61, 3, 47

PHOTOGRAPHISCHE KORRESPONDENZ
3. SONDERHEFT

QUALITÄT DER PHOTOGRAPHISCHEN BILDWIEDERGABE

KOLLOQUIUM

DER SEKTION FORSCHUNG
DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAPHIE
UND DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK
KÖLN 1958

VERLAG DR. OTHMAR HELWICH
DARMSTADT UND WIEN
DARMSTADT 1959

SLUB
Wir führen Wissen.

Jg., Bd., J. 003 | Ex. 1 | Bbd. 01

Pz. | Exp. | Jg., Bd., J. | Ex. | Bbd.
01 | 4 | 1042 | 1 | 1 | 003 | 1 | 01

Universitäts-Bibliothek Dresden

			Pz.	Exp.	Jg., Bd., J.	Ex.	Bbd.
01	4	1042	1	1	003	1	01

SLUB
Wir führen Wissen.

Buch
Nr.

Dieses Buch ist zurückzugeben bis zum

27. 09. 76			

Bestell-Nr. 0520 (204) LG 39/235/74 1500

SLUB
Wir führen Wissen.

SLUB
Wir führen Wissen.

QUALITÄT DER PHOTOGRAPHISCHEN BILDWIEDERGABE

KOLLOQUIUM

DER SEKTION FORSCHUNG
DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAPHIE
UND DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ANGEWANDTE OPTIK
KÖLN
20.–21. MÄRZ 1958

SLUB
Wir führen Wissen.

1961 K E 123

Technische Hochschule
Bibliothek
Dresden

I 4° 1042, So.-H. 3

VORWORT

Durch die Anwendung der modernen Methoden der Übertragungs- und Informationstheorie ist die Untersuchung der photographischen Wiedergabe kleiner Details und die Beurteilung der Bildqualität in ein neues Stadium getreten. Sowohl die Güte der Bildwiedergabe durch die Optik als auch der Einfluß der photographischen Schicht kann mittels des neuen Verfahrens quantitativ erfaßt werden, und es ist möglich, ein auch praktisch brauchbares Maß der Bildqualität zu erhalten.

In den verschiedensten Ländern ist in letzter Zeit eine Reihe von Arbeiten über dieses Gebiet erschienen, doch behandeln diese Veröffentlichungen meist nur eine Seite des Problems, entweder die optische oder die photographische.

Die Sektion Forschung der Deutschen Gesellschaft für Photographie hat sich gemeinsam mit der Gesellschaft für angewandte Optik die Aufgabe gestellt, durch ein Kolloquium den auf diesem Gebiet arbeitenden Forschern einen ausführlichen Gedankenaustausch zu ermöglichen und so eine Koordinierung beider Teile des Problems herzustellen.

Die auf diesem Kolloquium gehaltenen einführenden Vorträge und die sich anschließenden Diskussionen festzuhalten und einem größeren Interessentenkreis zugänglich zu machen ist der Zweck des vorliegenden Sonderheftes.

Ehrenvorsitzender des Kolloquiums war Professor Dr. Emanuel Goldberg, Tel Aviv, welcher durch sein Buch „Der Aufbau des photographischen Bildes" und viele andere Veröffentlichungen wesentliche Vorarbeiten zu dem hier behandelten Gebiet geliefert hat.

Prof. Dr. H. Frieser Dr. G. Franke

SLUB
Wir führen Wissen.

INHALTSÜBERSICHT

Vorwort 3
Vorträge und Diskussionsbeiträge 5–57
Nomenklatur 58
Teilnehmerverzeichnis 59

VORTRÄGE UND DISKUSSIONSBEITRÄGE

(* = Diskussions-Beiträge)

A: EINFÜHRUNG IN DIE ÜBERTRAGUNGSTHEORIE

LOHMANN, A.: Einführung in die Übertragungstheorie der optischen Abbildung 5
*LUKOSZ, W.: Zur Berechnung der Übertragungsfunktion eines optischen Systems 11

B: MESSUNG DER OPTISCHEN ÜBERTRAGUNGSFUNKTION

INGELSTAM, E.: Objektivprüfgeräte zur Messung der komplexen Kontrastübertragungsfunktion im Stockholmer „Institutet för optisk forskning" 13
ROSENHAUER, K.: Messung des optischen Kontrastübertragungsfaktors 16
MARÉCHAL, E.: Appareil pour la mesure du facteur du transfert de contraste des objectifs photographiques 18
Lau: Diskussionsbemerkung 19
Sauer, H.: Diskussionsbemerkung 19

C: MESSUNG DER PHOTOGRAPHISCHEN ÜBERTRAGUNGSFUNKTION UND DER KÖRNIGKEIT

FRIESER, H.: Die Übertragung durch den photographischen Prozeß 20
Botden, P.: Diskussionsbemerkung 25
Eggert, J.: Diskussionsbemerkung 25
Botden, P.: Diskussionsbemerkung 26
Eggert, J.: Diskussionsbemerkung 26
Slevogt, H.: Diskussionsbemerkung 26
HENDEBERG, L. O., INGELSTAM, E.: Messung der photographischen Kontrastübertragungsfunktion mit Berücksichtigung der benutzten Optik 26

D: BEDEUTUNG PHYSIOLOGISCHER PROBLEME FÜR DIE ÜBERTRAGUNGSTHEORIE

SCHOBER, H.: Physiologische Probleme der Bildschärfe 32
Hansen, G.: Diskussionsbemerkung 38
*ROSENBRUCH, K.-J.: Die Konstrastempfindlichkeit des Auges 39

E: ALLGEMEINE BESCHREIBUNG DER QUALITÄT PHOTOGRAPHISCHER BILDER

LINFOOT, E. H.: Allgemeine Qualitätsbewertungen photographischer Bilder 40

F: ANWENDUNG DER ÜBERTRAGUNGSTHEORIE AUF ALLGEMEINE PHOTOGRAPHISCHE PROBLEME

FRIESER, H.: Anwendung der Übertragungstheorie auf verschiedene praktische Probleme 46
*GOLDMANN, J.: Messung des Kontrast-Übertragungs-Faktors bei Fernsehfilmaufzeichnungen 49
*KLEIN, E.: Die Kontrastübertragung der photographischen Platte im Elektronenmikroskop 53
RÖHLER, R.: Bedeutung der Informationstheorie in der Medizin (Röntgenphotographie) und in der wissenschaftlichen Forschung 54
*LANGNER, G.: Die Verminderung des Störpegeleinflusses bei der Messung von Kontrastübertragungsfunktionen . . . 56
*HEYNACHER, E.: Optische Modellanordnung (Faltungsapparatur) für Bildgüteuntersuchungen 57

SLUB
Wir führen Wissen.

EINFÜHRUNG IN DIE ÜBERTRAGUNGSTHEORIE DER OPTISCHEN ABBILDUNG

Von Dr. A. Lohmann
Technische Hochschule Braunschweig

Einleitung

Die Aufgabe dieses Kolloquiums besteht darin, den Gang des optischen Signals vom Motiv in mehreren Schritten bis in das Gehirn zu verfolgen. Der erste Schritt, mit dem sich dieser Vortrag hauptsächlich befaßt, besteht in der optischen Abbildung. Danach kommen photographische, physiologische und psychologische Prozesse. Das erste Problem ist, eine *Beschreibung* (Abschnitt A) dieser Vorgänge zu finden. Danach werden *Qualitätskriterien* (Abschnitt B) diskutiert.

Man hätte das Thema des Kolloquiums auch analogieweise „Optisch-photographische Nachrichtenübertragung" nennen können. Dieser Titel legt es nahe, einige Grundbegriffe der elektrischen Nachrichtenübertragung zu übernehmen:

a: lineares Frequenzfilter (passives Übertragungsglied),
b: nichtlineare Prozesse (Kennlinien),
c: Rauschen,
d: aktive Übertragungsglieder.

Der Punkt a bedeutet für uns „Optische Übertragungstheorie". Noch ein anderer Weg führt zwangsläufig zu dieser Theorie, nämlich die Forderung, daß unsere Beschreibung der optischen Abbildung die folgenden drei Eigenschaften besitzen soll; sie soll sein:

I für beliebige Objekte gültig,
II theoretisch und experimentell erfaßbar,
III kombinierbar.

Die Bedeutung der Forderung I liegt auf der Hand, obgleich sie bisher kaum beachtet wurde. Aus II folgt unter anderem, daß jetzt die Testexperimente aus den Konstruktionsdaten vorausberechnet werden können. Die III. Eigenschaft kann man als den eigentlichen Grund dafür ansehen, daß sich in diesem Kolloquium Optiker, Photographen und Fernsehleute zusammengefunden haben. Punkt III fordert nämlich, daß aus dem optischen Qualitätsmaß und aus dem photographischen Qualitätsmaß die kombinierte Qualität des optisch-photographischen Gesamtprozesses berechnet werden kann.

A. Beschreibung der optischen Abbildung

1. Definition des Übertragungsfaktors

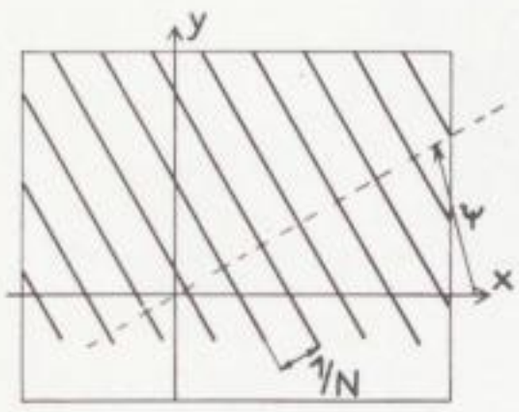
In der elektrischen Übertragungstheorie denkt man sich das Signal, das als Funktion der Zeit gegeben ist, in Zeitfrequenzen zerlegt. Die Durchlässigkeit des Übertragungsapparates für die verschiedenen Zeitfrequenzen nennt man bekanntlich den Übertragungsfaktor oder auch Frequenzgang. Ganz analog zerlegen wir jetzt das optische Signal (Objektintensität J_0), das als Funktion von zwei Raumkoordinaten x, y gegeben ist, in das Raumfrequenzspektrum $B_0(N_x, N_y)$. Die Raumfrequenz N (auch Ortsfrequenz

$$J_0(x, y) = \iint B_0(N_x, N_y) \cdot e^{2\pi i (N_x x + N_y y)}\, dN_x\, dN_y$$

$$J_B(x, y) = \iint B(N_x, N_y) \cdot e^{2\pi i (N_x x + N_y y)}\, dN_x\, dN_y \qquad (1)$$

$$B(N_x, N_y) = F(N_x, N_y) \cdot B_0(N_x, N_y)$$

oder Längenfrequenz genannt) wird meistens in Perioditätslängen pro Millimeter angegeben. Der Integrand besteht also aus periodischen Streifen der Amplitude $B_0(N_x, N_y)$ mit dem Streifenabstand $1/N$ ($N^2 = N_x^2 + N_y^2$), die um den Winkel ψ gegenüber dem Achsenkreuz gedreht sind (vgl. Abb. 1). Ganz analog kann



$N^2 = N_x^2 + N_y^2 \qquad tg\,\psi = \frac{N_y}{N_x}$

$N_x = N\cos\psi \qquad N_y = N\sin\psi$

Abb. 1. Schematische Darstellung eines Fourier-Elementes, des Integranden der Gleichung 1. Diese Figur zeigt, daß das Fourier-Element eine nur eindimensionale Struktur besitzt in einem um ψ gedrehten Koordinatensystem. Deshalb brauchen wir im weiteren nur mit einer Frequenz N statt mit dem Frequenzpaar N_x, N_y zu rechnen. In dem gedrehten Koordinatensystem ist $F(N_x, N_y) = F(N; \psi) = F(N)$ zu schreiben.

man natürlich auch die Bildintensität $J_B(x, y)$ zerlegen. (Wir vermeiden das Auftreten der Vergrößerung, indem wir uns unter der Objektintensität $J_0(x, y)$ die ideale Bildintensität vorstellen, die bei einer Abbildung ohne Beugung und ohne Aberrationen entstehen würde). Die komplexe Kontrastübertragungsfunktion (nach Duffieux [1]) $F(N_x, N_y)$ (kurz: CCT) gibt dann die „Frequenzdurchlässigkeit" an. Das wird besonders anschaulich, wenn man ein spezielles Objekt betrachtet, das nur eine Frequenz enthält (Abb. 2).

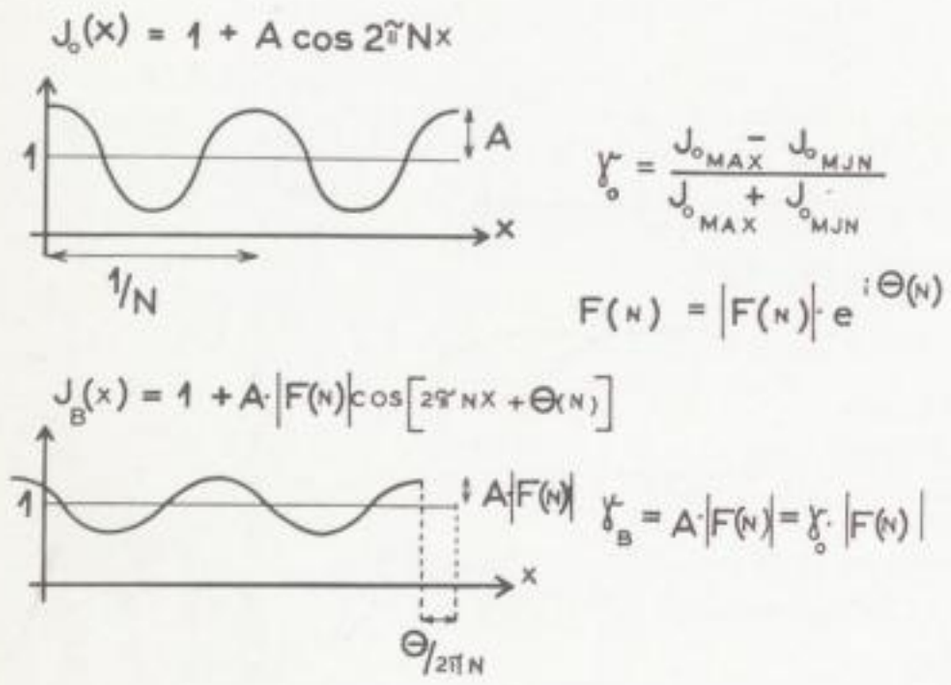


Abb. 2. Abbildung eines einfachen periodischen Objektes. Der Betrag der CCT, die Kontrastübertragung, gibt das Verhältnis von Bildkontrast γ_B zu Objektkontrast γ_0 an. Die Übertragungsphase bewirkt eine seitliche Verschiebung.

Man erkennt, daß der Betrag $|F(N)|$ der CCT als „Kontrastübertragung" wirkt, und daß durch die Übertragungsphase $\Theta(N)$ eine seitliche Verschiebung entsteht. Damit eine CCT existiert, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: 1. Lineare Additivität der Intensität und 2. Isoplanasie, das heißt, das Punktbild soll in allen Teilen des Bildfeldes die gleiche Intensitätsverteilung haben. Die zweite Forderung ist natürlich nur in sogenannten „isoplanatischen Teilbereichen" des Bildfeldes erfüllt. Jeder isoplanatische Teilbereich hat seine eigene CCT.

Nun zur Ausrechnung der CCT. Nimmt man in den Gleichungen (1) als Objekt speziell einen Lichtpunkt in $x = o$, $y = o$, so ist dessen Frequenzspektrum $B_0(N_x, N_y) = 1$. Dann ist das Frequenzspektrum des dazugehörigen Punktbildes $\Phi(x)$ identisch mit der CCT (ab jetzt nur noch eindimensional, was keine Einschränkung bedeutet (vgl. Abb. 1).

$$F(N) = \int \Phi(x) \cdot e^{-2\pi i Nx} dx \qquad (2)$$

Deshalb stellen wir uns jetzt die Aufgabe, das Punktbild zu berechnen unter Berücksichtigung der Aberrationen, der Aperturbeugung und des „Amplitudenfilters". Daraus wird sich die Formel von Duffieux [1] für die CCT ergeben. Es wäre für photographische Zwecke unnötig umständlich, wollte man die Formel von Duffieux in extenso auswerten, weil hier doch nur die kleinen Frequenzen N interessieren. Die hohen Frequenzen, die sehr feinen Details im Objekt entsprechen, gehen im photographischen Korn unter. Oder anders ausgedrückt: die photographische CCT, mit der die optische CCT zur Gesamt-CCT zu multiplizieren ist, reicht nur bis rund 50 Linien pro mm, während die optische CCT im Prinzip durchaus bis 1000 Linien pro mm reichen kann. Normalerweise bewirken allerdings die Aberrationen, daß auch die optische CCT bei Frequenzen jenseits 50 bis 100 Linien pro mm so klein wird, daß diese hohen Frequenzen praktisch nicht mehr abgebildet werden. Also auch aus diesem Grunde interessiert die CCT nur bei kleinen Frequenzen. Deshalb werden wir die Duffieux-Formel in eine Reihe entwickeln, die für kleine Frequenzen gilt.

Die Bedeutung der Koeffizienten dieser Reihe für die Abbildung wird diskutiert werden.

2. *Herleitung der Formel von Duffieux*

Der Achsenpunkt in O sendet eine Kugelwelle aus (vgl. Abb. 3). Die Linse soll daraus eine Kugelwelle konzentrisch um den Bildpunkt in B erzeugen. Tatsächlich entsteht in der Pupille AP meistens eine etwas deformierte Welle. Ihre Abweichung von der

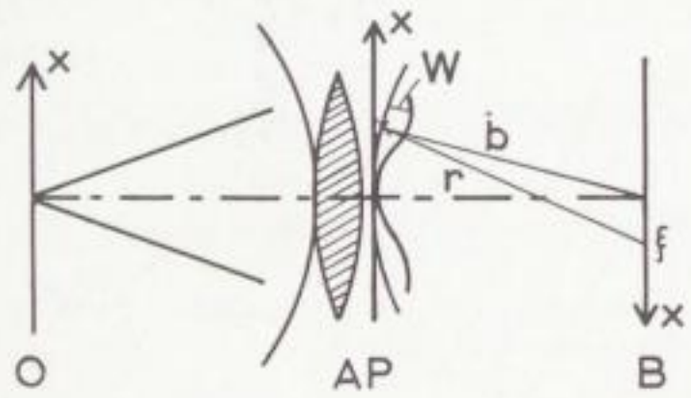


Abb. 3 Schema der optischen Abbildung mit Objektebene O, Pupille AP und Bildebene B. Die Differenz zwischen idealer und realer Wellenfront in der Pupille ergibt die Wellenaberration W (x, y).

idealen Kugel nennt man bekanntlich Wellenaberrationen W. Deshalb unterscheidet sich die komplexe Amplitude auf der idealen Kugel um die Phase $\frac{2\pi}{\lambda} W = KW$ von ihrem Sollwert. Außerdem kann die Amplitudendurchlässigkeit τ der Linse ungleichförmig sein (Straubel [2], neuere Lit. bei Dossier [3]), so daß sich die tatsächliche Amplitude in AP um den Faktor

$$p(x, y) = \tau(x, y) \cdot e^{iKW(x, y)} \qquad (3)$$

von der idealen Amplitude unterscheidet. $p(x, y)$ nennt man die Pupillenfunktion. Sie ist (bis auf einen uninteressanten konstanten Faktor) gleich der tatsächlichen Amplitude, weil die ideale Amplitude konstant sein sollte auf der idealen Kugel. Nun denken wir uns, daß von jedem Punkt Q(x) der idealen Kugel eine Kugelwelle losgeht (Huygens), die bis zur Bildebene gelangt und dort am Orte ξ die komplexe Amplitude: (In seltenen Fällen sind Verwechslungen zwischen Pupillen- und Bildkoordinate möglich. Dann nennen wir letztere ξ statt x.)

$$p(x) \cdot \frac{e^{iKr(x, \xi)}}{r(x, \xi)} \qquad (4)$$

erzeugt (jetzt nur eindimensional der Einfachheit halber). Für die Strecke $r(x, \xi)$ kann man mit einer einfachen geometrischen Betrachtung aus der Abb. 3 ableiten:

$$r(x, \xi) \approx b + \frac{x\xi}{b} + \frac{\xi^2}{2b} \qquad (5)$$

(b ist der Abstand vom Pupillenzentrum zum eigentlichen Bildpunkt). Die komplexe Amplitude $P(\xi)$ in der Bildebene erhält

man durch Summierung aller Kugelwellen (Gl. 4) aus der Pupille:

$$P(\xi) = \int_{-h}^{+h} p(x) \cdot \frac{e^{iKb}}{r(x,\xi)} \cdot e^{iK\left(\frac{x\xi}{b} + \frac{\xi^2}{2b}\right)} dx \approx$$

$$\approx \frac{e^{iKb}}{b} \cdot e^{iK\frac{\xi^2}{2b}} \int_{-h}^{+h} p(x) \cdot e^{iK\frac{\xi x}{b}} dx \qquad (6)$$

(Die Näherung ist nicht inkonsequent, weil sich $r \neq b$ im Nenner kaum bemerkbar macht, in der trigonometrischen Exponentialfunktion dagegen sehr.) Die Intensität des Bildpunktes erhalten wir daraus durch komplexes Quadrieren (der Stern bedeutet „konjugiert komplex". Die Konstante b^{-2} ist uninteressant):

$$\Phi(\xi) = |P(\xi)|^2 = P(\xi) \cdot P^*(\xi) =$$

$$= \iint_{-h}^{+h} p(x) \cdot p^*(x') \cdot e^{iK\xi\frac{x-x'}{b}} dx\, dx' \qquad (7)$$

Um auf die CCT zu kommen, müssen wir nun die Fourier-Transformation der Gl. 2 ausführen:

$$\iiint p(x) \cdot p^*(x') \cdot e^{2\pi i\xi\frac{x-x'}{\lambda b}} \cdot e^{-2\pi i N\xi} dx\, dx'\, d\xi \qquad (8)$$

Der erste Integrationsprozeß über ξ ergibt eine sogenannte Diracsche δ-Funktion, die nur $\neq 0$ ist, wenn das Argument null ist.

$$\int e^{2\pi i\xi\left(\frac{x-x'}{\lambda b} - N\right)} d\xi = \delta\left(\frac{x-x'}{\lambda b} - N\right)$$

Dadurch bleibt beim nächsten Integrationsprozeß über x' nur der Teil vom Integranden übrig, für den gilt:

$$x' = x - \lambda b N$$

So wird aus dem Integral (8) der Ausdruck:

$$\int p(x) \cdot p^*((x - \lambda b N)\, dx$$

Dies ist praktisch schon die CCT. Wir müssen nur noch einen Normierungsfaktor ($F(0) = 1$) anbringen und auf zwei Dimensionen (x, y) in der Pupille erweitern.

$$F(N) = \frac{\iint p(x,y) \cdot p^*(x - \lambda b N, y)\, dx\, dy}{\iint p(x,y) \cdot p^*(x,y)\, dx\, dy} \qquad (9)$$

Hopkins [4] gab der Gestalt dieser Formel etwas mehr Symmetrie durch die Ersetzung $x \to x + \frac{\lambda b}{2} N$

$$\boxed{F(N) = \frac{\iint p\left(x + \frac{\lambda b}{2} N, y\right) \cdot p^*\left(x - \frac{\lambda b}{2} N, y\right) dx\, dy}{\iint p(x,y) \cdot p^*(x,y)\, dx\, dy}} \qquad (10)$$

Duffieux-Formel

Das Integrationsgebiet für den Nenner ist die (im allgemeinen) kreisförmige Pupillenfläche $x^2 + y^2 \leqslant h^2$, weil nur dort die Pupillenfunktion $p(x, y)$ von null verschieden ist. Im Zähler haben wir zwei längs der x-Achse um $\pm \frac{\lambda b}{2} N$ verschobene Pupillenfunktionen. Ihr Produkt ist natürlich nur von null verschieden im Überdeckungsgebiet, das somit als Integrationsgebiet fungiert (Abb. 4).

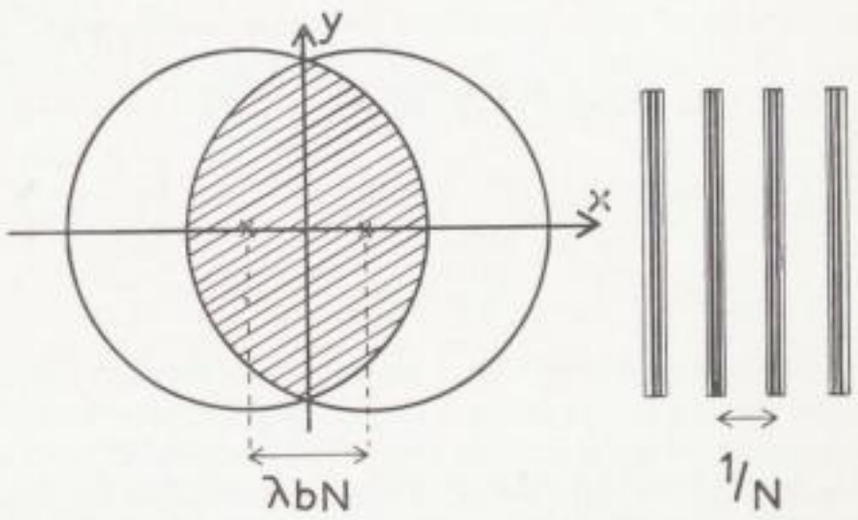


Abb. 4. Integrationsgebiet der Duffieux-Formel (Gl. 10), bestehend aus der Überdeckung von zwei verschobenen Pupillen. Größe und Richtung der Verschiebung richten sich nach dem Fourierelement (daneben gezeichnet), dessen CCT berechnet werden soll.

3. *Die Taylor-Reihe der CCT für kleine Frequenzen*

Die Differentiationsprozesse zur Gewinnung der Taylor-Koeffizienten sind physikalisch uninteressant und außerdem an anderer Stelle (Lohmann [5]) schon beschrieben. Deshalb wollen wir die Taylor-Reihe sofort aufschreiben (hier allerdings nur bis zur 2. Ordnung) und sie dann diskutieren. Dazu teilen wir die CCT auf in ihren Betrag $|F(N)|$, die sogenannte Kontrastübertragung CT, und den Phasenfaktor mit der sogenannten Übertragungsphase $\Theta(N)$.

$$F(N) = |F(N)| \cdot e^{i\Theta(N)} \qquad (11)$$

$$|F(N)| = 1 - \frac{4}{\pi} \varkappa\lambda \textcircled{\tau^2} \cdot N +$$

$$+ \left[-(2\pi)^2 \left\{\overline{\tau^2 \xi^2} - \left(\overline{\tau^2 \xi}\right)^2\right\} + (\lambda b)^2 \overline{\tau \cdot \tau_{xx}}\right] \cdot \frac{N^2}{2} + \ldots$$

$$\Theta(N) = 2\pi\, \overline{\tau^2 \xi} \cdot N + 16\, \lambda\varkappa \left[\textcircled{\tau^2} \cdot \overline{\tau^2 \xi} - \textcircled{\tau^2 \xi}\right] \cdot \frac{N^2}{2} + \ldots$$

Dabei ist $\varkappa = b/2h$ die Blendenzahl und der Index x eine Differentation $\tau_x = \frac{\partial \tau}{\partial x}$. Die Kreise und die Querstriche bedeuten Mittelwerte über den Rand, bzw. über die Fläche der Pupille. Ihre Definitionen lauten für eine beliebige Funktion $\varphi(x, y)$ in der Pupille:

$$\textcircled{\varphi} = \frac{\pi h}{4} \cdot \frac{\int_{-h}^{+h} \left[\varphi\left(+\sqrt{h^2 - y^2}, y\right) + \varphi\left(-\sqrt{h^2 - y^2}, y\right)\right] dy}{\iint \tau^2(x,y)\, dx\, dy} \qquad (12a)$$

$$\overline{\varphi} = \frac{\iint \varphi(x,y)\, dx\, dy}{\iint \tau^2(x,y)\, dx\, dy} \qquad (12b)$$

Der Nenner in diesen Definitionen bedeutet eine zweckmäßige Normierung auf die Gesamttransparenz der Pupille. Die Formeln (11) gelten zunächst nur für $N \geqslant 0$. Man kann daraus die CCT für negative N erhalten durch Ausnutzung der „Realitäts-Symmetrie: $F(N) = F^*(-N)$, oder $|F(N)| = |F(-N)|$; $\Theta(N) = -\Theta(-N)$. Diese Symmetrieeigenschaft der CCT sorgt dafür, daß bei der Rechnung nie imaginäre Intensitäten auftreten können. An den Formeln (11) ist bemerkenswert, daß die Wellenaberration W gar nicht mehr erscheint, sondern nur noch $\xi(x, y)$, die eine Komponente der Queraberrationen. Sie hängen mit den Differentialquotienten der Wellenaberration zusammen. Das

$$b \cdot \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} = \xi(x,y) \quad ; \quad b \cdot \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} = \eta(x,y) \qquad (13)$$

folgt bekanntlich aus der Vorstellung von Strahlen, die senkrecht zur tatsächlichen Wellenfläche in der Austrittspupille stehen. Die

tatsächliche Wellenfläche ist aber um den Winkel $\frac{\partial W}{\partial x}$, bzw. $\frac{\partial W}{\partial y}$ gegenüber der idealen Wellenfläche geneigt, so daß auch die dazugehörigen Strahlen um den gleichen Winkel falsch gerichtet sind und daher um die Strecke ξ, bzw η seitlich neben dem eigentlichen Bildpunkt die Bildebene treffen.

