

# Beurteilung der Bildqualität mit Hilfe der optischen Übertragungsfunktion

Dr. H. Tiziani, Heerbrugg, Schweiz

## Zusammenfassung

Die optische Übertragungsfunktion (OTF) erweist sich als sehr wertvolles Hilfsmittel zum Vergleich und zur Beurteilung der Qualität optischer Systeme. Das in der Firma Wild entwickelte Meßgerät wird kurz vorgestellt. Messungen und die anhand der Linsendaten gefundenen Rechenwerte werden verglichen. Dabei konnte gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Modulations-Übertragungsfunktion (MTF) festgestellt werden. Mit Hilfe eines auf Experimenten basierenden Modells konnte eine Schwellwertkurve gefunden werden, welche den Vergleich der auf der Modulations-Übertragungsfunktion basierenden Ergebnisse mit denen von konventionellen Auflösungsstests ermöglichte. Zusätzlich wird versucht, die vielen anfallenden Daten aus Rechnung und Messung zu Vergleichszwecken zu reduzieren, um so praktisch brauchbare Fokussier- und Gütemaße zu erarbeiten.

## Summary

The optical transfer function (OTF) has proved to be a highly valuable aid in comparing and evaluating the quality of optical systems. The measuring instrument, developed at Wild Heerbrugg Ltd., is briefly described. Measurements are compared with values computed with the aid of lens data. Thus an excellent correlation of the results of the modulation transfer function (MTF) could be obtained. With the help of a model based on experiments a threshold curve was plotted. The latter made it possible to compare the results based on the modulation transfer function with those from conventional resolution tests. An attempt was also made to reduce the large amount of data resulting from computation and measurement for comparison purposes, in order to elaborate practicable focussing and quality criteria.

## Résumé

La fonction de transfert optique (OTF) est un moyen très utile pour comparer et juger la qualité de systèmes optiques. L'instrument de mesure développé par la maison Wild est brièvement présenté. Des mesures et les valeurs numériques obtenues sur la base des caractéristiques des lentilles sont comparées. Une bonne concordance des résultats de la fonction de transfert de modulation (MTF) a pu être constatée. À l'aide d'un modèle basé sur des expériences, il a été possible d'obtenir une courbe de valeur seuil permettant de faire une comparaison entre les résultats basés sur la fonction de transfert de modulation et ceux de tests de résolution conventionnels. En outre on essaie de réduire les nombreuses données obtenues à partir de calculs et de mesures à des fins de comparaison pour élaborer des mesures de qualité et de mise au point utilisables dans la pratique.

## 1. Einführung

Der Aufschwung in der Landvermessung ist zum großen Teil der neuen Generation von Luftbildaufnahme-Objektiven zuzuschreiben. Bei der Entwicklung dieser neuen Objektivtypen war der Jubilar Dr. h. c. Bertele maßgeblich beteiligt, denken wir nur an die Weitwinkel- (Aviogon) und Überweitwinkel-Objektive (Super Aviogon) sowie die Aviotare für großmaßstäbliche Aufnahmen. Es ist erstaunlich, was heute Luftaufnahme-Objektive leisten, wenn man bedenkt, daß auf dem Format 23 cm × 23 cm eine Information von etwa  $10^8$ – $10^9$  bits gespeichert werden kann. Die neuen Objektive sind sowohl in bezug auf Auflösung, Lichtstärke, Lichtverteilung, Farbkorrektur vom Sichtbaren bis ins Infrarote als auch was die Verzeichnung anbetrifft, Spitzenprodukte. Die Erweiterung der Farbkorrektur bis ins Infrarote resultierte aus dem Wunsch nach vermehrter Verwendung von Farbfilmern IR und Falschfarbfilmern.

In der letzten Zeit galt der Bildqualität erhöhte Aufmerksamkeit. Dies äußert sich unter anderem in den Bemühungen, zuverlässige Kriterien zur Bewertung der Bildgüte zu erhalten. Allerdings sind diese Bestrebungen nicht nur bei Luftaufnahme-Objektiven, sondern auch bei anderen optischen Systemen zu beobachten [1–7]. Mehrere nationale und internationale Gremien befassen sich heute mit der optischen Übertragungsfunktion (OTF) und deren Anwendung zur Beurteilung der Bildqualität. In verschiedenen Ländern wurden schon mehr oder weniger komplexe OTF-Spezifikationen ausgearbeitet. Der Grund, warum sich die OTF beziehungsweise MTF bis heute noch nicht allgemein als Bewertungskriterium eingeführt hat, liegt in den noch auftretenden Abweichungen zwischen Rechnung und Messung einerseits und den Messungen untereinander, die an verschiedenen Stellen ausgeführt werden. Verschiedene Kommissionen haben sich schon mit der Normung der OTF und den Meßkriterien befaßt (British Standards, DIN), dies auch im Hinblick auf eine Verbesserung der Übereinstimmung der Meßergebnisse der verschiedenen Meßstellen. Die Abweichungen der Resultate von identischen Objektiven, welche an verschiede-

nen Stellen geprüft wurden, lagen vor wenigen Jahren noch bei 20–30 %, speziell bei Weitwinkelobjektiven. In der Zwischenzeit sind sowohl die Meßmethoden als auch die Meßkriterien verbessert worden, was an den Ergebnissen des letzten Ringversuches, organisiert vom DIN-Normenausschuß (Deutsche Industrie-Normen), bestätigt wurde. Dies trifft zumindest für die Modulations-Übertragungsfunktion (MTF), den Betrag der OTF, zu. Die Phase wird zurzeit noch wenig als Gütekriterium bei Messungen benützt, kann aber nützlich sein zur Bestimmung von Asymmetrien. Die Resultate des letzten DIN-Ringversuches sind sehr ermutigend für die zukünftigen Arbeiten zur Ausarbeitung von den auf MTF basierenden Bildgütekriterien. Die OTF gibt aber auch dem Optikrechner wertvolle Informationen über die Qualität von neu gerechneten Systemen.

Die ISP (International Society of Photogrammetry) befaßt sich ebenfalls schon lange mit der Normung der OTF für Objektiv von Flugzeugkamern, dies nicht zuletzt wegen der Objektivität der Methode und des relativ geringen Zeitaufwands für die Messungen. Diese Anstrengungen der Gruppe innerhalb der Kommission I sind in einem umfassenden Bericht von C.L. Norton [3] zusammengefaßt. Zur Ergänzung werden im nächsten Abschnitt einige typische Ergebnisse des letzten DIN-Ringversuches aufgezeichnet\*.

## 2. Ergebnisse des zweiten Ringversuches des Deutschen Industrie-Normen-Ausschusses

Der DIN-Normenausschuß setzt sich zusammen aus Vertretern der optischen und elektro-optischen Industrie Deutschlands und der Schweiz sowie von Hochschulen. Vom DIN-Normenausschuß wurden drei Ringversuche gestartet, zwei davon sind abgeschlossen, für den dritten zirkuliert noch ein Objektiv zu Meßzwecken in verschiedenen Laboratorien. Die Übereinstimmung bei den bereits beendeten Ringversuchen, wobei der letzte Prüfling ein Weitwinkelobjektiv von Rodenstock war, darf als sehr gut betrachtet werden. Obwohl mit verschiedenen Methoden und Instrumenten gemessen wurde, war die Abweichung der Ergebnisse meistens nicht größer als 5 %.

Für die Versuche wurden die Linsen auf äußerste Genauigkeit gefertigt und montiert; dabei mußte auf die Zentrierung speziell geachtet werden. Alle technischen Daten der Linsen waren bekannt (Ist-Daten). Gleichzeitig wurden genaue Meßvorschriften erstellt, um Messungen unter identischen Bedingungen durchführen zu können. Typische Vergleichs-

\* Der Autor dieses Berichtes arbeitet ebenfalls mit im DIN-Normenausschuß und wurde autorisiert, einige Ergebnisse in diesem Artikel wiederzugeben.

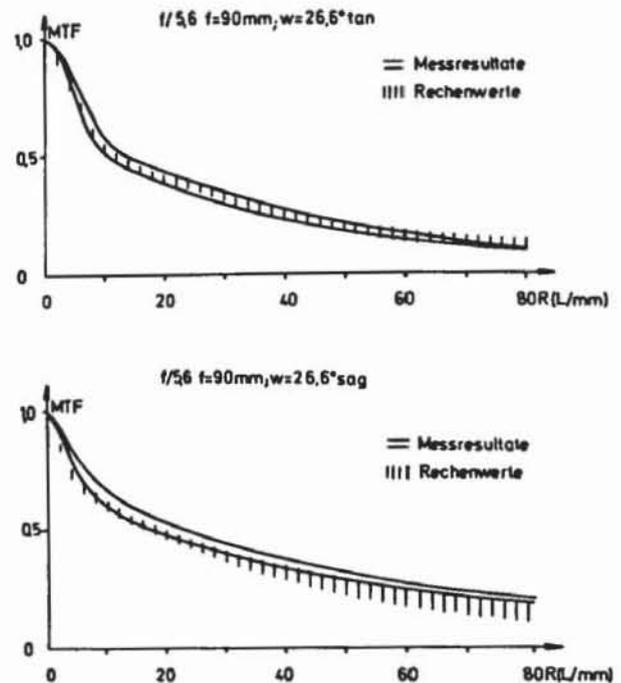


Abb. 1: Resultate des Ringversuches im Zusammenhang mit dem DIN-Normenausschuß des Rodenstock-Objektivs f/5,6, f = 90 mm, tangential und sagittal

