

Abbildungsqualität photogrammetrischer Objektive unter Berücksichtigung von Umwelteinflüssen

H.J.Tiziani, Inst.f.Techn.Optik, Uni Stuttg., Pfaffenwaldring 9  
7000 Stuttgart-80

1. Einführung

In den frühen 50-er Jahren wurden mit der Einführung der Hochleistungsobjektive deutliche Fortschritte in der Photogrammetrie erreicht. Durch die verbesserte Farbkorrektur über einen größeren Spektralbereich - am Anfang der 60-er Jahre - konnte eine weitere Verbesserung der Bildqualität erzielt werden. In den letzten Jahren wurde die Lichtstärke der Weit- und Überweitwinkelobjektive erhöht.

Moderne Hochleistungsobjektive für Luftbildaufnahmen sind heute speziell in Bezug auf Verzeichnung und Bildqualität optimiert. Sie weisen auch eine gute spektrale Transmissionscharakteristik im Spektralbereich von  $0,45 \mu\text{m} < \lambda < 1 \mu\text{m}$  auf.

Die Verzeichnungsrestfehler sind heute so stark vermindert, daß eine weitere Verbesserung keinen wesentlichen Fortschritt mehr bringen würde. In Abb.1 ist eine Verzeichnungskurve für ein modernes Weitwinkelobjektiv zu sehen. Die Restfehler sind vielfach fabrikationsbedingt und können sehr klein gehalten werden.

Um die Qualität der Hochleistungsobjektive aber voll ausnutzen zu können, müssen auch die Umwelteinflüsse entweder kompensiert oder aber möglichst klein gehalten werden. Bei Luftbildobjektiven kann, durch die Verwendung von optisch hochwertigen Abschlußplatten und durch gute Isolierung, der Einfluß der Temperatur und Druckvariation reduziert werden.

Die Bewertung photogrammetrischer Aufnahmeobjektive, mit Hilfe der optischen Übertragungsfunktion, ist eingeführt. Es wird aber, nach wie vor, mit Auflösungsstemarken gearbeitet. Deshalb ist es auch erforderlich, Übereinstimmung mit Auflösungsstesten, die mit den herkömmlichen Testvorlagen durchgeführt werden, mit denen mit Hilfe der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) gefundenen Werten zu erreichen /1/. Aus dem Schnittpunkt der MTF-Kurve mit der Schwellwertkurve ergeben sich die Auflösungswerte aus der MTF. Die Festlegung der Schwellwertkurve für Luftbildaufnahmeobjektive ist in Referenz /1/ beschrieben. Abb.2 veranschaulicht die Übereinstimmung der Testergebnisse für die Auflösungszahlen eines 31-

teren Luftbildobjektives (15U Ag II). Die Ergebnisse wurden durch Abbildung von Testwanzen und anschließender Auswertung auf dem Film einerseits, durch Bestimmung der Auflösung mit Hilfe der MTF und Schwellwertkurve andererseits, erhalten. Es wird aber nur ein Wert, nämlich die Auflösung, für einen bestimmten vorgegebenen Objektkontrast erhalten. Die Kurven der optischen Übertragungsfunktion liefern wesentlich mehr Information; vielfach sogar zu viel, die sinnvoll reduziert werden muß. Verschiedene Arbeiten über die Beurteilung der Bildqualität liegen vor /2-8/; weitere Untersuchungen und Vergleiche werden folgen. Für Gütekriterien ist es erforderlich, eine anwendungsorientierte Gruppeneinteilung zu machen, wie sie Dr. Kuttner in Referenz /7/ vorgeschlagen hatte. Luftaufnahmeobjektive fallen in eine dieser Gruppen. Dabei ist wegen der 60 - 80-prozentigen Überdeckung der Bilder, die später stereoskopisch ausgewertet werden, eine möglichst gleichmäßige Bildqualität über das Bildfeld erforderlich. Bild /3/ zeigt schematisch die nötige Bildüberdeckung bei der Aufnahme.

## 2. Bildgütekriterien bei Luftbildaufnahmeobjektiven

Bildgütekriterien dienen zur Beschreibung der Bildqualität optischer Systeme, sowie zum Vergleich verschiedener optischer Systeme untereinander, als auch zur Auffindung der besten Bildebene speziell bei Luftbildaufnahmeobjektiven /1/. Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) kann für Bildgütekriterien herangezogen werden /2-8/. Dabei wird die Phase, die für den Objektiv-Konstrukteur zwar wichtig ist, hier nicht berücksichtigt. Bei Bildgütekriterien für Luftbildobjektive, basierend auf der optischen Übertragungsfunktion, hat es sich gezeigt, daß eine Mittelung der MTF über das Bildfeld wichtig ist. Dabei werden die einzelnen Bildpunkte mit dem dazugehörigen Flächenanteil gewichtet. Die wichtigsten Kriterien für die Bildqualität von Luftbildaufnahmeobjektiven sind:

- Fläche unter der MTF bis zur Schwellwertkurve
- Über das Bildfeld gemittelte Fläche unter der MTF-Kurve; zur Beschreibung der Variation der Bildqualität über das Bildfeld.
- Kleine Abweichungen zwischen sag. und tang. MTF.
- Der kleinste Wert der MTF im ganzen Bildfeld ist vielfach eben-



falls von Bedeutung.

Bildgützkriterien werden anschließend diskutiert unter Berücksichtigung obiger Forderungen für Luftaufnahmeobjektive, eingesetzt in der Photogrammetrie. Ausgegangen wird von der Fläche unter der MTF-Kurve bis zur Schwellwertkurve,  $Q(w')$ , für die einzelnen Bildwinkel  $w'$ .

Die Mittelung der Fläche der MTF über das Bildfeld ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal, das bisher nicht berücksichtigt wurde. Dabei werden die Flächen  $Q(w')$  der MTF gewichtet mit Flächengewichten, die den einzelnen Bildpunkten zugeordnet sind. Mit den Flächengewichten wird der flächenmäßig beteiligte Bildausschnitt berücksichtigt. Die über das Bildfeld gemittelte Fläche der Modulationsübertragungsfunktion kann geschrieben werden als /1, 2, 7/:

$$Q = \int_0^{w'_{\max}} p(w') Q(w') dw'$$

dabei ist  $\int_0^{w'_{\max}} p(w') dw' = 1$

und  $Q(w') = \int_0^{R'_g} \sqrt{(T_s(R')) \cdot T_t(R')} dR'$

$Q(w')$  = Fläche der geometrischen Modulationsübertragungsfunktion. Es ist die Fläche des geometrischen Mittels aus sagittaler MTF und tangentialer MTF bis zum Schnittpunkt der schlechteren der beiden mit der Schwellwertkurve.

$p$  = Flächengewichte

$w'$  = Bildwinkel

$R'$  = Ortsfrequenz im Bild

$R'_g$  = Grenzfrequenz

$T_t$  = tang. MTF

$T_s$  = sag. MTF

Das Integral kann auch als Summe geschrieben werden:

$$\bar{Q} = \sum_{k=1}^N P_k Q_k, \text{ wobei } N = \text{Anzahl der Bildpunkte und } \sum_{k=1}^N P_k = 1.$$

Um den Einfluß der Variation der Bildqualität über das Bildfeld

zu erfassen, können wir, wie folgt, vorgehen:

$$\bar{Q}_\alpha = \left[ \sum_{k=1}^N P_k Q_k^\alpha \right]^{1/\alpha} \quad \text{für } \alpha \neq 0$$

Für gleichmäßige Bildqualität über das Bildfeld müßte für alle  $\alpha$   $\bar{Q}_\alpha = \bar{Q}$  sein.

Wir können die folgenden Ausdrücke einführen, nämlich:

- $\alpha = 1$  arithmetischer Mittelwert
- $\alpha = 2$  quadratischarithm. Mittelwert
- $\alpha = -1$  harmonischer Mittelwert
- $\alpha = -2$  quadratischharm. Mittelwert

Es hat sich herausgestellt, daß der Formalismus, wie er oben angedeutet ist, sehr brauchbare Resultate liefert, woraus auch ein Maß der Gleichmäßigkeit über das Bildfeld abgeleitet werden kann, z.B. durch das Verhältnis des harmonischen zum arithmetischen Mittel.

In Abb.4 sind einige Ergebnisse von älteren /1-4/ und neueren Objektiven /5-7/ zusammengefaßt. Es fällt auf, daß die neueren Konstruktionen /5, 6, 7/ gleichmäßigere Bildqualität über das Bildfeld aufweisen, als ältere. Abb.5 zeigt einen Vergleich der Bildqualität, die sich durch den Einsatz vom Farbfilter ergibt. Durch den Einsatz von Farbfiltern wird nicht nur das arithmetische Mittel über die Bildebene, sondern auch die Regelmäßigkeit beeinflusst. Dies bewirkt, daß bei F/4 die Kurve 2 zu 2' und bei F/5, 6 die Kurve 1 zu 1' wird.