Daß die Aberrationen in den Formeln (11) nur als geometrisch-optische (Quer-) Aberrationen erscheinen, ist sehr wichtig, weil man so die Möglichkeit besitzt, auf strahlenoptischem Wege die wellenoptische Kontrastübertragungsfunktion auszurechnen.

Nun wollen wir die Übertragungsphase aus der Gleichung (11) diskutieren:

$$\Theta(N) = \Theta'(o) \cdot N + \Theta''(o) \cdot \frac{N \cdot |N|}{2} + \ldots$$

Das lineare Glied bedeutet eine seitliche Verschiebung des Bildes, wie man am Vergleich zweier Intensitäten $\tilde{J}$, J mit und ohne Θ' erkennt:

$$J(x) = \int B(N) \cdot e^{2\pi i N x} \, dN$$

$$\tilde{J}(x) = \int B(N) \cdot e^{i(\Theta' \cdot N + 2\pi N x)} \, dN = J\left(x + \frac{\Theta'}{2\pi}\right)$$

$$\frac{\Theta'}{2\pi} = \overline{\tau^2 \xi}$$

Die Verschiebungs-Strecke $\overline{\tau^2 \xi}$ bedeutet anschaulich die durch Queraberrationen entstandene Verschiebung des strahlenoptischen Schwerpunktes vom Punktbild. Der „Gewichtsfaktor" $\tau^2(x, y)$ berücksichtigt den Energie-Anteil des entsprechenden Strahles mit der Queraberration $\xi(x, y)$. — Ist diese durch Θ' bedingte Verschiebung wellenlängenabhängig auf Grund der Dispersion, so bedeutet das einen Farbquerfehler. Und wenn die Verschiebung in verschiedenen Teilen des Bildfeldes verschieden groß ist, so haben wir Verzeichnung vor uns. Das quadratische Glied $\Theta'' \frac{N \cdot |N|}{2}$ der Übertragungsphase bewirkt den bekannten Koma-Effekt, also eine Asymmetrie des Punktbildes:

$$\Phi(\pm x) = \int |F(N)| \cdot e^{i\Theta'' \frac{N \cdot |N|}{2}} \cdot e^{\pm 2\pi i N x} \, dN \qquad (14)$$

Die Asymmetrie kann man diesem Integral direkt ansehen ohne ausführliche Rechnungen. Es wird nämlich für $x < 0$ größere Werte ergeben als für $x > 0$ ($\Theta'' > 0$ vorausgesetzt), weil der Integrand um so weniger oszilliert, je mehr die Phase des Integranden annähernd konstant bleibt. Man kann ganz allgemein zeigen, daß eine (antisymmetrische) Phase $\Theta(N)$ notwendig und hinreichend für ein asymmetrisches Punktbild ist. Betrachten wir nun speziell die Kontrastübertragung, die im Idealfall $|F| = 1$ sein sollte. Man sieht

$$|F(N)| = 1 + |F(o)|' \cdot |N| + |F(o)|'' \cdot \frac{N^2}{2} + \ldots$$

an der Formel (11), daß der lineare Anteil verschwindet, falls das Amplitudenfilter

$$\tau_{RAND} = 0 \qquad \longrightarrow \qquad \overline{\tau^2} = 0 \qquad (15)$$

am Pupillenrand undurchlässig ist. An den Abbildungen 8—12 der zitierten Arbeit [5] erkennt man die Verbesserung der CCT, die durch ein Amplitudenfilter erzielt werden kann, das die Bedingung (15) erfüllt. Den quadratischen Term der Kontrastübertragung wollen wir nur noch für den „Normalfall" $\tau = 1$ ohne Amplitudenfilter diskutieren.

$$|F(N)| = 1 - \frac{4}{\pi} \varkappa \lambda \cdot |N| - \frac{(2\pi N)^2}{2} \cdot \overline{(\xi - \overline{\xi})^2} + \ldots \qquad (16)$$

Zunächst erkennt man, daß die Einflüsse der Aperturbeugung ($\lambda \varkappa$) und der Aberrationen (ξ) als Summanden nebeneinander stehen, und zwar so, daß Kompensation beider Einflüsse unmöglich ist. Also bedeutet ein Fortschritt der strahlenoptischen Korrektur auch stets einen Fortschritt vom Standpunkt der übergeordneten Wellenoptik. Dieser Satz gilt nicht mehr exakt, wenn höhere Näherungen berücksichtigt werden, insbesondere nicht für den Koma-Effekt, wo Wechselwirkungen zwischen Strahlenoptik und Aperturbeugung eintreten können. Das quadratische Glied in Gl. 16 kann man benutzen, um die optimale Kompensation verschiedener Aberrationstypen zu berechnen. Dies Verfahren, das auf Gauss [13] zurückgeht, wollen wir hier aber nicht durchführen, da es schon kurz beschrieben wurde [5]. Außerdem hat W. Lukosz [6], der seinerzeit die engen Beziehungen zum „Gauss-Moment" erkannt hat, diese Kompensationsbetrachtungen wesentlich erweitert.

4. Vergleich der CCT mit dem Punktbild

Ein Qualitätsmaß für die optisch-photographische Abbildung sollte die eingangs geforderten drei Eigenschaften I, II und III haben. Die I. Eigenschaft ist bei der CCT gegeben, weil man sich bei jeder beliebigen Objektintensität denken darf, sie sei zusammengesetzt aus sinusförmigen periodischen Intensitätsstreifen von verschiedenen Frequenzen und mit verschiedenen Orientierungen (Fourier-Theorem). Zu zeigen, daß die II. Forderung erfüllt ist, war die Hauptaufgabe dieser Arbeit und der anschließenden Berichte über experimentelle Methoden (s. auch [15]). Dabei ist es praktisch bedeutsam, daß die CCT theoretisch *und* experimentell erfaßt werden kann. Denn nun liefert die Prototypen-Herstellung eine quantitative Aussage darüber, ob die nach den Kontruktionsdaten zu erwartende Qualität (in Form der CCT) auch praktisch realisiert werden kann. — Die III. Forderung ist auch erfüllt, denn optische CCT und photographische CCT setzen sich multiplikativ zur Gesamtübertragungsfunktion der optisch-photographischen Abbildung zusammen. Zwar schließen sich noch weitere Abbildungsschritte an (Schwärzungskurve, Körnigkeitseinfluß, Umkopieren, Projektion, Augenabbildung, physiologische und psychologische Einflüsse), die erst in den folgenden Arbeiten besprochen werden: dennoch liefert die Eigenschaft der Kombinierbarkeit schon jetzt eine sehr wesentliche Aussage: der Frequenzbereich (Durchlaßbereich für die Ortsfrequenzen, auch Bandbreite genannt) bei der Kombination aus zwei hintereinander folgenden Übertragungsschritten ist in jedem Falle kleiner als der kleinere der beiden Einzel-Frequenzbereiche (oder höchstens gleich). Wenn also die photographische CCT nur Frequenzen bis etwa 50 Linien pro mm durchläßt, so hängt die Qualität des Objektivs natürlich nur von der CCT für diese niedrigen Frequenzen ab. Die Angabe einer Auflösung von z. B. 500 Linien pro mm ist also ein sinnloses Qualitätsmaß.

Ist nun auch das Punktbild im Sinne der Forderungen I bis III zur Qualitätsbeschreibung geeignet? Im Prinzip ja, denn aus dem Punktbild kann man die CCT berechnen und umgekehrt (Gl. 2). Aber es wäre sehr umständlich (Faltungsintegral), wenn man die zu den Forderungen I und III nötigen Rechnungen mit dem Punktbild durchführen wollte. Die experimentelle Untersuchung von Punktbildern ist schwierig. Die Berechnung des Punktbildes ist in hohem Maße unökonomisch, weil die meisten Einzelheiten des Punktbildes „im photographischen Korn untergehen", beziehungsweise bei der Überlagerung von vielen Punktbildern im Gesamtbild verschwinden. Man kann bei der Berechnung des Punktbildes nicht die wenigen wichtigen von den vielen unwichtigen Details trennen. Das ist aber bei der CCT möglich. Dort sind die niedrigen Frequenzen wichtig (etwa von 0 bis 50 mm^{-1} beim 50 mm F/2 Objektiv), die hohen Frequenzen (von 50 bis 1000 mm^{-1}) bedeutungslos. Also wird man sich bei der Berechnung der CCT auf kleine Frequenzen beschränken, wofür es einfache Reihenentwicklungen gibt (vgl. neben [5] auch [7], [4] und [6]). — Die eben ausgesprochene Kritik am Punktbild bezieht sich hauptsächlich auf die hier betrachtete photographische Optik. In der astronomischen und mikroskopischen Optik haben Punktbilder teilweise ihre Berechtigung.

B. Qualitätskriterien

1. Psychologische Gesichtspunkte

Will man Kriterien für die Abbildungsqualität finden, so muß man natürlich auch alle hinter der Optik folgenden Abbildungsschritte berücksichtigen. Diese Schritte sind nicht nur Linearfilter — Punkt a in der Einleitung —; auch b nichtlineare Prozesse (Schwärzungskurve), c Rauschen (Körnigkeit) und d aktive Übertragungsglieder (psychologische Einflüsse auf Grund von a priori-Informationen) kommen vor. Besonders der Punkt d wurde bisher viel zu wenig beachtet. Er berücksichtigt, daß das Auge ein ausgesprochen *aktives Übertragungselement* ist (TORALDO DI FRANCIA [8] und E. v. HOLST [16]). Was wir „sehen" ist gar nicht alles physikalisch als Intensitätsverteilung auf der Netzhaut vorhanden. Vieles wird auf Grund von Kombinationserfahrungen und durch Sympathie-Reaktionen zum „physikalisch Gesehenen" hinzugefügt. Diese sicher sehr wertvollen Eigenschaften unseres Gesichtssinnes sind natürlich schwer zu analysieren, am besten indirekt aus Fehlleistungen. Dafür gab LAUENSTEIN [9] ein instruktives Beispiel. Einen weiteren Hinweis auf die Bedeutung dieser psychologischen Effekte kann man bei kleinen Kindern beobachten. Kinder können trotz besserer physikalischer Sehfähigkeit entfernte Gegenstände schlechter wahrnehmen als Erwachsene, weil die Unterstützung der „physikalischen Wahrnehmung" durch die Erfahrung geübt sein muß.

Unter Berücksichtigung dieser wichtigen Eigenschaft d wollen wir jetzt einige kritische Bemerkungen machen zu bisherigen Versuchen, „realistische Qualitätskriterien" aufzustellen. Die positiven Eigenschaften dieser neuen Qualitätskriterien werden besonders in der folgenden Arbeit von E. H. LINFOOT [10] besprochen werden, so daß wir hier darauf nicht einzugehen brauchen. Als Gegenvorschlag werden wir die „statistische Ätshetik" zur Diskussion stellen.

2. Ähnlichkeitsverlust

Wenn Objektintensität und Bildintensität möglichst ähnlich sein sollen, dann muß die Differenz an allen Punkten möglichst klein sein. Weil die Differenz positiv oder auch negativ sein kann, quadriert man und integriert dann über das ganze Bildfeld. Der so berechnete Ähnlichkeitsverlust enthält den Übertragungsfaktor in der Form:

$$|1 - F(N)|^2 = 1 + |F(N)|^2 - 2\,|F(N)| \cdot \cos \Theta(N)$$

Zunächst fällt auf, daß die Übertragungsphase offenbar sehr wesentlich den Ähnlichkeitsverlust beeinflußt. Andererseits ist größtmögliche Ähnlichkeit manchmal gar nicht erwünscht. Man retuschiert unwichtige Einzelheiten, damit das Wesentliche stärker hervorgehoben wird. Auch beim sogenannten „soften" wird absichtlich die Ähnlichkeit vermindert. Das gleiche Ziel wird oft im Zeichenstil der Karrikaturen angestrebt. Der Ähnlichkeitsverlust ist auch ein zu strenges Maß bei Verzeichnung, denn schon wenig Verzeichnung würde genügen, um ein Bild nach diesem Kriterium als völlig unbrauchbar zu beurteilen.

3. Informationskapazität

Bei der informationstheoretischen Beurteilung der Abbildungsqualität geht man davon aus, daß es dem „Empfänger" oft nicht möglich ist zu unterscheiden, welches Objekt als Motiv des Bildes genommen wurde. Mit anderen Worten: zwar sind unendlich viele Objekte denkbar, aber die Zahl der unterscheidbaren Bilder ist endlich. Diese Zahl der unterscheidbaren Bilder gibt dann ein Maß für die „Informationskapazität" des betreffenden Abbildungsapparates. Diese Art der Qualitätsbeurteilung ist sicher sinnvoll in der elektrischen Nachrichtentechnik, wenn es sich um die Übertragung und mechanische Registrierung von unpersönlichen Morsezeichen handelt. Auch in der Luftbildphotographie, in der Röntgenphotographie und in der Astronomie mag die Informationstheorie ihre Bedeutung haben, denn dort sollen hauptsächlich „Ja-Nein"-Fragen beantwortet werden. Ob aber ein Objektiv, das eine besonders hohe Zahl unterscheidbarer Bilder liefern kann, auch besonders ansprechende Bilder liefern wird, ist fraglich. Jedenfalls folgt aus E. H. LINFOOTS Arbeiten, daß die Informationskapazität nur vom Betrag der CCT $|F|$, nicht von der Übertragungsphase abhängt. Demnach wird die Informationskapazität durch den Komaeffekt, durch beliebig große Verzeichnung und durch Scheinauflösung ($F < 0$) nicht vermindert, obwohl diese Effekte die subjektiv empfundene Bildqualität sehr wohl herabsetzen können. Der scheinbare Widerspruch beruht darauf, daß die Informationstheorie nicht beachtet, ob die Information im Bilde direkt oder „verschlüsselt" enthalten ist. Im Prinzip kann man nämlich ohne Informationsverlust wieder entschlüsesln durch zusätzliche Abbildung mit einer CCT, die die Übertragungsphase des ersten Abbildungsschrittes (Verschlüsselung) wieder kompensiert (Entschlüsselung). Natürlich kann man dem Amateurphotographen diese Entschlüsselung nicht zumuten.

Informationskapazität und Ähnlichkeitsverlust sind zwei sich widersprechende Qualitätsmaße, wenn die CCT eine Übertragungsphase besitzt (Verzeichnung, Koma). Nur bei reinem Öffnungsfehler ist Konsistenz möglich.

Auch einige subjektive Effekte sprechen gegen die Informationskapazität als Qualitätskriterium. Man weiß z. B., daß das Publikum harte Bilder bevorzugt (γ etwa 1,5), obgleich dann einige Informationen im Schleierbereich oder im Sättigungsbereich leichter verloren gehen können, als beim Normalbild ($\gamma = 1$). Der Vorzug der harten Bilder mag darin bestehen, daß einige (wichtige) Details nun stärker als normal hervorgehoben werden, während andere Details, die sowieso nur schwachen Kontrast besitzen, jetzt ganz verschwinden. Der zur Verfügung stehende Kontrastumfang wird auf das Wesentliche konzentriert. Solche Überlegungen kann die Informationstheorie nicht erfassen, weil sie die Information nur quantitativ abmißt, nicht qualitativ bewertet. So kommt das scheinbar paradoxe Ergebnis zustande, daß ein 1 cm² großes Loch im Zentrum einer Porträtaufnahme nur ein Zehntel von dem Informationsverlust bedeutet, der entsteht, wenn man 10 cm² vom Rand dieser Porträtaufnahme abschneidet (sinngemäß von TORALDO DI FRANCIA [8] übernommen). Oder BRILLOUIN [11] weist darauf hin, daß eine von EINSTEIN geschriebene Zeile die gleiche Informationsmenge enthält, wie eine Zeile eines Schwachsinnigen. Außerdem widerspricht es den Erfahrungen, die man vom Fernsehen her hat (vergleiche den Diskussionsbeitrag von Herrn Dr. GOLDMANN), daß das Signal-zu-Rausch-Verhältnis linear in die Bildqualität eingeht. Vielmehr gibt es einen Schwellwert für das Rauschen. Ist das Rauschen geringer als dieser Schwellwert, so ist seine Größe erfahrungsgemäß belanglos für den Bildeindruck, nicht

SLUB
Wir führen Wissen.

aber für die berechnete Informationskapazität. Ferner kann die Informationstheorie eine psychologische Eigenschaft nicht berücksichtigen, die man als „Überschätzung des Superlativs" bezeichnen könnte. Zur Erläuterung dieses Begriffes ein Beispiel aus einem andern Gebiet: der schlechteste Schüler einer Klasse wird oft vom Lehrer gequält, während der zweitschlechteste Schüler meistens ziemlich in Ruhe gelassen wird. Diese psychologische Eigenschaft bedeutet bei manchem Photo-Amateur: ist z. B. Koma der größte Sündenbock des Objektivs, so werden daneben andere Fehlertypen überhaupt nicht beachtet.

Die große Bedeutung der Informationstheorie für meßtechnische Probleme soll nicht bestritten werden, aber auf Fragen der subjektiven Bildqualität ist diese Theorie jedenfalls heute noch nicht anwendbar.

4. Statistische Ästhetik

Der Amateur wünscht sich meistens ästhetische Bilder. Nun ist es nicht die Aufgabe der Physik, zu ergründen, was Ästhetik eigentlich ist. Man kann aber durch statistische Publikumsbefragung erfahren, ob die im Motiv eventuell enthaltene Ästhetik im Bild noch vorhanden ist oder nicht. So wird man durch „statistische Ästhetik" herausbekommen können, welche Form die CCT haben muß, damit sie „Ästhetik-erhaltend" wirkt. Die Durchführung dieses Programms ist natürlich schwierig, weil die Anzahl der Parameter so groß ist. Der „repräsentative Publikumsquerschnitt" ist e i n Problem. Dann muß ein „repräsentatives Objekte-Sortiment" zusammengestellt werden. Außerdem sind viele physikalische, physiologische und psychologische Nebenbedingungen zu beachten. Zuletzt muß man auch ein Mittel in der Hand haben, die optische CCT planmäßig zu variieren. Dazu werden sich die Amplitudenfilter [5] eignen. Hansen [12] variierte die Objektiveigenschaften mittels der Blende. Dabei ergab sich, daß das Publikum nicht die Bilder mit großer Auflösung (größte Öffnung) vorzog, sondern die Bilder bei mittlerer Blende, also wahrscheinlich mit gutem Kontrast in den niedrigen Frequenzen. Eine Fülle weiterer Einzelheiten zu diesem Thema lieferten die Arbeiten der Eastman-Kodak-Gruppe [14].

Man kann auch ein Argument von Duffieux [1] als „statistische Ästhetik" bezeichnen. Duffieux wies darauf hin, daß die Gemälde, die dem Publikumsgeschmack entsprechen, meistens mit grobem Pinsel gemalt sind. Der Künstler hat also bei der Übertragung des Motivs auf die Leinwand die niedrigen Frequenzen kontrastreich wiedergegeben, dagegen die höheren Frequenzen unterdrückt. Natürlich garantiert die Malerei mit breitem Pinsel noch kein schönes Bild, ebenso wie ein Objektiv mit guter CCT keine schönen Bilder ergibt, wenn das Motiv nicht geeignet ist, und wenn die handwerkliche Arbeit nicht die nötige Qualität besitzt.

Zusammenfassend können wir sagen, daß die Übertragungstheorie ein geeignetes Mittel zur Beschreibung der optisch-photographischen Nachrichtenübertragung liefert. Über Qualitätskriterien für die Amateurphotographie liegt noch nicht viel Endgültiges vor. Um auf diesem Sektor weitere Fortschritte erzielen zu können, dürfen wir nicht vergessen, daß die subjektive Bildqualität kein rein physikalisches Problem ist. Es ist kaum zu erwarten, daß sich die Ästhetik in dem Maßsystem der statistischen Informationstheorie messen lassen wird. Jedoch steht schon heute fest, daß es nur auf die bildwichtigen niedrigen Frequenzen ankommt. Dieser bildwichtige Frequenzbereich wird beim 50-mm-Objektiv bis etwa 50 Linien pro mm reichen.

LITERATUR

[1] Duffieux, P. M.: L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique. Besançon 1946.

[2] Straubel, R.: 8. Internat. Kongr. Phot., Dresden 1931, S. 353. P. Zeeman-Verhandelingen, Haag 1935, S. 302.

[3] Dossier, B.: Rev. Opt. *33*, 297 (1954).

[4] Hopkins, H. H.: Proc. Roy. Soc. A *217*, 408 (1953); *231*, 91 (1955). Optica Acta *2*, 23 (1955). Proc. Phys. Soc. B *69*, 562 (1956); *70*, 499, 1002, 1162 (1957).

[5] Lohmann, A.: Internat. Konf. wiss. Phot. in Köln 1956; Verlag Dr. O. Helwich, Darmstadt u. Wien, 1958, 620.

[6] Lukosz, W.: Coll. Télévision, Paris 1957. Ersch. in Acta Electr. *2*, 299 (1957/58). Diss. Braunschweig 1958.

[7] Steel, W. H.: Rev. Opt. *32*, 4, 143, 269 (1953). Optica Acta *3*, 65 (1956).

[8] Toraldo di Francia, G.: Atti Fond. G. Ronchi VIII (1953), N. 3.

[9] Lauenstein, L.: Psychol. Forsch. *22*, 136 (1938).

[10] Fellgett, P., und E. H. Linfoot: Phil. Trans. Roy. Soc. A *247*, 369 (1955). Linfoot, E. H.: J. O. S. A. *45*, 808 (1955); *46*, 740 (1956); Optica Acta *4*, 12 (1957). Black G., und E. H. Linfoot: Proc. Roy. Soc. A *239*, 522 (1957).

[11] Brillouin, L.: Science and Information Theory, New York 1956.

[12] Hansen G.: Zeiss-Nachr. *4*, 129 (1942).

[13] Gauss, C. F.: Gehlers Physikal. Wörterbuch, Leipzig 1831, S. 437.

[14] Higgins, G. C., und L. A. Jones: J. Soc. Motion Picture Television Engrs. *58*, 277 (1952 PSA Journal B *19*, 55 (1953). Higgins, G. C., und R. N. Wolfe: J. O. S. A. *45*, 121 (1955). Higgins, G. C., R. N. Wolfe und R. L. Lamberts: J.O.S.A. *46*, 752 (1956).

[15] Lohmann, A.: Optik *14*, 510 (1957).

[16] v. Holst, E.: Studium Generale *10*, 231 (1957).

ZUR BERECHNUNG DER ÜBERTRAGUNGSFUNKTION EINES OPTISCHEN SYSTEMS

Von Dr. W. Lukosz
(Physikalisches Institut der TH Braunschweig)

Zusammenfassung

Geometrisch-optisch läßt sich die Übertragungsfunktion eines optischen Systems im Anschluß an die üblichen Strahldurchrechnungen nach den angegebenen Formeln leicht berechnen. Die geometrische Optik ist gültig, wenn die Queraberrationen groß gegenüber dem Radius des 1. dunklen Ringes im Airy-Scheibchen sind. Dann beschreibt das Gauss-Moment den Abfall der Kontrastübertragung bis $D \cong 0{,}4$ sehr gut. Daher erscheint das Gauss-Moment (bzw. eine Funktion davon) als „Qualitätszahl" zu einer näherungsweisen Beschreibung der Abbildungsleistung photographischer Systeme geeignet.

Ausgangspunkt unserer Überlegungen zur Übertragungstheorie war Lohmann's [1] Reihenentwicklung der wellenoptischen Übertragungsfunktion für kleine Frequenzen. Eine geometrisch-optische Interpretation ergab (vgl. [2]): Selbst wenn die Aperturbeugung nicht vernachlässigt werden kann, ist der Einfluß der Aberrationen auf den Kontrastabfall bei kleinen Frequenzen dem Intensitätsmoment 2. Ordnung des geometrisch-optischen Punktbildes proportional, das von C. F. Gauss [3] als „Maß der Totalundeutlichkeit" in die Optik eingeführt wurde.

Weiter folgte: Die geometrische Optik ist um so besser gültig, je kleiner die betrachtete Frequenz im Verhältnis zur Auflösungsgrenze ist. Je größer die Ausdehnung des „spot diagram" (Herzberger, Linfoot) im Vergleich zum Durchmesser des 1. dunklen Ringes im Airy-Scheibchen bei gleicher Blende ist, bei um so kleineren Frequenzen im Verhältnis zur Auflösungsgrenze fällt die CT ab. Da nur Frequenzen interessieren, die noch maßgeblich zur Bildentstehung beitragen, also mit ausreichendem Kontrast übertragen werden, ist die geometrische Optik um so besser gültig, je größer die Aberrationen sind — was auch Abbildungen 1 und 2 bestätigen. Dieses Ergebnis fanden auch H. H. Hopkins [4] und K. Miyamoto [5].

Zur Berechnung der geometrisch-optischen Übertragungsfunktion fanden wir die Formel:

$$D(R) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{N} e^{-2\pi i R \xi_l} \tag{1}$$

Dabei wird die Pupille des Systems in N kleine Elemente eingeteilt. Durch jedes Element wird vom Objektpunkt aus ein Strahl gerechnet. Unter Berücksichtigung der Intensitätstransparenz des Systems wird die relative Größe der Pupillenelemente so gewählt, daß jeder Strahl, geometrisch-optisch gedacht, gleiche Energie transportiert. ξ_l sind die Queraberrationen senkrecht zu den Gitterstrichen in der Bildebene; R ist die Frequenz. Besonders einfach ist die Berechnung der geometrisch-optischen Kontrastübertragung in axialen Bildpunkten rotationssymetrischer Systeme mit:

$$D(R) = \frac{1}{N'} \sum_{l=1}^{N'} I_0 (2\pi R \varrho_l) \tag{2}$$

Die Bessel-Funktion $I_0(2\pi R \varrho_l)$ ist die geometrisch-optische Kontrastübertragung einer Pupillenringzone. Die Pupille ist in N' Ringzonen eingeteilt, mit gleicher (mittlerer) Intensitätsdurchlässigkeit. ϱ_l ist die Queraberration des durch die l-te Zone gerechneten Meridianstrahls.