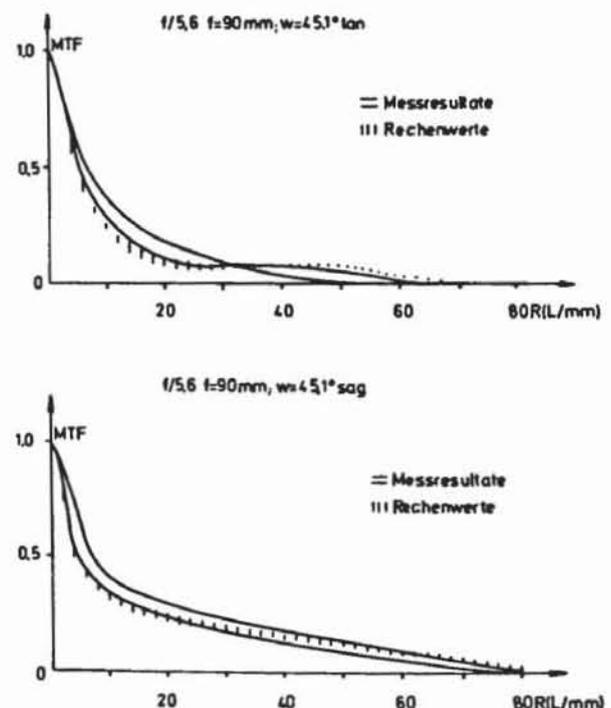


Abb. 2: Resultate des Ringversuches im Zusammenhang mit dem DIN-Normenausschuß des Rodenstock-Objektivs f/5,6, f = 90 mm, tangential und sagittal

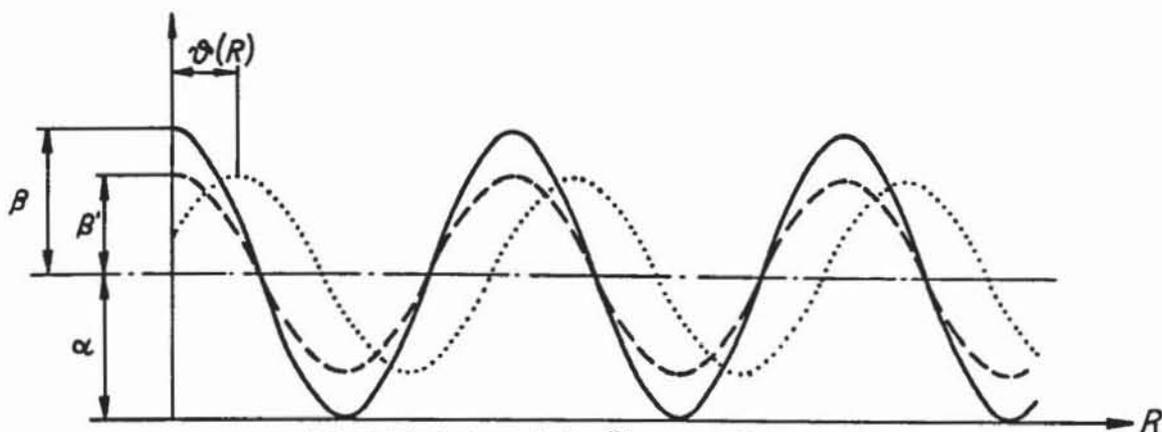


Abb. 3: Prinzip der optischen Übertragungsfunktion

resultate des Ringversuches vom Weitwinkelobjektiv  $f = 90 \text{ mm}$ ,  $f/5,6$  sind in den Abbildungen 1 und 2 wiedergegeben, für  $\lambda = 546 \text{ nm}$  und Bandbreite von  $20 \text{ nm}$ , optimiert bei axialer MTF bei  $60 \text{ Linien pro mm}$ . Abweichungen der Ergebnisse, die aber bedeutend kleiner sind als die von früheren Meßergebnissen, gab es besonders außerhalb der Achse. Die Meßergebnisse lagen innerhalb der beiden aufgezeichneten Kurven. Es zeigte sich bei dieser Gelegenheit, daß auch die theoretischen Ergebnisse streuen. Die Vergleichskurven bei den Bildwinkeln  $w = 26,6^\circ$  und  $45,1^\circ$  sind aufgezeichnet in den Abbildungen 1 und 2. Gleichzeitig ist die Streubreite der Rechnung eingetragen [8].

Bei den Ergebnissen fällt auf, daß eine Tendenz nach höheren Werten vorliegt. Dieser Effekt ist möglicherweise «Herstellungsfehlern» zuzuschreiben. Dabei wirken sich die letzteren besonders in sagittaler Richtung aus. Vergleicht man die Ergebnisse von früheren Ringversuchen, zum Beispiel von R. E. Hopkins und D. Dutton [2], so kann man sagen, daß sich die Geräte und Meßtechniken wesentlich verbessert haben, wie dies anhand der Abbildungen 1 und 2 an den typischen Ergebnissen gezeigt wird. Die optische Übertragungsfunktion dürfte sich demnach in absehbarer Zeit zur Qualitätsbeschreibung einbürgern. Vorerst sollten allerdings noch weitere Vergleichsmessungen durchgeführt werden.

### 3. Apparatur zur Messung der optischen Übertragungsfunktion

Bei der optischen Übertragungsfunktion setzen wir das Objektiv als lineares passives Filter zur Übertragung von Ortsfrequenzen voraus. Verschiedene Meßprinzipien werden bereits angewendet [9], zum Beispiel Abtastung des Spaltbildes und anschließende Fourier-Transformation, interferometrische Methoden (Zweistrahlinterferenz und Holographie)

und direkte Fourier-Transformation. Für unsere Anwendungen erwies sich die direkte Fourier-Transformations-Methode als geeignetes Meßprinzip; dabei wird prinzipiell ein sinusförmiges Objektgitter durch den Prüfling abgebildet und der Kontrast im Bild mit dem des Objektes verglichen (Abbildung 3). Nach der Fourier-Transformations-Theorie läßt sich jedes Objekt – aus Sinusfunktionen zusammengesetzt – behandeln. Das optische System wirkt demnach als Filter für die Übertragung der Ortsfrequenzen. Das Prinzip wird hier kurz in Erinnerung gerufen.

Der Kontrast im Objekt läßt sich schreiben als

$$C_{\text{Objekt}} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{\beta}{\alpha}$$

und analog der Kontrast im Bild

$$C_{\text{Bild}} = \frac{\beta'}{\alpha}$$

Das Verhältnis des Kontrastes im Bild zu dem im Objekt ist die Modulations-Übertragungsfunktion (MTF).

$$\text{MTF} = \frac{C_{\text{Bild}}}{C_{\text{Obj}}} = \frac{\beta'}{\beta}$$

Ein allfälliger Phasenfehler  $\varphi(R)$  manifestiert sich durch eine seitliche Verschiebung der Abbildung des Sinusgitters relativ zu dem im Objekt (für eine bestimmte Frequenz). Diese Verhältnisbildung der Kontraste und die Phasenmessung werden bei verschiedenen Ortsfrequenzen wiederholt. Daraus resultiert die optische Übertragungsfunktion (OTF). Das ist auch das Prinzip der im Hause Wild entwickelten Meßapparatur. Grundsätzlich mißt das Gerät den Kontrast im Bild für jede Ortsfrequenz und vergleicht ihn mit dem des Objektes, des Gitters. In diesem Bericht wird auf die Phasenmessung verzichtet. Unsere Konstruktion zur Messung der OTF ist in Abbil-