Für zukünftige Vergleiche könnten die Flächen der MTF z.B. mit der Fläche der beugungsbegrenzten MTF normiert werden.

### 3. Einfluß von Umweltbedingungen auf die Bildqualität

Umwelteinflüsse können die Bildqualität von Hochleistungsobjektiven begrenzen. Der Einfluß von Umweltbedingungen auf die Bildqualität wird immer wichtiger. Abb.6 zeigt den Aufbau eines typischen Luftbildobjektives mit der entsprechenden Aufhängung und Abschlußplatte. Verschiedene Umwelteinflüsse beeinflussen die Bildqualität; daraus resultiert eine Verschmierung des Punktbildes. Mathematisch läßt sich dies als Faltung der Punktbildfunktion des Linsensystems mit der Verwaschungsfunktion beschreiben.

Die Intensität im Bild ohne Umwelteinflüsse kann geschrieben wer-

den als

$$\begin{aligned}
 B(u', v') &= \iint B(u, v) G(u'-v, v'-v) \, du \, dv \\
 \text{und} \\
 B_{\text{tot}}(u', v') &= \iint B(u, v) G_{\text{tot}}(u'-u, v'-v) \, du \, dv \\
 G_{\text{tot}}(u', v') &= [G(u', v') * F'_2(u', v')] * F'_1(u', v')
 \end{aligned}$$

wobei

- $G'(u', v')$  = Punktbild des optischen Systems  
 $F'_1 F'_2$  = Verwaschungsfunktionen, die beispielsweise aus Umwelteinflüssen resultieren  
 $*$  = Faltung

Die resultierende MTF ist das Produkt der MTF der Glieder.

### 3.1 Arten der Bildverschmierung

Die wichtigsten Arten der Verschmierung des Punktbildes sind:

- a) Lineare, gleichmäßige Bewegung
- b) Harmonische Schwingung
- c) Atmosphärische Einflüsse
- d) Defokussierung, bedingt durch Temperatur und Druckvariation.

#### 3.11 Gleichförmige, lineare Bildbewegung

Die einfachste, aber auch eine der wichtigsten Bewegungsarten, ist die lineare, gleichförmige Bewegung. Bedingt durch die endliche Verschlusszeit  $T_0$ , bewegt sich das Flugzeug oder Weltraumfahrzeug während der Aufnahme in Vorwärtsrichtung; das Bild wird verschmiert (Abb.7). Die Bildbewegung während der Aufnahme sei  $a'_1$ . Der Einfluß der Verschmierung auf das ideale Punktbild kann als entsprechende Verschmierung des Punktbildes berücksichtigt werden.

Die Fourier-Transformation von  $\text{rect}(\frac{u'}{a_1}) \text{rect}(\frac{u'}{a_2})$  (eindimens.), ergibt (Abb.7b, gleichförmige Bewegung)

$$\text{MTF}_{B_1} = \frac{\sin \pi R' a_1'}{\pi R a_1'} \cdot \frac{\sin \pi R' a_2'}{\pi R' a_2'}$$

Der zweite Faktor dient lediglich als Korrekturfaktor für den Fall, daß der Verschluss nicht sofort die ganze Öffnung frei gibt. Er wird für die weitere Abschätzung vernachlässigt. Demnach wird



$$MTF_B = \frac{\sin \pi R' a_1'}{\pi R' a_1'}$$

$$a_1' = \frac{v T_O f'}{H}$$

$R'$  = Ortsfrequenz im Bild

$v$  = Flugzeuggeschwindigkeit

$H$  = Flughöhe

$f'$  = Objektivbrennweite

für

$$v = 1500 \text{ km/h} \quad H = 7000 \text{ m} \quad f' = 300 \text{ mm} \quad T_O = 1/600 \text{ sec} \text{ wird:}$$

$$a_1' = 30 \text{ } \mu\text{m, bzw. } 10 \text{ } \mu\text{m} \quad \text{für} \quad T_O = 1/1800 \text{ sec.}$$

In Abb.7 sind entsprechende  $MTF_B$ -Kurven aufgezeichnet. Bei obigem Beispiel ist eine Bewegungskompensation bei Belichtungszeiten länger als 1/100 sec unbedingt erforderlich.

Für Weltraumflüge in einer Höhe von 250 km, bei Benutzung langbrennweitiger Objektive und hochauflösender Emulsionen wie Kodak 3412 und 3414, ist eine Bewegungskompensation im allgemeinen erforderlich.

Bei der Bewegungskompensation muß aber darauf geachtet werden, daß nicht zusätzliche Schwingungen oder Defokussierungen auftreten. Möglichkeiten der Bewegungskompensation sind: Filmbewegung während der Aufnahme oder Kompensation durch bewegten Spiegel /9/.

### 3.12 Schwingungen

Auch Schwingungen bewirken eine Verschmierung des Punktbildes. Grundsätzlich müssen wir dabei zwei Fälle unterscheiden, nämlich die Schwingungen mit relativ hoher Frequenz, verglichen mit der Belichtungszeit, die zwischen 1/100 und 1/1000 sec liegen kann, sowie der langsamen Schwingung.

#### Hochfrequenzschwingungen

(mindestens eine Schwingungsperiode während der Belichtungszeit; Abb.7b, harmonische Schwingung). Für diesen Fall wird die eindimensionale Intensitätsverteilung

$$F'(u') = \frac{1}{\pi \sqrt{\left(\frac{a_1'}{2}\right)^2 - u'^2}}$$

Die Fourier-Transformation ergibt die Übertragungsfunktion der Schwingung, nämlich

$$MTF_v = J_0(\pi a'R')$$

In Abb.9 sind MTF-Kurven für  $a' = 40 \mu\text{m}$ ,  $a' = 30 \mu\text{m}$  und  $a' = 10 \mu\text{m}$  aufgetragen, wobei  $a' = \omega f'$  und  $\omega =$  Winkelgeschwindigkeit sind.

#### Niederfrequenzschwingungen

Für Schwingungen mit einer Schwingungsfrequenz, die klein ist, verglichen mit der Verschußzeit, kann näherungsweise mit gleichförmiger, linearer Bewegung gerechnet werden.

Werte für  $\omega$  bei Flugzeugen sind  $0,01 < \omega < 0,03 \text{ rad/sec}$ ; bei Satelliten-Aufnahmen liegen die Werte tiefer.

#### 3.13 Atmosphärische Einflüsse

Verschiedene atmosphärische Einflüsse können die Bildqualität beeinflussen. So wird das Luftlicht den Kontrast des Objektes reduzieren. Weitere Einflüsse: Absorption und Brechung durch die Atmosphäre, die aber die Bildqualität nicht direkt beeinflussen.

#### Atmosphärische Turbulenz

Die atmosphärische Turbulenz nimmt mit der Flughöhe zu bis 10.000 m. Für größere Flughöhen nimmt der Einfluß ab.

Über den Einfluß der Turbulenz auf die optische Übertragungskette gibt es zur Zeit noch wenig Literatur. Hufnagel /13/ beschreibt die MTF der Turbulenz in einem Modell, das eine zufällige, durch Turbulenz bedingte Verteilung der Wellenfrontvariation annimmt. Davon errechnet sich die  $MTF_T$  als Fourier-Transformation der Verwaschungsfunktion, nämlich (Abb.7b, Turbulenz)

$$MTF_T(R') = \exp\left[-2\left(\pi\sigma\frac{f'}{H}R'\right)^2\right]$$

$\sigma$  = Sichtweitenfaktor (rad.m Flughöhe)

$f'$  = Brennweite des Objektivs

$H$  = Flughöhe

$R'$  = Ortsfrequenz im Bild

Die obige Formel gilt besonders für Flughöhen über 10.000 m und variiert zwischen 0,015 und 0,1 für gute, bzw. schlechte Sichtverhältnisse /13/.

#### Luftlicht (Haze)

Das Luftlicht erhöht die Beleuchtungsstärke und reduziert den

Kontrast im Bild. Der Kontrast im Bild ist definiert nach Michelson

$$MTF_S = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\max} + \rho_{\min} + \frac{2\pi L}{E T_A}}$$

wenn

$$I_{\max} = E \rho_{\max} T_A + \pi L$$

$$I_{\min} = E \rho_{\min} T_A + \pi L$$

und

E = Beleuchtungsstärke (Lux) des Objektes,  
bedingt durch Sonne und Himmelslicht.