Zur Beschreibung der Übertragungsfunktion bei kleinen Frequenzen geeignet ist die Reihenentwicklung:

$$D(R) = 1 - i(2\pi R)\overline{\xi} - \frac{(2\pi R)^2}{2!}\overline{\xi^2} + \ldots$$
$$+ (-i)^n \frac{(2\pi R)^n}{n!}\overline{\xi^n}\ ;\ \text{wobei}\ \overline{\xi^n} = \frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N} \xi_l^n \tag{3}$$

und im Spezialfall axialer Bildpunkte rotationssymmetrischer Systeme:

$$D(R) = 1 - (\pi R)^2 \overline{\varrho^2} + \frac{(\pi R)^4}{(2!)^2}\overline{\varrho^4} - + \ldots$$
$$+ (-1)^n \frac{(\pi R)^n}{(n!)^2}\overline{\varrho^{2n}}\ ;\ \text{wobei}\ \overline{\varrho^{2n}} = \frac{1}{N'}\sum_{l=1}^{N'} \varrho_l^{2n} \tag{4}$$

Diese für alle Werte von Frequenz und Queraberration konvergenten Entwicklungen folgen aus Gl. (1) bzw. (2) mit der Reihe für die Exponential- bzw. Bessel-Funktion. Die Koeffizienten der

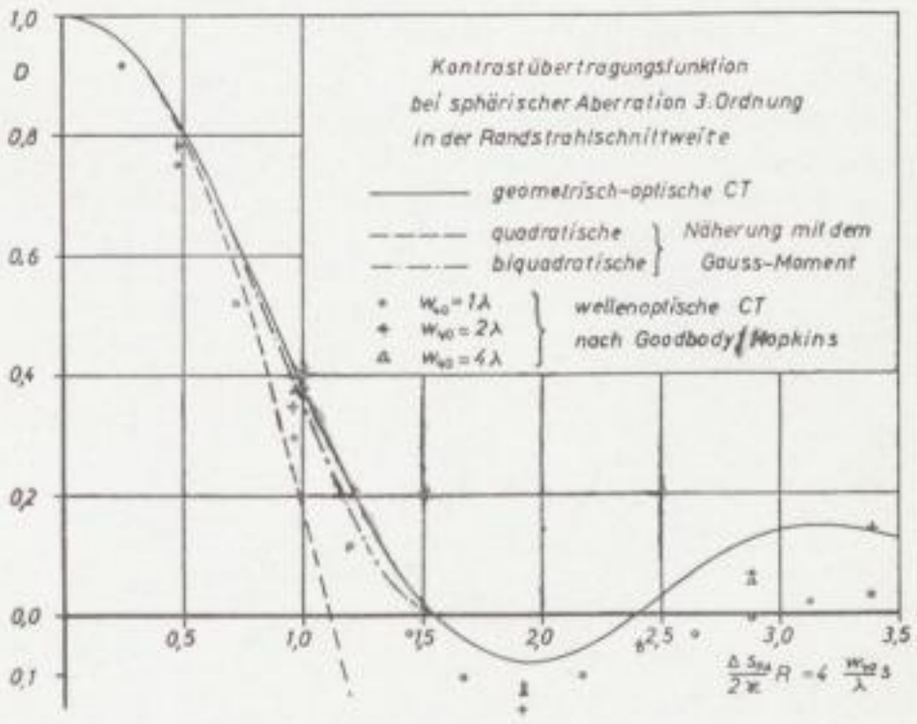


Abb. 1. R = Frequenz; Δs_{Rd} = Längsaberration des Randstrahls; $\varkappa$ = Blendenzahl; $s = 2\lambda\varkappa R$ Hopkins' reduzierte Frequenz; w_{40} die durch sphärische Aberration 3. Ordnung bedingte Wellenaberration am Pupillenrand.

Die wellenoptischen CT verdanke ich dem Entgegenkommen von Herrn Dr. H. H. Hopkins und Herrn A. M. Goodbody.

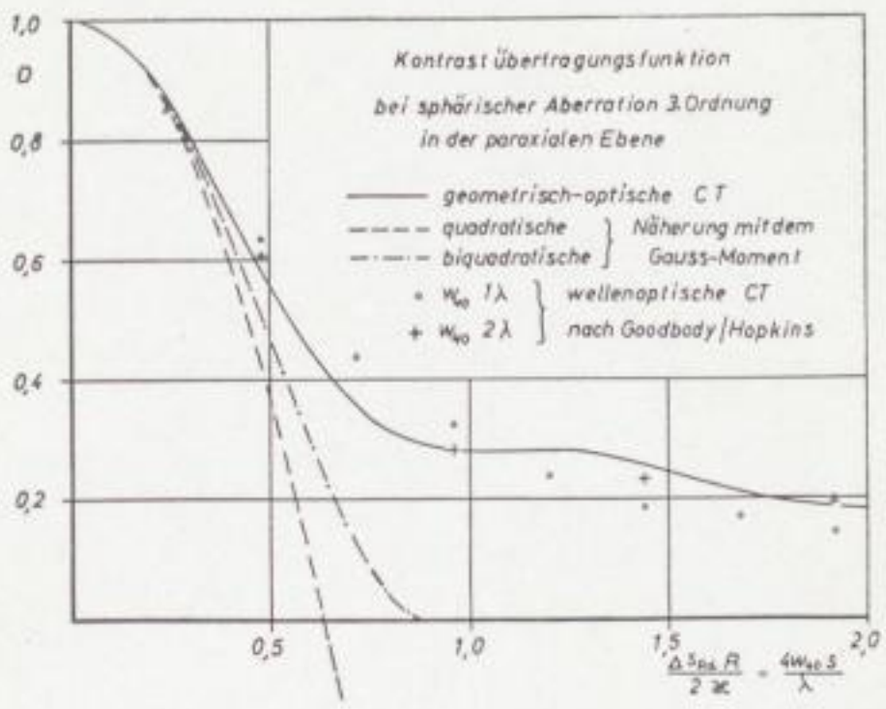


Abb. 2

Potenzreihe in R sind den Intensitätsmomenten des geometrisch-optischen Punktbildes proportional.

Einen Zusammenhang zwischen den Momenten des Punktbildes und der Abbildung beliebiger Objekte hatte schon SPENCER [6] angegeben. Betrachtet man mit SPENCER's Methode die Abbildung eines Strichgitters cosinusförmiger Intensitätsverteilung, ergibt sich eine Gl. (3) entsprechende Potenzreihe für die Übertragungsfunktion, in der als Koeffizienten die Intensitätsmomente des Punktbildes auftreten. Explizit gaben dieses Resultat erst DUFFIEUX und LANSRAUX [7] an. SPENCER's wie auch DUFFIEUX's und LANSRAUX's Methoden sind nur in der geometrischen Optik anwendbar; sie versagen, wenn die Abbildung wellenoptisch betrachtet wird, da die Punktbildmomente dann i. a. divergieren.

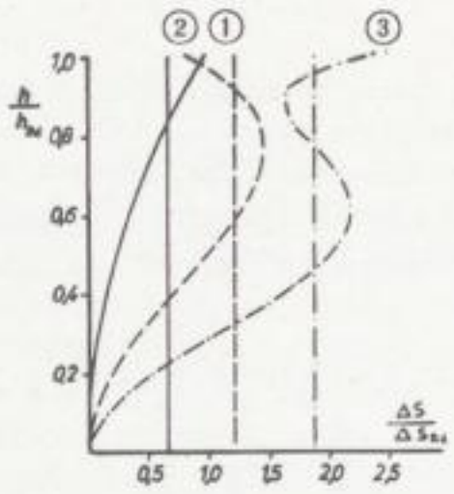


Abb. 3. Dargestellt als Funktion der Einfallhöhe h der Strahlen sind die Längsaberrationen Δs für sphärische Aberration:

① 3. Ordnung;
② 5. Ordnung, die durch sphär. Aberration 3. Ordnung . . .
③ 7. Ordnung, die durch sphär. Aberration 5. und 3. Ordnung . . .

. . . in der gleichzeitig günstigsten Einstellebene zum kleinsten Gauss-Moment kompensiert ist.

(h_{Rd} = Einfallshöhe des Randstrahls, Δs_{Rd} = Abszisseneinheit stimmt überein mit der Längsaberration des Randstrahls bei sphär. Aberration 3. Ordnung allein.)

Für die drei Aberrationskurven ist in jeweils gleicher Strichführung die Einstellebene kleinsten Gauss-Moment mit eingezeichnet. Die Größe der Aberrationen wurde so gewählt, daß zu jeder der drei Aberrationskurven in der dazugehörigen Einstellebene gleich große Gauss-Momente ($\overline{\rho^2} = \left(\frac{\Delta s_{Rd}}{12\,\varkappa}\right)^2$, $\varkappa$ = Blendenzahl) und damit gleiche Kontrasttransmissionen der kleinen Frequenzen gehören. Auch außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Näherungen mit dem Gauss-Moment fallen die geometrisch-optischen CT der drei Aberrationskurven dicht zusammen (siehe Abb. 4). Daher erzeugen die drei Aberrationskurven dieselbe photographische „Bildqualität" (wohlgemerkt nur bei voller Öffnung).

Nach unseren obigen Überlegungen zeigt die Wellenoptik:

1. Die Bedeutung des geometrisch-optischen Gauss-Moments als Maß zur Beurteilung des Korrektionszustandes eines Objektivs geht über den Gültigkeitsbereich der geometrischen Optik weit hinaus;
2. die geometrisch-optische Reihenentwicklung gibt die Übertragungsfunktion um so besser wieder, je größer die Aberrationen sind.

In den Abbildungen 1, 2 und 4 werden von uns berechnete geometrisch-optische CT mit einer in der Frequenz quadratischen:

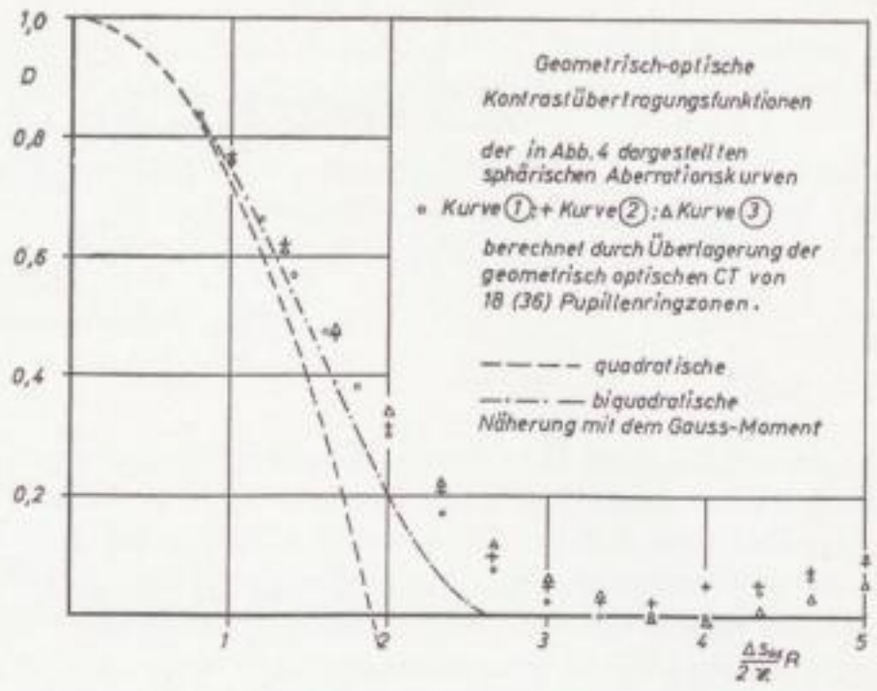


Abb. 4. Zur Berechnung der geometrisch-optischen Kontrastübertragung mit einer für viele praktische Zwecke ausreichenden Genauigkeit genügt (für die betrachteten Aberrationskurven und den dargestellten Frequenzbereich) eine Aufteilung der Pupille in 18 Ringzonen. Die Abweichungen der erhaltenen CT von einem genaueren mit der doppelten Zahl von Ringzonen berechneten Wert ist $< 0{,}015$.

$$D(R) \simeq 1 - (\pi R)^2\,\overline{\rho^2} \tag{5}$$

(hier geschrieben für axiale Bildpunkte, vgl. Gl. 4) und einer biquadratischen:

$$D(R) \simeq \left[1 - \frac{(\pi R)^2}{2}\,\overline{\rho^2}\right]^2 = 1 - (\pi R)^2\,\overline{\rho^2} + \frac{(\pi R)^4}{(2!)^2}\,(\overline{\rho^2})^2 \tag{6}$$

Näherung mit dem Gauss-Moment $\overline{\rho^2}$ verglichen.

Die Abbildungen zeigen: Sind die Queraberrationen groß gegenüber dem Radius des 1. dunklen Ringes des Airy-Scheibchens — was bei photographischen Systemen meist zutrifft — beschreibt das Gauss-Moment den Abfall der CT bis $\sim 0{,}4$ sehr gut; und zwar ist die biquadratische Näherung besser als die quadratische, da sie in der Entwicklung Gl. 4 den Term von 4. Potenz in der Frequenz zum Teil mit berücksichtigt. Da $\overline{\rho^4} \geq (\overline{\rho^2})^2$ ist, gibt die biquadratische wie auch die quadratische Näherung (in ihrem Gültigkeitsbereich) nie einen zu großen Wert für die geometrisch-optische CT.

Wegen der begrenzten „Bandbreiten" von Film, Auge, Fernseh-Übertragungssystem ist für photographische und Fernseh-Aufnahme-Objektive die Kontrastwiedergabe der kleinen Frequenzen für die Bildqualität entscheidend. Für diese Systeme scheint das aus den Ergebnissen der üblichen Strahldurchrechnungen leicht zu erhaltende Gauss-Moment eine geeignete „Qualitätszahl" zu sein, die einen guten Anhaltspunkt für die zu erwartende Bildqualität gibt.

Vorgeschlagen wurde, als „Schnellmaße" experimentell zu messen:

a) — zuerst von HANSEN [8] — die Frequenz, bei welcher die CT auf einen bestimmten Wert, z. B. = 0,5 abgefallen ist.

b) den Kontrastabfall bei einer festen charakteristischen Frequenz.

Von der rechnenden Optik lassen sich diese Maße nach Gl. 6 mit dem Gauss-Moment leicht vorausberechnen. Da der Abfall der CT bis $\sim 0{,}4$ mit dem Gauss-Moment, also nur einem Parameter, gut beschrieben wird, müssen die „Schnellmaße" a und b (sofern die Aberrationen groß sind, und dort wo die CT $\geqslant 0{,}4$ gemessen wird) dieselbe Information über die Abbildungsleistung enthalten.

LITERATUR

[1] LOHMANN, A.: Int. Konf. wiss. Photogr. Köln 1956 (Verlag Dr. O. Helwich, Darmstadt, 1958); Kolloquium: Qualität der photogr. Bildwiedergabe, Köln 1958, S. 5—10 (Verlag Dr. O. Helwich, Darmstadt, 1959).

[2] LUKOSZ, W.: Optik 14, 490 (1957); Optik 15, 635, (1958); Colloqu. Television en Couleurs, Paris 1957 (Optica Acta 5, N° hors série, 299, 1958).

[3] GAUSS, C. F.: Gehler's Phys. Wörterbuch, Leipzig 1831, S. 437.

[4] HOPKINS, H. H.: Proc. Phys. Soc. B 70, 1162 (1957).

[5] MIYAMOTO, K.: J. Opt. Soc. Amer. 48, 57 (1958).

[6] SPENCER, R. C.: Phys. Rev. 38, 618 (1931); Sympos. Astron. Optics, Manchester 1955 (Amsterdam 1956).

[7] DUFFIEUX, P. M., u. G. LANSRAUX: Rev. Opt. 24, 65 (1945).

[8] HANSEN, H.: Vortrag FNA „Phototechnik", Bad Kreuznach, Mai 1950.

OBJEKTIVPRÜFGERÄTE ZUR MESSUNG DER KOMPLEXEN KONTRASTÜBERTRAGUNGSFUNKTION IM STOCKHOLMER „INSTITUTET FÖR OPTISK FORSKNING"

Prof. Dr. Erik Ingelstam
Institut för optisk forskning, Stockholm 70

Die von Duffieux' Übertragungstheorie und aus der elektrischen Nachrichtentheorie stammenden Ideen zur Charakterisierung eines optischen Bildes haben eine Reihe mathematischer und theoretischer Untersuchungen veranlaßt. Man hat in einigen Laboratorien auch begonnen, experimentelle Anordnungen zu realisieren. Das ist aber bedeutend schwieriger, weil man in der Experimentalphysik stets technische Details, Toleranzen und systematische Fehler diskutieren muß, um die Lösungen dem Ideal zu nähern.

In diesem Institut sind wir seit 1950 mit der experimentellen Entwicklung beschäftigt, einschließlich der dazugehörigen Theorie. Lindberg und der Verfasser berichteten 1951 (Symposium in Washington) über die erste Konstruktion [1]. Lindberg baute den ersten Apparat für direkte Fourieranalyse des optischen Bildes [2]. Dabei führte er neben anderen Ideen den rotierenden Teststern ein. Damit machte er vorläufige Messungen an einigen Objektiven. In diesem Apparat wurde später von anderen Mitarbeitern Elektronik eingebaut. Dann erweiterte Djurle die Apparatur auch zur Messung der CCT-Phase [3]. Nun befindet sich unsere Testanordnung, besonders durch die Mitarbeit von Djurle und Bäck, in einem recht brauchbaren und vielseitigen Stadium (anwendbar für Brennweiten von 20 bis 1000 mm). Der Apparat wurde von Hjelmström, H. Johansson, Hendeberg u. a. für verschiedene Forschungszwecke benutzt. Unsere Aufgabe ist nicht die einer Prüfanstalt, aber wir konnten auf Grund unserer CCT-Analysen schon bei verschiedenen optischen und photographischen Problemen beratend mitarbeiten.

Die Grundprinzipien sind im wesentlichen schon in den angegebenen Arbeiten enthalten, aber die hier kurz beschriebene Konstruktion des Prüfgerätes ist neu.

Das *Hauptschema des optischen Strahlenganges* enthält die Abb. 1. Die ersten Teile W—S gehören zur Beleuchtungseinheit mit Farbfilter F; S ist das Lichtquellendiaphragma in der Brennebene des Prüflings L. Der Strahlengang durch das Objektiv L ist also *umgekehrt*, dies aus technischen Gründen und weil wir vom theoretischen Standpunkt aus keine ernstlichen Bedenken dagegen gefunden haben. An der üblichen Objektseite (Etikettseite des Objektivs) verläuft also der Strahlengang nahezu parallel. Das Bild des Lichtquellendiaphragmas entsteht mit Hilfe des Kollimators K in der Ebene des Sektorsterns St.

Der Bereich der meßbaren Raumfrequenzen hängt von den Dimensionen des Teststernes ab. Da man die Raumfrequenzen normalerweise auf die Filmebene der Kamera bezieht, müssen wir noch die Vergrößerung (Verhältnis von Kollimator- zu Objektivbrennweite) angeben (Tabelle 1). Bei kurzer Brennweite arbeitet man ohne Kollimator.

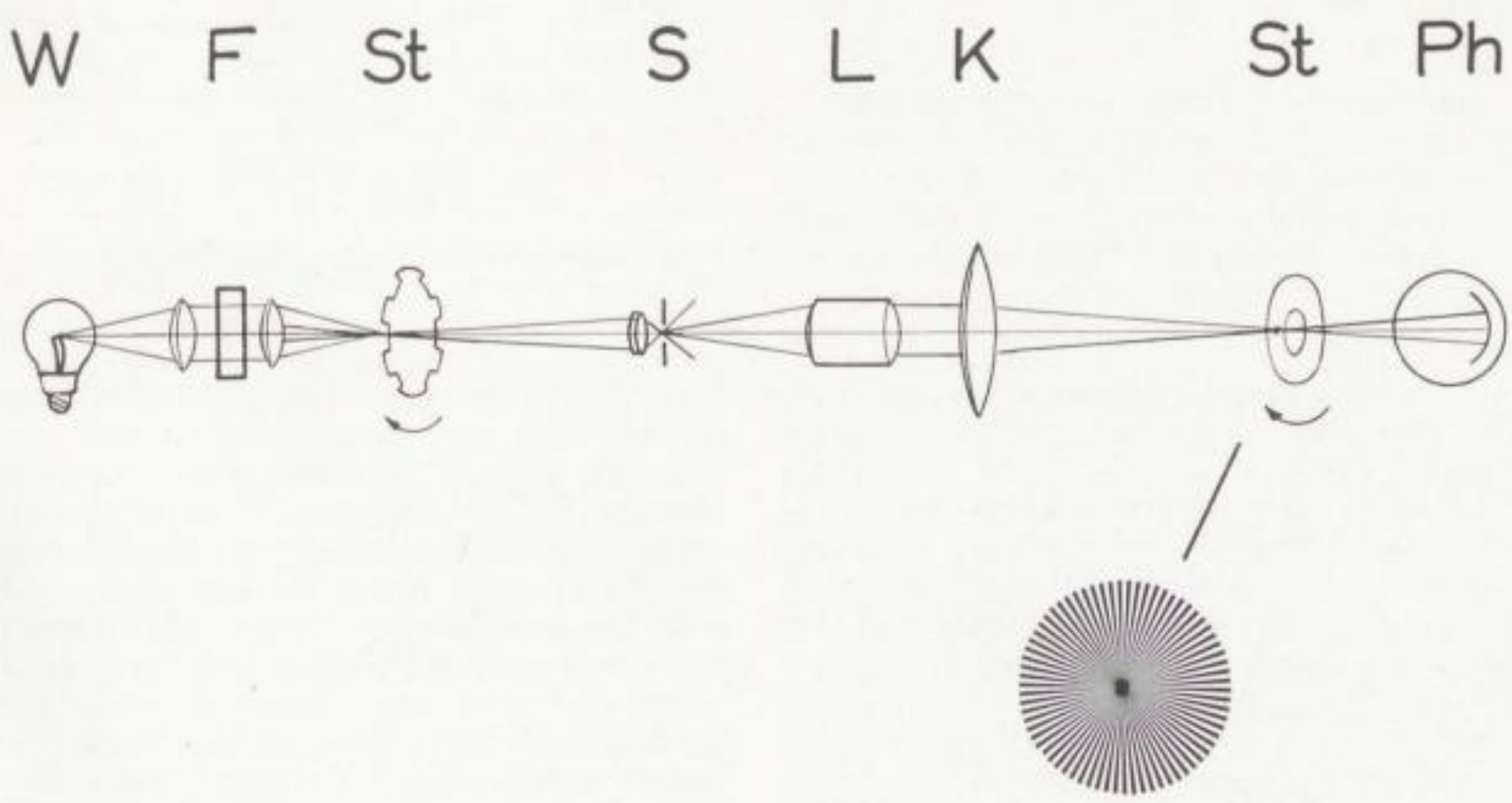


Abb. 1. Schema des Objektivprüfgerätes

Tabelle 1

Objektivbrennweiten

Kollimatorbrennweiten	25 mm	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm
600 mm	24 x (480) (18)	12 x (240) (9)	6 x (120) (4,5)	—	—
1200 mm	—	24 x (480) (18)	12 x (240) (9)	6 x (120) (4,5)	—
1600 mm	—	—	16 x (320) (12)	8 x (160) (6)	5,3 x (90) (4)

Technisch bedingte Grenzwerte von N in ( )

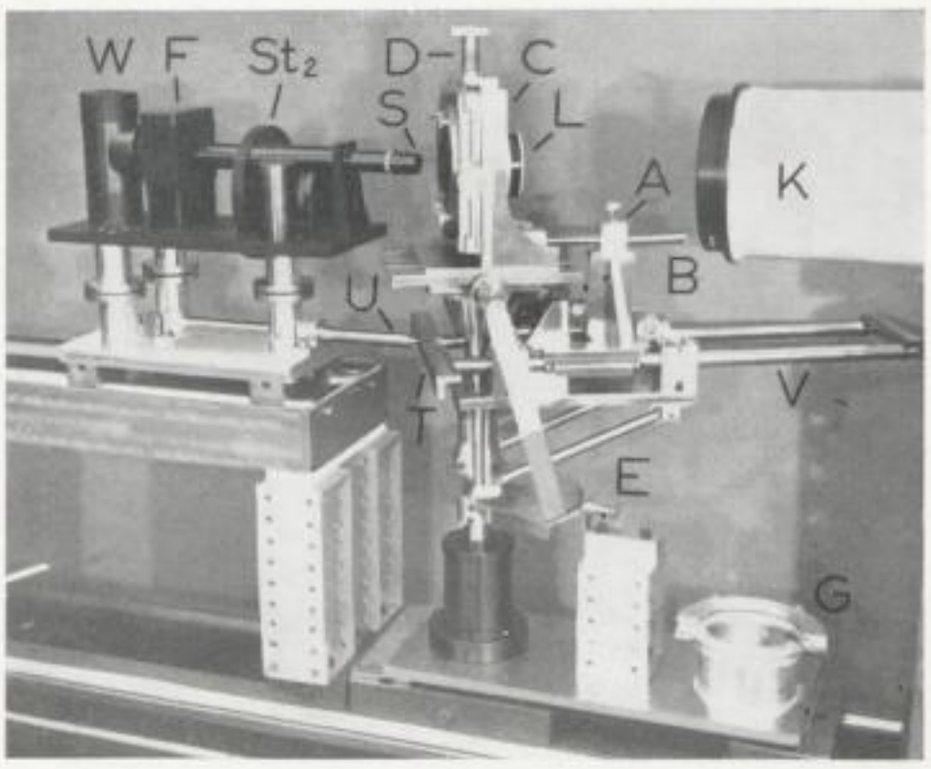


Abb. 3. Vorderer und mittlerer Teil des Prüfgeräts

W Bandlampe; F Farbfilter- (und Linsen-) Haus; St_2 Kalibrierungssektorstern; S Diaphragma, durch ein Mikroskopobjektiv beleuchtet; L zu prüfendes Objektiv; T Präzisions-T-Lineal; U Zylinder mit Halbkugel, genau unter Punkt S gelegen (T und U bewirken, daß S immer in derselben, zur Objektivachse senkrechten Ebene bleibt, wenn sich das Objektiv um seinen Hauptpunkt dreht); A Kupplung zwischen C und V zur Einstellung des Hauptpunktes in die mechanische Drehachse; B Mikrometerverschiebung der eigentlichen Objektivhalterung; C Justierbare Befestigungen des Objektivs L; D Höheneinstellung; E Festlegung der Bildwinkeleinstellung; G Distanzhalterung für langbrennweitige Objektive

Prinzip der Fourieranalyse

Wir haben gefunden, daß eine mechanische Fourierabtastung mit so vielen Vorteilen gegenüber der interferometrischen besonders für die photographischen Objekte verbunden ist (Variation des Spektralgebietes, Einfachheit im Aufbau, geringere Erschütterungsempfindlichkeit), daß wir sie unbedingt vorziehen. An den zitierten Stellen wird im Prinzip beschrieben, wie das Bild des Lichtquellendiaphragmas über den Sektorstern wandert. Abb. 2 zeigt die noch nicht publizierte Anordnung zur CCT-Phasenmessung mit einem magnetisch erzeugten Vergleichssignal als Nullphase. Das magnetisch erzeugte Vergleichssignal geht ebenfalls durch einen Selektivverstärker, so daß das Signal automatisch sinusförmig wird. Die in der Figur angedeutete Phasenmessung aus einer Lissajous-Ellipse (mit Robotkamera während der Abtastung an signalierten Stellen der Raumfrequenz aufgenommen) ist in einigen Untersuchungen verwendet worden. In Zukunft soll aber für Routinemessungen ein elektrischer Phasenschreiber eingesetzt werden. Es sei auch hier darauf hingewiesen, daß in einigen Fällen ebenfalls der Verlauf der Phase der CCT (neben der sonst stets beachteten Amplitude) praktische Bedeutung besitzt; das wurde schon in einer früheren Arbeit [3] angedeutet. Die CCT-Phase bedeutet ein unsymmetrisches Linienbild, also eine Verzeichnung. In der Photogrammetrie kann es dann passieren, daß man einen systematischen Unterschied in den Höhenlinien erhält, wenn der Kontrast des Objekts gegenüber dem Untergrund variiert wird und falls man in einem nichtlinearen Bereich der Schwärzungskurve arbeitet [3, 4]. Mit der Bildanalyse auf Fourier-Basis kann man leicht verstehen, wie das Meßergebnis ausfallen wird, wenn sich das Meßsignal über einem hellen oder über einem dunklen Untergrund befindet.