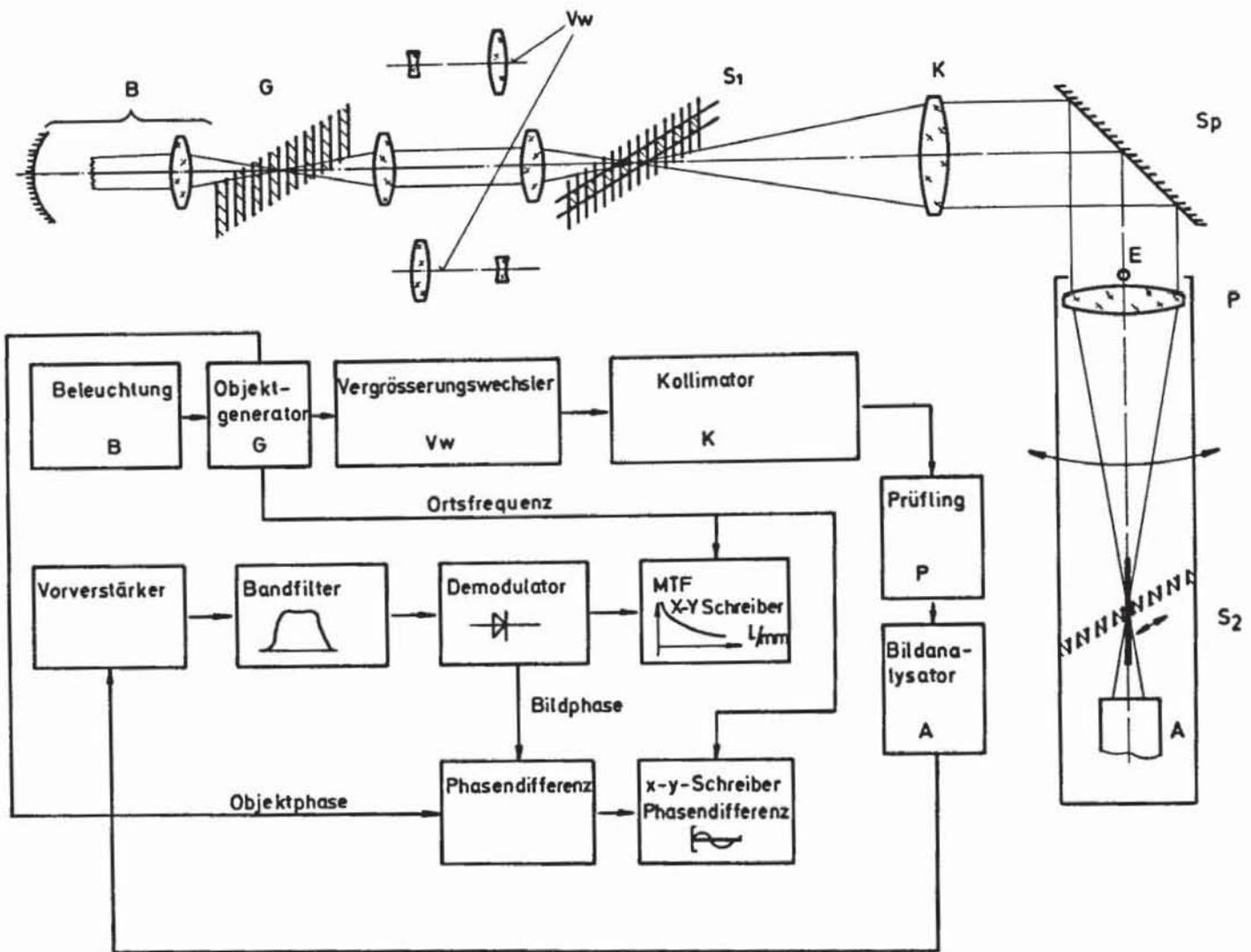


Abb. 4: Prinzip der Apparatur

dung 4 schematisch dargestellt. Prinzipiell wird ein sich kontinuierlich bewegendes Transmissionsgitter auf den Bildspalt abgebildet und abgetastet, das heißt, die Modulation der Abbildung des Gitters wird mit der des Gitters im Objekt verglichen. Als Lichtquelle dient eine 150-W-Halogenlampe mit Diffusor, Wärmeschutzfilter und geeigneten Farbfiltern. Als Objektgitter G wird das von Beck-Ealing gelieferte Radialgitter (Periode 10 L/mm) in einer von EROS 100 etwas modifizierte Anordnung verwendet. Allerdings ergibt das Radialgitter keine sinusförmige, sondern eine rechteckige Transparenz, was herstellungstechnisch bedingt ist. Letzteres wird mit einem Vergrößerungswechsler auf den Eingangsspalt  $S_1$  abgebildet.

Das kontinuierlich sich bewegendes Radialgitter (Frequenz = 1000 Hz) wird auf den Ausgangsspalt  $S_2$  des Analysators A abgebildet. Durch elektrische Filterung des Ausgangssignals wird die Sinusgitter-Transmission bewerkstelligt (Bandfilter für erste Harmonische der Fourier-Serie). Die Frequenzänderung wird durch Neigung des Gitters relativ zum Eintrittsspalt erreicht. Das heißt, die Periode variiert mit dem Kosinus des Neigungswinkels des Gitters relativ zum Spalt  $S_1$ . Der Vergrößerungswechsler zur Abbildung des Gitters auf den Spalt erlaubt fünf Vergrößerungen  $-0,4 < M < -2,5$ .

Der Kollimator K projiziert den Objektpalt mit der Abbildung des Gitters ins Unendliche. Zur Verfügung stehen die

Kollimatoren mit den Brennweiten  $f = 570$  mm sowie ein speziell für diesen Zweck im Hause Wild gerechnetes superachromatisches Teleobjektiv mit  $f = 2000$  mm bei 1000 mm Baulänge. Letzteres ist sehr gut korrigiert (beugungsbegrenzt für  $400 < \lambda < 1000$  nm). Der freie Durchmesser beträgt 100 mm. Die Qualität des Kollimators wurde mit Hilfe der Foucault-Testmethode und interferometrisch geprüft. Objekt- und Bildspalt  $S_1, S_2$  sind aufgedampft und sehr schnell auswechselbar, so daß im allgemeinen die zwei Spalten so schmal gewählt werden, daß eine Spaltkorrektur vernachlässigt werden kann. Weiter wurde das Gerät so ausgelegt, daß bis unmittelbar zur Bildecke des jeweiligen Objektivs mit aufgesetzten Bildrahmen gemessen werden kann. Für außeraxiale Bildpunkte (bis zum halben Bildwinkel  $w = 55^\circ$ ) wird der Schlitten mit Bildanalysator und Prüfling um die Eintrittspupille E des Prüflings P gedreht, wobei für die

Auslenkung die Träger auf Luftkissen geschwenkt werden. Der ganze Aufbau ruht auf einer in Sand gelagerten Kunststoffplatte, welche von Autopneus getragen wird. Die Eigenfrequenz des Grundaufbaues beträgt 2 Hz. Bei der Konstruktion des Gerätes wurde besonders auf einen stabilen Aufbau geachtet, wurde es doch speziell zur Prüfung von Luftbild-Weitwinkelobjektiven konzipiert. Die Apparatur kann aber auch zur Messung anderer Objektivtypen herangezogen werden. Die Verarbeitung der elektrischen Signale ist in Abbildung 4 schematisch wiedergegeben. Allfällige Frequenzmaßstabkorrekturen bei außeraxialen Messungen sind in der Elektronik des Gerätes berücksichtigt. Die Apparatur arbeitet sehr schnell, und im allgemeinen sind an den direkt am X/Y-Schreiber aufgezeichneten Ergebnissen keine Korrekturen erforderlich. Dies gilt auch für die Phasenmessung, die demnächst eingesetzt wird. Großes Gewicht galt bei der

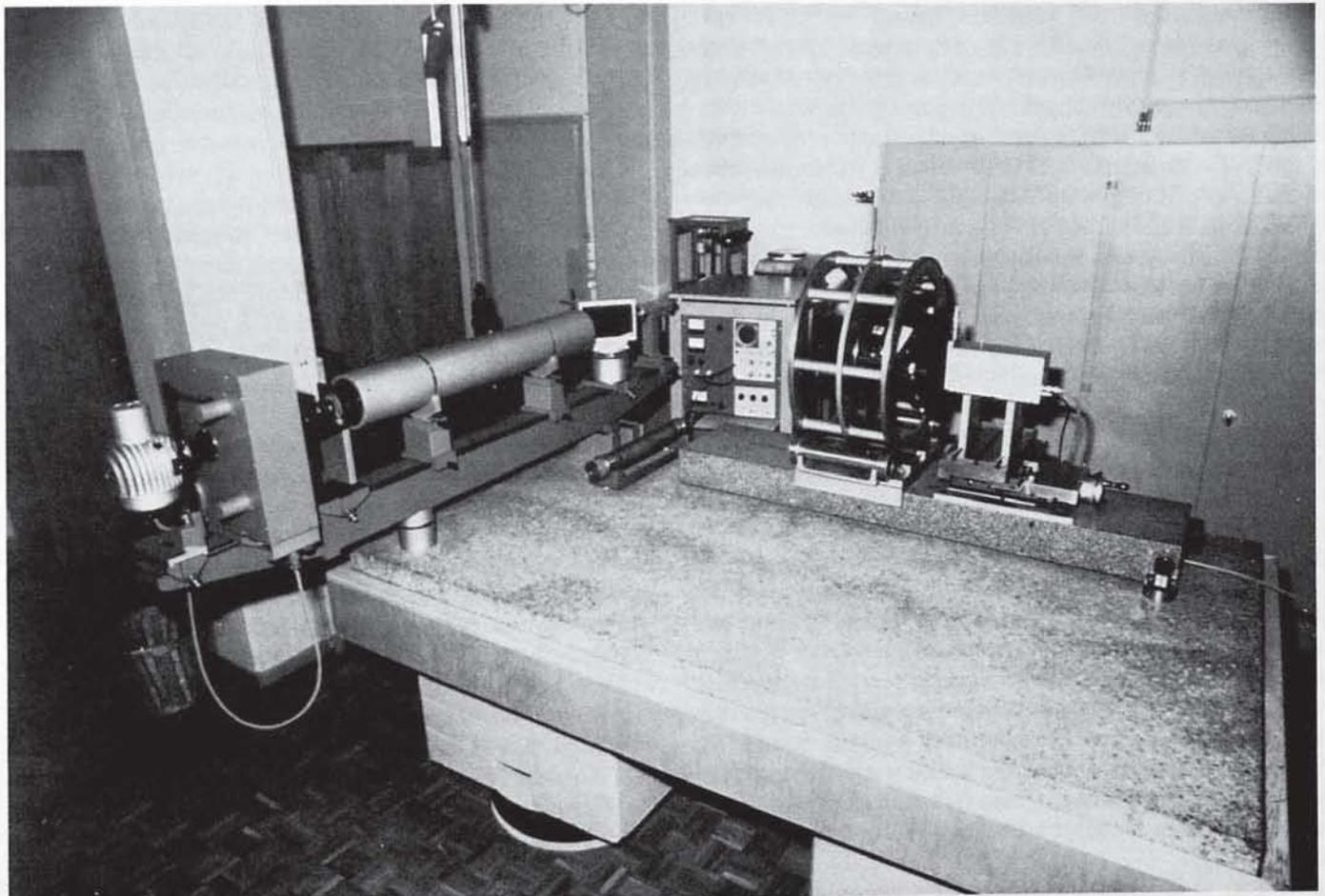


Abb. 5: Ansicht des Geräteaufbaus

Konstruktion der Halterung der Objektive. Letztere ist spiel- frei gelagert und erlaubt eine Zentrierung des Prüflings bei Rotation. Abbildung 5 zeigt eine Photo des Aufbaus mit Prüfling, wie er im Hause Wild konstruiert wurde.

