesen, dass sich die Analyse auf einen Bildradius von 10 cm beschränkt; Abbildungen mit Tafeln in einem grösseren Abstand vom Bildhauptpunkt lagen nur sporadisch vor, und es scheint daher nicht angebracht, diesen Bereich in die Analyse miteinzubeziehen.

3.3 Vergleich der Bildqualität

Es sei vorausgeschickt, dass sich die Ergebnisse einzig auf die drei verwen-

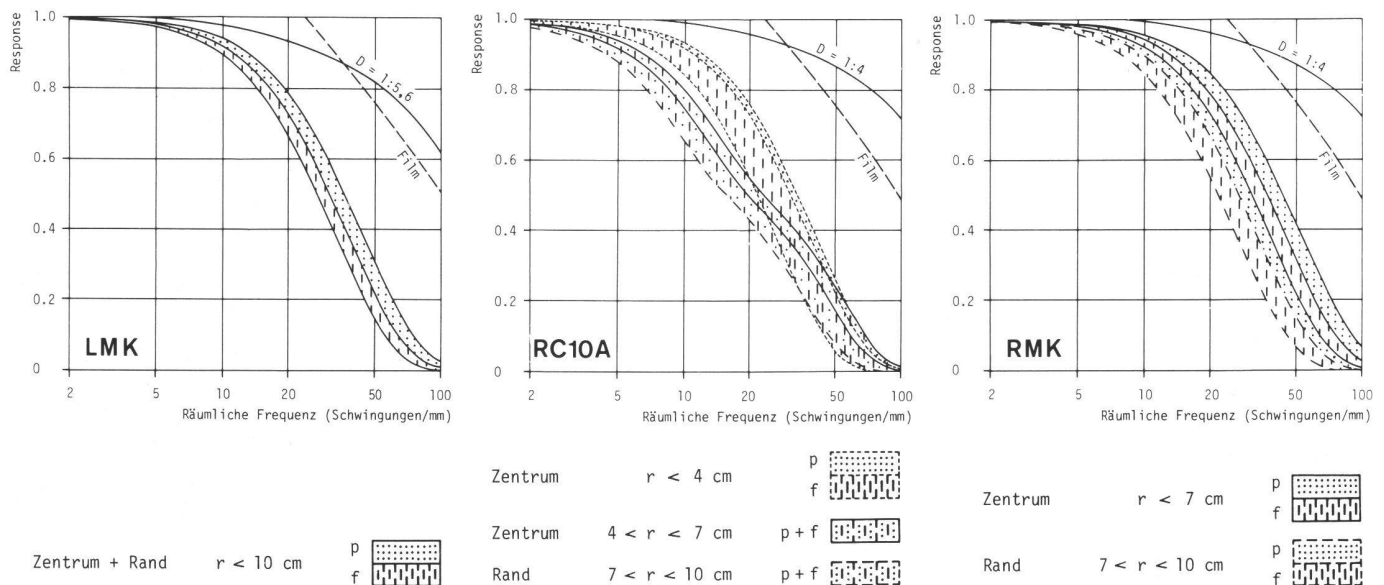


Abb. 5 Modulationsübertragungsfunktionen (MÜF) für verschiedene Luftbildkameras, ermittelt unter Flugbedingungen unter Verwendung des Panatomic-X-Films. Dargestellt wurde auch die Begrenzung für das jeweilige Öffnungsverhältnis (D); die MÜF wurde für Tafeln in Flugrichtung (f) und senkrecht zur Flugrichtung (p) ermittelt.