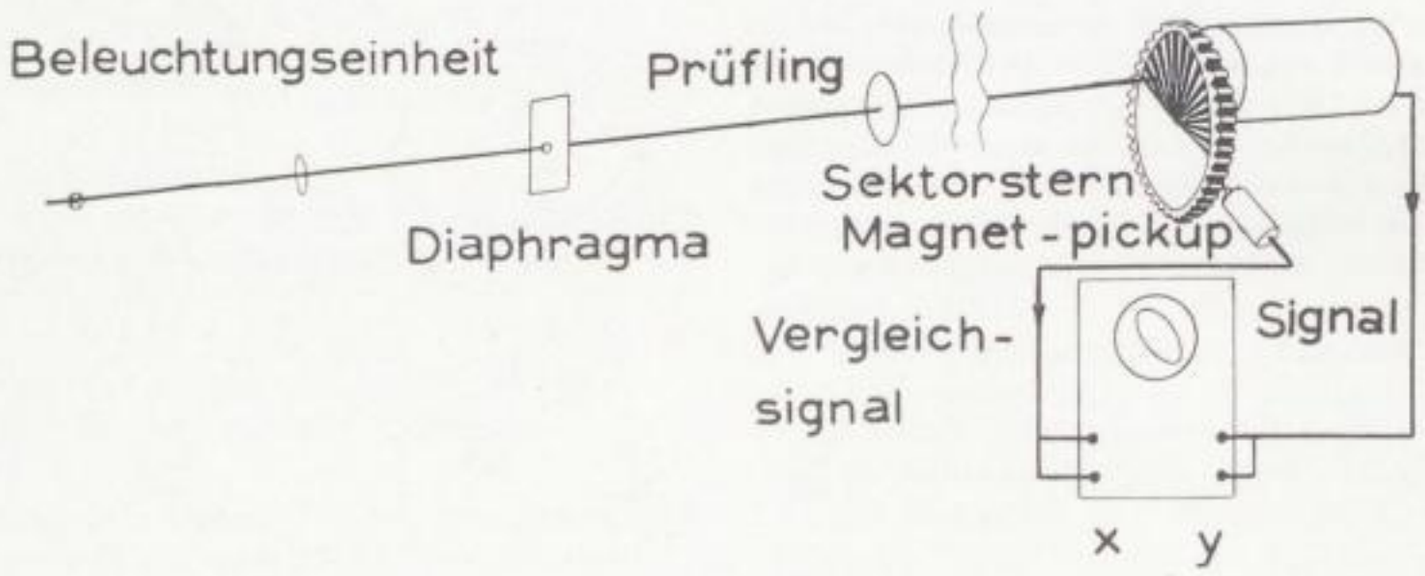


Abb. 2. Prinzip der Phasenmessung mit einem magnetischen Vergleichssignal als Nullphase

In der Arbeit Hendeberg—Ingelstam [4] findet man ein Beispiel einer CCT-Betragskurve, die mit einem elektrischen Schreiber registriert wurde. Der *Beleuchtungs- und Filterteil* enthält, wie aus Abb. 3 hervorgeht, Fächer für auswechselbare Filter (standardisierte Tageslichtfilter, gewöhnliche Farbfilter und Interferenzfilter). Es ist wegen der Spektralempfindlichkeit der Emulsion außerordentlich wichtig, daß man die Wellenlängenabhängigkeit der Objektiv-CCT-Kurve kennt. Deshalb müssen bei der Messung die Spektralemission der Wolframbandlampe, die spektrale Transparenz des Farbfilters und die spektrale Empfindlichkeit des Photomultipliers bekannt sein. Zur Untersuchung des Farbkorrektionszustandes werden drei Spektralbereiche empfohlen. Für die praktische Photographie genügt weißes Licht, das man einer panchromatischen Emulsion anpaßt. Die Farbfilter zur Erzeugung eines wohldefinierten Spektralbereiches sind außerdem nötig, wenn man die gemessenen Kurven mit der Theorie oder mit den Ergebnissen anderer Laboratorien vergleichen will.

Technische Universität Dresden Bibliothek

SLUB Wir führen Wissen.

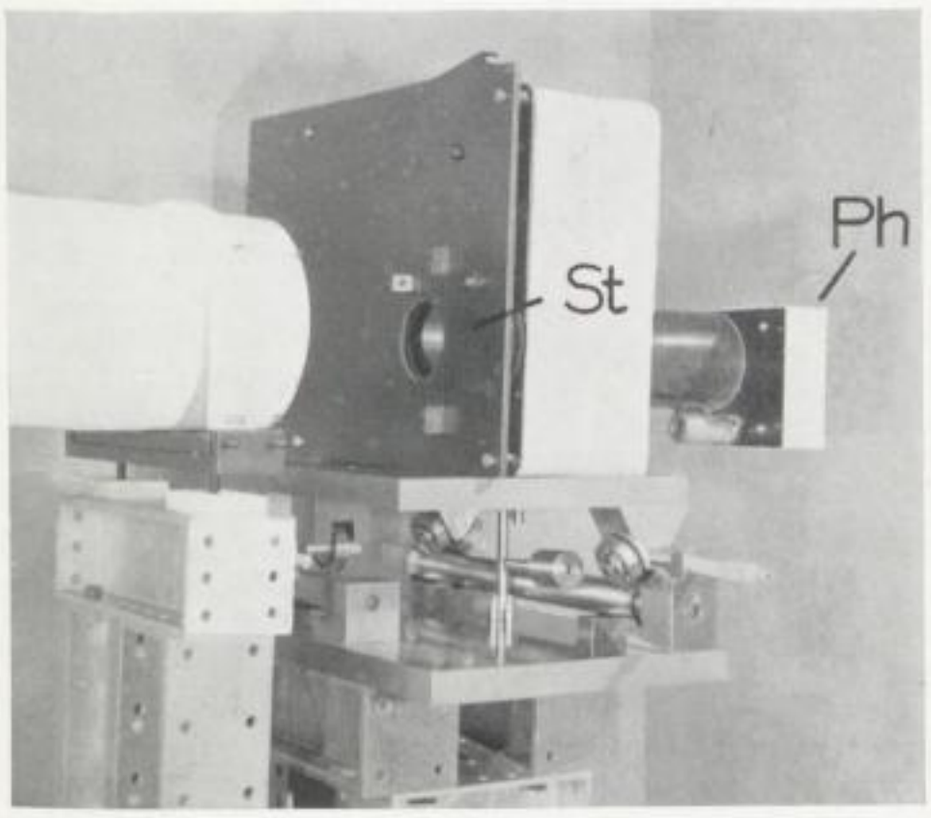


Abb. 4. Empfänger von der Kollimatorseite
St Eintrittsloch zum Sektorstern; Ph Photomultiplikatorhaus, das um 180° umklappbar ist, so daß ein Mikroskop zur Betrachtung und Einstellung des Punktbildes an die Stelle des Multiplikators kommen kann

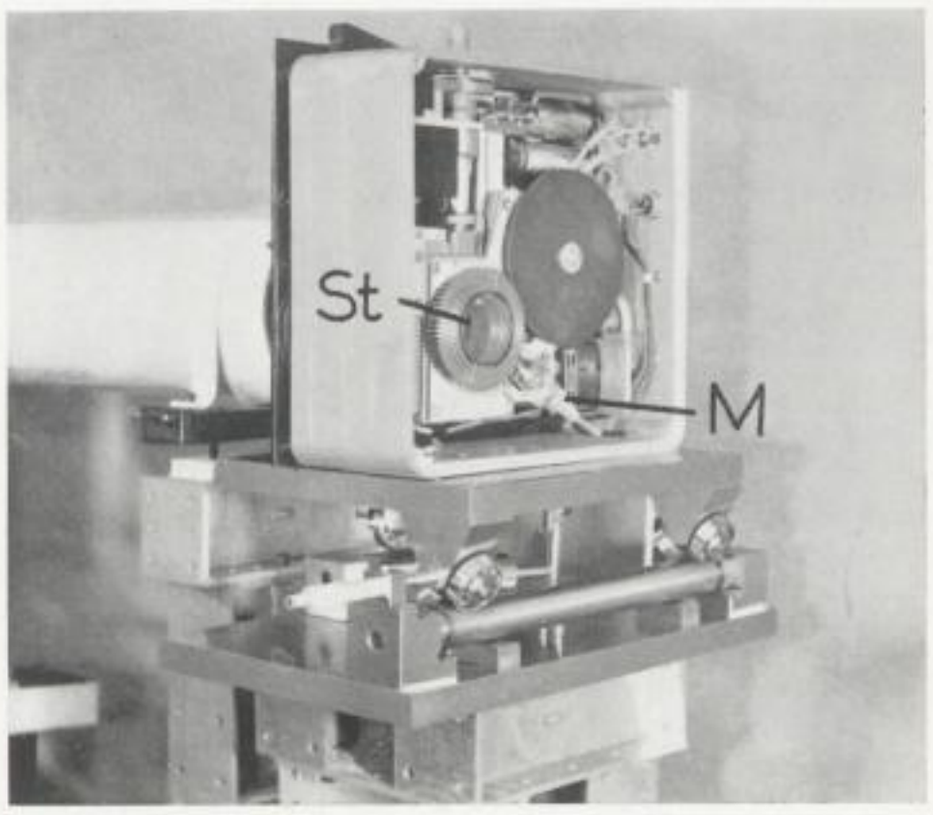


Abb. 5. Empfänger von der Rückseite
St Sektorstern, von Motoren in Höhen- und Seitenrichtung getrieben; M Magnetischer pick-up

Objektivhalterung. Man kann mit unserem Apparat die CCT für verschiedene Tiefeneinstellungen und für verschiedene Bildwinkel messen. Dafür wurde die in derselben Abb. 3 dargestellte Objektivhalterung konstruiert. Wenn sich das Objektiv dreht, so bleibt Punkt S in einer Ebene senkrecht zur optischen Achse. Das wird durch ein Präzisions-T-Lineal T und durch Justiermöglichkeiten der Objektivhalterung im Verhältnis zu dem Hauptpunkt des Objektivs erreicht. Außerdem kann man das Objektiv in Richtung der Objektivachse mikrometrisch meßbar verschieben. Man erhält in dieser Weise eine Schar von CCT-Kurven aller Einstellebenen und Bildwinkel, so daß man die Bildfeldwölbung, die differentielle Verzeichnung oder auch optimale Einstellebenen, z. B. für eine feste Raumfrequenz, untersuchen kann.

Der Empfänger und seine Kalibrierung (siehe Abb. 4 und 5 betreffs der Ausführung des jetzigen Empfängers mit auswechselbarem Mikroskop und Photomultiplier). Die Wechselstromamplitude am Ausgang der Selektivverstärkung und also auch die CT wird zunächst in einem relativen Maßstab gemessen. Um daraus absolute Werte für die CT zu machen, muß man an den durch Konvention für die Raumfrequenz $N = o$ festgelegten Wert $F(o) = 1$ an den Wert $F(o) = 1$ anschließen, was ja bedeutet, daß für den Grenzfall „unendlich breite Strukturen" der CCT-Wert gleich 1 ist. $F(o) = 1$ folgt notwendig aus der Tatsache, daß das Objektiv die Objektintensität I_o = const identisch abbildet. Der endliche Radius unseres Teststernes bewirkt aber, daß eine minimale Raumfrequenz nicht unterschritten werden kann (vgl. Tabelle 1). Deshalb wird in einem Extraexperiment der rotierende Teststern S seitlich herausgeschoben. Statt dessen moduliert nun ein zweiter rotierender Stern St_2, der nur für die Kalibrierung da ist (vgl. Abb. 1 und 3) den Lichtstrom. Die Tourenzahl und die Abmessungen von St_2 sind so dimensioniert, daß jetzt die CT des Mikroobjektivs (NA = 0,4; Vergrößerung = 13) für die Raumfrequenz $N = 0{,}251\ mm^{-1}$ (wieder bezogen auf die Ebene des Lichtquellendiaphragmas) angezeigt wird, und zwar im gleichen relativen Maßstab wie beim Hauptversuch. Bedenkt man, daß der Frequenzbereich dieses sicher gut korrigierten Mikroobjektivs, das nur für die Abbildung des Achsenpunktes benutzt wird, theoretisch weit über 1000 Linien pro Millimeter geht, so können wir zum Zwecke der Kalibrierung sicher $F(0{,}256) = 1$ setzen. Der Fehler ist kleiner als 1‰. Bei dieser Art der Kalibrierung wird die Tatsache, daß ein Rechteckgitter die Grundperiode mit der relativen Amplitude $\frac{4}{\pi}$ (und nicht 1) enthält, automatisch berücksichtigt, weil der Selektivverstärker sowohl bei der eigentlichen Messung als auch bei der Kalibrierung nur die zeitliche Grundfrequenz (also auch nur die räumliche Grundfrequenz) durchläßt.

Der Empfänger selbst sowie auch die Beleuchtungseinheit sind zwar normalerweise auf einer schweren optischen Bank mit der Objektivhalterung usw. montiert, die Hauptteile, d. h. die Beleuchtungseinheit und der Empfänger, sind jedoch auch an anderen Aufstellungen montierbar, was z. B. von Hendeberg [4] ausgenutzt wurde.

Der Empfänger wird jetzt ebenfalls in einer neuen Anordnung mit einem Moirégitter als Testobjekt [5] eingesetzt werden können. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse dieser Methode direkt mit denen der Sektorsternmethode zu vergleichen, was für das Studium der systematischen und technischen Fehlerquellen beider Methoden sehr nützlich ist.

Schlußbemerkungen. Obwohl während dieser Jahre intensiv an Prüfgeräten für die CCT gearbeitet wurde, so glauben wir doch, daß in Zukunft noch einige Weiterentwicklungen sinnvoll sind. Beim Sektorstern wird der Raumfrequenzbereich nach unten durch den endlichen Radius begrenzt (siehe Tabelle 1). Die obere Raumfrequenz entsteht durch technische Unvollkommenheiten im Zentrum des Sternes und durch die Konvergenz der Stern-Speichen (Abweichung von der theoretisch geforderten Parallelität der Streifen). Den möglichen Einfluß der Konvergenz haben H. Johansson und andere in diesem Institut untersucht. Die sich daraus (für eine ziemlich aberrationsfreie Optik) ergebende obere Grenze des Raumfrequenzbereichs (Maximalfehler der CCT 5%) wird in der Tabelle angegeben. Anderseits hat der rotierende Teststern einige Vorteile gegenüber den nur eindimensional variablen Testobjekten, besonders wenn das Punktbild unsymmetrisch ist. Gegebenenfalls muß man noch für die endliche Ausdehnung des rechteckigen Lichtquellendiaphragmas (einige Mikron in beiden Richtungen) und andere triviale experimentelle Gegebenheiten eine kleine Korrektur anbringen. Das sekundäre Spektrum der Kollimatorlinsen (Triplets) ist so gut, daß man es nicht berücksichtigen muß beim Wechsel des Spektralbereichs.

Nur durch systematische Entwicklung verschiedener CCT-Apparaturen wird man ihre Vor- und Nachteile kritisch bewerten können. Dann dürfte sich bald zeigen, daß diese relativ einfachen Testmethoden bei den verschiedensten Problemen (theoretische Optik, Linsenberechnung, Fertigung, Wahl des Objektivs in Kombinationen, z. B. beim Fernsehen und in der Photographie) die

nötige Klarheit in den physikalischen Begriffen schaffen und das so oft mißverstandene und irreführende Auflösungsvermögen ersetzen werden.

Weitere Verbesserungen und Ergebnisse sind beschrieben in:

E. INGELSTAM, Bericht der Jena-Tagung „Optik aller Wellenlängen", Nov. 1958, Akademischer Verlag, Berlin.

A. BÄCK, Bericht zu der Fünften Konferenz der Internationalen Kommission für Optik in Stockholm, August 1959; liegt als Vordruck vor und wird in Optica Acta erscheinen.

Literatur

[1] INGELSTAM, E., und P. J. LINDBERG: Optical Image Evaluation. Natl. Bureau of Standards Circular No. 526, 1954.

[2] LINDBERG, P. J., Optica Acta *1*, 80 (1954).

[3] INGELSTAM, E., E. DJURLE und B. SJÖGREN: J. Opt. Soc. Amer. *46*, 707 (1956).

[4] HENDEBERG, L., und E. INGELSTAM, Phot. Korrespondenz, 3. Sonderheft (1959).

[5] LOHMANN, A.: Optik *14*, 510 (1957).

MESSUNG DES OPTISCHEN KONTRASTÜBERTRAGUNGSFAKTORS

Von Dr. K. ROSENHAUER, Braunschweig
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

Verabredungsgemäß sollten die nachfolgenden Ausführungen nur als Diskussionsgrundlage dienen und es wurde deshalb zunächst das bereits früher beschriebene Verfahren[1]) zur Messung der Kontrastübertragungsfunktion photographischer Objektive erörtert. Bei diesem Verfahren wird ein auf einer rotierenden Trommel befindliches Test durch das zu prüfende Objektiv in dessen Bildebene abgebildet. Das Test besteht aus Liniengruppen mit verschiedenen Gitterabständen und wird inkohärent durchleuchtet. Das in der Bildebene entstehende Luftbild wird durch ein geeignetes Mikroobjektiv vergrößert auf einen Spalt abgebildet, hinter dem sich ein Sekundärelektronenvervielfacher befindet. Bei der Rotation des Testes bewegt sich das Bild an dem Abtastspalt vorbei. Der Sekundärelektronenvervielfacher setzt die Lichtschwankungen in Stromschwankungen um, die nach Verstärkung in einem Breitbandverstärker bei geeigneter Synchronisation zwischen Trommel und Zeitablenkung des Oszillographen auf dem Schirm ein stehendes Bild ergeben. Die Schwärzungsverteilung des Testes ist rechteckförmig. Die Testtrommel befindet sich etwa 5 m vor dem zu prüfenden Objektiv. Auch seitliche Bildpunkte können durch Verschiebung der Trommel wie auch des Mikroobjektivs untersucht werden. Unmittelbar vor der Trommel befindet sich ein Strahlenteilerwürfel, der mit einem guten Photoobjektiv bei 1:1 Abbildung auf einem zweiten Sekundärelektronenvervielfacher eine Kontrolle des Testes und der elektrischen Anordnung ermöglicht und der mit einer geeigneten elektrischen Anordnung auch Phasenmessungen erlaubt.

Es wurden die mit dieser Anordnung erhaltenen Meßergebnisse für verschiedene Photoobjektive gezeigt und die Vor- und Nachteile des Verfahrens erörtert.

Als Vorteil kann die Schnelligkeit der Messung angesehen werden und die Möglichkeit, die gesamte Kontrastübertragungsfunktion auf einmal zu überblicken und so die Einstellung für den günstigsten Bildpunkt durch Fokussierung leicht zu finden. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß auch die Möglichkeit besteht, die Kontrastübertragungsfunktion für Bildpunkte außerhalb der Achse zu untersuchen, wobei die Bildebene relativ sicher eingehalten wird, und daß das photographische Objektiv in gleicher Anordnung geprüft wird, wie es normalerweise auch benutzt wird. Als weiterer Vorteil des Verfahrens kann noch die Möglichkeit angesehen werden, die Einstelldifferenzen bei verschiedenen Blenden, die sphärische Aberration und bei Verwendung von monochromatischen Lichtquellen oder von Interferenzfiltern auch die chromatischen Aberrationen zu ermitteln. Des weiteren können Astigmatismus und Bildfeldwölbung ermittelt werden. So wurde für ein Photoobjektiv die Abhängigkeit der Bildfeldwölbungen von Raumfrequenzen und Blende gezeigt (Abb. 1). Auch Dezentrierfehler kann man entweder durch Drehen des Objektives in der Fassung oder durch Messung an verschiedenen Punkten des Bildfeldes sichtbar machen.

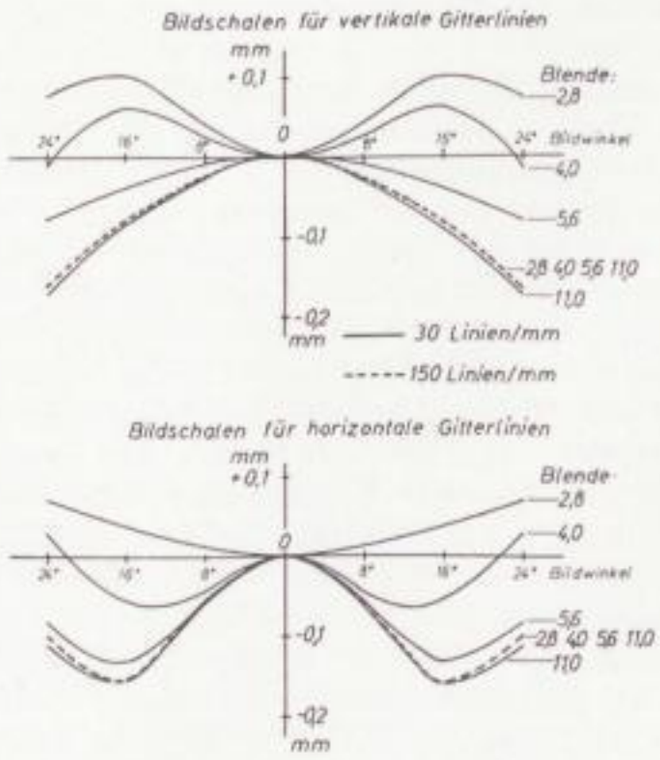


Abb. 1. Bildfeldwölbung eines Kleinbildobjektivs 1 : 2,8/50 für zwei Raumfrequenzen bei verschiedenen Öffnungsverhältnissen und weißem Licht.

[1]) ROSENHAUER, K., und K.-J. ROSENBRUCH, Optica Acta 4, (1957) 21—30.

Nachteile der Anordnung sind: Das Test mit rechteckförmiger Schwärzungsverteilung, obgleich es leicht möglich ist, rechnerisch auf eine sinusförmige Schwärzungsverteilung, die frei von zusätzlichen Oberwellen ist und die theoretisch zweckmäßiger ist, umzurechnen; im gegenwärtigen Augenblick muß als Nachteil auch noch angesehen werden, daß die Phase der Raumfrequenzen bisher noch nicht mitbestimmt wurde; auch die Verwendung des Mikroobjektives könnte zu Fehlern Veranlassung geben, obgleich nach allgemeiner Erfahrung die Korrektion guter Mikroobjektive weitaus besser als die der zu untersuchenden Photoobjektive ist. Versuche der unmittelbaren Abtastung des Luftbildes durch einen sehr feinen Spalt zeigten im Gebiete der niedrigen Raumfrequenzen keinen Einfluß des Mikroobjektives.

Unter Beachtung des Rechtecktestes wird die Genauigkeit der Messung des Kontrastübertragungsfaktors auf etwa ± 5% geschätzt.

Es wurde nochmals auf die Vorteile, die die Messung der Kontrastübertragungsfunktion (KÜF) zur Beurteilung der Qualität der Objektive bietet, hingewiesen. Die KÜF stellt eine vollständige Beschreibung der Bildqualität in einem Punkt des Bildraumes dar und sie ist theoretisch aus den geometrisch-optischen Aberrationen berechenbar. Sie erlaubt eine Beschreibung der Qualität des Objektivs allein, ohne durch die chemische Entwicklung oder Änderung der Eigenschaften der photographischen Emulsion oder des Auges beeinflußt zu sein. Ein weiterer sehr wesentlicher Vorteil besteht in ihrer Kombinierbarkeit. So ist es möglich, bei Kenntnis der KÜF des Objektivs, der KÜF der Emulsion und gegebenenfalls der KÜF eines Projektionsobjektivs die gesamte KÜF des Systems durch einfache Multiplikation zu errechnen.

Da das Auge eine Kontrastempfindlichkeitskurve zeigt, die eng mit dem Auflösungsvermögen verknüpft ist, so kann man z. B. für den Fall, daß der Beobachter in etwa der halben Projektionsentfernung sitzt, diese Funktion des Auges, die den Zusammenhang zwischen Auflösungsvermögen und Kontrast darstellt, mit der Gesamt-Kontrastübertragungsfunktion des optischen Systems für die Diaprojektion eines Kleinbildes vergleichen (Abb. 2). Die Kontrastempfindlichkeitsfunktion des Auges wurde für sinusförmige Helligkeitsverteilung bestimmt und mit den bekannten Messungen, z. B. von Arnulf, verglichen (s. Vortrag von K.-J. Rosenbruch). Wie Abb. 2 zeigt, spielen für die Bildwiedergabe nur relativ niedrige Raumfrequenzen bis etwa 40 Linien/mm eine wesentliche Rolle. Durch experimentelle Untersuchungen an einem Projektor, der allerdings zwecks Sicherstellung inkohärenter Beleuchtung eine Milchglasscheibe enthielt, wurden die errechneten Werte im Rahmen der Meßfehler bestätigt.

Da für die vollständige Kenntnis eines photographischen Objektivs eine recht große Anzahl von KÜF erforderlich ist, so ist es schwer, sich eine Übersicht zu verschaffen. Es wurde deshalb das Auflösungsvermögen bei einem Kontrast von 0,4 für eine größere Anzahl von Objektiven graphisch dargestellt[2]). Da sich aber gezeigt hat, daß im wesentlichen die niedrigen Raumfrequenzen maßgebend sind, ist es vielleicht nach dem Vorschlag von Lohmann

[2]) Rosenhauer, K., und K.-J. Rosenbruch, Z. f. Instrkde. 65 (1957) 83—90.

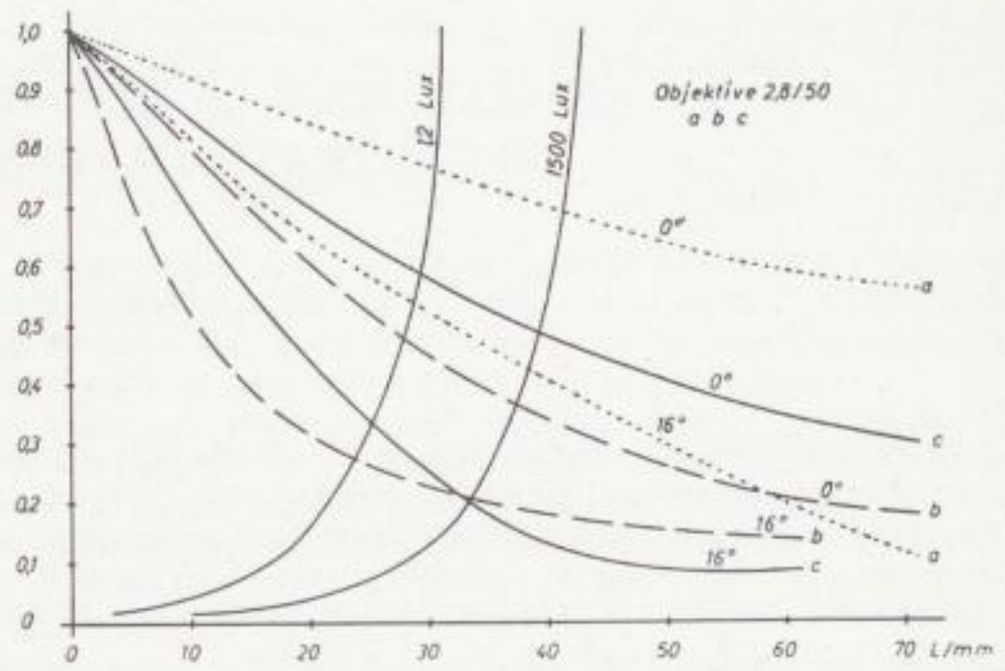


Abb. 2. Kontrastübertragungsfunktion von drei Kleinbildobjektiven 2,8/50 in der opt. Achse und unter 16° Bildwinkel bei Diaprojektion mit den gleichen Objektiven und Kontrastempfindlichkeit eines auf 1,2 bzw. 1500 Lux adaptierten Auges. Der Beobachter befindet sich in halber Projektionsentfernung und als Material ist eine Feinkornemulsion von 17/10° DIN zugrunde gelegt.

zweckmäßig, zur Kennzeichnung der Objektivqualität in einem vorgegebenen Punkt des Bildraumes den Kontrast bei 30 Linien/mm zu bestimmen.