**4. Durchführung der Messungen, mono- und polychromatisch**  
 Aufgrund der Erfahrungen, die anhand der verschiedenen Ringversuche gesammelt werden konnten, ist ein gutes Meß- gerät Voraussetzung für zuverlässige Resultate. Gleichzeitig müssen aber auch die Meßbedingungen jeweils überprüft werden. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, muß dar- auf geachtet werden, daß bei der Messung Testfigur, Auflageflansch des Prüflings und Abtastmechanismus paral- lel zueinander und senkrecht zur optischen Achse verlaufen. Überprüfung erfolgt zum Beispiel durch MTF-Messung bei großer Frequenz. Weiter muß auf möglichst inkohärente Beleuchtung sowie auf die zulässige Größe des Abtastbe- reichs (Isoplanbereichs) geachtet werden.

Beim Rotieren des Prüflings in der Halterung wird bei der Montage des neuen Prüflings das Objektiv zur Halterung zentriert. Unsere Messungen haben gezeigt, daß der Zentrier- fehler nicht nur mit Hilfe der Phasenmessung, sondern auch durch Abweichungen der MTF-Messungen in verschiedenen Azimuten auf einfache Art festgestellt werden kann, dabei rea- giert die Methode sehr empfindlich auf Symmetriefehler [10]. Die MTF-Messungen werden bei uns bei folgenden Winkeln durchgeführt:  $w = 0, 0,5, 0,7, 0,85$  und  $1 w \text{ max}$ . ( $w \text{ max} =$  maximaler Bildwinkel). Unsere Bildhöhen betragen dem- nach:  $y' = 0, 0,41, 0,62, 0,81$  und  $1$  ( $y' = 1$ , entspricht der Halbdiaagonalen = 152 mm).

Vergleichsmessungen der MTF (Ringversuche) wurden bis heute mit monochromatischem Licht mit vorgeschrie- bener Bandbreite des jeweils verwendeten Filters (vielfach  $\lambda = 546 \text{ nm}$ , Halbwertsbreite 20 nm) ausgeführt. Wird «weißes Licht» für die MTF-Messung angewendet, so sollte für all- fällige Vergleichsmessungen die spektrale Verteilung sowohl der Lichtquelle, der Filter und Hilfsoptiken als auch des Empfängers (beziehungsweise des Produkts) bekannt und möglichst den Meßergebnissen beigelegt werden. Es stellt sich hier nun die Frage, welcher Spektralbereich der Messung von Objektiven für Flugaufnahmen zugrunde gelegt werden soll. Darüber ist in der Literatur noch wenig zu finden. Wir haben vorerst versuchsweise die Spektralverteilung der Ob- jektive nach Anwendung in zwei Gruppen eingeteilt und die weitverbreiteten Kodak-Emulsionen zugrunde gelegt, näm- lich

1. Objektive für Schwarzweiß- und Farbphotographie (Ko- dak Plus-X, Typ 2402, und Color DF, Typ So-397),

2. Objektive für IR- und Falschfarbenaufnahmen (IR S/W, Typ 2424, False Color, Typ 2443).

Diese Einteilung scheint vernünftig, nicht zuletzt, weil die Farbphotographie in den letzten Jahren an Bedeutung ge- wonnen hat; weiter werden dieselben Objektive vielfach für Schwarzweiß- wie auch Farbaufnahmen (beziehungsweise IR- und Falschfarben) verwendet. Zusätzlich zu den relativen spektralen Empfindlichkeiten der Kodak-Aerofilme wurde mittleres Tageslicht ( $5500^\circ \text{K}$ ) sowie die relative Spektral- charakteristik über Meereshöhe angenommen. Über die Er- fahrung mit den vorgeschlagenen Spektralverteilungen wird später berichtet. Für die zu präsentierenden Vergleichsmes- sungen wurde in Anlehnung an unsere früheren Messungen des Auflösungsvermögens eine spektrale Verteilung für Rechnung und Messung simuliert, wie dies aus Abbildung 6 ersichtlich ist.

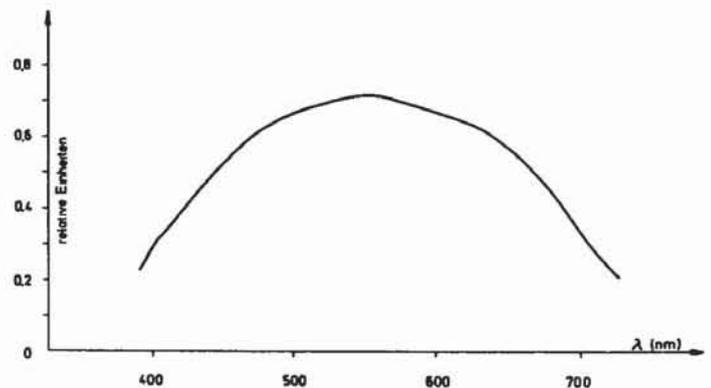


Abb. 6: Spektrale Verteilung zur Messung der OTF und für Auflösungs- test

## 5. Vergleich zwischen Rechnung und Messung der MTF (mono- und polychromatisch)

Um den Vergleich zwischen Rechen- und Meßwerten an- stellen zu können, müssen Wellenlängen mit Bandbreiten, Blenden und Einstellebene genau bekannt sein und sowohl bei der Rechnung als auch bei der Messung übereinstimmen. Auch muß bei der «Weißlicht»-Simulation die spektrale Transmission des Objektivs, speziell im Blau, berücksichtigt werden. Für die spektrale Transmission der Weitwinkelob- jektive sind die Absorption des Glases wie auch die Vergü- tungsschichten (Ein- und Mehrfachschichten) verantwor- tlich. Abbildung 7 zeigt eine typische Transmissionskurve für ein Universal-Aviogon-Objektiv (UAGI). Diesem Umstand muß speziell bei der Gewichtung der Farben für den Ver- gleich zwischen Rechnung und Messung, besonders im Hin- blick auf die vermehrte Verwendung von Farbaufnahmen, Rechnung getragen werden.

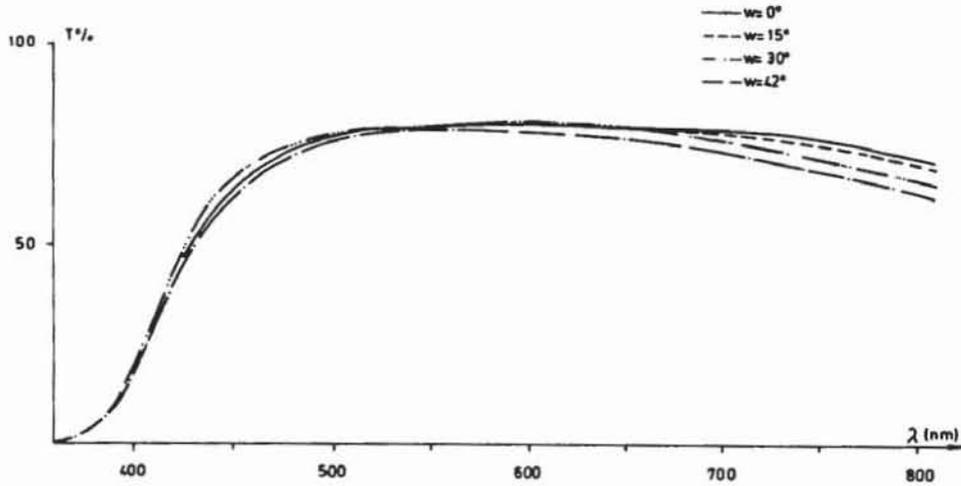


Abb. 7: Transmissionskurve des Universal Aviogon

Zur Berechnung der MTF müssen alle optischen Daten des Systems bekannt sein. Unsere Berechnung der MTF basiert auf der Autokorrelation der Pupillenfunktion, wozu die Wellenfrontaberrationen über der Austrittspupille genau bekannt sein müssen. Unsere Studien haben zum Schluß geführt, daß für die genaue Berechnung der OTF mit Hilfe der Autokorrelation für große Bildwinkel die Form der vignettierte Pupille bestimmt werden muß. Näherungen führen sehr schnell zu größeren Fehlern. Das Rechenprogramm, das an der Technischen Hochschule in Zürich entwickelt wurde, ist optimiert auf Genauigkeit ( $< 1\%$ ) und Rechenzeit. Zur Berechnung der OTF für weißes Licht werden für den entsprechenden Bildwinkel die nach der vorgegebenen spektralen Verteilung gewichteten OTF-Werte der einzelnen Farben vektoriell addiert.

Die Frage stellt sich gleich, wie die beste Einstellebene ge-

funden werden kann. Bei unserem Vorgehen wird zuerst bei einer Ortsfrequenz, die wir anhand von Versuchen auf 20 L/mm festgelegt haben, bei einzelnen Bildwinkeln durchfokussiert, dies sowohl monochromatisch als auch bei weißem Licht. Dies führt vorerst zur Abschätzung der besten Bildebene. Dabei zeigte es sich, daß sich die Kurven bei großen Bildwinkeln beim Durchfokussieren nur geringfügig ändern. Anschließend wird mit einem Gütekriterium, welches sowohl die Flächen unter den MTF-Kurven als auch die Regelmäßigkeit übers Bildfeld berücksichtigt, optimiert.