deten Aufnahmekameras mit ihren spezifischen Objektiven beziehen und die Untersuchung in keiner Weise repräsentativ für die Objektive einer Firma betrachtet werden können. Vergleicht man die verschiedenen Ergebnisse, so stellt man fest, dass das Lamegon (Zeiss Jena) eine sehr homogene Bildqualität für das ganze Bildformat aufweist. Damit zeichnet sich das Lamegon gegenüber den anderen Objektiven aus. Es dürfte hierbei das verwendete Öffnungsverhältnis eine entscheidende Rolle spielen; so wurde das Lamegon mit dem Öffnungsverhältnis 1:5,6 verwendet, die anderen Objektive dagegen mit dem Öffnungsverhältnis von 1:4. Bei Aufnahmen mit dem Lamegon wurden allerdings in den Randpartien ($r > 10$ cm) vereinzelt Komafehler beobachtet. Das Pleogon weist im Zentralbereich eine etwas höhere Bildqualität auf als das Lamegon. Beim Aviogon (Wild) stellt man fest, dass die MÜF ziemlich langsam auf 100% ansteigt. Das würde bedeuten, dass die Verwaschungsfunktion einen ziemlich breiten Fuss aufweist. Diese Erscheinung lässt sich auch anhand der Mikrovergrößerungen beobachten (vgl. Abb. 6). Die Signale weisen einen etwas grösseren Lichthof auf als bei den vergleichbaren Mikrovergrößerungen der anderen Kameras. Selbstverständlich sollte man diese Einzelbeispiele nicht überbewerten; auch ist zu berücksichtigen, dass für diese Mikrovergrößerungen die Aufnahmen im Massstab 1:3000 verwendet wurden, wohingegen für die Ableitung der MÜF die Bilder im Massstab 1:5000 dienten. Bei einem Massstab von 1:3000 kommt selbstverständlich die Bewegungsunschärfe be-

reits zum Tragen. Die Aufnahmen erfolgten bei einer Fluggeschwindigkeit von ca. 300 km/h mit Belichtungszeiten von 1/1000 bei der RC10A und 1/500 bei der LMK, wobei die Bewegungsunschärfe bei dieser Kamera kompensiert wurde. Ferner sei darauf hingewiesen, dass das verwendete Objektiv der Firma Wild als Vorserienprodukt betrachtet werden muss.

Wie zu erwarten, ergaben sich für die MÜF in Flugrichtung niedrigere Werte als senkrecht dazu. Aus den unterschiedlichen Werten lässt sich der Einfluss der Bewegungsunschärfe unmittelbar ablesen. Es ist bemerkenswert, dass sich auch bei der LMK Unterschiede bei der MÜF in Flugrichtung und senkrecht dazu ergeben, obwohl diese Kamera über eine Kompensationseinrichtung verfügt. Es ergibt sich der Eindruck, als würde die Kompensationseinrichtung eine Restkomponente belassen, welche einer Bewegungsunschärfe von etwa der halben Belichtungszeit entspricht, d. h. etwa einer 1/1000 Sek.

Zur Überprüfung der MÜF wurde versucht, die empirisch erhaltenen Werte mit Labormessungen zu vergleichen. Dabei zeigt sich, dass bei den Feldmessungen eher bessere Werte erzielt wurden als bei Labormessungen. Lediglich für das Zentrum des Bildfelds konnte eine gewisse Übereinstimmung erzielt werden. Bei diesem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass der Kodak Panatomic-X-Film im Bereich zwischen 1–20 Hz auf Grund von Nachbareffekten eine Kontraststeigerung aufweist. Es wurden jedoch keinerlei Vorkehrungen getroffen, um auch den Einfluss atmosphärischer Störungen zu berücksichtigen.

3.4 Empfehlungen für weitere Untersuchungen

Die Untersuchung zeigt, dass die MÜF durchaus unter Flugbedingungen ermittelt werden kann. Bei der Konzeption der Testtafeln soll jedoch berücksichtigt werden, dass zur Normierung niedrige Frequenzen zwischen 3 und 7 Hz benötigt werden. Falls diese Frequenzen fehlen, lässt sich kaum ein Bezug für die MÜF finden. Eine Aussage über die Kontrastreduktion bei niedrigen Frequenzen ist dann nicht möglich. Gerade diesem Bereich kommt aber grosse Bedeutung zu, um die Objektwiedergabe im Luftbild zu beurteilen. Zum anderen sei darauf hingewiesen, dass die Kontrastreduktion im hohen Frequenzbereich nur etwa bis 80% gesichert nachgewiesen werden kann (Modulation $< 20\%$). Frequenzen, welche eine stärkere Kontrastreduktion aufweisen, scheinen nicht mehr bildwirksam zu sein und gehen in der Körnigkeit des Films unter. Es handelt sich hierbei um Frequenzen von 50 Hz und darüber.