Schließlich wurde noch auf die Notwendigkeit physiologisch-optischer Untersuchungen hingewiesen. Am Schnittpunkt der KÜF des optischen Systems und der Kontrastempfindlichkeitskurven des Auges ist die maximal überhaupt sichtbare Auflösung erreicht. An dieser Stelle ist aber nur noch Sichtbarkeit oder Nicht-Sichtbarkeit vorhanden, d. h. Graustufen werden dort nicht mehr wiedergegeben. Hätte man also z. B. ein Objekt, das sich nur aus Einzelheiten von der Größe dieses Auflösungsvermögens zusammensetzt, so würde das Bild keine Graustufen mehr enthalten. Die Einzelheiten würden sichtbar oder nicht sichtbar sein. Andererseits würde bei der Notwendigkeit der Abbildung verschieden großer Flächen mit sehr vielen verschiedenen Graustufen nur noch ein sehr geringes Auflösungsvermögen erzielt werden. Es bleibt also für die physiologisch-optischen Untersuchungen die Frage, welche Anzahl von Graustufen für die praktische Photographie erforderlich sind, um ein ästhetisch befriedigendes Bild zu erhalten.

In der anschließenden Diskussion wurden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren (Hopkins, Ingelstam, Maréchal) zur Messung der KÜF erörtert und einander gegenübergestellt. Dabei wurde insbesondere auch auf die Schwierigkeiten der Photometrie kleinster Strukturen hingewiesen. Allgemein wurde es für nützlich und dringend erforderlich gehalten, baldmöglichst mit den z. Z. meßbereiten Apparaturen Vergleichsmessungen anzustellen, um weitere Erfahrungen zu sammeln.

LITERATUR

Bis zum Erscheinen des vorliegenden Berichtes ist über das gleiche Thema von den verschiedensten Verfassern eine ganze Anzahl von Veröffentlichungen theoretischer und meßtechnischer Arbeiten erschienen. Insbesondere wird hingewiesen auf:

Rosenhauer, K., u. K.-J. Rosenbruch: Zs. f. Instrkde. *67* (1959), H. 7.

Rosenbruch, K.-J.: Optik *16* (1959), 135.

Rosenhauer, K.: Vortrag am 26. August 1959 anläßlich der 5th Conference of the International Commission for Optics in Stockholm (Collection of preprints, Professor E. Ingelstam, Stockholm 70).

APPAREIL POUR LA MESURE DU FACTEUR DE TRANSFERT DE CONTRASTE DES OBJECTIFS PHOTOGRAPHIQUES

Par Prof. Dr. Maréchal
Institut d'Optique, Paris

Le premier dispositif, réalisé dans le but de mesurer le contraste d'images de mires sinusoïdales, semble avoir été celui de O. H. Schade, des laboratoires RCA: l'objet était un film dont la transparence était une fonction sinusoïdale, et qui était animé d'un mouvement de translation uniforme; l'image était analysée par une fente fixe placée devant un photorécepteur.

L'appareil réalisé à l'Institut d'Optique, représenté sur la fig. 1, est analogue à celui de Schade (fréquence du courant photoélectrique constante, fréquence spatiale variable) mais il en diffère par les points suivants.

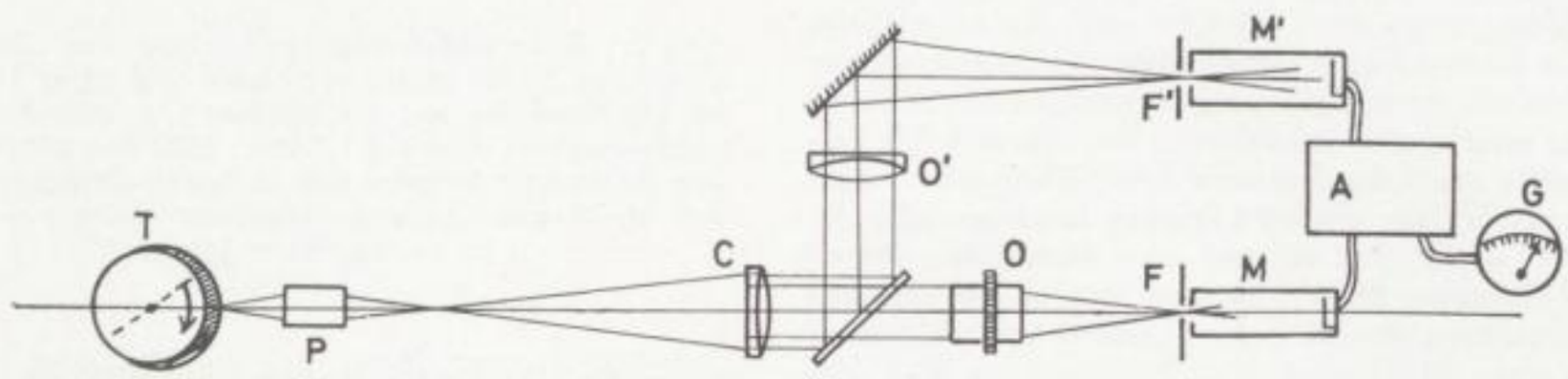


Fig. 1

T	tambour portant la mire	F et F'	fentes aux foyers de O et O'
P	système pancratique	M et M'	multiplicateurs d'électrons
C	collimateur	A	amplificateur différentiel sélectif
O	objectif essayé	G	galvanomètre
O'	objectif de comparaison		

Mire objet

Il est délicat de réaliser, sur un film photographique, une densité suivant une loi donnée. Une gravure sur verre est moins fragile et supporte mieux la chaleur. C'est pourquoi nous avons choisi un cylindre de verre, portant des traits opaques parallèles et équidistants, entraîné à vitesse constante par un moteur électrique synchrone dans un mouvement de rotation autour de son axe.

N'étant pas sinusoïdale, la mire comprend des harmoniques impairs de la fréquence fondamentale; ceux-ci sont éliminés aisément par filtrage électrique, au moyen d'un amplificateur sélectif placé entre le photomultiplicateur et le galvanomètre récepteur; il suffit donc que la mire soit périodique et qu'elle présente une amplitude suffisante de la composante à la fréquence fondamentale; à ce point de vue la mire de Foucault permet de gagner le facteur $4/\pi$ par rapport à la mire sinusoïdale.

Variation de la fréquence spatiale

La fréquence «temporelle» doit être fixe si l'amplificateur est accordé sur une fréquence déterminée. La fréquence spatiale doit pouvoir varier dans de larges limites.

La solution que nous avons adoptée consiste à interposer, entre la mire et le collimateur, un système optique à grandissement variable mais qui ne fasse pas varier la position de l'image (système pancratique).

On peut, par exemple, laisser fixe une lentille divergente à égale distance de l'objet et de l'image, alors que les deux lentilles convergentes identiques qui l'encadrent se déplacent en restant solidaires l'une de l'autre.

Pour des puissances et des intervalles convenables, on arrive à des déplacements très faibles du plan image, si le rapport des grandissements extrêmes n'est pas poussé trop loin.

Le système pancratique qui a été utilisé permet de faire varier le grandissement de $1/\sqrt{7}$ à $\sqrt{7}$. Il faut, en fait, prendre garde que

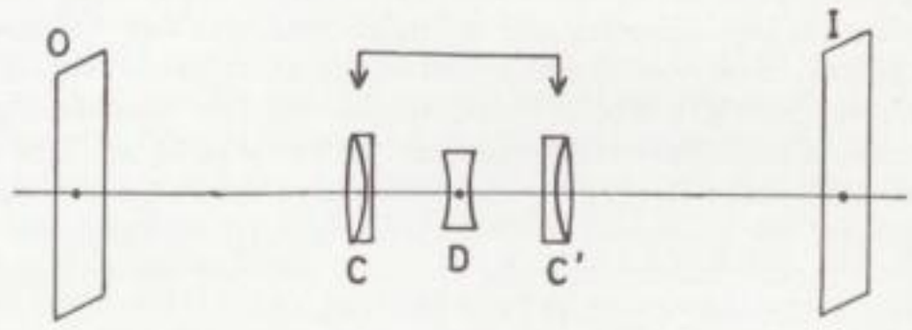


Fig. 2

O	plan objet	I plan image
D	divergente équidistante des plans O et I	
C et C'	convergentes identiques, mobiles solidairement l'une de l'autre	

les fortes puissances des trois groupes de lentilles risquent de faire apparaître des aberrations pour certaines valeurs du grandissement. Ces aberrations doivent en tous cas être négligeables devant celles de l'objectif essayé; ceci est possible parce que le système pancratique travaille à une faible ouverture: on trouve ainsi qu'à f/10, l'aberration ne dépassera pas $\lambda/8$. On trouve aussi que les aberrations sont plus faibles pour les fréquences spatiales élevées: pour une ouverture donnée de l'objectif à étudier, si la mire objet porte en effet 4 traits par mm, on voit qu'à 100 lignes/mm dans le plan focal de l'objectif essayé, l'ouverture à laquelle travaille le pancratique est 25 fois plus faible que celle de cet objectif.

Eclairage de la mire objet

On projette sur la mire l'image d'un ruban de tungstène 2 x 20 mm d'une lampe (dite pour pyromètre) 10 volts 15 ampères. Un transformateur abaisse la tension de secteur à 40 volts environ, et un groupe de redresseur secs montés en pont est suivi d'une cellule de filtrage «passe bas» en π à fortes capacités, précaution qui n'est pas absolument nécessaire étant donné l'inertie calorifique du filament.

D'autre part, cet éclairage est pratiquement incohérent: l'ouverture angulaire du pancratique est en effet très faible devant celle du condenseur, et conforément aux résultats de la théorie de la cohérence partielle l'éclairage peut être dans ces conditions considéré comme incohérent.

Méthode de mesure, élimination des fluctuations de la source

S'il est aisé de stabiliser l'alimentation du photomultiplicateur, il n'en est pas de même pour les 15 ampères de la source d'éclairage. Aussi-est-il indiqué d'utiliser une méthode de zéro qui dispense d'avoir recours à la stabilisation, et permet en même temps de connaître la phase.

A cet effet, le faisceau lumineux est partagé en deux par une lame semi-réfléchissante. Le faisceau lumineux de comparaison traverse un deuxième objectif, un Clairaut 1 : 6,3 f = 360 mm, d'excellente qualité, dont le facteur de transmission, connu, théoriquement, est pris comme base de comparaison. Au foyer de ce Clairaut, une fente, de largeur fixe, mais que l'on déplace dans le plan focal, précède un deuxième photomultiplicateur.

Les deux courants électriques recueillis sont envoyés dans un amplificateur différentiel, et opposés pour obtenir l'annulation du signal sortant: les amplitudes se règlent par potentiomètres, la phase par déplacement micrométrique de la fente située derrière le Clairaut de référence. Ainsi cette méthode de zéro doit permettre la connaissance précise du facteur complexe de transfert de contraste.

L'appareil est actuellement en cours de réalisation et quelques résultats préliminaires partiels ont déjà été obtenus.

Note ajoutée au moment de rédaction

Pour pouvoir être considérée comme strictement périodique, la mire devrait comporter un nombre infini de traits. En fait, l'objet est le produit d'une mire infinie, par une «fonction rectangle» égale à l'unité entre les abcisses $\pm$ a/2, et nulle ailleurs.

Dans ces conditions son spectre de fréquences spatiales est obtenu par convolution du spectre de la mire infinie (qui se compose de signaux discrets, pour les fréquences 0, 1/p, 2/p, etc. . . .) et de la transformée de Fourier de la «fonction rectangle», c'est-à-dire une fonction de la forme $\frac{\sin(\pi a \mu)}{\pi a \mu}$ il y a, bien entendu, intérêt à ce que les traits soient aussi nombreux que possible, mais cette transformée de Fourier ne décroît toujours que comme $1/\mu$. On aura donc avantage à placer sur l'objet un masque dont la loi de transparence décroît aussi vite que possible: le problème est le même que celui de l'apodisation; on pourra par exemple choisir la transformée d'une courbe de Gauss qui est elle-même une courbe de Gauss, et dont la décroissance est très rapide. Il y a donc intérêt, pour réduire l'erreur due au fait que le nombre de traits n'est pas infini, à éviter les discontinuités en plaçant devant la mire un filtre dont la transparence a la forme d'une courbe du genre de celle de Gauss.

Discussion:

Herr Prof. Lau erwähnte, daß man die bei der Objektivprüfung vorkommenden, oft sehr hohen Schwärzungen günstig mit der Plastikmethode ausmessen kann. (Interferometrische Vermessung der Dickenunterschiede, die auch die Silberverteilung in der Emulsionsschicht verursachen.) Über diese Methode wurde von Herrn Hodam auf der Tagung der Gesellschaft für angewandte Optik in Wien 1958 berichtet.

Herr Dr. Sauer wies darauf hin, daß bei der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, seit einiger Zeit neben der Kontrastübertragungsfunktion für Sinus-Schwingungen (Ausfilterung der Grundschwingung im Fourierspektrum bei Abtastung mit einem Radialgitter) auch noch die Summe der Oberschwingungen (Klirr-Faktor) bestimmt wird, um einmal zu sehen, ob sich hierdurch in Verbindung mit einem der hier diskutierten Schnellmaße (Größe der Gitterkonstante für einen bestimmten Kontrast oder Kontrastzahl für eine bestimmte Größe der Gitterkonstante) eine charakteristische Größe ergibt.

C: MESSUNG DER PHOTOGRAPHISCHEN ÜBERTRAGUNGSFUNKTION UND DER KÖRNIGKEIT

DIE ÜBERTRAGUNG DURCH DEN PHOTOGRAPHISCHEN PROZESS

Von Prof. Dr. H. Frieser
(Wiss. Photogr. Laboratorium der Agfa AG, Leverkusen)

1. Einleitung

Die Anwendung der Übertragungstheorie auf die photographische Abbildung hat gegenüber der Anwendung in der Optik einige Besonderheiten. Einerseits ist eine Vereinfachung dadurch vorhanden, daß, von Fällen besonders schräger Inzidenz abgesehen, die Verwaschungsfunktion symmetrisch ist, man also die Verwaschung durch eine eindimensionale Funktion charakterisieren kann und keine Phasenänderungen bei einem aufbelichteten Raster auftreten. Andererseits sind die Verhältnisse durch die im allgemeinen nicht lineare Übertragung durch den photographischen Prozeß wesentlich komplizierter.

Da die Anwendung der Übertragungstheorie lineare Übertragung voraussetzt, ist es zweckmäßig, die Untersuchungen nicht an den durch den photographischen Prozeß entstehenden Schwärzungen durchzuführen, sondern an den diese Schwärzungen erzeugenden „wirksamen" Belichtungen. Diese entstehen aus den der Schicht von außen „aufgedrückten" Belichtungen durch Lichtstreuung in der Schicht, also vorwiegend durch den Diffusionslichthof. Diese Umwandlung der „aufgedrückten" Belichtung in die „wirksame" soll als Verwaschung bezeichnet werden. Sie ist nur an kleinen Details zu beobachten. Bei großen Details ist die aufgedrückte gleich der wirksamen Belichtung.

Als weitere Besonderheit der photographischen Abbildung sind die durch die Kornstruktur der Schicht bedingten statistischen Schwankungen der Bildschwärzung anzusehen. Diese werden in Abschnitt 3 behandelt.

2. Verwaschung

Die Verwaschung kann durch folgende Funktionen beschrieben werden, die ineinander übergeführt werden können. Zur Beschreibung ist also nur eine dieser Funktionen notwendig, und zwar wird man die für den vorliegenden Fall zweckmäßigste wählen:

a) Verwaschungsfunktion $\psi(x)$

$\psi(x)$ gibt die wirksame Belichtung im Abstand x von einem aufbelichteten, sehr schmalen Spalt wieder. Sie ist so normiert, daß $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x)\,dx = 1$ ist. Die Verwaschungsfunktion des Diffusionslichthofes kann durch folgende Näherung beschrieben werden [4—7]

$$\psi(x) = \frac{\varrho \ln 10}{k_1} 10^{-2|x|/k_1} + \frac{(1-\varrho)\ln 10}{k_2} 10^{-2|x|/k_2} \qquad (1)$$

k_1, k_2 und ϱ sind der photographischen Schicht eigentümliche Konstanten, die auch nicht von Art und Dauer der Entwicklung abhängen, wenn man von Entwicklern absieht, welche einen starken Nachbareffekt erzeugen. k_1 beträgt bei allen untersuchten Schichten etwa 10 μ.

Für viele praktische Zwecke genügt die folgende Näherungsgleichung (einfacher Ansatz):

$$\psi(x) = \frac{\ln 10}{k} 10^{-2|x|/k} \qquad (2)$$

Die Ermittlung von k erfolgt zweckmäßig mit einem Spalt von 15 μ Breite.

In Abbildung 1 ist der Verlauf von $\psi(x)$ für einfachen und erweiterten Ansatz dargestellt. Abbildung 2 zeigt den Verlauf verschiedener Verwaschungsfunktionen (normiert für $\psi(0) = 1$) für $k_1 = 10\,\mu$, $k_2 = 50\,\mu$ und $\varrho = 0$; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0. Die Kurven für $\varrho = 0$ und $\varrho = 1$ entsprechen dem einfachen Ansatz (2) für k = 50 bzw. k = 10.

Der k-Wert ist bei modernen Dünnschichtfilmen etwa 20 μ. Bei dickschichtigen Filmen kann er Werte von 40—50 μ annehmen.

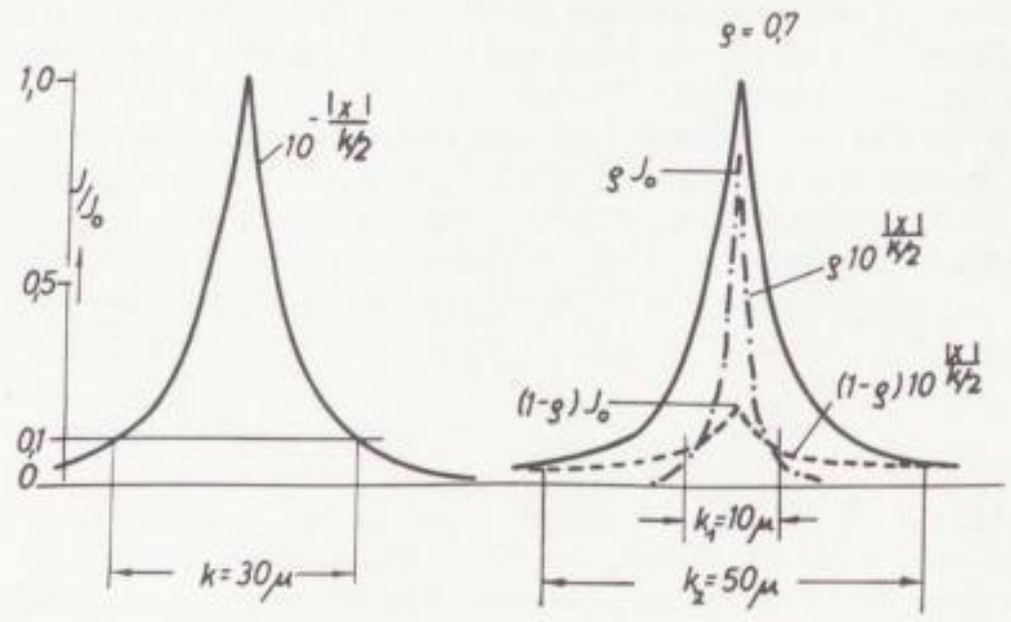


Abb. 1. Darstellung der wirksamen Intensität bei einem aufbelichteten Spalt durch eine bzw. zwei Exponentialfunktionen [einfacher Gl. (2) und erweiterter Gl. (1) Ansatz].

b) Kontrastübertragungsfunktion (α)

Die Kontrastübertragungsfunktion gibt an, wie die Amplitude bzw. die Aussteuerung verschiedener Raumfrequenzen eines aufbelichteten Sinusrasters durch die Verwaschung verkleinert wird. Die Aussteuerung p wird definiert als Quotient von Amplitude (A) zum Mittelwert (M).

$$p = \frac{A}{M} \tag{3}$$

Ist die Verteilung der aufgerückten Intensität

$$\hat{I} = \hat{I}_0 \, (1 + \hat{p} \sin 2\pi \, \nu \, x), \tag{4}$$

ν = Raumfrequenz
x = Längenkoordinate

so gilt für die wirksame Intensität

$$I = \hat{I}_0 \, (1 + \hat{p} \, \alpha \, (\nu) \sin 2\pi \, \nu \, x) \tag{5}$$

Der Kontrastübertragungsfaktor wird durch Fouriertransformation der Verwaschungsfunktion erhalten:

$$\alpha \, (\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi \, (x) \cos 2 \, \pi \, \nu \, x \, dx \tag{6}$$

und es gilt:

$$\psi \, (x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha \, (\nu) \cos 2 \, \pi \, \nu \, x \, d\nu \; . \tag{7}$$

Unter Benutzung des einfachen Ansatzes erhält man

$$\alpha \, (\nu) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi \, k \, \nu}{\ln 10}\right)^2} = \frac{0{,}54}{0{,}54 + (k\nu)^2} \; . \tag{8}$$

Mit dem erweiterten Ansatz (2) ergibt sich:

$$\alpha \, (\nu) = \rho \, \alpha_1 \, (\nu) + (1 - \rho) \, \alpha_2 \, (\nu) \; . \tag{9}$$

Verschiedene photographische Kontrastübertragungsfaktoren sind in Abbildung 2 dargestellt (im mittleren Teil). Weiter enthält Abbildung 3 einige Beispiele von Kontrastübertragungsfunktionen für Umkehrfilm (⑤ k ∼ 20 μ), Negativfilm (① k ∼ 25 μ), Kopie, Optik und die Zusammenwirkung von Kopie und Optik.

Die Bedeutung der Kontrastübertagungsfunktion liegt vor allem darin, daß, lineare Übertragung vorausgesetzt, die Kontrastübertragungsfunktion eines zusammengesetzten Prozesses sich aus denen der Einzelprozesse multiplikativ zusammensetzt.

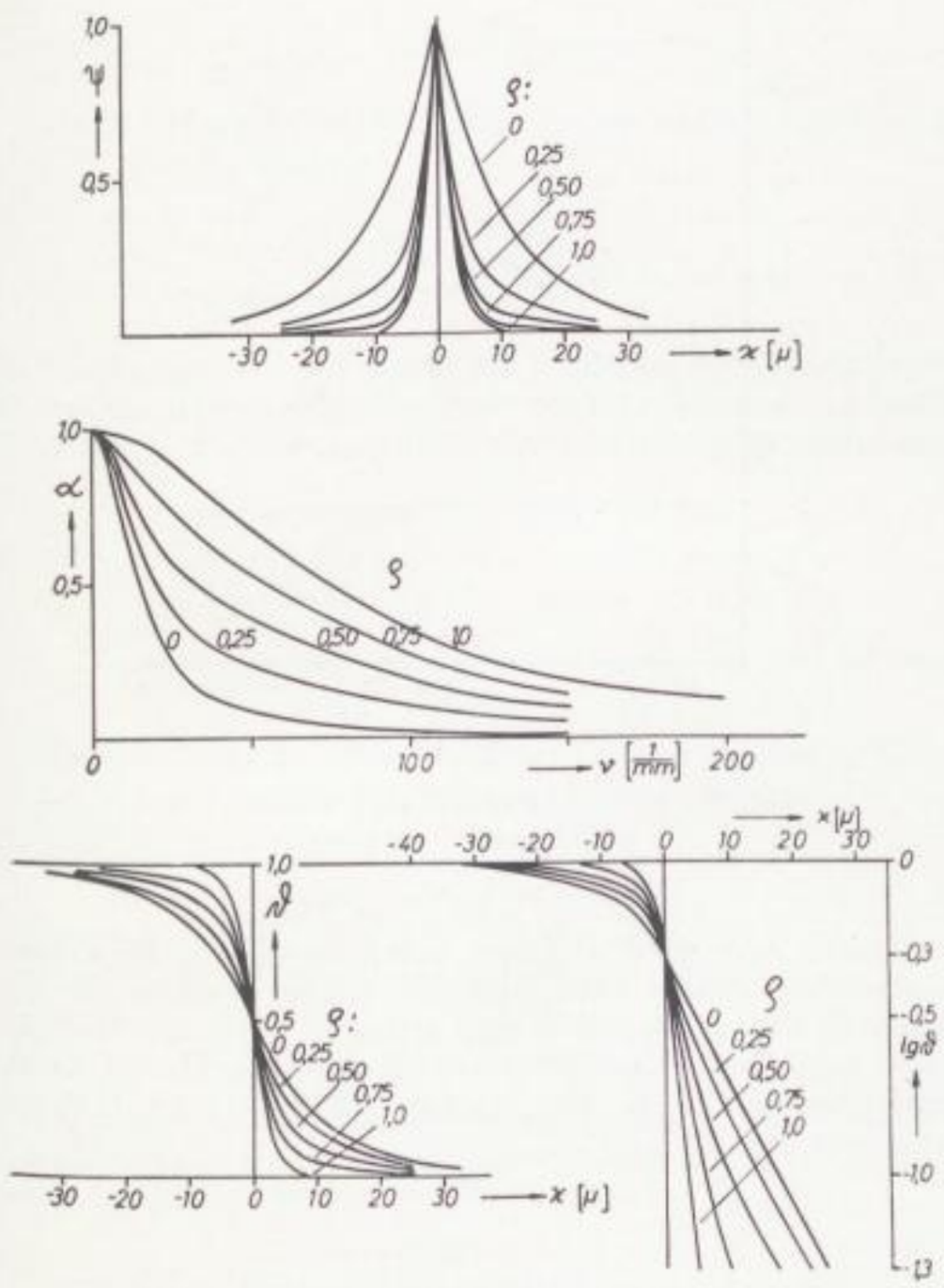


Abb. 2. Verwaschungsfunktion, Kontrastübertragungsfunktion und Kantenfunktion für $k_1 = 10\ \mu$, $k_2 = 50\ \mu$ und $\varrho = 0; 0{,}25; 0{,}50; 0{,}75; 1{,}0$. Die Kurven für $\varrho = 0$ und $\varrho = 1{,}0$ entsprechen dem einfachen Ansatz für k = 50 bzw. k = 10 μ.