L = Leuchtdichte der Atmosphäre

$\rho_{\max}$  = max. Reflexionskoeffizient der Objektstruktur

$\rho_{\min}$  = min. Reflexionskoeffizient der Objektstruktur

$T_A$  = Transmission der Atmosphäre

$T_A \approx 0,75$  nach /15/

Beim Beispiel des Steines ( $\rho_{\max} = 0,2$ ) auf dem Waldboden (mit  $\rho_{\min} = 0,04$ ) reduziert sich die von der Ortsfrequenz unabhängige Modulation mit  $L = 2000 \text{ cd/m}^2$ ,  $E = 8,610^6 \text{ Lux}$   
von  $MTF_S$  ohne Luftlicht = 0,67  
auf  $MTF_S$  mit Luftlicht = 0,38

Das Luftlicht führt demnach zu einer ortsfrequenzunabhängigen Kontrastreduzierung. Die streuenden Partikel in der Atmosphäre werden durch Streuung den Objektkontrast wellenunabhängig vermindern.

Da die Streuung im blauen Spektralbereich stärker ist als im roten, kann mit einem Filter der Einfluß des Luftlichtes reduziert werden.

### 3.14 Einfluß der umweltbedingten Defokussierung auf die Bildqualität

Druck und Temperaturveränderungen in der Objektkammer können zu einer Änderung der Verzeichnung führen. Sie führen aber auch zu einer Defokussierung und damit zu einer Beeinflussung der Bildqualität. Bei geometrischer Näherung wird nach Abb.10 näherungsweise die

$$MTF_{\text{Def}} = \frac{2J_1\left(\frac{2\pi R' \Delta r'}{\lambda}\right)}{2\pi R' \Delta r' / \lambda}$$



wobei

- $J_1$  = Besselfunktion der 1. Ordnung 1. Art
- $R'$  = Ortsfrequenz im Bild
- $\Delta r'$  = Radius des Streukreises im Bild  
=  $\frac{D}{2f'}$   $\Delta f'$
- $\Delta f'$  = Defokussierung

Arbeiten von Bormann und Mathieu /10/, sowie H.K.Meier /11/, haben gezeigt, daß beträchtliche Defokussierungen beim Fliegen durch Temperaturveränderungen auftreten können. Die Änderungen scheinen annähernd proportional mit der Brennweite zuzunehmen und sind auch vom Objektivtypus abhängig. Abb.11 zeigt die experimentellen Ergebnisse von Bormann und Mathieu der umweltbedingten Defokussierung im Labor. Abb.12 zeigt die gerechneten  $MTF_{Def}$ -Kurven des im Labor getesteten Objektivs mit umweltbedingten Defokussierungen von  $\Delta f' = 20 \mu m$ ,  $40 \mu m$  und  $80 \mu m$ .

Umwelteinflüsse müssen für die Auslegung von neuen Objektiven berücksichtigt werden. Die Schwellwertkurve ermöglicht diese Berücksichtigung. Dies wird am Beispiel eines Satellitenaufnahmeobjektivs demonstriert. In Abb.13 werden die Umwelteinflüsse für zwei Objektive der Brennweiten 300 mm und 600 mm mit Hilfe der Schwellwertkurve berücksichtigt. Dabei wird hochauflösende Emulsion, Kodak 3414, für Niedrig-Kontrast-Objekte mit  $k = 1,6$  ( $k \approx \frac{I_{max}}{I_{min}}$ ) berücksichtigt. Die MTF der Emulsion ist in Abb.13 eingezeichnet.  $SW_n$  (30 cm) und  $SW_n$  (60 cm) sind die umweltbedingten Schwellwertkurven für die Objektive der Brennweiten 300 mm, bzw. 600 mm.

Umwelteinflüsse wirken sich bei Objektiven mit längeren Brennweiten stärker aus. Die Schwellwertkurve ohne Umwelteinfluß für Hochkontrast  $k = 1000 : 1$  ist ebenfalls eingezeichnet. Der Schnittpunkt der so ermittelten Schwellwertpunkte mit der MTF des Objektivs ergibt die Auflösung. Der Bildeindruck kann aber am besten beurteilt werden durch den Verlauf der MTF bei niedriger Ortsfrequenz als der, gegeben durch die Auflösung.

#### 4. Zusammenfassung

Hochleistungsobjektive für die Luftbildaufnahmen haben einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Umwelteinflüsse machen sich auf die Bildqualität bemerkbar, ja können sie sogar begrenzen. Anstren-

gungen sind erforderlich, diese Umwelteinflüsse zu erfassen und zu berücksichtigen. Die MTF bietet dazu die Möglichkeit. Bei der Beschreibung der Bildqualität ist die Berücksichtigung des ganzen Bildfeldes wesentlich. Qualitätseinbrüche bei einzelnen Bildwinkeln sind zu vermeiden.

Es zeigt sich auch, daß die Auflösungsteste bei Hochkontrast für den Bildeindruck nicht aussagekräftig sind. Die MTF-Werte bei der halben Grenzfrequenz sind aussagekräftiger, als bei der Grenzfrequenz. Objekte mit Hochkontrast gibt es bei Luftbildaufnahmen selten.



LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Tiziani, H.J.: The use of optical transfer function for assessing the quality of optical systems, Photogrammetria 34, pp. 45-68 (1978)
- [2] Tiziani, H.J.: Image quality criteria for aerial survey lenses, ISP-Symposium Com. I, Tokyo (1978)
- [3] Linfoot, E.H.: Qualitätsbewertung optischer Bilder, F. Vieweg & Sohn, Braunschweig (1960)
- [4] Hertel, J.: Neue Methoden zur Prüfung und Bewertung von Objektiven, Dr.-Ing. Dissertation, TU Berlin (1963)
- [5] Heinacher, E.: Über die Bedeutung der Kontrastwiedergabe photographischer Objektive, Kino-Technik 18, pp. 159-164 (1964)
- [6] Biedermann, K.: Ermittlung des Zusammenhanges zwischen subjektiver Bildgüte und den physikalischen Eigenschaften des photographischen Bildes, Dissertation, TU München (1965)
- [7] Bericht Opt-7  
6.PTB Seminar: Kennzeichen der Abbildungsgüte optischer Systeme PTB, Braunschweig (1978)
- [8] Heidinger, D.: Zur Bildgüte von Kleinbildobjektiven insbesondere bei außeraxialer Abbildung
- [9] Konecny, G./  
Schröder, M.: Einsatz von photographischen Meßkammern im Weltraum, AVN (1979)
- [10] Bormann, G.E./  
Mathieu, E.: Experimental results of lens calibration of different temperatures, ISP XIV. Kongreß Hamburg (1980), Com. I
- [11] Meier, H.K.: Verzeichnung, Kamerakonstante und Fokussierung von Luftbildkammern unter dem Einfluß bildspezifischer Umweltbedingungen, Bul. 6 (1978), pp. 193-198

- | 12 | Shack, R.V.:           The influence of image motion and shutter operation on the photographic transfer function,  
Appl. Opt. Vol. 3, pp. 1171 (1964)
  
- | 13 | Hufnagel, R.E.:        Random wavefront effects,  
Phot. Sc. Eng. 9, pp. 244 (1965)
  
- | 14 | Slater, P.N.:           Manual of Remote Sensing, ed. R.G. Reeves,  
American Society of Photogrammetry (1975)
  
- | 15 | Welch, R./  
Halliday, J.:           Imaging Characteristics of Photogrammetric Camera Systems,  
Proc. XII International Congress for Photogrammetry, Ottawa (1972)