4. Bildauswertung und Ergebnisse der Blockausgleichung

Bei der Blockausgleichung werden heute vielfach Ergebnisse um und unter 2μ erreicht. Es versteht sich, dass diese hohe Messgenauigkeit nur möglich ist, wenn bei der Bildmessung entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um die Stabilität des Messgerätes und des Films selbst während des Messvorgangs sicherzustellen. Selbstverständlich muss zudem das Messmittel selbst in der Lage sein, diese hohe Genauigkeit zu liefern. Die Untersuchungen der OEEPE zur optimalen Filmwahl [4] haben gezeigt, dass den Messgeräten nach wie vor eine überragende

gende Bedeutung bei Genauigkeitsuntersuchungen zukommt. Es ist beabsichtigt, in den nächsten Monaten Vergleichsmessungen an verschiedenen weiteren Präzisionsmessgeräten vorzu-

nehmen. Um jedoch möglichst rasch über erste Ergebnisse der Aufnahmekampagne zu verfügen, wurden je zwei Teilblöcke von drei Streifen zu sieben Bildern herausgegriffen und am Mono-

komparator Kern MK2 des Instituts für Photogrammetrie ausgemessen. Die Messungen erfolgten sukzessive für das verschiedene Bildmaterial, wobei die Messungen in der Reihenfolge erfolgten: LMK-RMK-RC10A-RC10A-LMK-RMK. Es wurde vermieden, sämtliche Bilder einer Kammer in einem Zug durchzumessen, um zu vermeiden, dass etwa die Messerfahrung des Operateurs oder auch besondere klimatische Bedingungen während der Messperiode die Ergebnisse systematisch verfälschen könnten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Messungen keine klimatisierten Räume zur Verfügung standen. Sämtliche Punktmessungen erfolgten in zwei Durchgängen. Die Blockausgleichung erfolgte mit dem Programmsystem «Bluh» des Photogrammetrischen Instituts der Universität Hannover. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die erhaltenen Ergebnisse.

Dabei fällt auf, dass die Beobachtungsgenauigkeit für den Panatomic-X-Film für sämtliche Aufnahmen um $1,0\text{ }\mu\text{m}$ liegt. Zwischen den Aufnahmekammern ergibt sich hierbei keinerlei Unterschied. Lediglich die Aufnahmen aus einem früheren Bildflug (März 1982) weisen einen geringfügig höheren Beobachtungsfehler auf. Die Messergebnisse dieser Aufnahmeserie wurde angefügt, um eventuelle Unterschiede zwischen den beiden Filmtypen aufzuzeigen.

Etwas grössere Variationen ergeben sich demgegenüber für den mittleren Gewichtseinheitsfehler der Blockausgleichung (σ_0). Dieser Wert berechnet sich aus den Restfehlern in den Passpunkten und den Verknüpfungspunkten, wobei die Restabweichungen auf den Bildraum bezogen werden. Bei der Berechnung von σ_0 wird die Zahl der Freiheitsgrade bzw. die Überbestimmung im Blockverband berücksichtigt. Entsprechend den mittleren Gewichtseinheitsfehlern wäre zu schliessen, dass die besten Ergebnisse mit der Kammer von Zeiss Oberkochen erzielt werden, für die Wild-Kammer wie auch für die Kammer von Zeiss Jena werden knapp 10% höhere Restfehler ausgewiesen. Diese Ergebnisse wurden nach Kompensation der systematischen Bilddeformationen durch eine variable Anzahl von zusätzlichen Parametern erzielt. Die durch diese zusätzlichen Parameter approximierten Bilddeformationen werden in der Abb. 7 ausgewiesen. Hierbei wird wie üblich davon ausgegangen, dass die Bilddeformationen für eine Aufnahmekammer über den gesamten Blockverband als konstant angenommen werden dürfen.