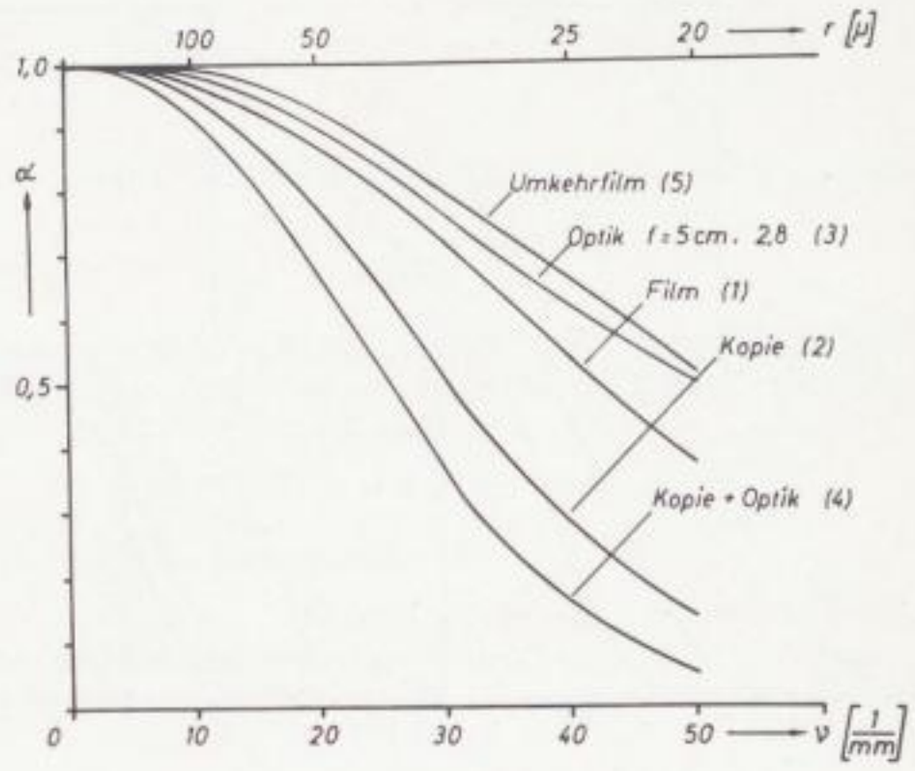


Abb. 3. Beispiel für praktisch gemessene Kontrastübertragungsfunktion.

c) Kantenfunktion (ϑ (x))

Die Kantenfunktion gibt den Verlauf der relativen wirksamen Intensität an einer aufbelichteten Schwarzweißkante wieder.
Es gilt:

$$\vartheta \, (X) = \int_{-\infty}^{X} \psi \, (d) \, dx \quad . \tag{10}$$

Wertet man diese Gleichung mit Gl. (2) bzw. (1) aus, so erhält man:
Einfacher Ansatz (2):

$$\vartheta \, (X) = \frac{1}{2} \, 10^{-2 \, |x|/k} \qquad x \geqslant 0$$
$$= 1 - \frac{1}{2} \, 10^{-2 \, |x|/k} \qquad x \leqslant 0 \tag{11}$$

Erweiterter Ansatz (1):

$$\vartheta \, (X) = \varrho \, \vartheta_1 (X) + (1 - \varrho) \, \vartheta_2 (X). \tag{12}$$

Der Verlauf von $\vartheta \, (X)$ ist für verschiedene Werte von k im unteren Teil der Abbildung 1 (unten) dargestellt. Für photographische Anwendungen ist der Verlauf von log $\vartheta \, (X)$ besonders interessant, der ebenfalls gezeichnet ist. Man sieht, daß beim einfachen Ansatz log $\vartheta \, (X)$ außerhalb des von außen exponierten Teils geradlinig verläuft.

Abbildung 2 ermöglicht einen guten Vergleich des Verlaufes der drei Funktionen unter verschiedenen Bedingungen.

d) Wirksame Belichtung bei beliebiger Verteilung der aufgedrückten Belichtung

Ist die Verwaschungsfunktion bekannt, so kann man aus einer aufgedrückten Intensität I(x) die wirksame Intensität erhalten

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(y)\, \hat{I}(x+y)\, dy \qquad (13)$$

Man kann auch die Fouriertransformierte bilden (im folgenden durch $\sim$ gekennzeichnet) und erhält nach dem Faltungssatz, da (13) ein Faltungsintegral darstellt

$$\tilde{I}(\nu) = \alpha(\nu)\, \tilde{\hat{I}}(\nu) \qquad (14)$$

Durch Rücktransformation von $I(\nu)$ erhält man $I(x)$.

f) Nachbareffekt

Die Schwärzungsverteilung kann aus der Verteilung der wirksamen Belichtung mittels der Schwärzungskurve ermittelt werden. Dies ist möglich, da bei normaler Entwicklung (siehe folgender Abschnitt) in kleinen Details dieselbe Schwärzungskurve gilt wie sie z. B. an den Stufen eines Stufenkeils ermittelt wird. Die Schwärzungsverteilung an einer Kante, wie sie durch verschiedene Schwärzungskurven erhalten wird, zeigt Abbildung 4. Im oberen Teil der Abbildung ist der Verlauf der wirksamen Belichtung bzw. ihr Logarithmus wiedergegeben. Der untere Teil zeigt links drei Schwärzungskurven und rechts die mit diesen erhaltenen Schwärzungsverteilungen an der Kante.

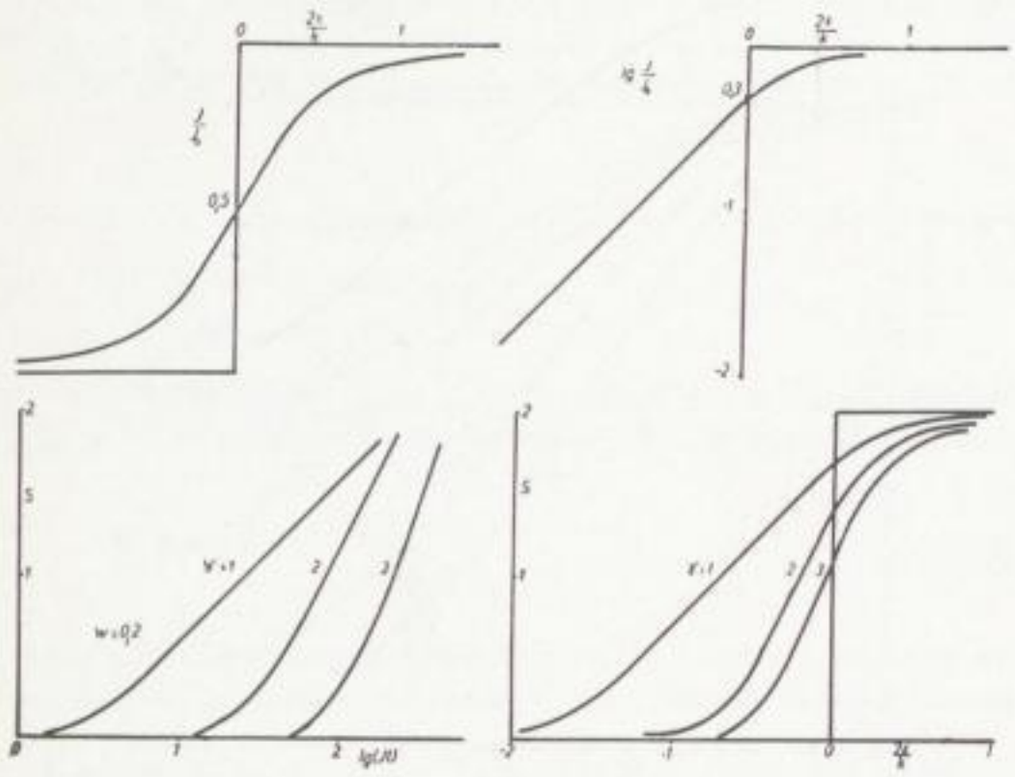


Abb. 4. Verlauf der aufgedrückten und wirksamen Belichtung und der Schwärzung an einer Kante. Die Schwärzungsverteilung wird mit der links weiter gezeichneten Schwärzungskurve erhalten.

Der untere Teil dieser Kurve wird durch die Form der Schwärzungskurve bestimmt, da in diesem Gebiet der Logarithmus der wirksamen Belichtung linear verläuft. Liegt der obere Teil der Kurve im geradlinigen Gebiet der Schwärzungskurve, so ist die Schwärzung bei $x = 0$ gleich der um $0{,}3 \cdot \gamma$ verminderten Maximalschwärzung.

e) Schwärzungsverteilung

Die Ermittlung der Schwärzungsverteilung mittels der „Makro"-Schwärzungskurve ist nicht möglich, wenn bei der Entwicklung ein Nachbareffekt auftritt. Vor allem wird dieser bei stark verdünnten Entwicklern beobachtet, der bei den stark belichteten Stellen stark erschöpft wird. Der aus benachbarten schwächer belichteten Stellen zudiffundierte Entwickler erhöht die Schwärzung am Rand der stark belichteten Stelle. Wegen des Wegdiffundierens wird die Schwächung an dem Rand der schwach belichteten Stelle

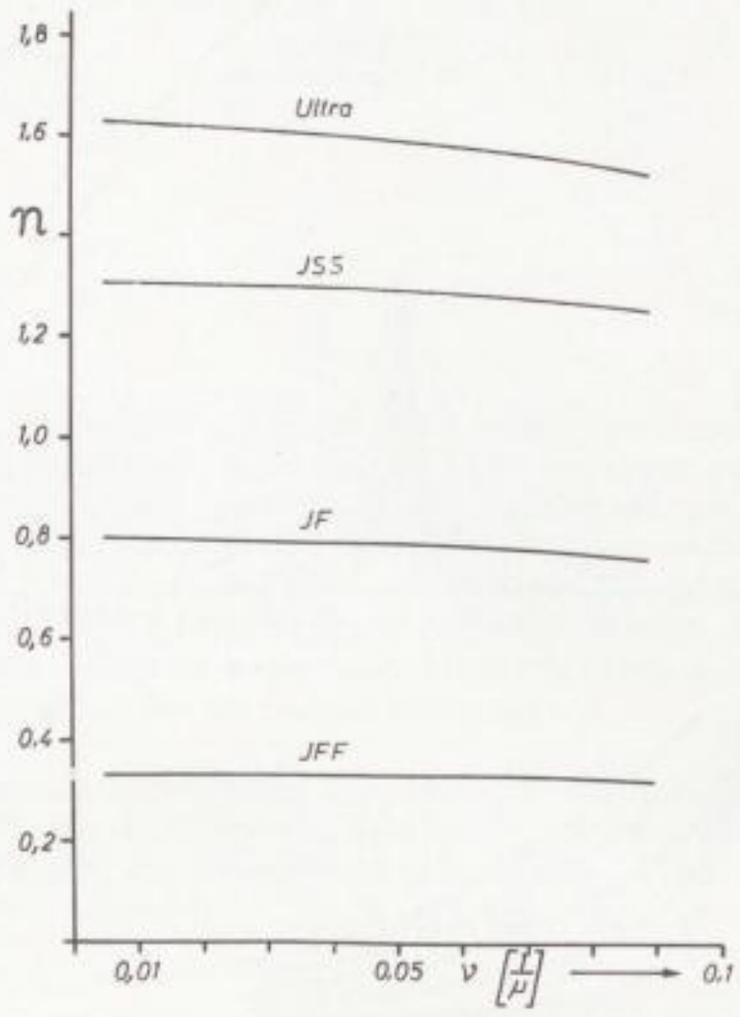


Abb. 5. Schwankungsspektren von vier verschiedenen Filmproben.

verringert. Auch durch Diffusion von Br-Ionen von Entwickleroxydationsprodukten kann Ähnliches bewirkt werden. Die Erscheinung wird durch Abbildung 5 erläutert. Durch den Nachbareffekt kann die Kontrastübertragungsfunktion bei kleinen Raumfrequenzen größer als eins werden, wie INGELSTAM [12] gezeigt hat.

g) Kopie

Solange man den Verlauf der Exposition-Transparenz-Kurve in dem interessierenden Bereich durch eine Gerade annähern kann, ist die Kontrastübertragungsfunktion des Gesamtprozesses gleich dem Produkt der Kontrastübertragungsfunktion der Einzelprozesse.

$$\alpha_{12}(\nu) = \alpha_1(\nu)\, \alpha_2(\nu). \qquad (15)$$

Diese Gleichung gilt somit streng bei einem Positiv-Positiv-Prozeß, wo beide Einzelprozesse mit $\gamma = -1$ arbeiten. Auch bei kleinem Kontrast ist die Bedingung der Linearität im allgemeinen genügend erfüllt. Bei starker Abweichung von der Linearität treten Anomalien auf [13].

3. Körnigkeit

Um die körnige Struktur einer photographischen Schicht zu untersuchen, kann man sie in einem Mikrophotometer mit einer kleinen Meßfläche F abtasten und die Abweichung t(x) der Transparenz T(x) von dem Mittelwert $\overline{T}$ feststellen.
Es ist

$$T(x) = \overline{T} + t(x), \tag{16}$$

wobei x die Ortskoordinate bedeutet.

Die Schwankung ist abhängig von der Größe der Meßfläche, und zwar gilt für die Schwankung bei einer Meßfläche mit der Fläche F

$$t_F(x) = \int_{\infty} t(x+y)\, u(y)\, dy, \tag{17}$$

wobei u(y) die Durchlässigkeit der Meßfläche und y die Ortskoordinate auf der Meßfläche ist.

Ist u(y) nur im Bereich der Meßfläche von Null verschieden und dort gleich eins, so gilt

$$t_F(x) = \frac{1}{F} \int_F t(x+y)\, dy. \tag{18}$$

Um zu einer Charakterisierung der Kornstruktur zu gelangen, kann man die im folgenden angegebenen Funktionen verwenden, die ineinander umrechenbar sind.

a) Streuung

Durch Bildung des quadratischen Mittelwertes der Schwankung t erhält man die Streuung

$$\sigma_F^2 = \overline{t_F^2} = \frac{1}{A} \int_0^A t_F^2\, dx. \tag{19}$$

Sie ist abhängig von der Größe der Meßfläche. A ist der Bereich, in dem die Mitteilung durchgeführt wird. Es ist üblich, an Stelle der Streuung der Transparenz die der Schwärzung zu verwenden. Da die Schwankungen nur klein sind, ist eine einfache Umrechnung möglich, und es gilt

$$\sigma\,(\text{Schwärzung}) = \frac{0{,}43}{\overline{T}}\, \sigma\,(\text{Transparenz}). \tag{20}$$

Nach Selwyn [2] wird zur Charakterisierung einer Schicht der Wert G verwendet, welcher im weiten Bereich, vor allem bei genügend großer Meßfläche, unabhängig von F ist:

$$G = \sigma \sqrt{F}. \tag{21}$$

b) Schwankungsspektrum

Zu einer weiteren Möglichkeit der Charakterisierung gelangt man, wenn man die Fouriertransformierte der Funktionen t(x) und u(y) bildet.

$$\tilde{t}(\nu) = \int_{\infty} t(x)\, e^{-2\pi i x \nu}\, dx \tag{22}$$

$$\tilde{u}(\nu) = \int_{\infty} u(y)\, e^{-2\pi i y \nu}\, dy \tag{23}$$

Das Zeichen $\sim$ bedeutet die Fouriertransformation. ν ist die Raumfrequenz. Man kann unter Anwendung des Parsevalschen Satzes die Gl. (19) folgendermaßen schreiben:

$$\sigma^2 = \frac{1}{A} \int_0^A t_F^2(x)\, dx = \frac{1}{A} \int_{-\infty}^{+\infty} \left|\tilde{t}_F(\nu)\right|^2 d\nu = \int_{-\infty}^{+\infty} n(\nu)\, d\nu \tag{24}$$

Dieser Satz besagt, daß der quadratische Mittelwert der Schwankung gleich ist der Summe der quadratischen Mittelwerte der Amplitude der Teilschwingungen. Er besagt die den Elektrotechnikern geläufige Tatsache, daß der Effektivwert eines Gesamtvorganges gleich ist der Summe der Effektivwerte der Teilvorgänge.

$$n(\nu) = \left|\frac{\tilde{t}_F}{A}\right|^2 \tag{25}$$

bedeutet das „Schwankungsspektrum" (auch power- oder Wienerspektrum [8]). Berücksichtigt man noch, daß Gl. (17) als Faltungsintegral geschrieben werden kann:

$$t_f(x) = \int_{\infty} t(x+y)\, u(y)\, dy = t(x) * u(x), \tag{26}$$

so gilt nach dem Faltungssatz:

$$\tilde{t}_f(\nu) = \tilde{t}(\nu)\, \tilde{u}(\nu). \tag{27}$$

Damit erhält man für die Streuung [(24) (27)]:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{-\infty} \left|\tilde{u}(\nu)\right|^2 n(\nu)\, d\nu. \tag{28}$$

Ist die Meßfläche so groß, daß $n(\nu)$ in dem Gebiet, wo $\tilde{u}(\nu)$ nicht verschwindet, konstant und gleich n(0) ist, so gilt:

$$\sigma^2 = F\, n(0). \tag{29}$$

Durch Gl. (28) wird der Zusammenhang zwischen $\sigma(F)$ und $n(\nu)$ hergestellt.

c) Autokorrelationsfunktion

Die Autokorrelationsfunktion beschreibt, ob und wie ein Wert t an der Stelle x von einem Wert im Abstand z, also an der Stelle x + z abhängt. Er ist gleich dem Mittelwert der Produkte von zwei t-Werten, deren zugehörige x-Werte sich um den Wert z unterscheiden:

$$\Phi(z) = \frac{1}{A} \int_0^A t(x)\, t(x+z)\, dx. \tag{30}$$

Auch dieses Integral ist ein Faltungsintegral, und man kann die Fouriertransformierte schreiben:

$$\tilde{\Phi}(\nu) = \frac{1}{A} \left|t(\nu)\right|^2 d\nu = n(\nu). \tag{31}$$

Daraus folgt, daß das Schwankungsspektrum gleich ist der Fouriertransformierten der Autokorrelationsfunktion.

d) Bestimmung des Schwankungsspektrums aus dem „Rauschspektrum"

Wird eine entwickelte photographische Schicht in einem lichtelektrischen Mikrophotometer mit einer kleinen Meßfläche abgetastet und dabei mit der Geschwindigkeit v bewegt, so erhält man eine Wechselspannung mit kontinuierlicher Frequenzverteilung. Die Rauschspannung ist abhängig von der Frequenz („Rauschspektrum") und kann nach JONES [8] zur Bestimmung des Schwankungsspektrums verwendet werden. Für das Quadrat der „Rauschspannung" (E) kann man berechnen [8]:

$$E^2 = L_0^2 \eta^2 \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(f) \left| \bar{u}\left(\frac{f}{v}, \nu_2\right) \right|^2 n_T\left(\frac{f}{v}, \nu_2\right) df d\nu \quad (32)$$

E = Rauschspannung
f = Frequenz der Wechselspannung
L_0 = auf die Probe auffallender Lichtstrom
L = aus der Probe austretender Lichtstrom (Mittelwert) $L = T L_0$
$\varphi(f)$ = Durchlässigkeitsfunktion des elektrischen Filters
$\bar{u}(\nu_1 \nu_2)$ = Kontrastübertragungsfunktion der Meßfläche
$\eta = \frac{dE}{dL}$ Übertragungsfaktor von Lichtschwankungen in Spannungsschwankungen.

Die Integration kann man durchführen, wenn das Durchlaßgebiet des Filters so eng ist, daß sich in ihm $n(\nu_1 \nu_2)$ nicht merklich ändert.

Definiert man weiter ein von der Größe und Art der Meßfläche und der Abtastrichtung abhängiges „spezifisches Schwankungsspektrum"

$$n'(\nu_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \bar{u}(\nu_1 \nu_2) \right|^2 n(\nu_1 \nu_2)\, d\nu_2, \quad (33)$$

so erhält man auf Schwärzungsschwankung (20) bezogen (Index S):

$$n'_S(\nu_1) = \frac{0{,}43\, E^2(\nu)\, v}{2 L^2 \eta^2 \int_0^{\infty} \varphi^2(f)\, df}.$$

Bei Abtastung mit einem Spalt von der Breite b_1 und der Länge b_2 ergibt sich

$$n_S(\nu) = n'_S(\nu)\, b_2 \left(\frac{\pi \nu_1 b_1}{\sin \pi \nu_1 b_1} \right)^2. \quad (34)$$

Durch Integration von $n'(\nu_2)$ erhält man die Streuung [Gl. (28)]:

$$\sigma = \int_{-\infty}^{+\infty} n'(\nu_1)\, d\nu_1. \quad (35)$$

e) Schwankungsspektrum von verschiedenen Schichten und Expositionsarten

Abb. 5 zeigt das Schwankungsspektrum für vier verschiedene Filmsorten bei Lichtexposition. Man erkennt, daß n in verschiedener Höhe, aber in dem untersuchten Frequenzbereich nahezu konstant verläuft. Über den Verlauf bei höheren Frequenzen wird von INGELSTAM [12] berichtet.

Den Unterschied zwischen Licht- und Röntgenexposition zeigt Abb. 6. Bei letzterer sind die $n(\nu)$-Werte bei kleinen Frequenzen viel höher als bei Lichtexposition, um dann bei höheren Frequenzen auf den Wert bei Lichtexposition abzusinken. Ähnliche Erscheinungen werden auch bei Exposition mit Elektronen beobachtet. Sie erklären sich dadurch, daß durch ein Röntgenquant oder ein Elektron eine größere Anzahl von Körnern entwickelbar gemacht wird und so Kornanhäufungen entstehen. Auch bei Kopie (Abb. 7) einer grobkörnigen Schicht auf eine feinkörnige wird Ähnliches beobachtet. Hier wird die Kornstruktur des Originalfilms auf den Positivfilm kopiert und wirkt sich besonders stark

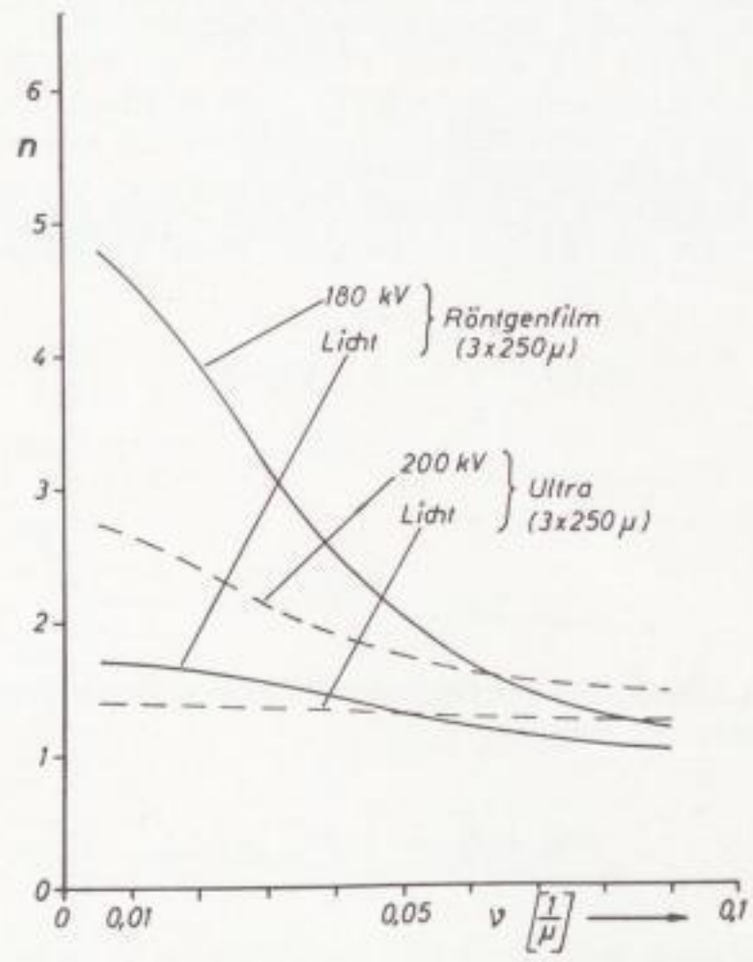


Abb. 6. Schwankungsspektrum bei Licht- und Röntgenexposition.

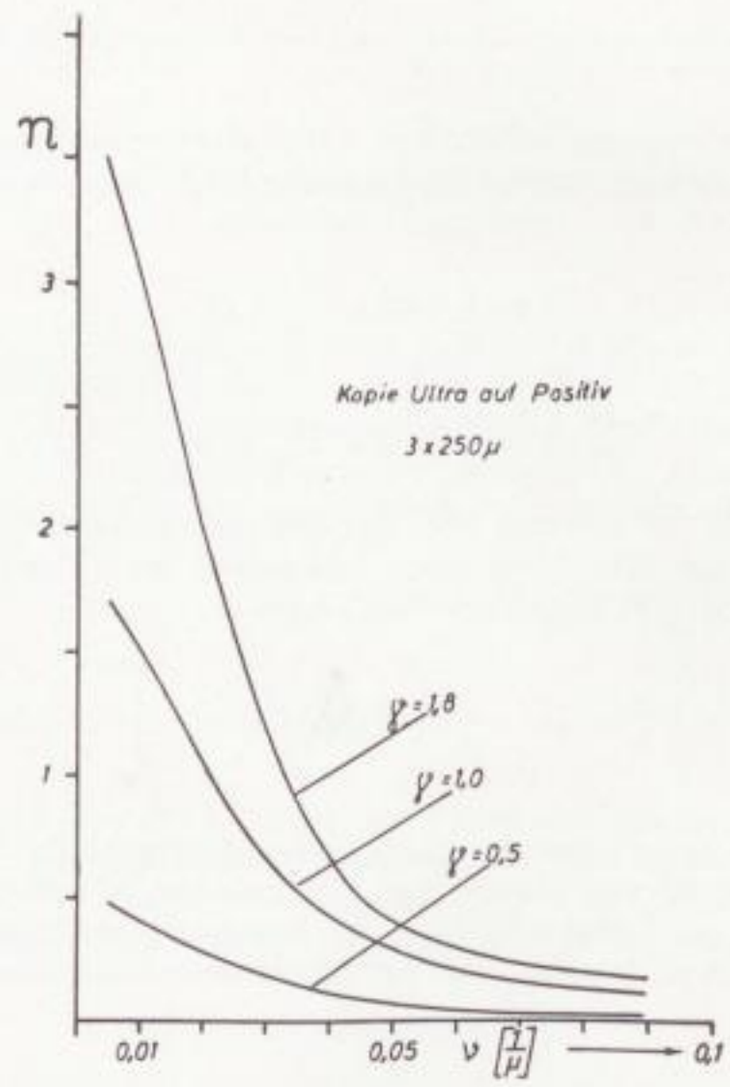


Abb. 7. Schwankungsspektrum bei Kopie einer grobkörnigen auf eine feinkörnige Schicht.

aus, wenn die Kopie mit steiler Gradation erfolgt. Dies tritt aber nur bei niedrigen Frequenzen auf, bei denen die Kontrastübertragungsfunktion des Positivfilms etwa gleich eins ist. Bei höheren Frequenzen wird $n(\nu)$ durch die kleinen Werte der Kontrastübertragungsfunktion erniedrigt, so daß schließlich die $n(\nu)$-Werte des Positivfilms beobachtet werden.

f) *Abhängigkeit des Schwankungsspektrums und der Streuung von dem mittleren Korndurchmesser (d)*

Für das Schwankungsspektrum wird von JONES [8] abgeleitet:

$$n(\nu) = 1{,}36\ d^2\ S\ [I_2(\pi\nu d)\ /\ \pi\nu d]^2 \qquad (36)$$

(Gl. 10. 3) d = mittleren Korndurchmesser
I_1 = Besselfunktion erster Ordnung
S = Schwärzung

Nach dieser Formel ist $n(\nu)$ für $\nu < \frac{1}{10\,d}$ praktisch konstant. Dies konnte auch, wie in Abschnitt d gezeigt wurde, durch Versuche bestätigt werden (INGELSTAM [12]).

Mit (29) erhält man aus (36) die schon von SIEDENTOPFF [1] angegebene Formel

$$\sigma^2 = 0{,}43\,\frac{f}{F}\,S \qquad (37)$$

$$G^2 = 0{,}43\ fS \qquad f = \frac{d^2\,\pi}{4} = \text{mittlere Kornfläche} \qquad (38)$$

$\frac{G}{\sqrt{S}}$ ist demnach unter den für (29) geltenden Bedingungen [$n(\nu)$ = konstant, wenn $u(\nu) \neq 0$] nur abhängig ist von der Korngröße. Nach EGGERT und KÜSTER besteht auch ein Zusammenhang zwischen dem mittleren Korndurchmesser und der aus dem Callierkoeffizienten abgeleiteten Körnigkeitszahl K = 100 log S″/S (S″: Schwärzung im gerichteten Licht (Apertur 0,5°), S: Schwärzung im zerstreuten Licht).