Objektiv 15/4 UAG

F/4.0,  $f' = 152.8 \text{ mm}$

$400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$

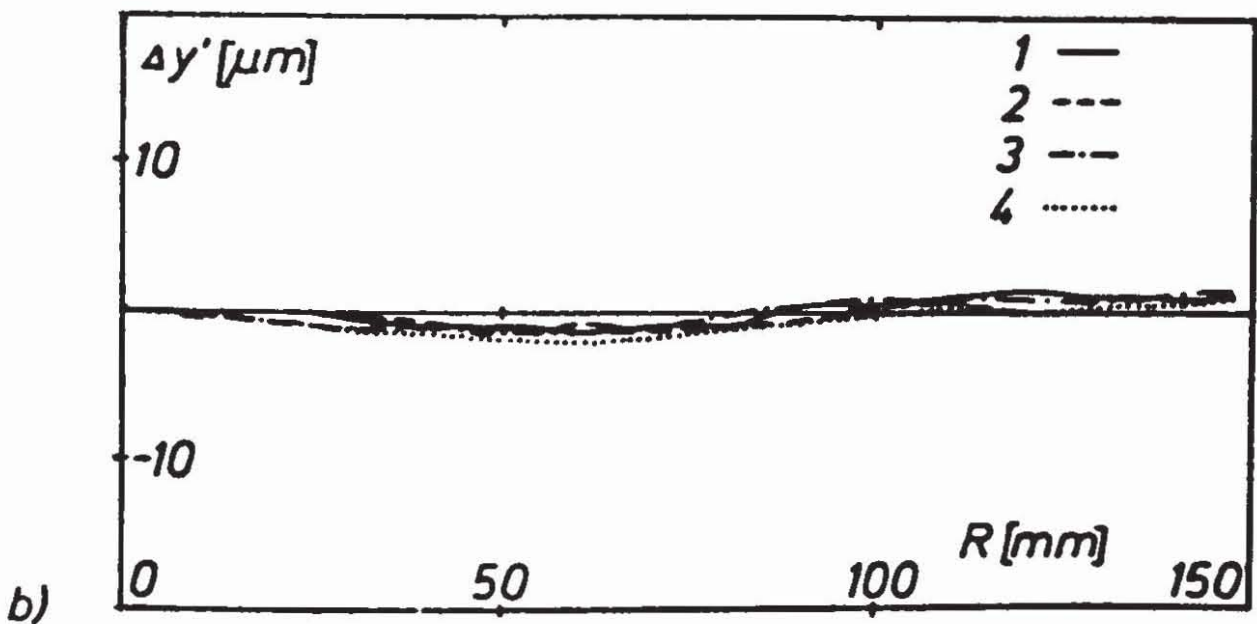
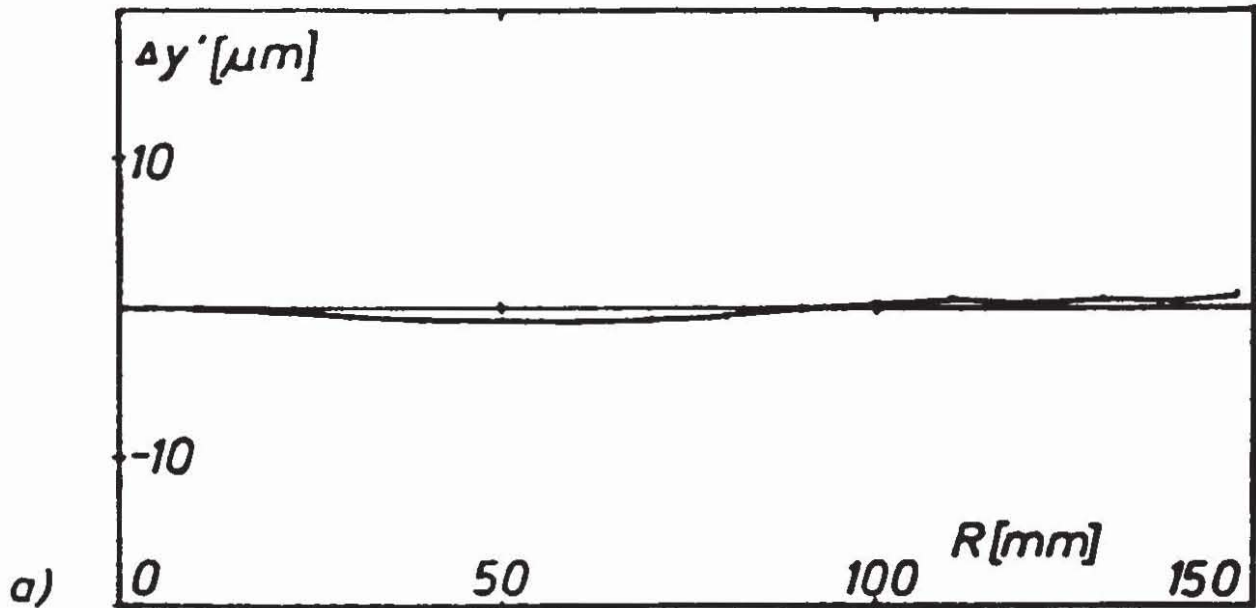
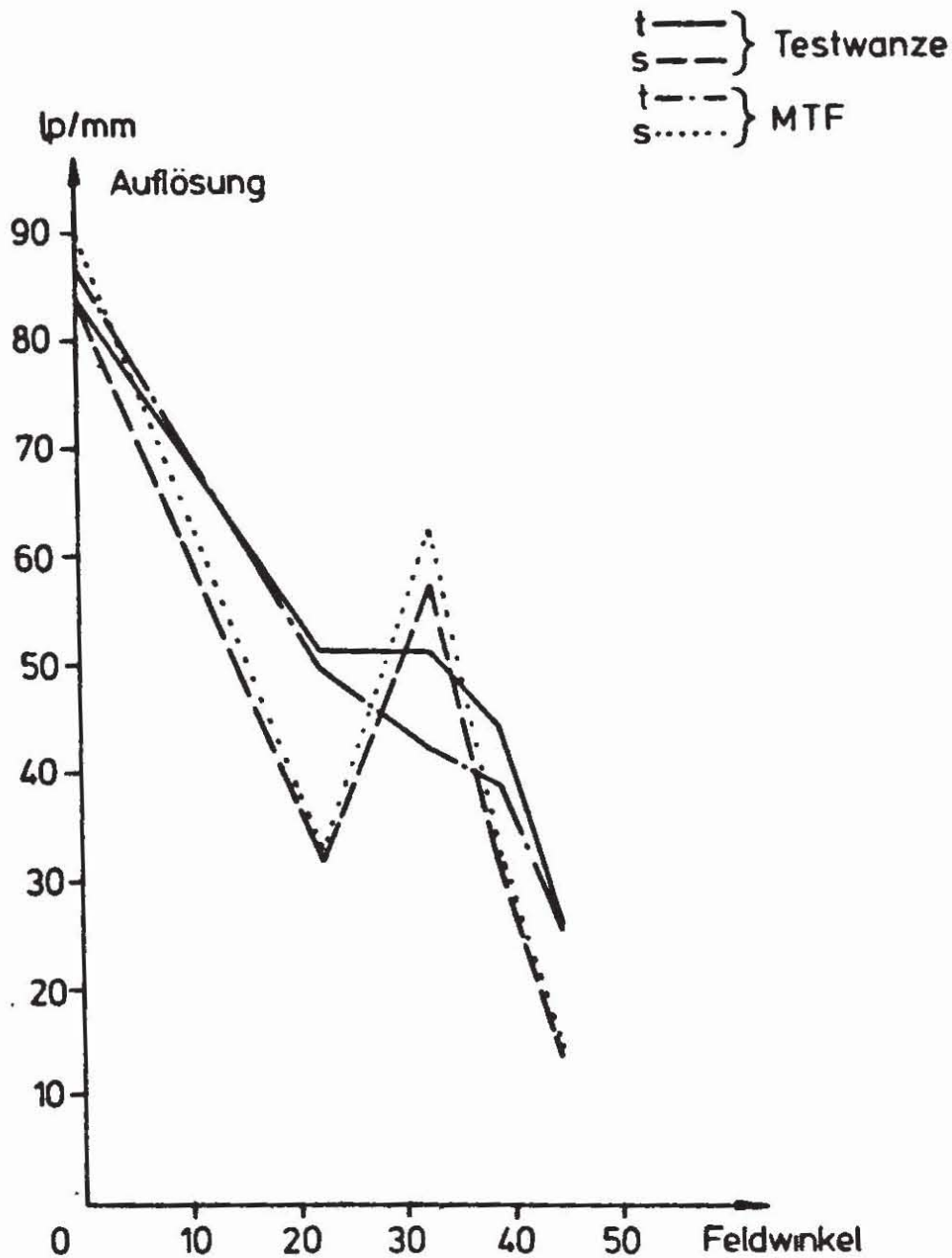


Abb. 1: Ergebnisse der Verzeichnungsmessung eines Luftbildobjektives der neuen Generation der Brennweite  $f' = 152,8 \text{ mm}$  und der Blende F/4  
a) für eine Bildhalbdiaagonale  
b) für vier Bildhalbdiaagonalen



### Vergleich: Testwanze - MTF

Abb. 2 : Vergleich von experimentellen Auflösungsahlen, resultierend aus der Abbildung von Testwanzen als auch aus dem Schnittpunkt der gemessenen MTF und der Schwellwertkurve des Filmes.

Die Auflösung eines älteren Luftbildobjektives (15 U AG II) ist über dem Bildfeld aufgetragen.