Bei der Betrachtung der Abb. 7 stellt man beträchtliche Unterschiede bei den Bilddeformationen fest; weist die Wild-Kammer die geringsten Bilddeformationen auf, so ergeben sich für die

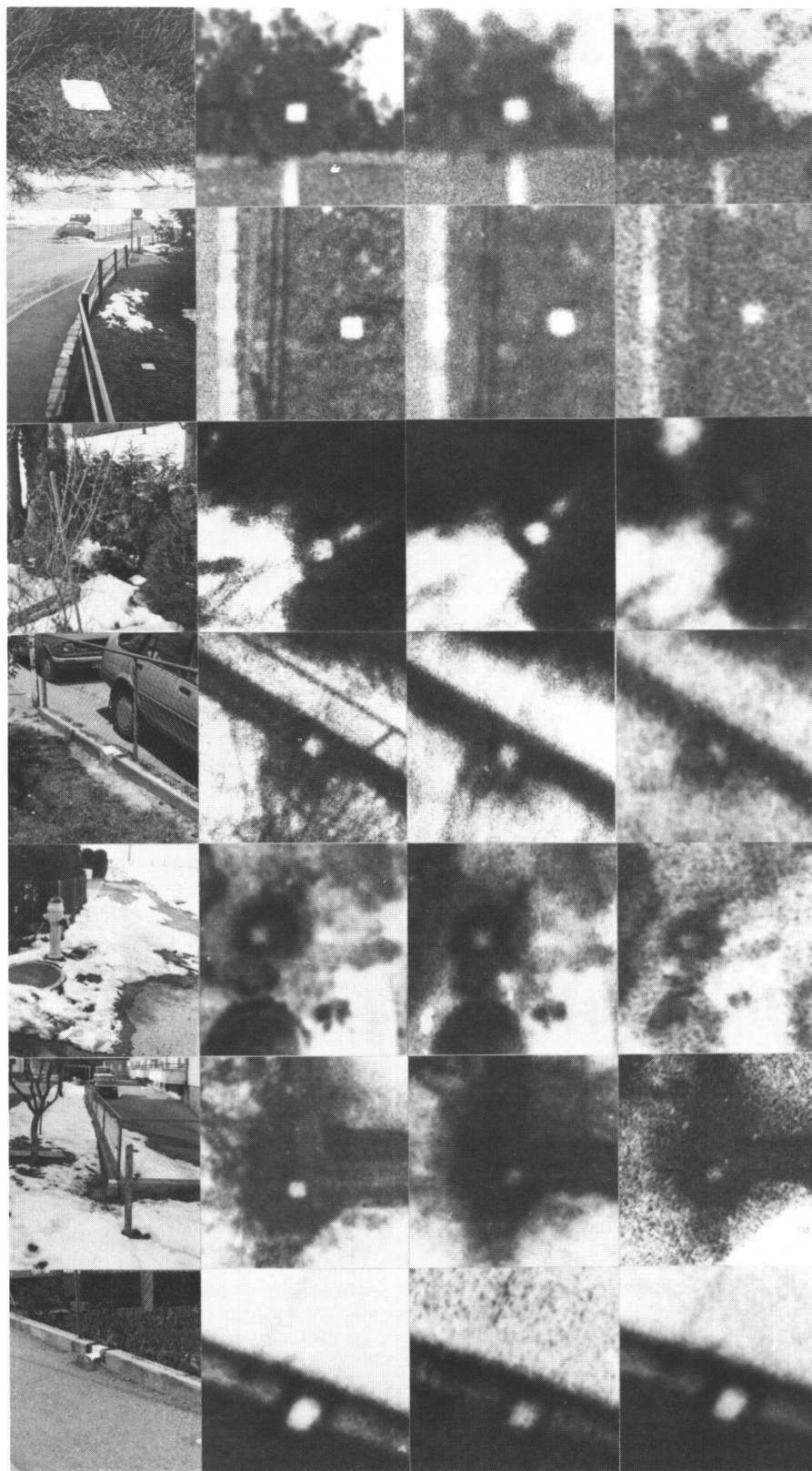


Abb. 6 Mikrovergrößerungen von signalisierten Punkten, aufgenommen mit verschiedenen Kammern und unterschiedlichen Bildmassstäben. 1. Kolonne links: Aspekt im Gelände. 2. Kolonne: 40fache Mikrovergrößerung der entsprechenden Luftaufnahme mit Kammer Zeiss Jena bei Kompensation der Bildwanderung. 3. Kolonne: Vergleichsaufnahme mit der Wild-Kammer RC10A ohne Kompensation der Bewegungsunschärfe, Originalmassstab jeweils ca. 1:3000. 4. Kolonne: Aufnahme RC10A, Originalmassstab 1:5500, 80fach vergrößert.

Erläuterungen		Panatomic-X-Film						Plus-X		Anzahl Punkte und Freiheitsgrade
		LMK Zeiss Jena		RC10A Wild		RMK Zeiss Oberk.		RC10 Wild		
Mittl. Einstellfehler bezogen auf das Mittel (µm)	Rahmenmarken Detailpunkte	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	m _x	m _y	336 Punkte ~ 1100 Punkte
		1.1	1.0	0.8	0.9	1.0	1.1	0.8	0.9	
		1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	1.1	1.2	
Mittl. Restfehler an den Rahmenmarken nach Affin- transformation auf Kalibrierungswerte (µm)		12.0	3.9	3.9	1.8	13.0	6.3	4.4	3.4	336 Punkte