Es ist demnach auch ein Zusammenhang zwischen $\frac{G}{\sqrt{S}}$ und K zu erwarten. Daß dies im allgemeinen der Fall ist, zeigt die Darstellung der Meßergebnisse in Abb. 8. $\frac{G}{\sqrt{S}}$ ist als Funktion von K

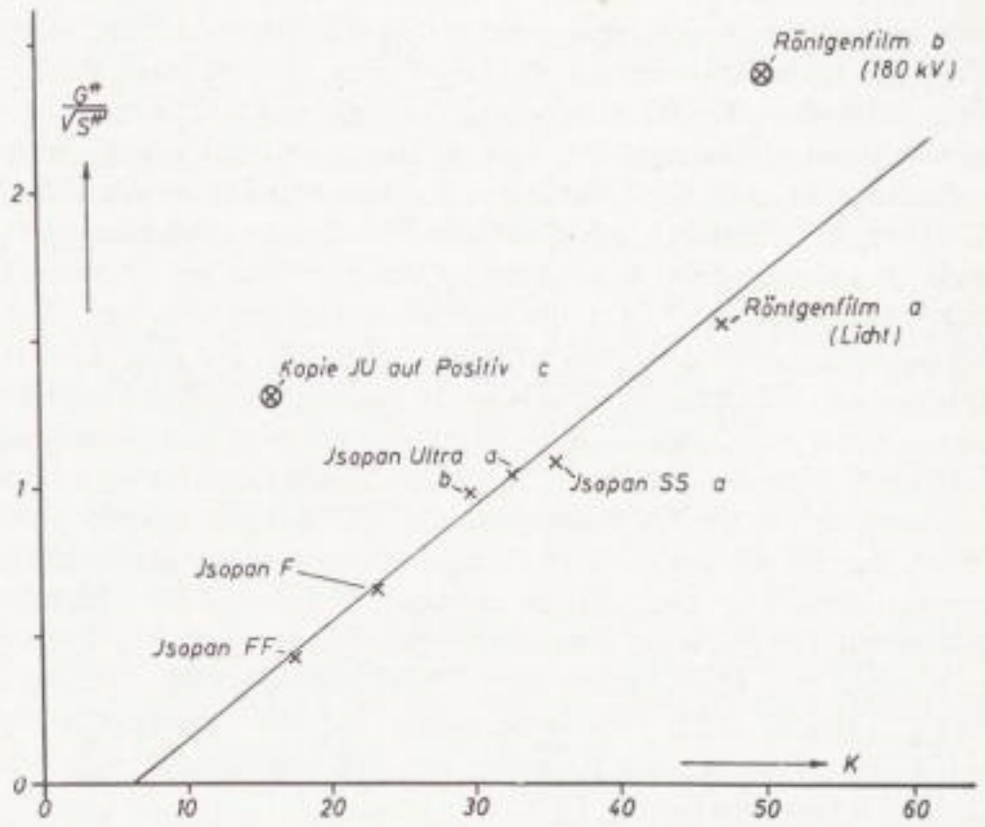


Abb. 8. Zusammenhang zwischen $\frac{G}{\sqrt{S}}$ und K.

aufgetragen. G wurde mit einer runden Meßfläche von 23 μ Durchmesser gemessen. Man sieht, daß die meisten Meßwerte recht gut durch eine Kurve verbunden werden können. Außerhalb der Kurve liegen die Werte, die an der Schicht gemessen werden, die durch Röntgen- oder Elektronenexposition, Kopie oder Farbenentwicklung hergestellt worden waren.

LITERATUR

[1] SIEDENTOPFF, H., Phys. Z. *38*, 154 (1937).
[2] SELWYN, E. W. H., Phot. J. *79*, 513 (1939).
[3] FRIESER, H., Fortschritte der Photographie II 1940 Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig.
[4] FRIESER, H., Phot. Korr. *91*, 69 (1955).
[5] FRIESER, H., Phot. Korr. *92*, 51 (1956).
[6] FRIESER, H., Phot. Korr. *92*, 183 (1956).
[7] FRIESER, H., Mitt. d. Agfa (1956), Verlag Springer, Berlin, 129.
[8] CLARK-JONES, R., JOSA *45*, 799 (1955).
[9] FELGETT, P., JOSA *43*, 271 (1953).
[10] PITTS, E., u. A. MARRIAGE, JOSA *46*, 1019 (1956); JOSA *47*, 321 (1957).
[11] ZWEIG, H. J., JOSA *46*, 805 (1956); JOSA *46*, 812 (1956).
[12] INGELSTAM, E., in diesem Band.
[13] FRIESER, H., Phot. Korr. *94*, 115, 131, 147 (1958).

DISKUSSION

Dr. P. BOTDEN
(Fa. Philips, Eindhoven)

Herr Dr. BOTDEN wies darauf hin, daß die Kontrastübertragungsfunktion und das Auflösungsvermögen einer photographischen Schicht stark von der Apertur der Belichtung abhängt. Dieser Effekt spielt vor allem bei der großen Apertur der Röntgen-Schirmbildphotographie eine große Rolle. (Besonders stark auch bei abgeschatteter Zentralhöhe bei Schmidtspiegel.)

Prof. FRIESER bemerkte, daß er diese Erscheinung auch beobachtete hatte, sie aber nur bei großen Öffnungsverhältnissen untersuchte. Oberhalb eines Öffnungsverhältnisses von 5 ist im allgemeinen keine Änderung mehr zu beobachten.

Prof. Dr. J. EGGERT
(Photogr. Institut der Eidgen. Technischen Hochschule Zürich)

Herr Prof. EGGERT wies darauf hin, daß das Problem der Kontrastübertragung von ihm im wissenschaftlichen Zentrallaboratorium der Agfa in Wolfen bearbeitet wurde, als man begann, sich mit der photographischen Tonaufzeichnung zu beschäftigen (ab 1928). Bei den Versuchen mit R. SCHMIDT und A. KÜSTER wurde so verfahren, daß die beim Tonfilm durch den Schall erzeugten Lichtschwankungen durch ein Modell in Gestalt einer mit variabler Tourenzahl umlaufenden Scheibe ersetzt wird, die regelmäßige Transparenzschwankungen oder eine definierte Zackenschrift aufwies, und die in dem Strahlengang einer geeigneten Aufzeichnungs-

optik mit konstanter Lichtquelle rotierte — im Prinzip also eine Anordnung, die in ähnlicher Form den heute benutzten entsprach. Die Aufzeichnungen auf der photographischen Schicht wurden dann mit einem Registrierphotometer ausgemessen und die ermittelten Transparenz- oder Schwärzungswerte als Funktion der Frequenz (also der „Strichbreite") der Aufzeichnung aufgetragen, wobei sich unmittelbar der Kontrastumfang oder dessen Verlust mit wachsender Frequenz ergab. Diese Kurven wurden in Anlehnung an das elektroakustisch gebräuchliche Analogon: „Frequenzgang" genannt; er entspricht wohl unmittelbar der heutigen „Kontrastübertragungsfunktion". Da die optischen Bedingungen bei diesen Versuchen konstant gehalten wurden, ließen sich die Eigenschaften verschiedener Schichtarten mit Hilfe der unterschiedlichen Frequenzgänge leicht vergleichen. Außerdem konnte der Kopiervorgang objektiv untersucht werden, z. B. im Sinne des Lautstärkeverlustes (in phon), ferner das Verhalten der Aufzeichnung in verschiedenen Teilen der Schwärzungskurve, Fragen der Grundgeräuschverminderung, Kontrolle des „Filmrauschens", Auftreten des Donnereffektes etc. Wegen aller Einzelheiten wird auf das Buch J. Eggert & R. Schmidt, Einführung in die Tonphotographie, Verlag S. Hirzel, Leipzig 1932, verwiesen, sowie auf die Dissertation von R. Görisch, Beiträge zur Kenntnis des Grundgeräusches von Tonfilmen, Universität Berlin, 1936.

Dr. P. Botden (Fa. Philips, Eindhoven)

wies auf die Möglichkeit der Kontrastverminderung durch das Logetronic-Verfahren hin. Näheres darüber kann aus folgenden Literaturstellen entnommen werden:

D. R. Graig, The Logetron: A fully automatic, servo-controlled scanning light source for Printing. Photographic Engineering, *5*, 219, 1954.

E. G. St. John u. D. R. Graig: Logetronography. Amer. Journ. of Röntgenology, *78*, 124, 1957.

K. Bischoff u. O. Schott: Eine neue Kontrastverstärkungseinrichtung für Röntgenaufnahmen.

H. G. Ebert: Bringt die Kontrastverstärkung von Röntgenfilmen praktischem Nutzen? Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen, *87*, 530, 1957.

Herr Prof. Eggert

bemerkte, daß die Firma Cin-Tel in England einen ähnlichen, billigeren Apparat in den Handel gebracht hat. Einen entsprechenden Vorgang zum Ausgleich großer Kontraste kann man bei Röntgenaufnahmen mit Hilfe der Xerographie durchführen und schließlich wurde im Photogr. Institut der Eidgen. Technischen Hochschule in Zürich eine rein photographisch arbeitende Methode gefunden, die sich beim Kopieren oder Vergrößern kontrastreicher Negative zum Ausgleich großer Schwärzungsumfänge anwenden läßt. Über dieses Verfahren könne aber noch nichts Näheres gesagt werden.

Herr Prof. Slevogt

gab zu bedenken, ob man nicht wegen der Kohärenz zwischen einfallendem und gestreutem Licht beim Zusammenwirken des Diffusionslichthofes mit dem aufgeprägten optischen Bild Rücksicht auf die Phasenbeziehungen, falls Aberrationen auftreten, nehmen müsse.

MESSUNG DER PHOTOGRAPHISCHEN KONTRASTÜBERTRAGUNGSFUNKTION MIT BERÜCKSICHTIGUNG DER BENUTZTEN OPTIK

Von L. O. Hendeberg und Erik Ingelstam
Institutet för optisk forskning, Stockholm 70

Man kann auf verschiedene Weisen untersuchen, welchen Einfluß die photographische Emulsion auf die Bildgüte ausübt. Hier wird eine experimentelle Methode beschrieben, die auf der Multiplikation der komplexen Kontrastübertragungsfunktionen (kurz CCT) beruht: $F_{tot}(N) = F_{opt}(N) \cdot F_{em}(N)$. Dabei ist die CCT des Gesamtprozesses $F_{tot}(N)$ bekanntlich die Fouriertransformierte von der Intensitätsverteilung im optisch-photographischen Bilde eines infinitesimal schmalen Spaltes. Die beiden anderen CCT $F_{opt}(N)$, bzw. $F_{em}(N)$ sind die analogen Fouriertransformierten, wobei nur die Optik, bzw. nur die Emulsion die Abbildung des Spaltes beeinflußt hat. N ist die Raumfrequenz, in Linien pro Millimeter gemessen.

Wir haben experimentell $F_{tot}(N)$ und $F_{opt}(N)$ bestimmt und daraus die photographische Kontrastübertragungsfunktion $F_{em}(N)$ berechnet. Bei unseren Messungen wurde also der Einfluß des Objektivs berücksichtigt [1].

Der Diffusionslichthof des photographischen Punktbildes ist bei unserer Anordnung sicher symmetrisch, weil die Belichtung konusförmig praktisch senkrecht zur Emulsionsebene geschieht. Ein symmetrisches Punktbild bedeutet, daß die CCT reell ist. Deshalb brauchen wir nur den Betrag der CCT, die sogenannte Kontrastübertragung CT zu messen. In Formel rechnet man also

$$|F_{tot}(N)|/|F_{opt}(N)| = |F_{em}(N)| = F_{em}(N)$$

Um F_{tot} zu bestimmen, wurde eine sinusförmige Intensitätsverteilung auf dem Film abgebildet und der Kontrast des Negativs photometrisch gemessen. Bei der Abbildung der sinusförmigen Intensitätsverteilung wurde ein Objektiv benutzt, dessen Kontrastübertragungsfunktion $F_{opt}(N)$ mit einer photoelektrischen Methode [2] bestimmt wurde. Eine Wolframbandlampe mit Farbglasfilter oder Interferenzfilter erwies sich als genügend lichtstark und genügend spektralrein.

Der erste Teil dieser Arbeit behandelt die $F_{tot}(N)$-Technik und der zweite Teil die $F_{opt}(N)$-Technik mit Ausrechnung von $F_{em}(N)$.

Der Apparat für die $F_{tot}(N)$-Messung

In der Brennebene des Kollimators K mit der Brennweite 938,5 mm befindet sich ein Spalt mit der Breite 10 μ und mit der Höhe 18 mm (Abb. 1a). Das austretende parallele Strahlenbündel wird an einem ebenen Aluminiumspiegel reflektiert und durch das Kameraobjektiv in einem Linienelement auf der Emulsion gesammelt. Beim Bau der Kamera wurde höchstmögliche Präzision angestrebt bezüglich der Filmplanlage und der Fokussierung. Es wurde eine Reproduzierbarkeit von 1 μ erreicht, wie man aus den

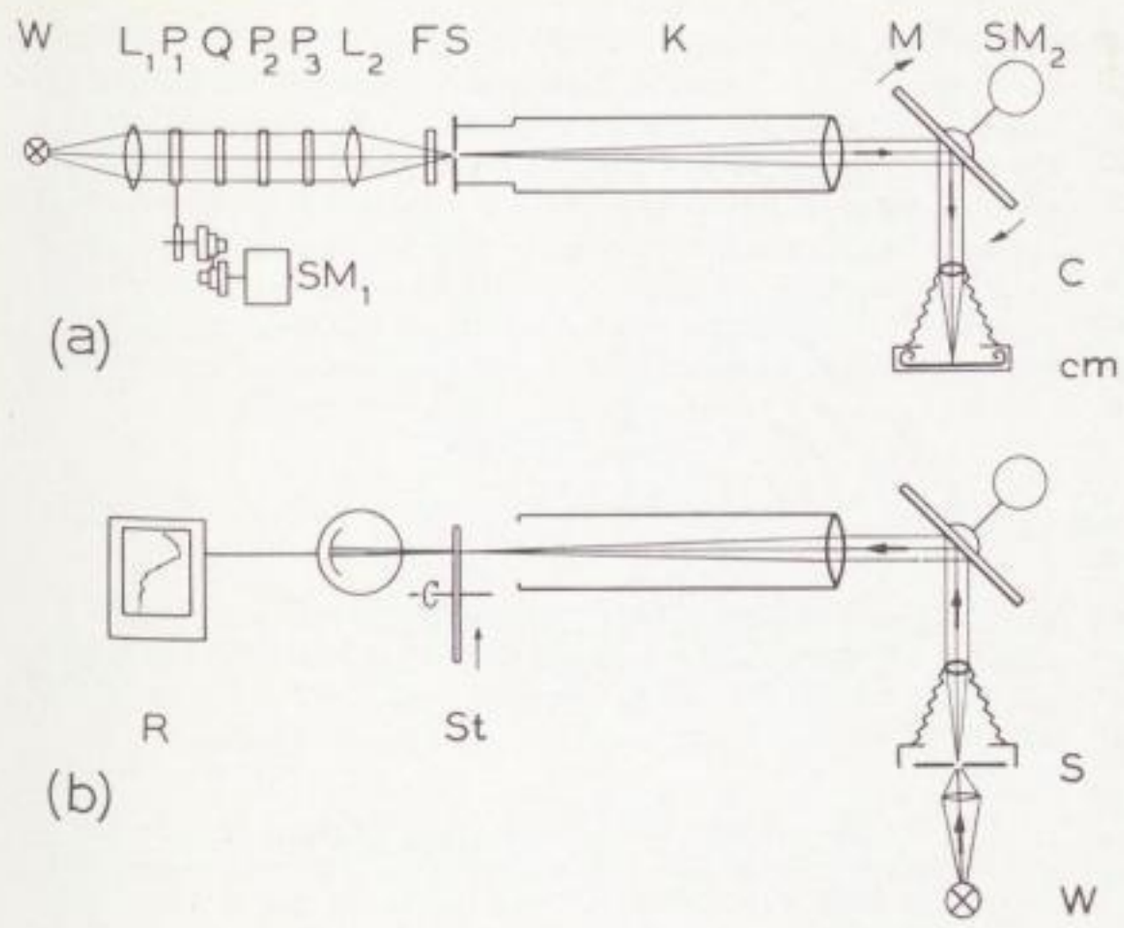


Abb. 1. Apparatur zur Bestimmung der CT-Funktionen.
a) Anordnung für die Messung der CT-Funktion $F_{tot}(N)$ zur Kombination Optik + Emulsion.
W: Wolframbandlampe.
L_1 und L_2: Linsen.
P_1: rotierender Polarisator, vom Synchronmotor SM_1 getrieben, mit einem Wechselgetriebe.
Q: Viertelwellenlängenblättchen.
P_2 und P_3: zwei feststehende Polarisatoren mit einem Azimut gegenüber Q von α bzw. β.
F: Halterungen für Farb-, Interferenz- und Graufilter.
S: Eintrittsspalt, 18 mm lang, 10 μ breit.
K: Kollimator, f = 938,5 mm.
M: ein Spiegel, der langsam von dem Synchronmotor SM_2 gedreht wird, und zwar um eine Achse durch das Zentrum des Spiegels und senkrecht zur Zeichenebene.
C: Kameraobjektiv, Xenon 1 : 2/25 mm.
em: Filmemulsion.
b) Anordnung für die Messung der optischen CT-Funktion $F_{opt}(N)$.
W: Wolframbandlampe.
S: Spalt (1,5 x 2,2 μ^2), der längs der optischen Achse und senkrecht bewegt werden kann, also in der xz-Ebene.
St: rotierender Teststern [2] in der Kollimatorbrennebene.
R: Photomultiplier und Schreiber.

gemessenen Kontrastübertragungsfunktionen folgern kann. Die Fokussierung geschah nicht wie üblich durch schraubenförmige Bewegung des Objektivs, sondern durch reine Translation. So konnten auch die durch Zentrierfehler entstehenden Asymmetrien in der Bildwinkelabhängigkeit reproduzierbar erfaßt werden. Das Bild des Spaltes wandert langsam über die Emulsion, wenn der Aluminiumspiegel rotiert (Drehachse senkrecht zur Zeichenebene der Abb. 1a). Gleichzeitig wird die Spaltintensität sinusförmig zeitlich variiert. Dadurch entsteht in der Emulsion ein (räumliches) sinusförmiges Streifensystem. Natürlich wird die Transparenzverteilung in der entwickelten Emulsion wegen der nichtlinearen Schwärzungskurve von der Sinusform abweichen.

Zwischen Wolfram-Bandlampe W und Kollimatorspalt S befindet sich der Lichtmodulator. Er enthält zwei Linsen L_1 und L_2 zur Abbildung des Glühdrahtes auf den Spalt. Im parallelen Strahlengang zwischen L_1 und L_2 befinden sich die Polarisatoren P_1 und P_2; P_2 steht fest, P_1 rotiert mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, so daß die Intensität sinusförmig moduliert wird. Die Rotation besorgt der Synchronmotor SM_1 über ein Getriebe, das in 9 Stufen auf etwa 1 bis 8 Sinusperioden pro Sekunde eingestellt werden kann. Auch der Synchronmotor SM_2 für den Aluminiumspiegel M ist mit einem Wechselgetriebe ausgestattet, so daß man 27 verschiedene Linienabstände (also auch Frequenzen N) erzielen kann. Der Modulationsgrad $(I_{max} - I_{min} / I_{max} + I_{min})$ des einfallenden Lichtes kann durch das Azimut α eines $\lambda/4$-Blattes Q eingestellt werden. Dadurch kann man erreichen, daß sich die sinusförmigen Intensitätsschwankungen nur über einen kleinen Teil der Schwärzungskurve ausdehnen. Den „Arbeitspunkt" auf der Schwärzungskurve (Schwärzung der mittleren Intensität) kann man verändern mit dem Polarisator P_3, der die absolute Intensität reguliert.

Zwischen Lichtquelle und Spalt kann man Filter zur Begrenzung des Spektralbereichs einfügen. Die Kombination Wolframbandlampe und Filter war einerseits genügend lichtstark, z. B. auch für Kodak Microfile Pan. Anderseits war der Spektralbereich genügend schmal, um die Farbabhängigkeit der verschiedenen Effekte untersuchen zu können. Bei hochempfindlichen Filmen, wie z. B. Agfa Isopan Ultra, diente ein Graufilter vor dem Spalt zur Intensitätsschwächung.

Apparat zur Messung der optischen Kontrastübertragungsfunktion $F_{opt}(N)$

Um die Kontrastübertragungsfunktion einer Emulsion $F_{em}(N)$ zuverlässig bestimmen zu können, müssen alle kontrastvermindernden Einflüsse der Apparatur bekannt sein, damit sie rechnerisch eliminiert werden können. Deshalb haben wir in einer Extrauntersuchung, aber mit dem gleichen Aufbau, die CT-Werte des gesamten Linsensystems (K, M und C) experimentell bestimmt. Dabei wurden die Frequenzen, die Einstellebene und der Bildwinkel variiert. Das Prinzip und einige Einzelteile wurden schon [2] beschrieben (siehe auch Abb. 1b).

Ein rechteckiges Lichtquellendiaphragma (1,5 x 2,2 μ^2) befand sich in der Bildebene der Kamera. Der rotierende Siemens-Stern St befand sich statt des Spaltes S in der Kollimator-Brennebene. Die Strahlenrichtung (Abb. 1b)war entgegengesetzt zum Emulisonsexperiment (Abb. 1a). Über Photozelle und Verstärker ging das Signal zu einem Schreiber, der die $F_{opt}(N)$-Kurve aufzeichnete (Abb. 2).

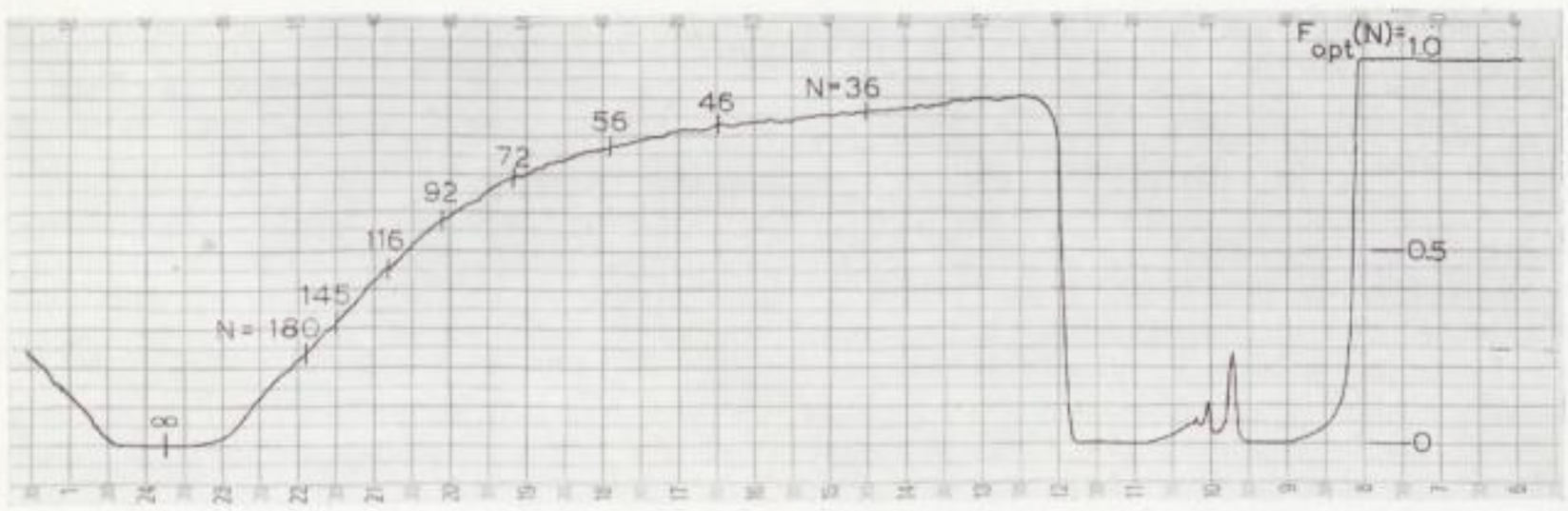


Abb. 2. Beispiel einer CT-Registrierung, hier speziell für das Objektiv. Rechts die Aufzeichnung für die Kalibrierung $F_{opt}(0) = 1$. Die registrierten CT-Werte müssen noch bezüglich der endlichen Spaltbreite korrigiert werden. (Zwischen den CT-Werten und dem Kalibrierungsniveau befinden sich „im Tal" einige kleine Zacken, die durch eine Umschaltung entstanden sind.)

Wenn man die photographische CT noch bis etwa 150—200 Linien pro mm messen will, muß die Optik natürlich diese Frequenzen mit ausreichendem (und bekanntem) Kontrast in der Emulsionsebene erzeugen können. (Vgl. dazu auch RONCHI [3]). Da auch an wenig empfindlichen Filmen gemessen werden sollte, war ein lichtstarkes Öffnungsverhältnis des Kameraobjektivs erforderlich. Ein Kinoobjektiv Schneider Xenon 1:1,5/25 mm bei Blende 2 erfüllte diese Forderungen.

Bei der Messung der optischen CT wurde die Tiefeneinstellung längs der z-Achse in 10-μ-Schritten variiert und die Bildwinkeleinstellung längs der x-Achse in 1-mm-Schritten, bezogen auf die Bildebene xy. Die Messungen wurden für Frequenzen von 9 bis 180 Linien pro mm durchgeführt. In der Abbildung 3 sind z. B. die Ergebnisse für $N = 56\ mm^{-1}$ „topographisch" dargestellt als Funktion der Tiefeneinstellung z und der Bildkoordinate x. Dabei sind die Einflüsse der endlichen Größe von Lichtquellendiaphragma und Photozellenspalt schon rechnerisch eliminiert. Die Linien gleichen Kontrastes, die „Isokontrasten", zeigen, daß der kontrastreiche Bildbereich eine große Breite, aber nur eine sehr geringe Tiefe besitzt. Die beste Kontrastwiedergabe entsteht in der Nähe der optischen Achse. Bei steigender Linienzahl hat das „Kontrastgebirge" die Tendenz, sich etwas näher an das Objektiv zu bewegen. Dann wird das „Kontrastgebirge" auch niedriger und weniger ausgedehnt. Bei geeigneter Placierung der Emulsion, z. B. in der x-Achse (Abb. 3), kann man die CT-Werte der Emulsion auch für relativ hohe Frequenzen messen. Die Dimensionen des Teststernes und die CT-Eigenschaften der Emulsionen bestimmten den erfaßbaren Frequenzbereich von 36 bis 180 Linien pro mm.

Im nächsten Schritt wurden auch die Frequenzen $N < 36\ mm^{-1}$ erfaßt. Dazu wurde mit einer möglichst glatten Kurve von den hohen Frequenzen über $N = 36$ bis $N = o$ $(F(o) = 1)$ extrapoliert. Diese Art der Extrapolation ist vom theoretischen Standpunkt aus selbstverständlich. Es könnten allerdings im Prinzip Streulichteinflüsse bewirken, daß die CT-Kurve zwischen $N = 36$ und $N = o$ nicht glatt verläuft. Nach unsern Experimenten ist das nicht (oder nur minimal) zu erwarten, wie an der Abbildung 4 zu sehen ist.