Abbildung 8 zeigt einen Schnitt durch das neue Wild 21 NAgII-Objektiv  $f = 210\text{ mm}$ ,  $1:4^*$ . Die Abbildung 9 zeigt Defokussierungskurven des 21 NAgII für verschiedene Bildwinkel bei  $f/4$ , für  $\lambda = 588\text{ nm}$  und weißes Licht (spektrale Verteilung

\* Der gleiche Objektivtyp ist auch im Aufsatz von Dr. K. Hildebrand in dieser Festschrift erwähnt.

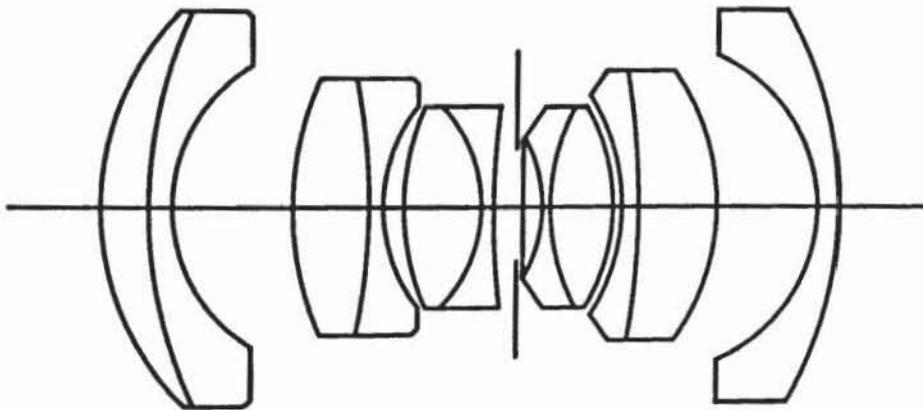


Abb. 8: Optikschemata des Objektivs Wild 21 NAgII

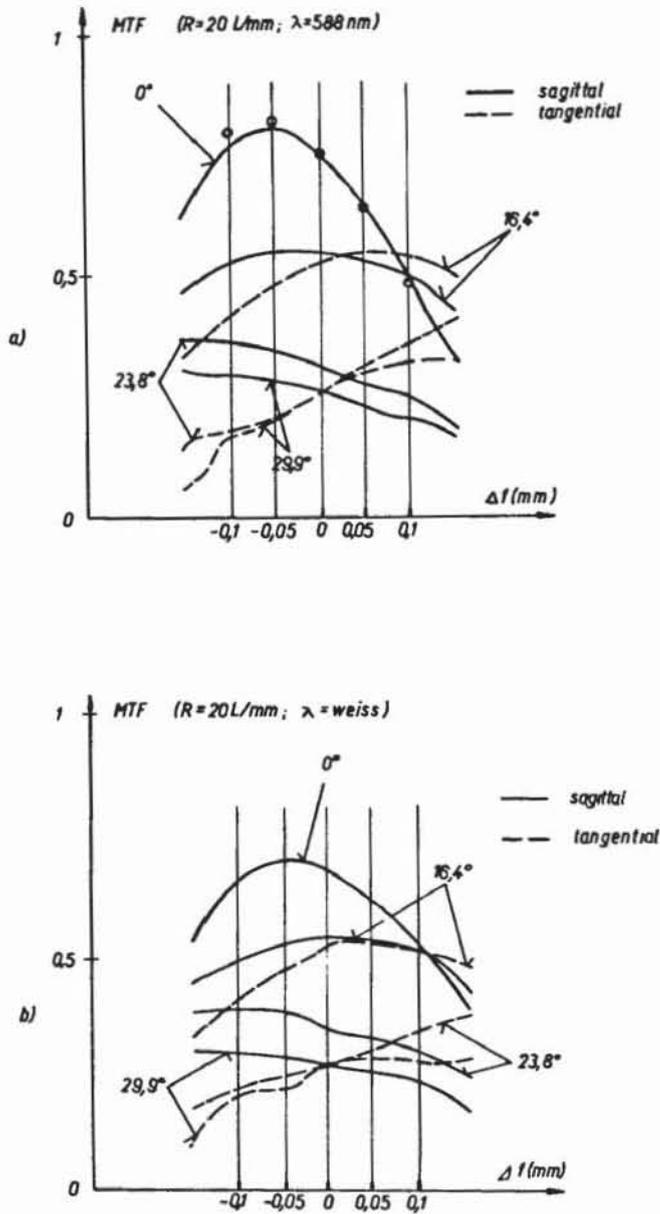


Abb.9: Variation der MTF für verschiedene Bildwinkel, bei der Ortsfrequenz von 20 L/mm beim Defokussieren  
 a) für  $\lambda = 588 \text{ nm}$   
 b) für weißes Licht  
 oo Rechenwerte

nach Abbildung 6). In Abbildung 9 sind die Rechenwerte mit Kreisen markiert. Bei einer anderen Öffnung verschiebt sich allerdings die beste Bildebene geringfügig.

Bei den einzelnen Objektiven ist aber immer mit Fabrikationsfehlern zu rechnen. Letztere führen beispielsweise zu einer Änderung der Schnittweite; deshalb ist die Schnittweite kein gutes Referenzmaß. Unsere Studien haben ergeben, daß als Referenzmaß für Rechnung und Messung das Maximum der MTF bei Defokussierung bei vorgegebener Wellenlänge (in unserem Fall  $\lambda = 588 \text{ nm}$ ) nützlich ist. Wir suchen demnach vorerst das Maximum der MTF auf der Achse, zum Beispiel bei 20 L/mm, und defokussieren zur besten Bildebene, optimiert für das ganze Bildfeld, in unserem Beispiel ( $\Delta f = -0,12 \text{ mm}$ ). Auf dieser Basis konnte bis jetzt sehr gute Übereinstimmung zwischen den anhand der Optikdaten gerechneten Werten und der Messung gefunden werden. So waren zum Beispiel die Abweichungen zwischen der anhand der MTF-Rechnung und Messung gefundenen besten Bildebene  $\Delta f \leq 0,02 \text{ mm}$  bei Blende  $f/4$ .

In Abbildung 10 sind die monochromatischen MTF-Werte für drei Wellenlängen  $\lambda = 486, 588, 656 \text{ nm}$  für das Objektiv 21 NAgII aufgetragen. Zusätzlich sind die gerechneten Phasen aufgezeichnet. Die größte Abweichung zwischen Rechnung und den mit monochromatischem Licht ausgeführten Messungen konnte für dieses Beispiel bei  $\lambda = 486 \text{ nm}$  festgestellt werden, sie betrug im Maximum 7%. In Abbildung 11 ist das Ergebnis der gerechneten und gemessenen MTF mit weißem Licht wiedergegeben. Die Meßwerte sind hier mit Kreisen bzw. Kreuzen markiert. Speziell zu beachten ist der Phasenverlauf in Abbildung 10. Zur Simulation des weißen Lichtes für die Rechnung genügen für dieses Objektiv fünf Wellenlängen.

## 6. Quantitative Vergleiche zwischen Modulations-Übertragungsfunktion und Auflösung

In diesem Abschnitt wird ein Vergleich zwischen den Meßergebnissen der MTF und dem klassischen Auflösungsvermögen angestellt. Dazu sind wieder möglichst gleiche Meßbedingungen, wie spektrale Verteilung der Lichtquelle, Einhaltung der identischen Bildebene, einzuhalten, gleichzeitig ist die Reduzierung der subjektiven Meßfehler notwendig. Auch muß die Kontrastwiedergabe des Speichermediums, der photographischen Schicht, mit berücksichtigt werden. Das bildseitige visuelle Auflösungsvermögen wird bis heute zur Festlegung der Qualität der Objektive benutzt. Es ist definiert als größte Zahl von Strichen je Millimeter, die im entworfenen Bild gerade noch als getrennte Linien unterschieden werden können. Für unsere Vergleiche wurde der