Mittl. Gewichtseinheits- fehler der Blockaus- gleichung (µm)	mit zus. Parameter	2.7		2.7		2.5		2.6		1600 Freiheitsgrade
	Anzahl Parameter	11		6		14		12		
	ohne zus. Parameter	(7.8)		(3.2)		(4.2)		3.4		~ 120 Passpunkte
Restfehler in den Passpunkten	m _x (cm)	0.9		0.8		0.8		0.8		
	m _y (cm)	0.7		0.8		0.8		0.8		
	m _z (cm)	1.5		1.3		1.4		1.4		
Restfehler in den Pass- und Verknüpfungspunkten (µm)	in radialer Richtung	2.5		2.5		2.3		2.5		
	in tangentialer Richtung	2.1		2.1		2.2		2.3		

Tab. 3 Übersicht über die Ergebnisse der Blockausgleichung.

Kammer von Zeiss Oberkochen und insbesondere für die Kammer von Zeiss Jena beträchtlich höhere Werte. In Tabelle 3 wird auch der mittlere Gewichtseinheitsfehler der Blockausgleichung ohne die Verwendung von zusätzlichen Parametern ausgewiesen (vgl. Werte in Klammer). In diesem Fall würde die Wild-Kammer mit

$\sigma_0 = 3,2 \mu\text{m}$ am besten abschneiden. Es fällt schwer, die ausgewiesenen Bilddeformationen zu interpretieren. Da sämtliche Fliegerfilme unter gleichen Bedingungen entwickelt wurden, dürfte der Entwicklungsvorgang als Ursache für die Bilddeformationen wohl ausscheiden. Vergleicht man die Bilddeformationen mit den Restfehlern an den Rah-