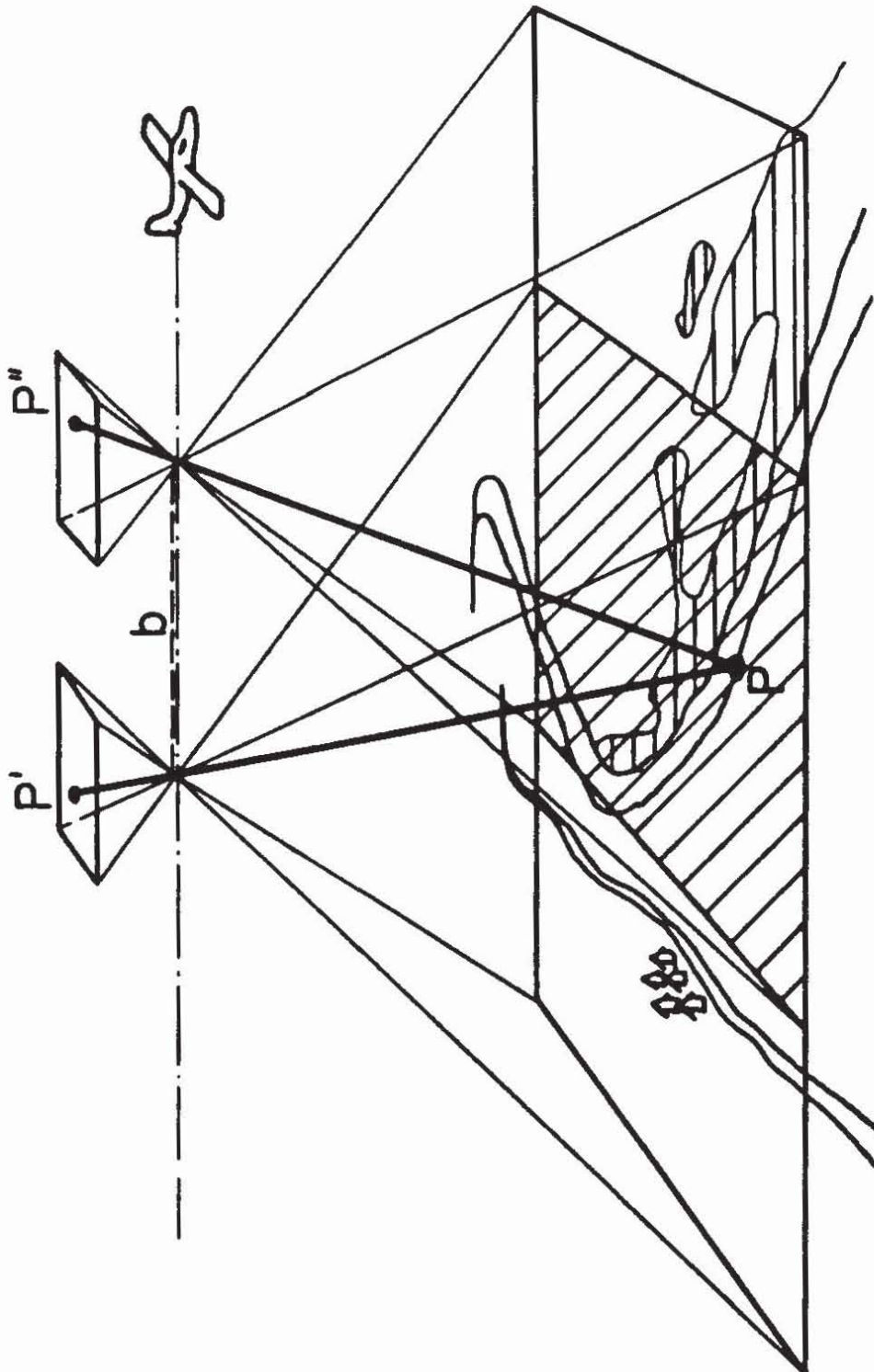


Abb. 3: Schematische Darstellung der Oberdeckung beim Bildflug

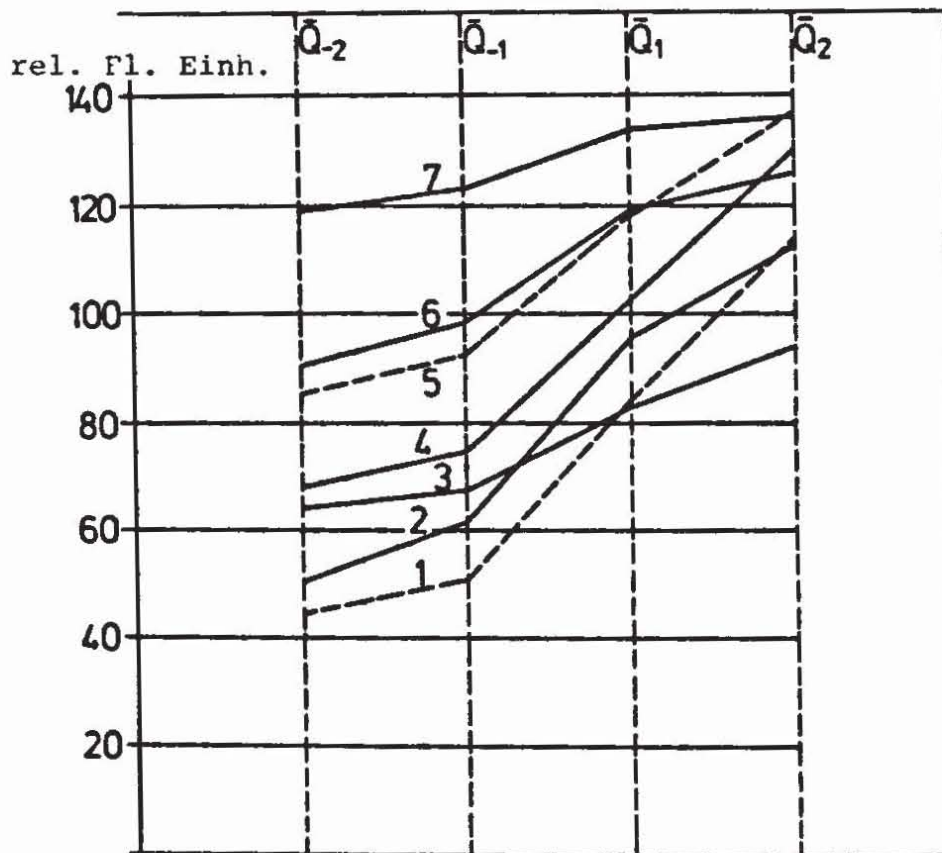


Abb. 4: Vergleich der unnormierten  $Q_{\alpha}$  von älteren und neuen Objektiv-Konstruktionen

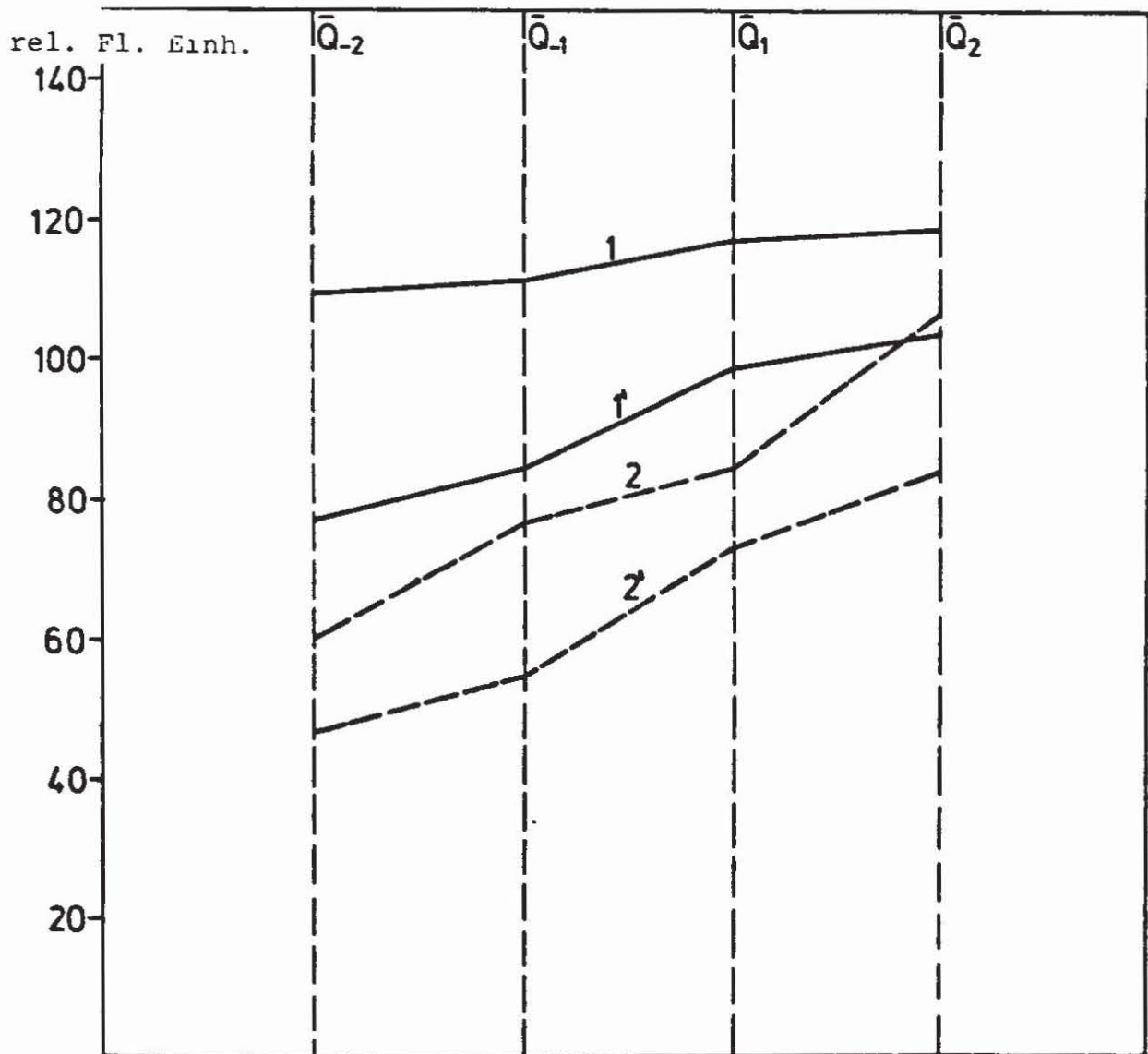


Abb. 5: Vergleich der unnormierten  $Q_\alpha$  für zwei Öffnungen F/4 und F/5, 6, 1, bzw. 2 und die entsprechenden Werte bei der Benutzung eines Farbfilters 1', bzw. 2'