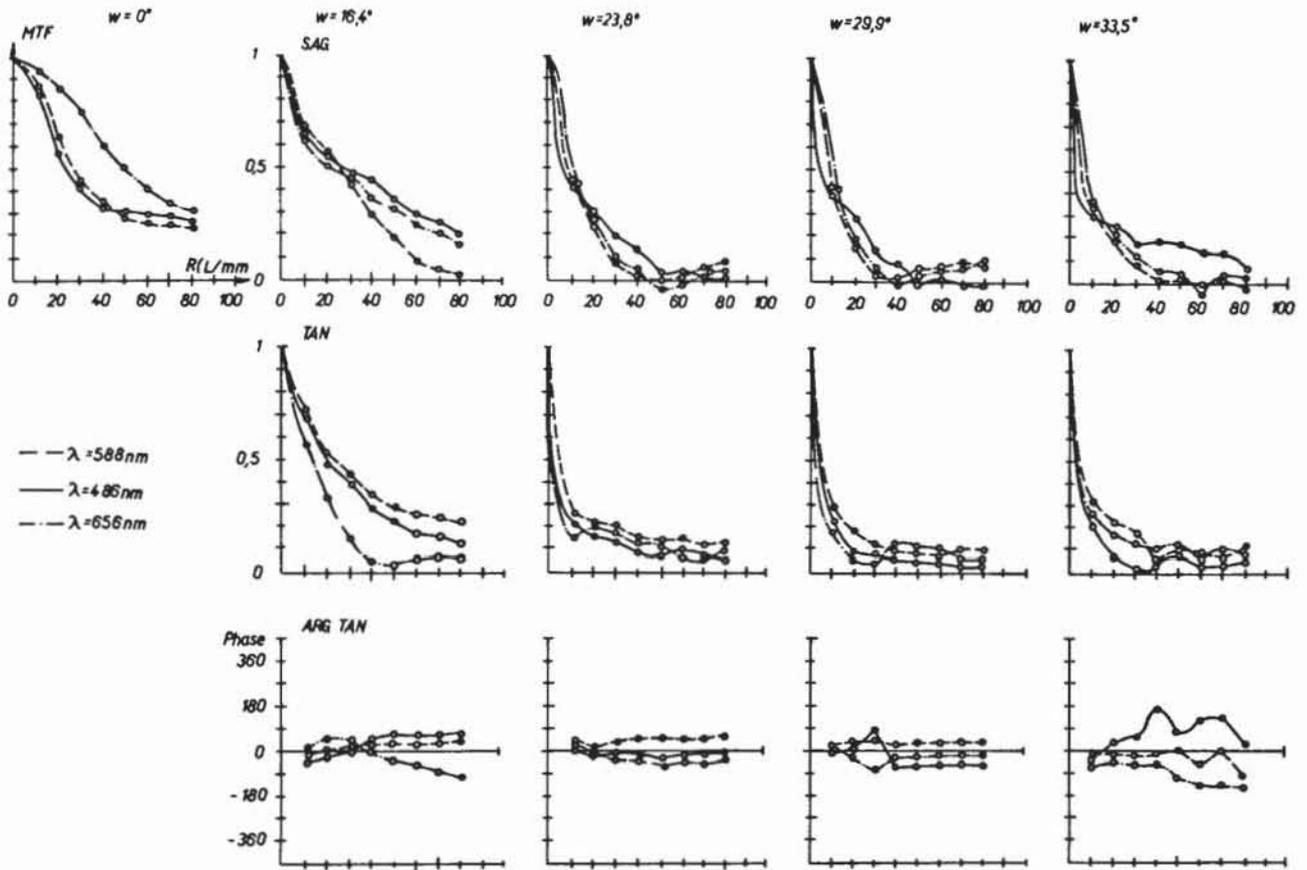


Abb. 10: Gerechnete OTF für verschiedene Bildwinkel des Wild 21 NAglII-Objektivs für —  $\lambda = 486 \text{ nm}$ , ----  $\lambda = 588 \text{ nm}$ , - · -  $\lambda = 656 \text{ nm}$

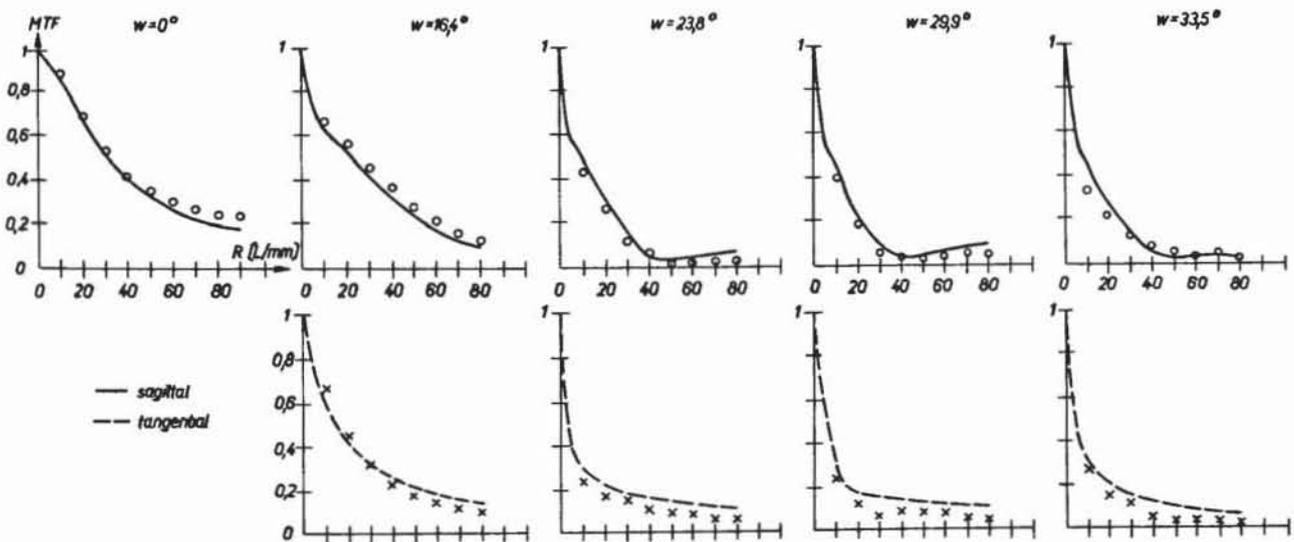


Abb. 11: Vergleich der Rechnung und Messung der MTF des Objektivs 21 NAglII für weißes Licht und die gleiche Bildebene wie in Abb. 10 — sagittale Meßwerte, ooo sagittale Rechenwerte, ---- tangentiale Meßwerte, xxx tangentielle Rechenwerte

Objektcontrast als eins angenommen. Der Beobachter ist in der Kette ein Unsicherheitsfaktor, auch ist die Auflösung des Auges abhängig von der Ortsfrequenz, dem Contrast des Bildes sowie der Beleuchtungsstärke. Der Fehler, der durch die subjektive Beurteilung des Bildes durch den Beobachter auftritt, wird reduziert, wenn die Auflösung des Bildes (in unserem Fall Dreibar-Testplatten) mit Hilfe eines Mikroskops bestimmt wird. Der Beobachter ändert sowohl die Vergrößerung als auch die Beleuchtung des Mikroskops, bis die optimalen reproduzierbaren Beobachtungsbedingungen erreicht sind. Unsere Auflösungsstests wurden zusätzlich von Personen mit großer Routine ausgeführt.

Die Untersuchungen an mehreren Objektivtypen mit mehreren Beobachtern führten zum Schluß, daß für unsere Bedingungen der Contrastschwelligkeit des Auges mit  $C_A = 0,03$  angenommen werden kann. Anhand der  $MTF_E$  der verwendeten Emulsion (Kodak Plus-X sowie Agfapan 25) und derjenigen des verwendeten Mikroskops (M5) ( $MTF_M$ ) wurde ein Schwellwert SW gefunden, wobei

$$SW = \frac{C_A}{MTF_E \cdot MTF_M}$$

Die unseren Versuchen zugrunde gelegten Kurven sind in Abbildung 12 aufgetragen. Der Emulsion Agfapan 25 entspricht die Schwellwertkurve ⑤ in Abbildung 12.

Der Schnittpunkt der Schwellwertkurve mit der  $MTF$ -Kurve des Objektivs ergibt dessen Auflösung. Allerdings sagt der Verlauf der  $MTF$ -Kurve mehr über die Qualität des Objektivs aus als der Auflösungstest allein, doch soll damit ein quantitativer Vergleich zwischen  $MTF$ -Messung und Auflösungsstest angestellt werden. Unter Einhaltung der erwähnten Vorkehrungen wurde gute Übereinstimmung zwischen den subjektiven Auflösungsstests und der Auflösung mit Hilfe der  $MTF$ - und der Schwellwertkurve registriert. Um auch die Resultate von früheren Auflösungsstests mit unseren neuen, schnelleren und objektiveren Methoden vergleichen zu können, war es zweckmäßig, die spektrale Verteilung der Messungen der von Abbildung 6 anzupassen.

Die Abbildung 13 zeigt  $MTF$ -Kurven für simuliertes weißes Licht für das neue Wild-Objektiv 21 NAgl II ( $f = 210, 1:4$ ) für verschiedene Bildwinkel; die Abbildung 14 diejenigen für das Wild Aviogon 15 UAgI ( $f = 152, 1:5,6$ ). Auch bei diesem Objektiv konnte gute Übereinstimmung zwischen den Rechen- und Meßwerten erzielt werden (mono- und polychromatisch). In den Abbildungen sind ebenfalls die Schwellwertkurven eingetragen. Es zeigt sich bei dieser Gelegenheit, daß beim 15UAgI Pseudoauflösung erreicht werden kann. Um die Übereinstimmung der identischen Bildebene für visuelle Auflösungsstests und  $MTF$ -Messungen zu gewähr-

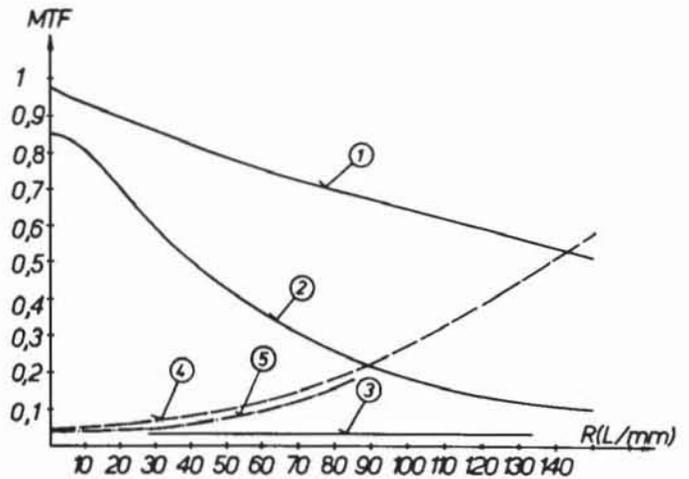


Abb. 12: Bestimmung der Schwellwertkurve  
 1  $MTF_M$  Mikroskop  
 2  $MTF_E$  Emulsion (Kodak + X)  
 3 Schwellwert des Auges  
 4 Schwellwert für Kodak + X-Emulsion  
 5 Schwellwert für Agfapan 25