menmarken, so zeigt sich eine gewisse Übereinstimmung für die Kammer von Zeiss Jena und der RC10 mit dem Plus-X-Film.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Zuge der inneren Orientierung die Messwerte auf die Kalibrierungswerte der Rahmenmarken über eine Affintransformation eingepasst wurden. Die Restfehler in den Rahmenmarken können daher nur eine trapezförmige Verformung oder eine Durchbiegung aufweisen. Demgegenüber werden trapezförmige Bilddeformationen durch die Freiheitsgrade der Bildorientierung (φ , ω) noch weitgehend kompensiert. Es verbleiben bei der Blockausgleichung im wesentlichen nur die Durchbiegung am Bildrand und eventuelle Pseudo- ω -Verformungen (trapezförmige Verzerrung mit Streckung). Trotz dieser Einschränkung lässt sich, wie bereits erwähnt, keinerlei Ähnlichkeit zwischen den Restfehlern in den Rahmenmarken und den Bilddeformationen bei der Kammer von Zeiss Oberkochen feststellen. Auch die RC10A lässt in dieser Beziehung keine Rückschlüsse zu, da nur vier Rahmenmarken vorliegen. Eine gewisse Übereinstimmung zwischen den Bilddeformationen und den Restabweichungen in den Rahmenmarken lässt sich demgegenüber bei der Kammer von Zeiss Jena und der RC10A von Wild erkennen, dies in bezug auf die Größenordnung und auch in begrenztem Masse in bezug auf die Form. Bemerkenswert ist auch, dass die Kammern Wild und Zeiss Jena eine etwas geringere Genauigkeit in radialer Richtung als in tangentialer Richtung aufweisen (vgl. auch Abb. 8). Es ist schwer vorstellbar, dass es sich hierbei um Restkomponenten von radialen Fehlern handelt, nachdem die ausge-

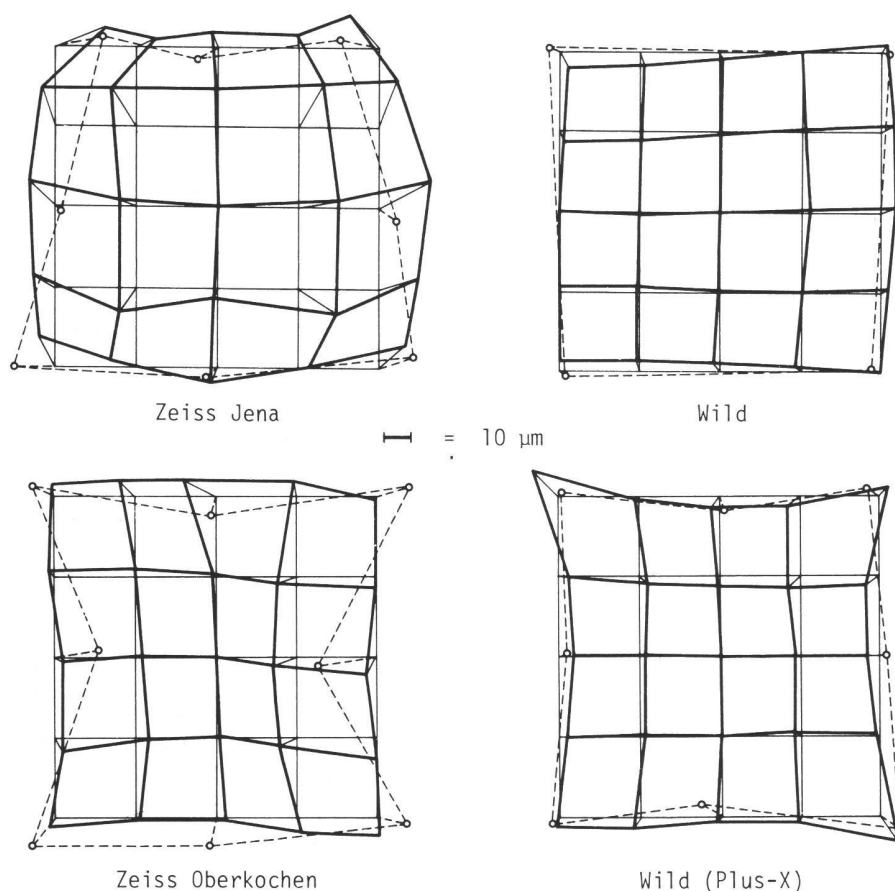


Abb. 7 Bilddeformationen entsprechend der Blockausgleichung und Abweichungen in den Rahmenmarken nach Affintransformation (Kreise).