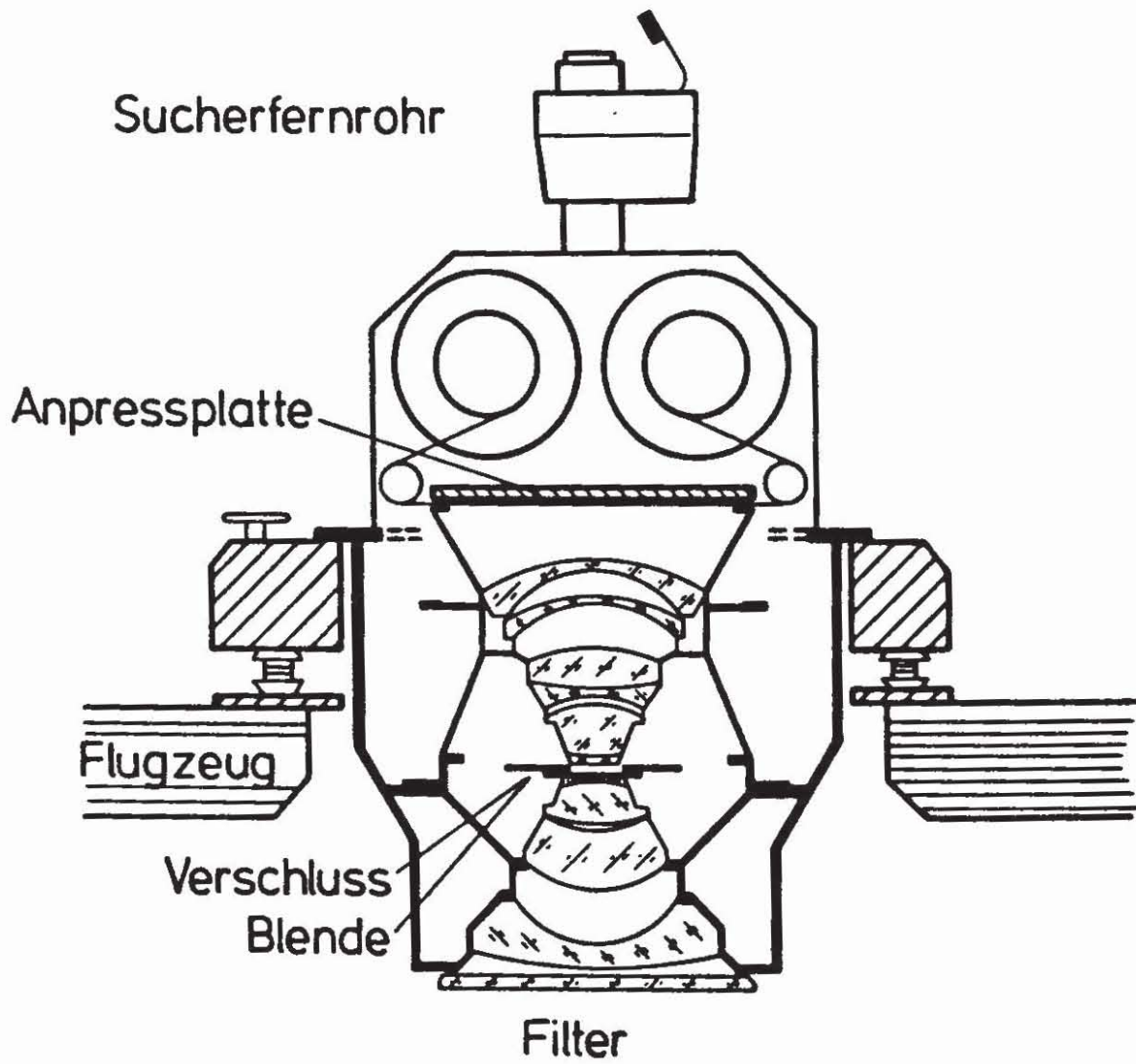
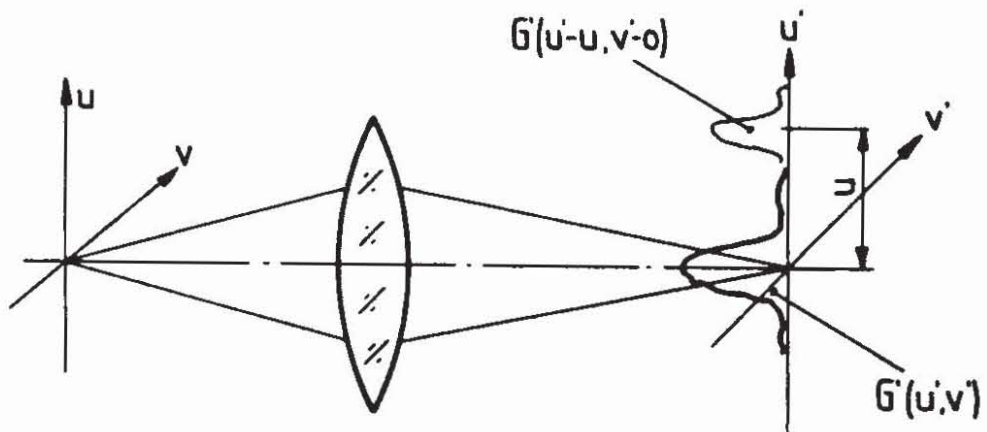


Abb. 6 : Prinzipieller Aufbau der Luftbildaufnahmekamera



a)

Bewegungsart	Bildbewegung	Bildgeschwindigkeit	Verwaschungsfunktion
a) gleichformige Bewegung			 $F'(u', 0) = \text{rect} \left( \frac{u'}{a} \right)$
b) harmonische Schwingung			 $F'(u', 0) = \frac{1}{\pi \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - u'^2}}$
c) zufällige Bewegung - Turbulenz			 $F'(u', 0) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u'^2}{2a^2}\right)$

b)