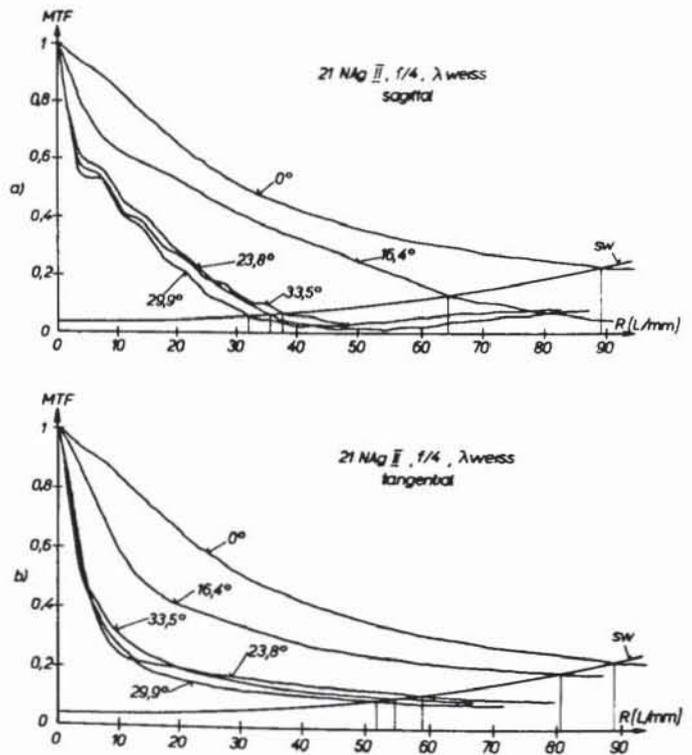


Abb. 13:  $MTF$ -Kurve des Objektivs 21 NAgl II  $f/4$  für weißes Licht und Schwellwert SW;  $w = 0^\circ, 16,4^\circ, 23,8^\circ, 29,9^\circ$  und  $33,5^\circ$   
 a) sagittal  
 b) tangential

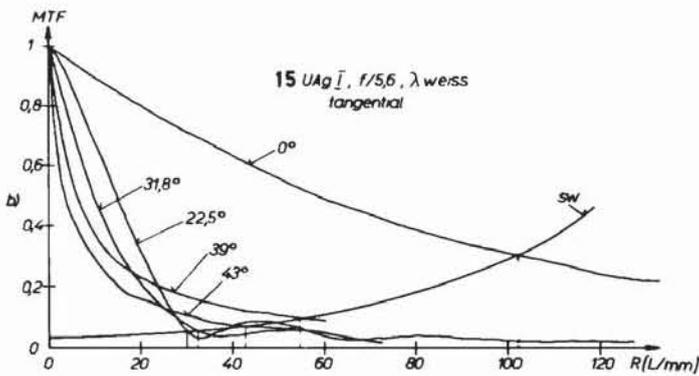
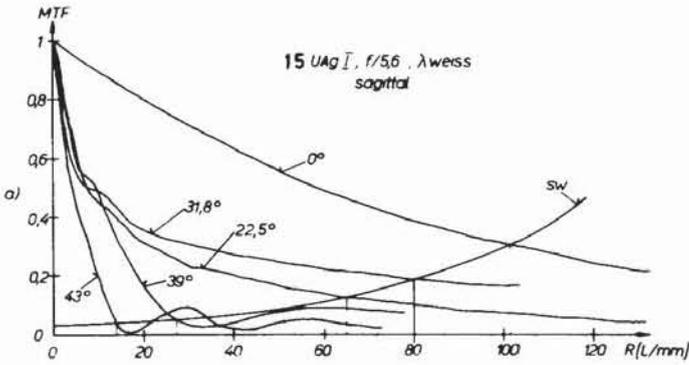


Abb. 14: MTF-Kurven des Objektivs Wild 15 UAgI f/5,6 für weißes Licht und Schwellwert SW;  $w = 0^\circ, 22,5^\circ, 31,8^\circ, 39^\circ$  und  $45^\circ$   
 a) sagittal  
 b) tangential

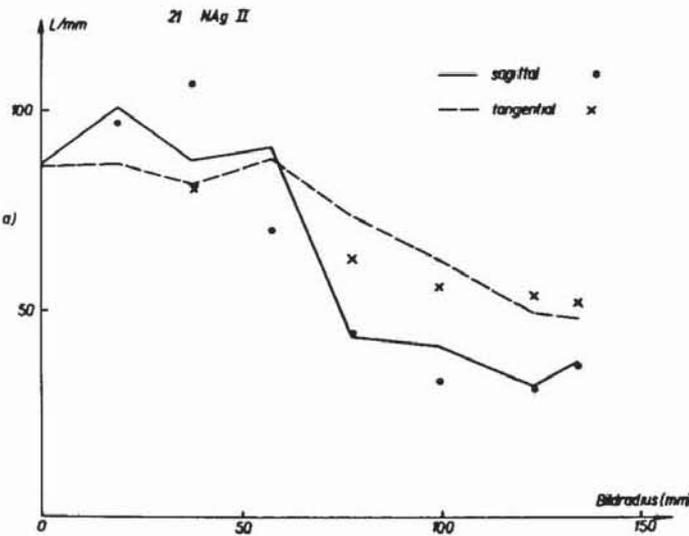


Abb. 15a): Auflösung des Wild-Objektivs 21 NAgiII, f/4, für weißes Licht; aufgetragen als Funktion des Bildradius  
 sagittal: — konventioneller Auflösungstest, ooo mit Hilfe der MTF  
 tangential: — — konventioneller Auflösungstest, xxx mit Hilfe der MTF

leisten, wurde die Position des Anlegrahmens (Bildebene) genau ausgemessen. Dabei zeigte es sich, daß die mit verschiedenen Aufnahmen mühsam gefundene beste Bildebene nahe bei der mit Hilfe der MTF-Messungen festgelegten zu liegen kam. Für den Abstich (Festlegen der besten Bildebene) sind die MTF-Messungen schneller und zuverlässiger. Die Abbildungen 15a und 15b geben den Vergleich zwischen der mit MTF- und Schwellwertkurve gefundenen Auflösung (mit Kreisen und Kreuzen gekennzeichnet) und derjenigen aus subjektiven Auflösungstests in tangentialer und sagittaler Richtung resultierend. Die vorgeführten Beispiele sind bei Objektcontrast eins ausgeführt worden. Doch kann bei MTF-Messungen sehr einfach für den Objektcontrast  $\neq 1$  umgerechnet werden.

### 7. Einige Gedanken zu den Bildgütekriterien

Gütekriterien sind sowohl zur Auffindung der besten Bildebene als auch zum Vergleich der Qualität verschiedener optischer Systeme untereinander interessant. Praktisch brauchbare Bildgütekriterien erfordern aber eine Reduktion der anfallenden MTF-Daten auf ein Minimum. Linfoot [11] und Hertel [12] haben sich schon sehr früh mit Bildgütekriterien befaßt. Diese konnten aber bis heute praktisch nicht angewendet werden.

In der Photogrammetrie wird zur Beurteilung der Bildqualität ein Mittelwert der Auflösung über das ganze Bildformat für die vorgegebene Bildebene bestimmt (AWAR). Dabei

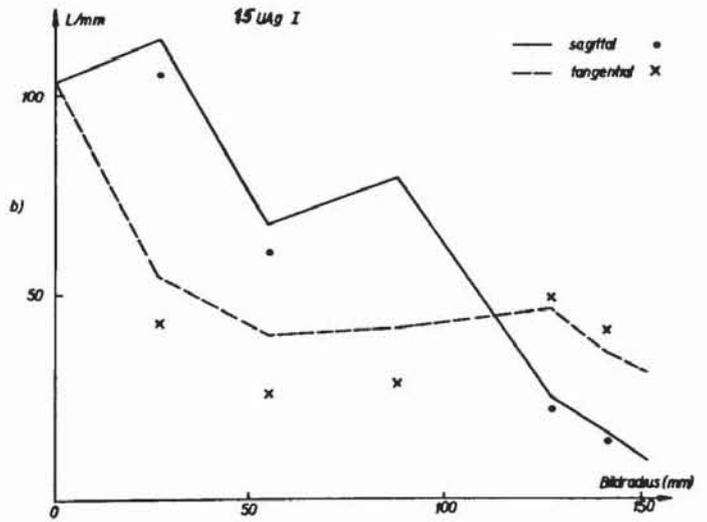


Abb. 15b): Auflösung des Wild-Objektivs 15 UAgI, f/5,6, für weißes Licht; aufgetragen als Funktion des Bildradius  
 sagittal: — konventioneller Auflösungstest, ooo mit Hilfe der MTF  
 tangential: — — konventioneller Auflösungstest, xxx mit Hilfe der MTF

wird die Auflösung für jeden Prüfwinkel mit dem Verhältnis der Zonengröße, in der sich der Bildpunkt befindet, zur Größe des Gesamtformates multipliziert und summiert über das Bildfeld. Nur ein Wert der Auflösung, das geometrische Mittel aus tangentialer und sagittaler Auflösung für jeden Prüfwinkel, wird herangezogen.