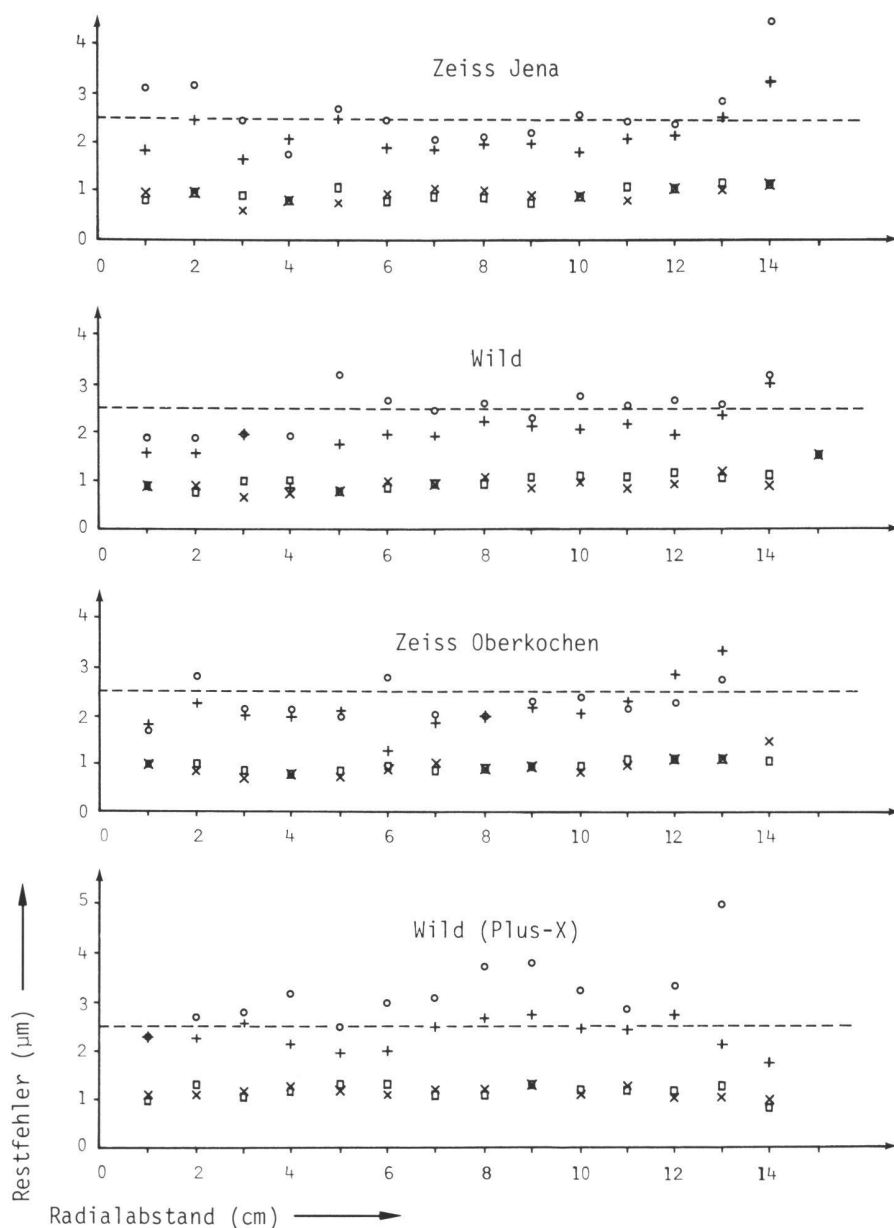


Abb. 8 Restfehler in den Passpunkten und Verknüpfungspunkten nach der Blockausgleichung in Funktion des radialen Abstandes vom jeweiligen Bildhauptpunkt. Ausgewiesen werden die Fehlerkomponenten in radialer (o) und tangentialer (+) Richtung sowie die Beobachtungsfehler, ebenfalls aufgespalten in die radiale (□) und tangentielle Komponente (x).

wiesenen radialen Restfehler nahezu ausschliesslich unter 1 µm bleiben. Wahrscheinlicher wäre, dass hierbei gewisse Unregelmässigkeiten bei der Filmplanlage eine Rolle spielen. Vergleicht man schliesslich die Ergebnisse zwischen dem Panatomic-X-Film und dem Plus-X-Film, so stellt man fest, dass mit der Steigerung des Auflösungsvermögens anscheinend keine Steigerung der Messgenauigkeit erzielt wurde. Dies ist nicht verwunderlich, da bei der Signalisierung ein sehr hoher Aufwand, vor allem durch die Aufbringung des Kontrastringes, getrieben wurde. Bei den in der Praxis verwendeten Signaltafeln oder bei der lediglichen Bemalung der Steinköpfe sollte das höhere Auflösungsvermögen jedoch durchaus zum Tragen kommen.