Abb. 7 : Bildverschmierung durch verschiedene Umwelteinflüsse

a) Punktbild ohne Verschmierung

b) Typische Bildbewegung mit Verwaschungsfunktionen

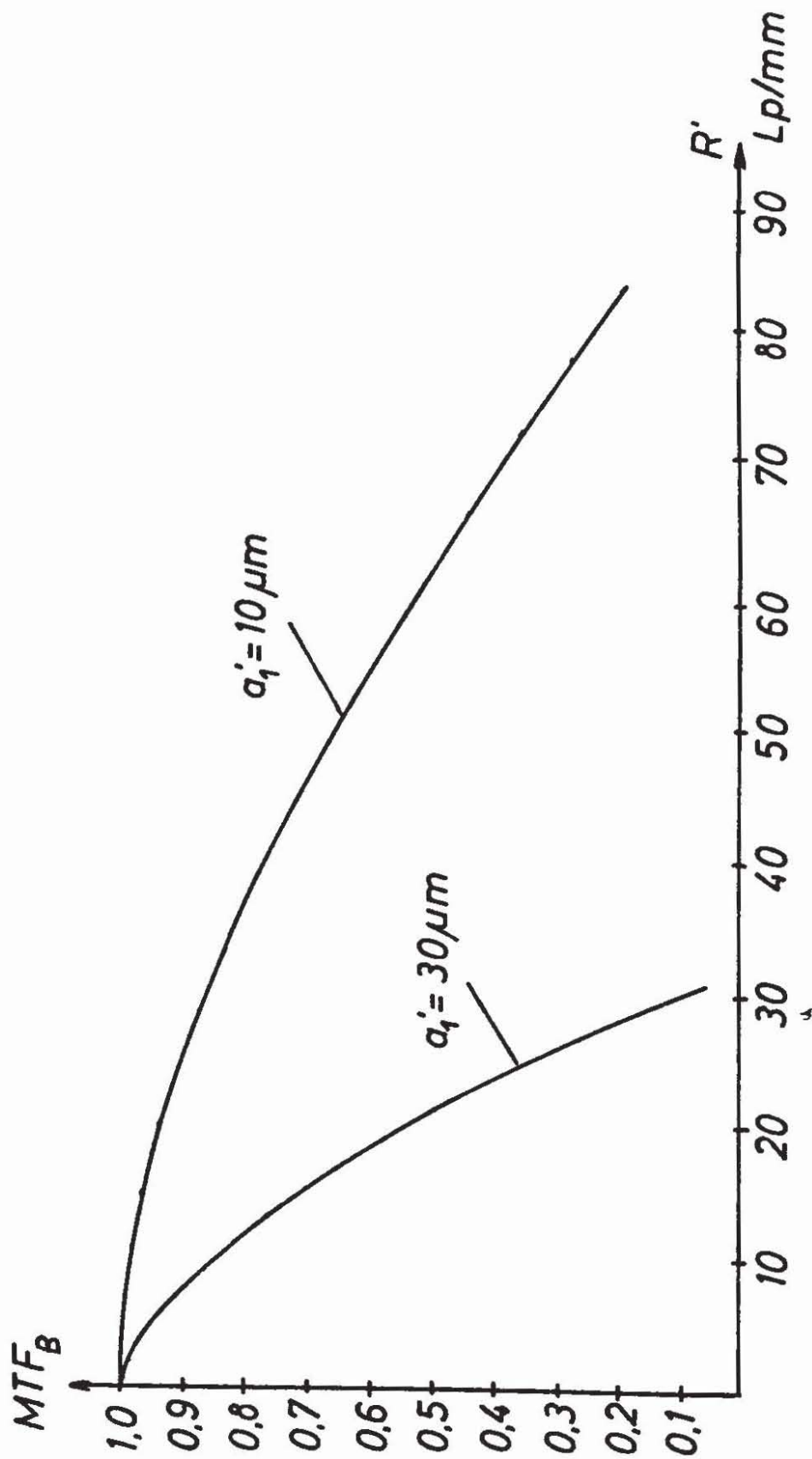


Abb. 8 :  $MTF_{B_1}$  der Bildbewegung für Bildbewegungen  $a'_1 = 30 \mu m$  und  $10 \mu m$



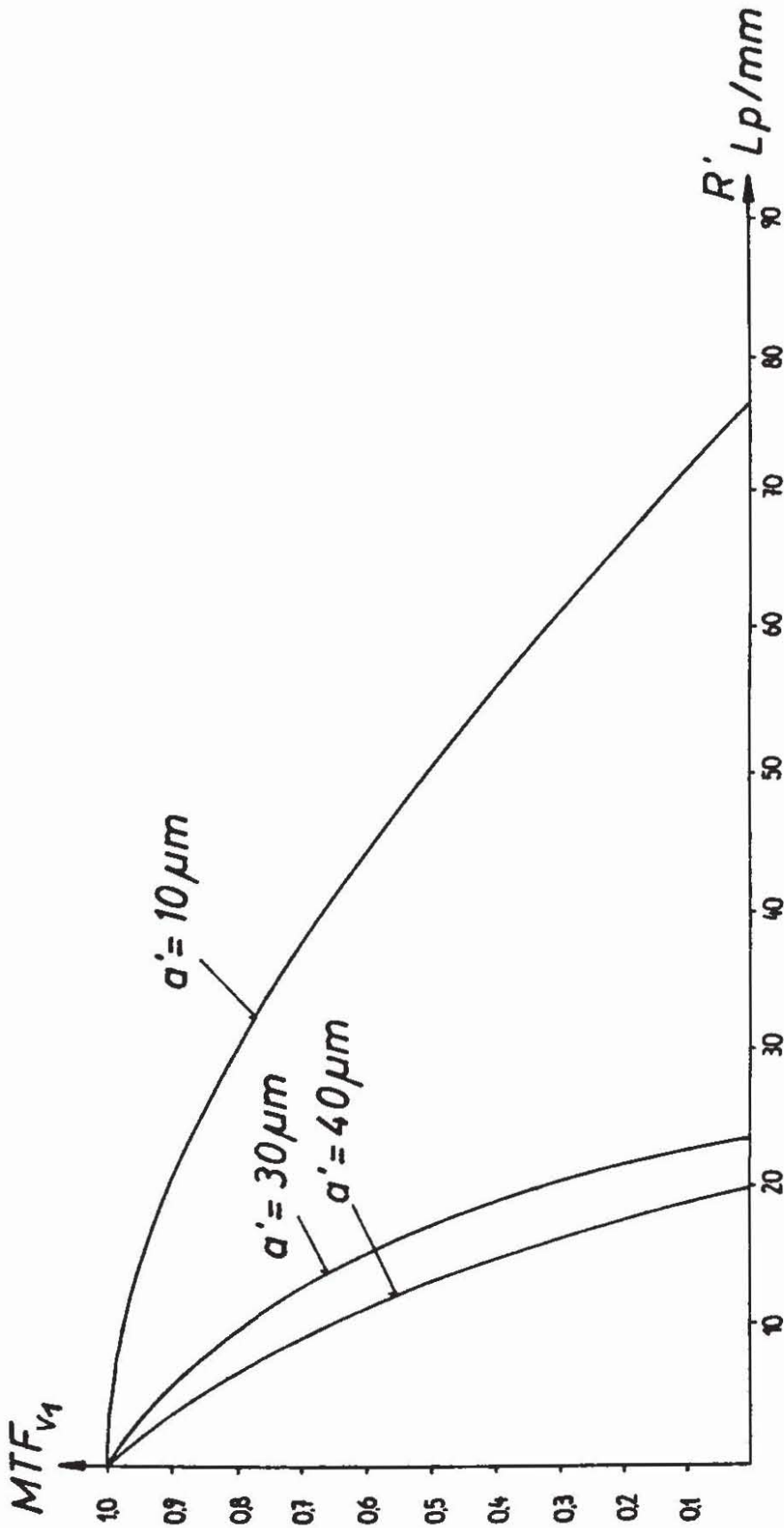
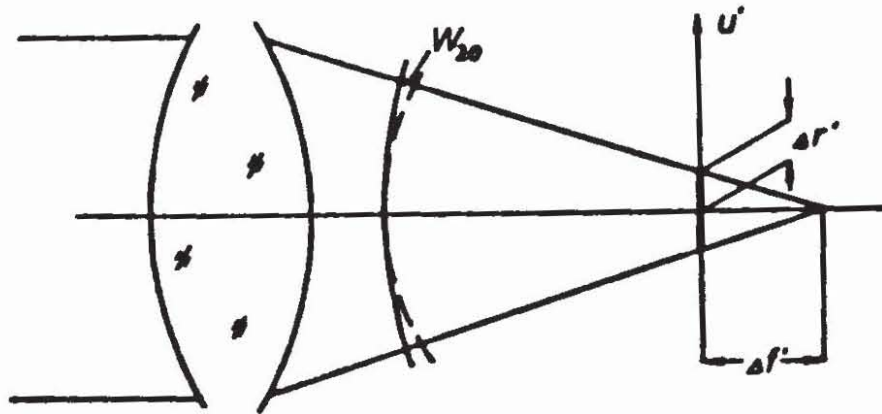


Abb. 9 :  $MTF_V$  resultierend aus den Schwingungsamplituden von  $a' = 40 \mu m$  und  $a' = 30 \mu m$  und  $a' = 10 \mu m$