Eine bedeutende Erweiterung erfährt das Verfahren, wenn anstelle der Auflösung die Fläche unter den MTF-Kurven herangezogen wird. Zum Vergleich verschiedener Objektiv untereinander oder beim Heranziehen der MTF als Gütemaß oder zur Auffindung der besten Bildebene muß allerdings die Anzahl der Kurven reduziert werden. Man könnte sogar so weit gehen, daß zur Beurteilung der Linse einige ausgewählte Frequenzen herangezogen werden. Bei den Bildgütekriterien stellen aber Benutzer der Daten auch verschiedene Ansprüche. Handelt es sich um ein neues Objektiv, so sind die verschiedenen MTF-Kurven für den Optikrechner sehr aufschlußreich. Dazu sind viele Daten für verschiedene Blenden, Farben und Bildebenen interessant.

In diesem Abschnitt werden Gütekriterien mit Hilfe der MTF zur Auffindung der besten Bildebene vorgeschlagen, die auch zur Beurteilung verschiedener Objektiv untereinander dienen könnten. Dabei sind drei Gesichtspunkte berücksichtigt:

1. Fläche unter der MTF-Kurve bis zum Schwellwert,
2. Regelmäßigkeit in bezug auf tangentielle und sagittale MTF,
3. Regelmäßigkeit über das ganze Bildfeld.

Die Fläche unter der MTF-Kurve wird integriert bis zur Schwellwertkurve. Um die Anzahl der Kurven zu reduzieren, wird  $T_g = \sqrt{MTF_s \cdot MTF_t}$ ; also das geometrische Mittel der sagittalen ( $MTF_s$ ) und tangentialen MTF ( $MTF_t$ ) gewählt. Um zu unterschiedliche Kurven  $MTF_s$  und  $MTF_t$  bei gleichen Bildwinkeln zu berücksichtigen, wird als Grenzfrequenz der Schnittpunkt der schlechteren MTF-Kurve mit der Schwellwertkurve angenommen. Für das gleiche  $T_g$  kann ja zum Beispiel  $MTF_t$  sehr schlecht und  $MTF_s$  sehr gut sein; vorzuziehen wäre aber  $MTF_t \approx MTF_s$ . Bei zu unterschiedlichen MTF-Kurven wird demnach die zur Beurteilung der Bildqualität herangezogene Fläche kleiner. Zur Information der Bildqualität über das ganze Bildfeld wird die Fläche unter der  $T_g$ -Kurve mit dem zum jeweiligen Bildpunkt gehörenden Flächengewicht  $p_i$  (ähnlich dem AWAR) gewichtet. Dabei berücksichtigt  $p_i$  das Verhältnis des zum Bildwinkel  $w_i$  gehörenden Flächenanteils zur gesamten Bildfläche. Um die Regelmäßigkeit über das Bildfeld zu beurteilen, wird zusätzlich zum arithmetischen Mittel das harmonische aufgetragen. In Abbildung 16 ist sowohl das arithmetische als auch

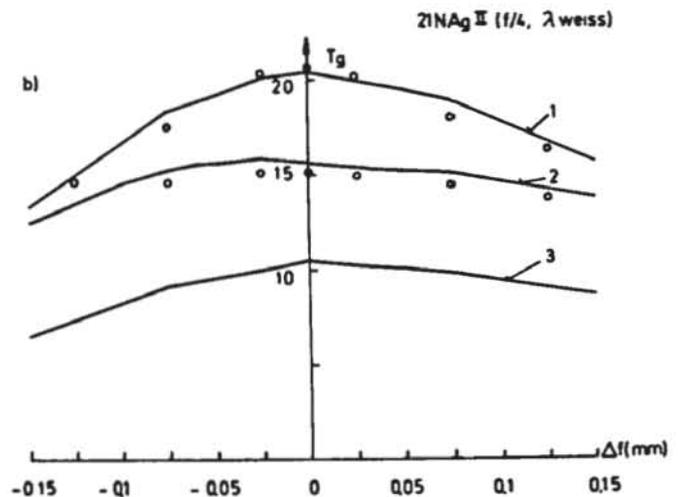
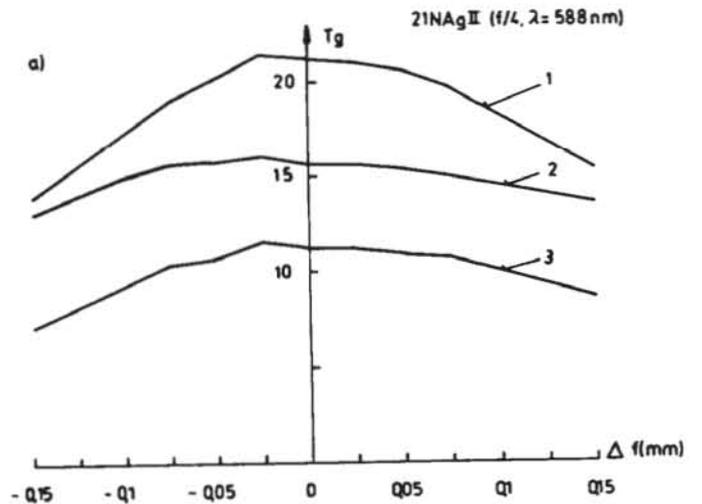


Abb. 16: Gütekriterien über das ganze Bild gemittelt, in Funktion der Defokussierung  
 1 arithmetisches Mittel  
 2 harmonisches Mittel  
 3 Strukturinhalt  
 (mit Kreisen sind die entsprechenden Rechenergebnisse aufgetragen)  
 a) für  $\lambda = 588 \text{ nm}$   
 b) für weißes Licht

das harmonische Mittel der gewichteten Flächen unter den  $T_g$ -Kurven,  $Q_i$ , für die einzelnen Bildwinkel berücksichtigt. Der von Linfoot vorgeschlagene Strukturinhalt ändert wenig am Verlauf der Kurve. Repräsentative Ergebnisse vom 21 NAGII-Objektiv für  $\lambda = 588 \text{ nm}$  und Weiß sind in Abbildung 16a und b aufgetragen.

In den Abbildungen veranschaulicht die Kurve ① das arithmetische Mittel über das Bildfeld.

$$A_1 = \frac{\sum_{i=1}^N p_i Q_i}{\sum_{i=1}^N p_i} \text{ dabei sind } p_i \text{ die Flächengewichte,}$$

$$Q_i = \int_0^{R_g} T_{ig}(R) dR \text{ und } T_g = \sqrt{MTF_s \cdot MTF_t}$$

$i = 1, 2, \dots N$

$N = \text{Anzahl Bildwinkel}$

$R_g = \text{Grenzfrequenz}$

Die Kurve ② zeigt jeweils das harmonische Mittel, welches besonders die Regelmäßigkeit über das ganze Gesichtsfeld berücksichtigt.

$$A_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{p_i}}{\sum_{i=1}^N p_i} \frac{Q_i}{Q_i}$$

In Kurve ③ ist  $Q_i$  ersetzt durch

$$\overline{Q_i} = \int_0^{R_g} |T_{ig}(R)|^2 dR,$$

welches dem von Linfoot [11] vorgeschlagenen Strukturinhalt Rechnung trägt. Die Kurve ③ scheint bei unseren untersuchten Beispielen keine wesentlich anderen Ergebnisse zu

liefern als Kurve ①, ist aber für praktische Zwecke aufwendiger. Mit Kreisen sind jeweils die theoretisch anhand der gerechneten Kurven gefundenen Werte aufgetragen. Unsere Studien haben ergeben, daß bei der Berücksichtigung der Regelmäßigkeit über das Bildfeld die beste Bildebene sich etwas verschiebt. Dies trifft auch für das abgeblendete Objektiv zu.

Zusammenfassend darf gesagt werden, daß es möglich wird, mit objektiven Kriterien die Bildgüten zu beurteilen. Noch bleibt einige Arbeit, und es fehlen auch zusätzliche Vergleichsmessungen, um die in diesem Bericht vorgeschlagenen Gütezahlen zu prüfen.

An dieser Stelle möchte ich den Herren A. Aemmer für die Ausführung der Rechnungen und J. Behringer für die Messungen bestens danken.

#### Literatur

- [1] L. R. Baker, *Optica Acta*, 18, 81–92 (1971).
- [2] R. E. Hopkins, D. Dutton, *Optica Acta*, 18, 105–121 (1971).
- [3] C. L. Norton, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, XLI, 203–216 (1975).
- [4] F. J. P. Consitt, W. Mandler, *Optica Acta*, 18, 123–131 (1971).
- [5] G. C. Brock, A. C. Marchant, T. L. W. Williams, *Optica Acta*, 19, 953–972 (1972).
- [6] Y. Matsui, K. Murata, *Optica Acta*, 18, 149–163 (1971).
- [7] J. Pouleau, P. Lafouasse, presented paper ISP Congress, Ottawa (1972).
- [8] P. Kuttner, *Optica Acta*, 22, 265–75 (1975).
- [9] K. Murata, *Progress in Optics*, Vol. V, ed. E. Wolf, 199–245 (1966), North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- [10] B. Beyeler, H. Tiziani, *Optik* (im Druck)
- [11] E. H. Linfoot, *Qualitätsbewertung optischer Bilder*, Fried. Vieweg & Sohn, Braunschweig (1960).
- [12] J. Hertel, *Mitteilungen und Berichte des optischen Instituts der TU Berlin* 7 (1963).

Anschrift des Verfassers:

Dr. H. Tiziani, Wild Heerbrugg AG, CH-9435 Heerbrugg