5. Schlussbemerkungen

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, drei moderne Aufnahmekammern miteinander zu vergleichen. Wir sind uns bewusst, dass eine vergleichende Untersuchung immer ein problematisches Unternehmen ist. Schon aus praktischen Gründen musste diese Untersuchung auf einen einzigen Bildflug mit nur einer Kammer des jeweiligen Herstellers beschränkt bleiben. Die Ergebnisse dürfen daher keinesfalls als repräsentativ für die Kammer eines Herstellers betrachtet werden. Der Verfasser sieht die Bedeutung der Untersuchung vielmehr im Aufzeigen von Verfahren zur Qualitätsbeurteilung der Aufnahmekammern unter Flugbedingungen. Die geometrischen Tests stellen an sich keine Besonderheit dar, dieser Teil

der Untersuchung war jedoch wichtig, um das einwandfreie Funktionieren der Filmplanlage aufzuzeigen.

Die Untersuchungen zur Bildqualität zeigen, dass bei der Verwendung des Panatomic-X-Films die Güte des Abbildungsobjektives voll zum Tragen kommt. Das aufgezeigte Verfahren zur Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion ist genügend sensibel, um die unterschiedliche Abbildungsqualität der Objektive aufzuzeigen. Es kann daher durchaus empfohlen werden, diese Tests etwa bei der Abnahme eines Objektives oder auch für die routinemässige Überprüfung zu verwenden. Die ausgewiesenen Kurven können dabei als Referenz dienen. Vorerst konnten nur vereinzelt die unter Flugbedingungen ermittelten MÜF mit Labormessungen verglichen werden. Bei der Analyse dieser wenigen Daten ergibt sich der Eindruck, dass die Feldmessungen bessere Ergebnisse liefern als Labormessungen. Eine Erklärung dieser Unterschiede steht noch aus. Die Bedeutung der vorliegenden Arbeit liegt daher vor allem im methodischen Bereich und der Aufstellung einer Referenz für weitere Analysen.

Der Autor ist ganz besonders den Firmen Zeiss Jena und Wild verpflichtet; die beiden Firmen hatten für diese Untersuchungen in sehr entgegenkommender Weise ihre Kamern zur Verfügung gestellt; der Bildflug mit diesen beiden Kamern wurde freundlicherweise von der Eidgenössischen Vermessungsdirektion ausgeführt; die Entwicklung der Filme übernahm das Bundesamt für Landestopographie. Den Bildflug mit der Kammer von Zeiss Oberkochen hatte die Firma Hansa Luftbild ausgeführt. Vom Institut für Photogrammetrie hatten sich die Herren J. Hawawini und T. Perret ganz besonders um die Signalisierung des Testfeldes und die Auswertung des Bildmaterials bemüht.

Literatur

- [1] O. Kölbl: Augmentation de la performance de la photogrammétrie en mensuration cadastrale. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 1/83, S. 4–11.
- [2] R. Welch, J. Halliday: Imaging Characteristics of Photogrammetric Camera Systems. XIth Int. Congress of Photogrammetry, Presented Paper for Comm. II, 1972, 60 S.
- [3] American Society of Photogrammetry: Manual of Photogrammetry, 4th Ed. 1980, S. 352–357.
- [4] Brindöpke/Jaakkola/Noukka/Kölbl: Optimal Emulsions for Large Scale Mapping (OEEPE Commission C). International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. XXV Part A1, S. 6–15.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Otto Kölbl
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Institut de Photogrammétrie
GR-Ecublens, CH-1015 Lausanne