$$MTF_{Def} = \frac{2J_1(2\pi R'\Delta f')}{2\pi R'\Delta f'}$$

Abb. 10: Skizze zur näherungsweise Berechnung der defokussierten  $MTF_D$

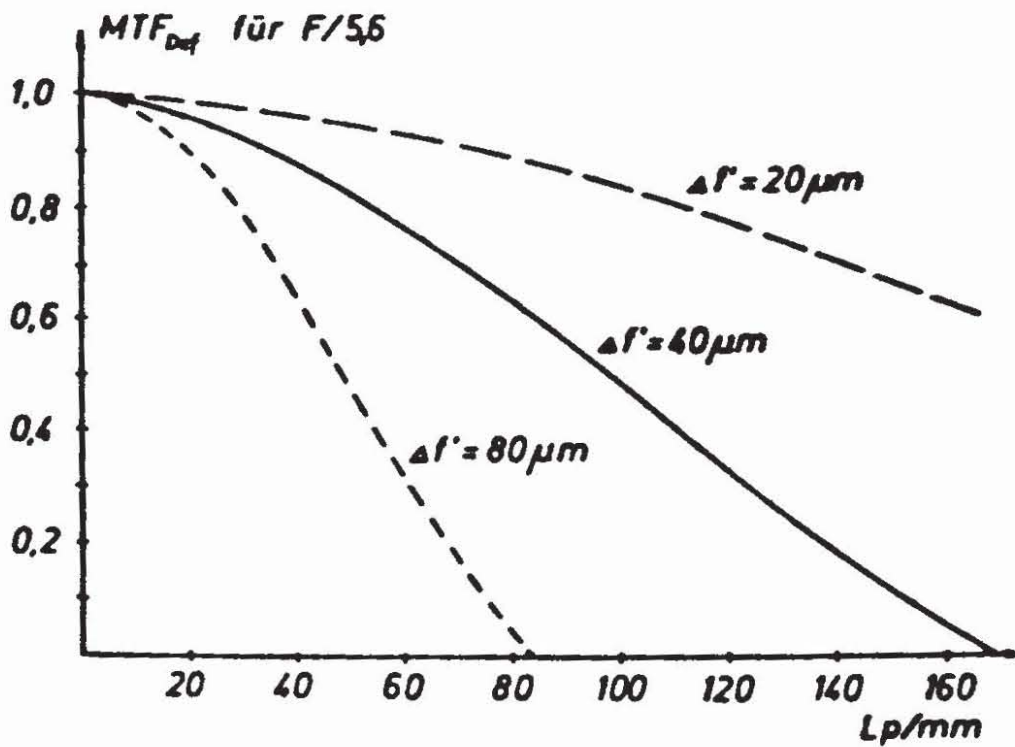


Abb. 12:  $MTF_D$  für ein Luftbildobjektiv der Brennweite 300 mm und der Öffnung  $F/5,6$

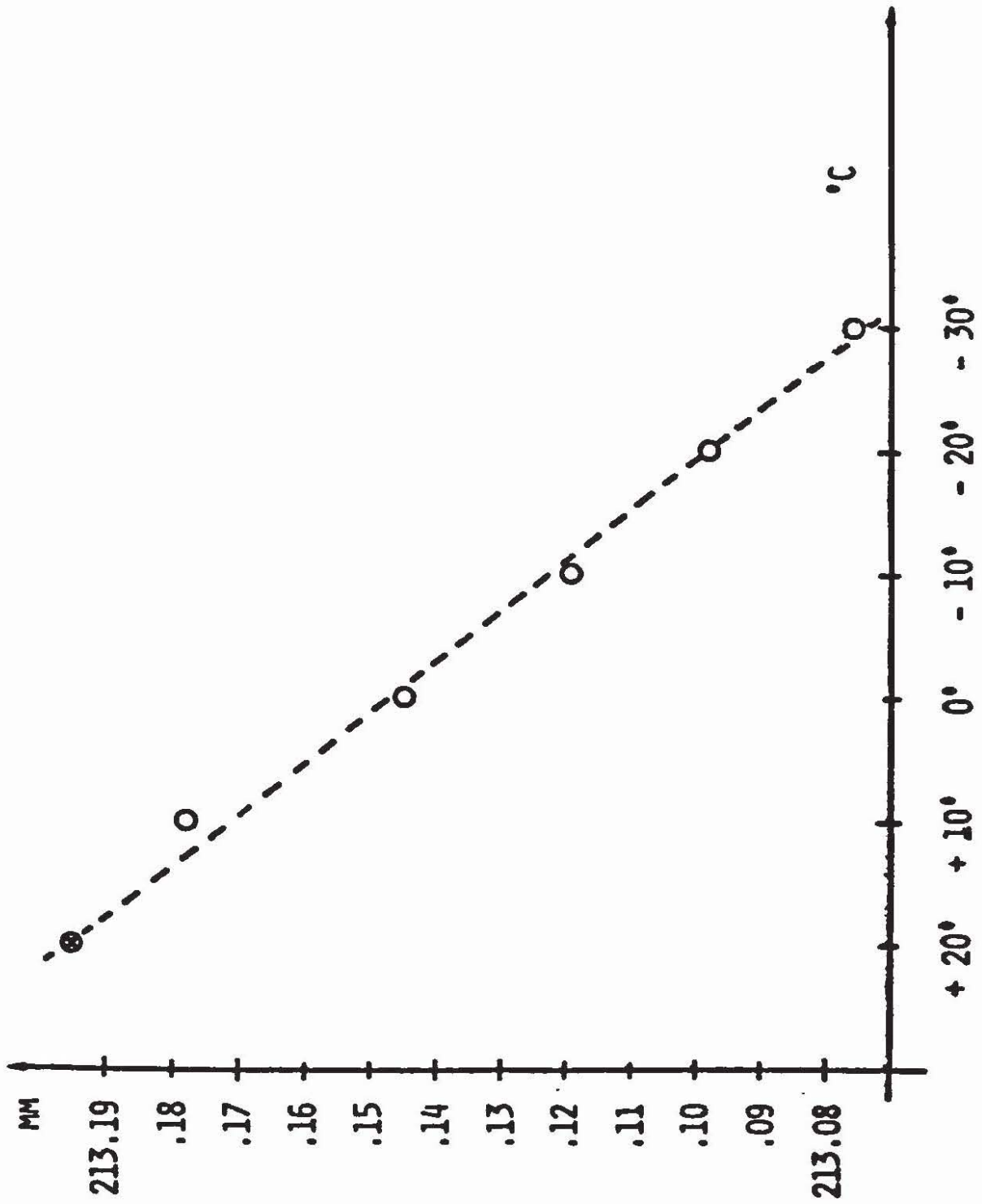


Abb. 11 : Umweltbedingte Defokussierung eines Luftbildobjektives der Brennweite 210 mm (Objektiv 21NA6)



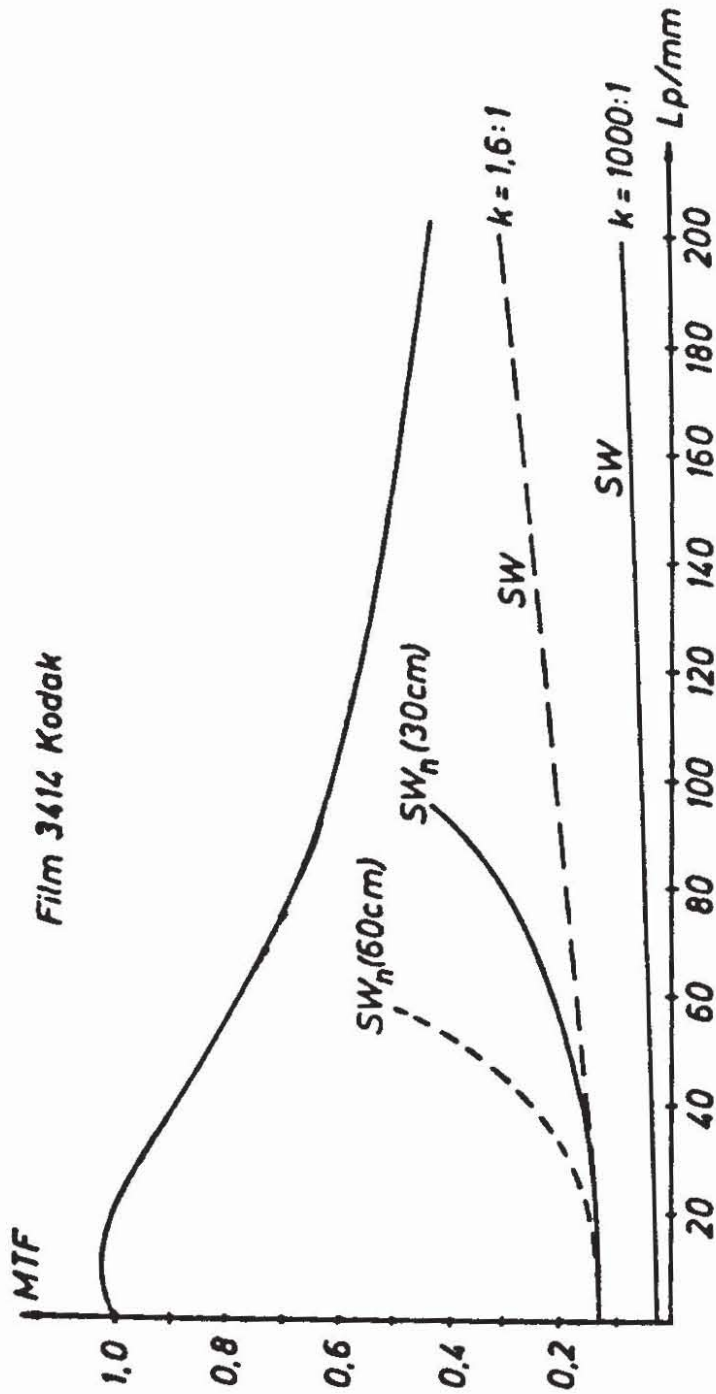


Abb. 13: Schwellwertkurven für das Objektiv für Aufnahmen mit dem hochauflösenden Film Kodak 3414 für Hochkontrast und Niedrigkontrast