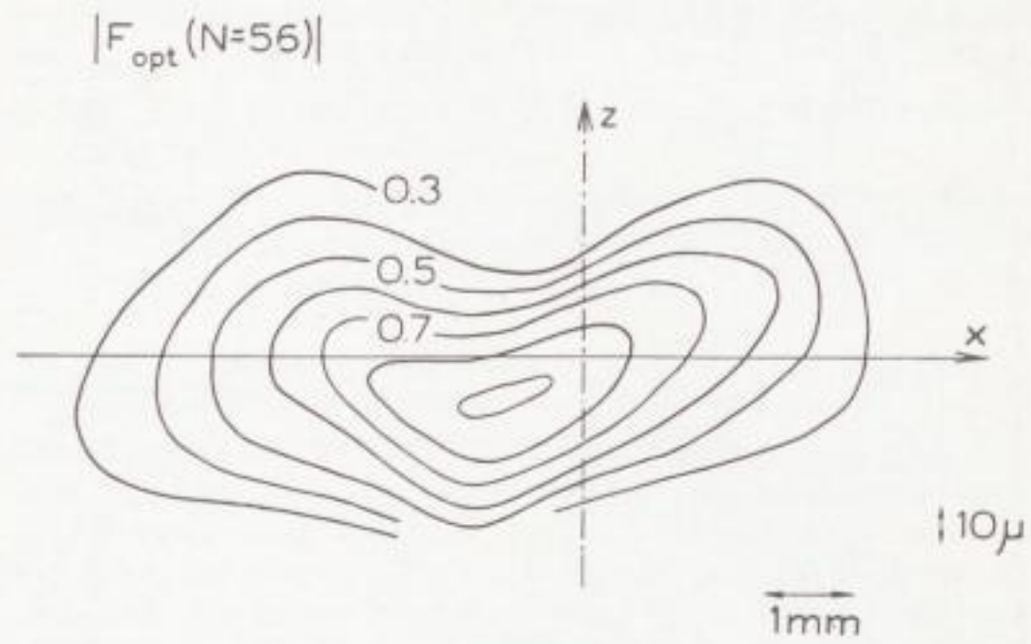


Abb. 3. Die optische CT für eine feste Frequenz $N = 56\ mm^{-1}$ als Funktion der x- und z-Koordinaten, „Kontrastgebirge". Die z-Achse liegt parallel zur Objektivachse. In der x-Achse liegt die Emulsion.

Abb. 4. Die optische CT für verschiedene Bildwinkel. Die x-Achse liegt senkrecht zur Objektivachse. Die Meßpunkte sind durch ein Kreuz gekennzeichnet. Die durch Kreise hervorgehobenen (interpolierten) Werte wurden später bei der Auswertung der F_{tot}-Kurve benutzt.

$F_{tot}(N)$-Technik, Ausrechnung von $F_{em}(N)$

Für die Aufzeichnung des sinusmodulierten Intensitätsverlaufes auf dem Film (oder der Platte) wird gefordert, daß die Emulsion eben und in wohldefinierter Lage ist. Dies war bei einer vorläufigen Untersuchung das schwierigste Problem, das aber in einer neu konstruierten Kamera gelöst werden konnte. Man kann aus dem experimentellen Material entnehmen, daß die Lage der Filmemulsion bis auf wenige μ wohl definiert ist. Es ist von Interesse, die Dicken der Emulsionen größenordnungsmäßig zu wissen, für Agfa IFF 6 μ und für Agfa IU etwas größer als 10 μ.

Das belichtete Gebiet ($7 \times 0{,}4\ mm^2$) bestand aus mehreren Teilbereichen, in denen die Frequenz konstant war. Da die Teilbereiche verschiedenen Bildwinkeln entsprachen, mußte die Winkelabhängigkeit der CT-Funktion der Optik berücksichtigt werden, was mit unseren „Kontrastgebirgen" möglich war.

Die experimentelle Arbeit bestand aus Belichten und Entwickeln, aus Photometrierung und Auswertung der Photometerkurven. Die Photometrierung erfolgte im parallelen Licht mit einer Translationsgeschwindigkeit von 150 μ pro Minute. Der Photometerspalt war 0,3 bis 0,4 mm lang und 0,7 bis 1,5 μ breit, je nach der Höhe der Frequenzen, die noch gemessen werden sollten.

Unsere Methodik ist auf beliebige Teile der Schwärzungskurve anwendbar. Wir nahmen als Schwärzung für den Mittelwert der Intensität stets $S = 0{,}5$. Die Abbildung 5 zeigt die Schwärzung in einem Kodak-Microfile-Pan-Film, auf den ein Kontrast 1,0 abgebildet wurde. Die Kontrastverminderung in den höheren Frequenzen entsteht durch das Linsensystem und durch den Diffu-

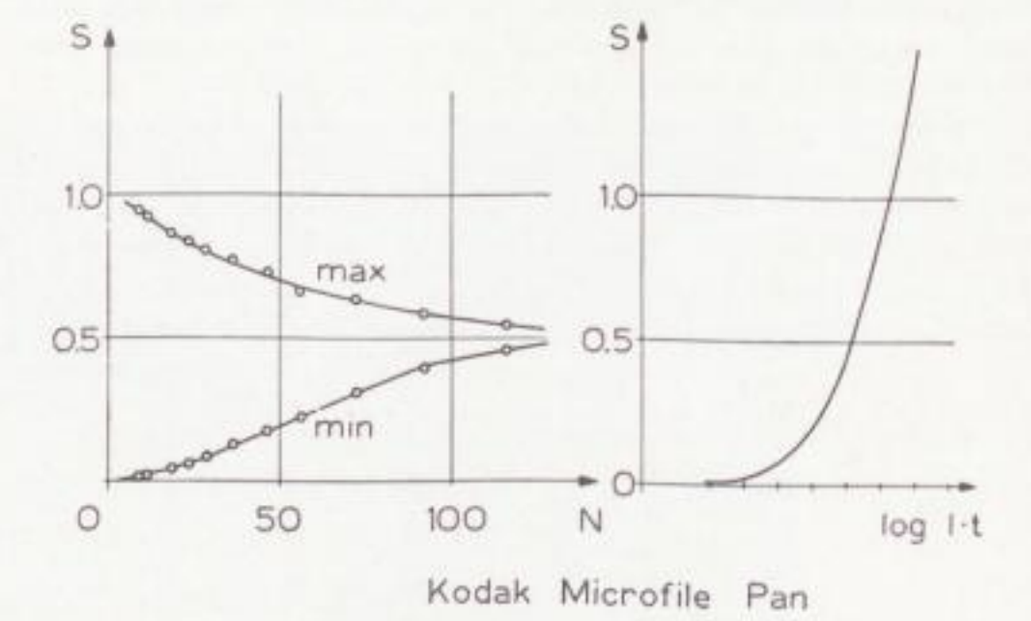


Abb. 5. Links die Schwärzungsmaxima, bzw. -minima im Negativbild des Sinusmusters als Funktion der Raumfrequenz. Der „Arbeitspunkt", also die Schwärzung der mittleren Intensität, ist $S = 0{,}5$. Rechts die dazu gehörende Schwärzungskurve.

sionslichthof. Die dazugehörige Schwärzungskurve ist in der rechten Hälfte der Abbildung dargestellt.

Die Messungen der Transmission sind auf den Schleier der Emulsion bezogen. Die so berechneten CT-Werte sind natürlich etwas höher als diejenigen, die aus Messungen, bezogen auf die Basis, herauskommen würden. Aber weil wir die Transformation der wirklichen Belichtung haben wollen, so scheinen die CT-Werte bezogen auf den Schleier am sinnvollsten und am natürlichsten zu sein. Um die Verhältnisse vollständig zu beschreiben, und um Emulsionen mit viel oder wenig Schleier vergleichen zu können, sollte man zusätzlich zur CT noch einen Zahlenwert über die Höhe des Schleiers angeben.

Um aus der photometrisch gemessenen Transmission des Negativs auf die wirksame Intensitätsverteilung schließen zu können, wurden neben den Sinusmustern auch Graustufen aufbelichtet. So kann man bekanntlich den Einfluß der nichtlinearen Schwärzungskurve rechnerisch eliminieren.

Bedeutung der Filmlage

Wenn man die Belichtung in verschiedenen Einstellebenen durchführt (Abstand jeweils 10 μ), so kann man für die Kombination Optik + Emulsion ähnliche „Kontrastgebirge" erhalten, wie das für die Optik allein in der Abbildung 3 dargestellt wurde.

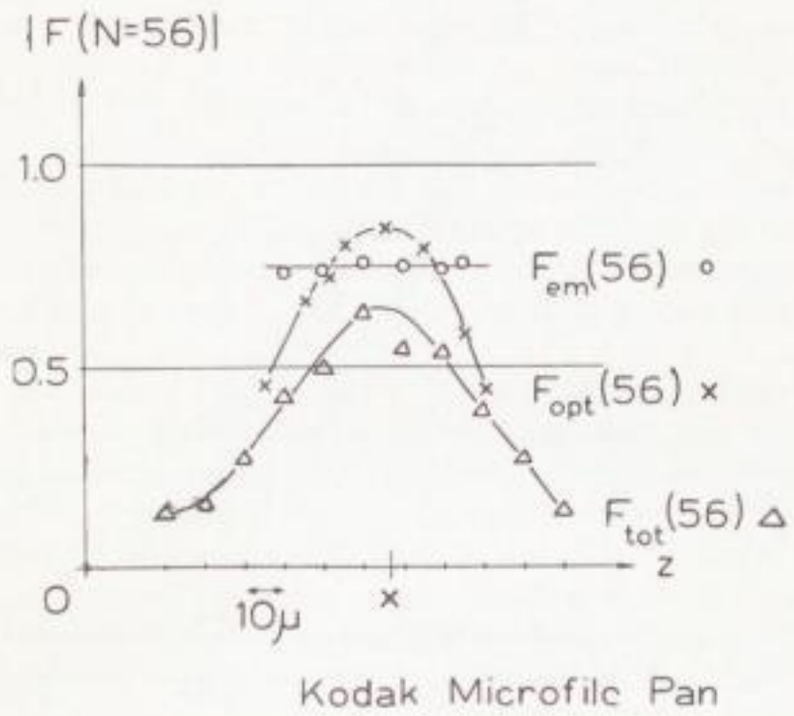


Abb. 6. Schnitt durch das „Kontrastgebirge" längs der z-Achse für die Frequenz $N = 56 mm^{-1}$. $F_{em}(56; z)$ wurde aus den beiden gemessenen Kurven $F_{tot}(56; z)|$ und $|F_{opt}(56; z)|$ errechnet: $F_{em}(56; z) = |F_{tot}(56; z|/|F_{opt}(56; z)|$. Dabei zeigt sich, daß die photographische CT nicht von der Einstellebene z abhängt. Dadurch wird die Konsistenz unserer Messungen demonstriert.

Weil die photographische CT natürlich nicht von der Einstellebene abhängt, dienen die neuen Kontrastgebirge für die Kombination nicht nur zur Bestimmung der photographischen CT nach der Formel $F_{em}(N) = |F_{tot}(N)|/|F_{opt}(N)|$ für eine bestimmte Frequenz z. B. N = 56. Man kann auch durch Vergleich der Abbildungen 3 und 6 feststellen, ob die rein optischen Messungen mit den optisch-photographischen Messungen konsistent sind. Die Probe fiel positiv aus, wie aus der Abbildung 6 hervorgeht. Man kann nun auch indirekt die Einstellebene bei der optisch-photographischen Messung mit ziemlich großer Genauigkeit bestimmen, wenn das rein optische Kontrastgebirge schon vorher bekannt ist.

Untersuchte Filme

Wir haben uns nur mit 35-mm-Kleinbildfilmen befaßt. Angeregt durch H. Frieser's Diffusionslichthof-Untersuchungen haben wir an den Afa-Filmen IFF, IF, ISS und IU (alle nach der üblichen Vorschrift mit Final entwickelt; Pinselentwicklung) gemessen. Außerdem wurde bei Kodak Microfile Pan (mit Kodak D 158 entwickelt) der Einfluß der Entwicklungsart studiert. Bei allen Experimenten betrug die mittlere Schwärzung 0,5 (Abb. 5). Jeder experimentelle Kurvenwert für die Agfa-Filme ist ein Mittelwert aus mindestens 3 Aufzeichnungen, die aus je 4 bis 30 Perioden bestanden. Dazu gehörten jeweils mindestens 3 Stufen des Graustufenkeils, und zwar so placiert, daß Sinusmuster und Graustufen auf die gleiche Weise entwickelt wurden. Die Belichtung geschah mit grün gefiltertem Licht aus einer Wolfram-Bandlampe.

Experimente

Experiment I. Variation des Kontrastes

Bei einigen Filmen (ohne Nachbareffekt) wurde der Kontrast der „aufgeprägten Intensität", also der Modulationsgrad des Lichtstromes, variiert, und zwar mit den Kontrastwerten 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 und 0,2. Dabei zeigte sich stets, daß die CT unabhängig vom aufgeprägten Kontrast ist. Der Bildkontrast war nämlich um den gleichen Faktor verändert wie der Objektkontrast (Abb. 7). Dieses Ergebnis hat auch meßtechnische Bedeutung, weil es nun sicher erlaubt ist, den Objektkontrast so einzurichten, daß der Bildkontrast einen mittleren Wert annimmt. Bei zu großem Bildkontrast kann man in den Schleierbereich kommen, bei zu kleinem Bildkontrast wird die Messung wegen des Rauschens zu ungenau.

Man erkennt bei diesen Untersuchungen auch deutlich, wie problematisch das „Auflösungsvermögen" ist.

Am Rande sei bemerkt, daß die Photometerkurven sich besser der Sinusform annähern, wenn man im geraden Teil der Schwärzungskurve arbeitet.

Experiment II. Verschiedene Emulsionen

Der Vergleich zwischen feinkörnigen unempfindlichen und grobkörnigen Emulsionen (Abb. 8) zeigt, daß die Kontrastwiedergabe bei großen Körnern schlechter ist, speziell für die Frequenzen von 0 bis 75 mm^{-1}. Bei höheren Frequenzen sind die Unterschiede wegen des Rauschens nicht mehr so deutlich wahrnehmbar. Man erkennt jedoch bei der feinkörnigen IFF-Emulsion noch stellenweise 180 mm^{-1}, während das bei der grobkörnigen Emulsion nur bis etwa 100 mm^{-1} möglich ist. Die für den Amateur wichtigen Frequenzen werden allerdings kaum über 75 mm^{-1} hinausgehen.

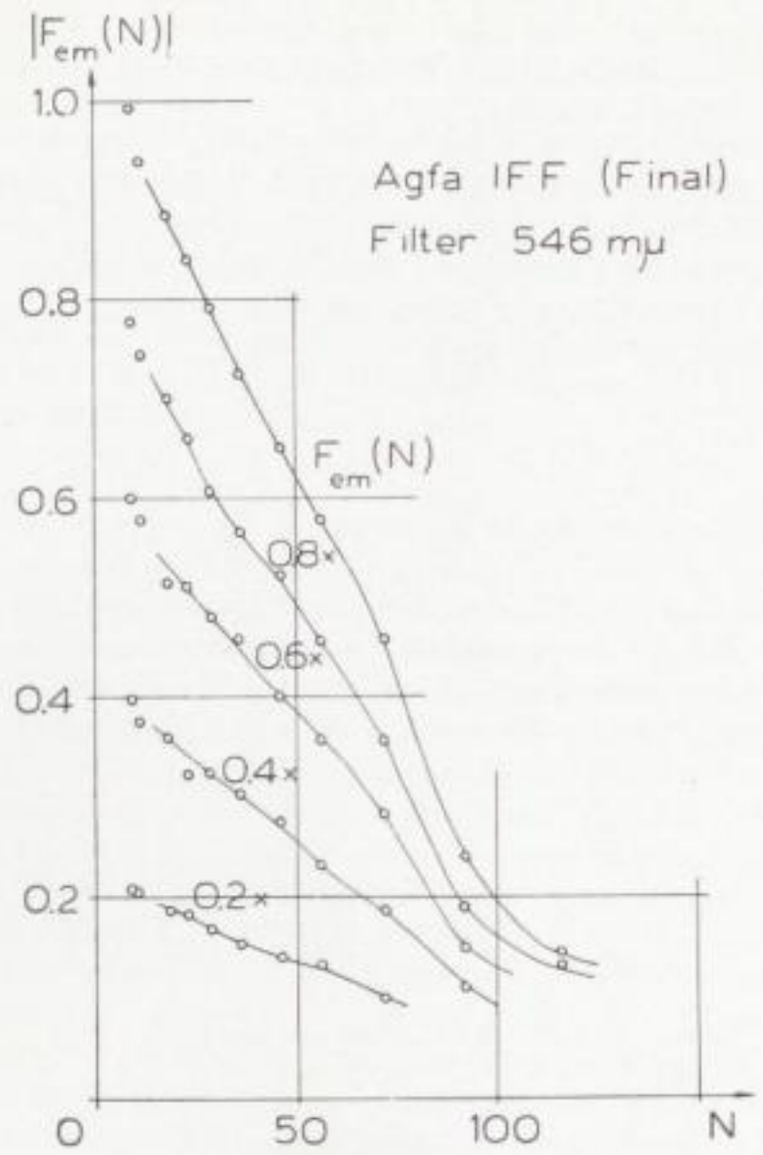


Abb. 7. Der im Negativ gemessene Kontrast nach Eliminierung der Verzerrung durch die Schwärzungskurve ist proportional zum Kontrast der aufgeprägten Intensität. Dadurch wird bestätigt, daß man die Umwandlung der aufgeprägten Intensität in die wirksame Intensität als ein Linearfilter beschreiben kann. D. h. Anwendbarkeit der Übertragungstheorie.

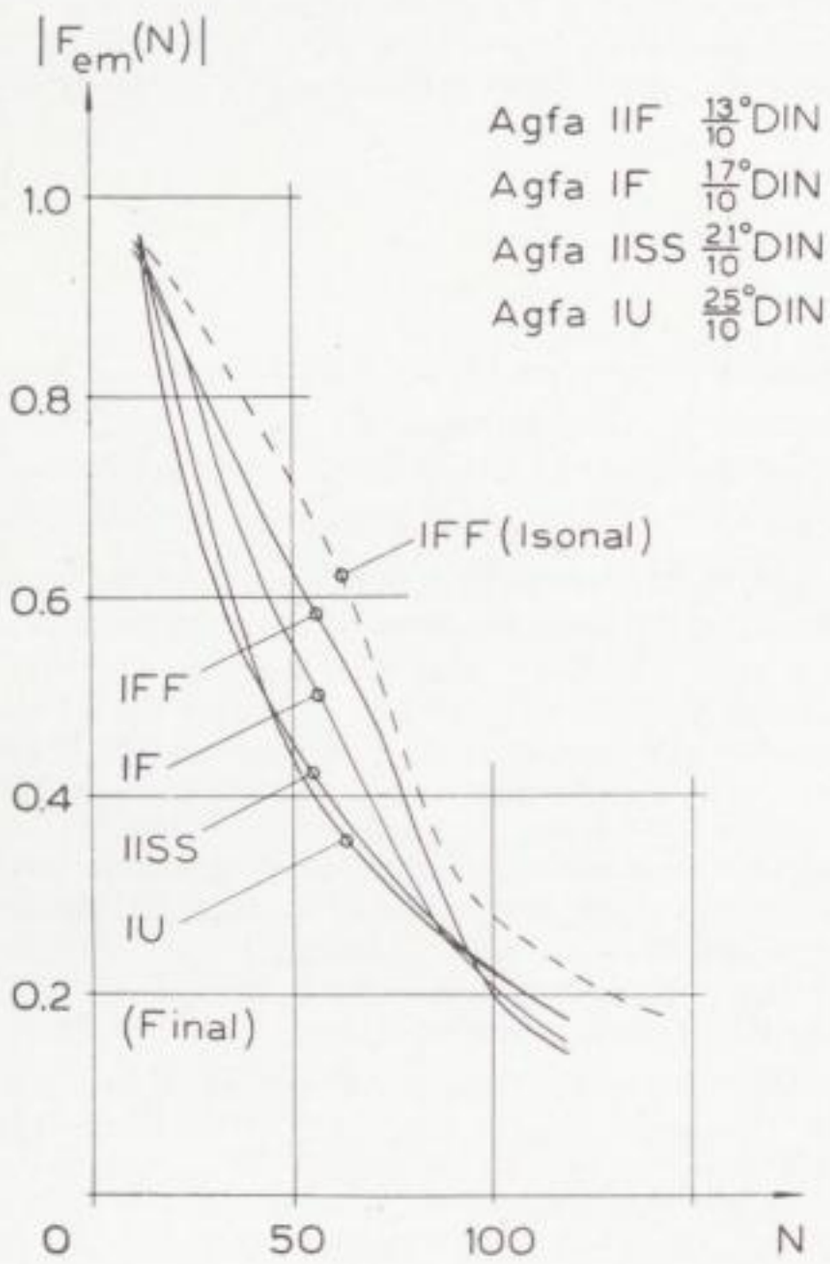


Abb. 8. Photographische CT-Kurven $F_{em}(N)$ für vier Filmsorten, die mit Final entwickelt wurden, IFF außerdem auch mit Isonal.

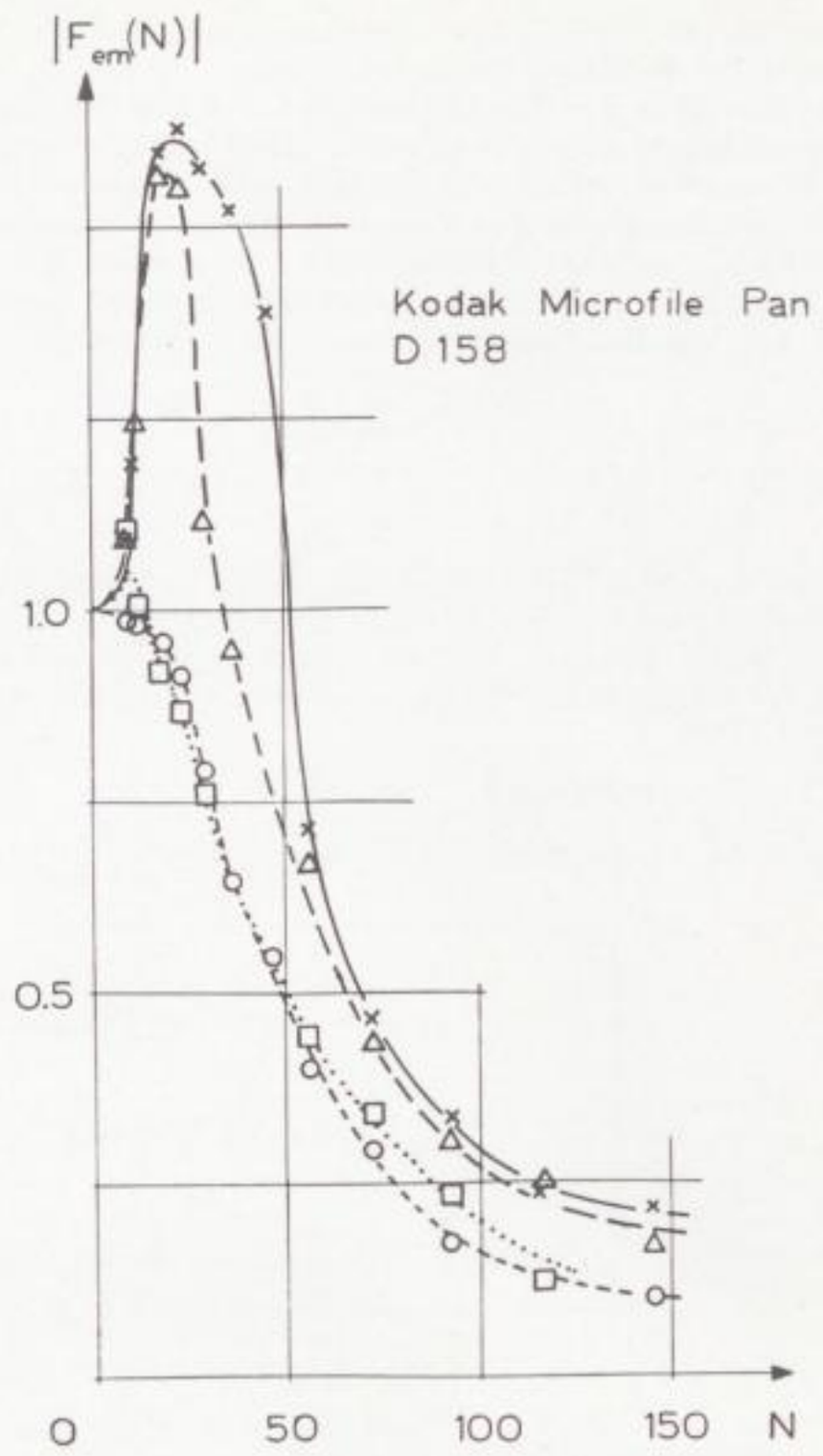


Abb. 9. Der Nachbareffekt bei verschiedenen Entwicklungsarten:

——— × Konstante Winkelgeschwindigkeit der Entwicklungsdose. Drehung nur in einer Richtung.

— — △ Unregelmäßige („amateurmäßige") Bewegung der Dose.

– – – – ○ Pinselentwicklung, dabei konstante Winkelgeschwindigkeit, Drehung nur in einer Richtung.

. . . . . □ Pinselentwicklung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit, aber alle 30 Sekunden wird die Richtung gewechselt.

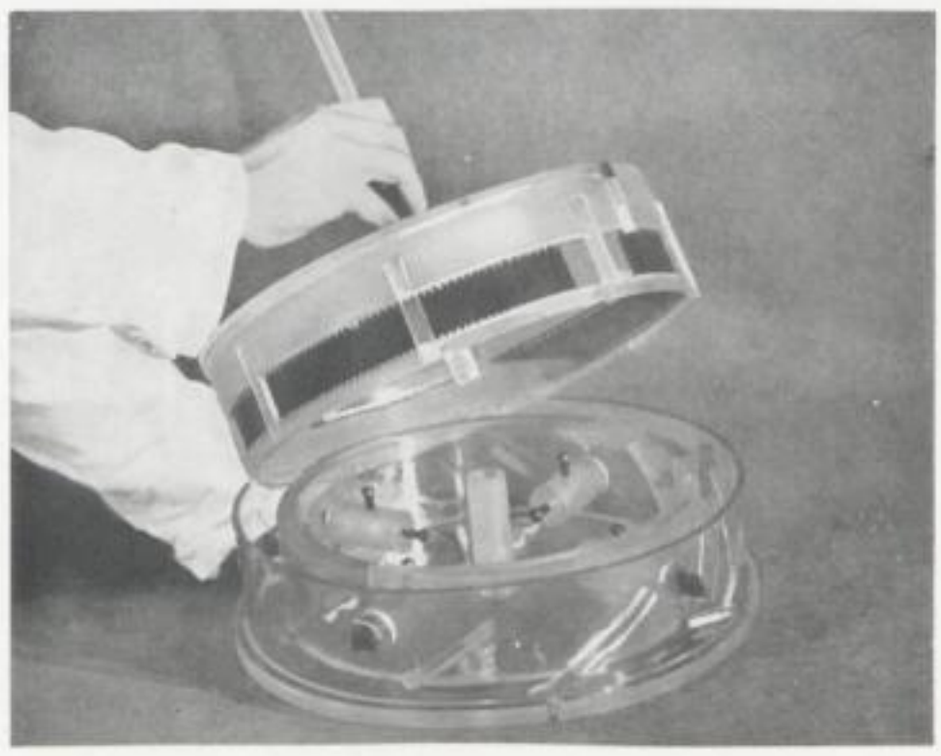


Abb. 10. Dose für die Pinselentwicklung. Während der Drehung des Filmhalters streichen vier Marderhaarpinsel am Film entlang. Das Entwicklerbad ist von Thermostaten-Wasser umgeben.

Experiment III. Einfluß des Entwicklers

Bekanntlich werden die Empfindlichkeit und die Korngröße auch durch den jeweiligen Entwickler beeinflußt. Das haben wir mit Final und Isonal am IFF-Film untersucht. Vom Isonal-Entwickler ist bekannt, daß er Nachbareffekte erzeugt. Den Einfluß des Nachbareffektes erkennt man auch an der CT (Abb. 8). Isonal verbessert die CT für alle Frequenzen. Das wird im folgenden Experiment IV näher untersucht.

Experiment IV. Einfluß der Entwicklungsmethode

Besonders bei Kodak Microfile-Pan-Film geht die CT-Kurve weit über 1 hinaus in einem Frequenzbereich bis etwa 50 mm^{-1}. Dieser Effekt trat auch auf, wenn der aufgeprägte Kontrast beispielsweise nur 0,4 groß war. Für die Entwicklung wurde eine übliche Spiral-Dose benutzt, die sich mit konstanter Geschwindigkeit drehte (Abb. 9; x). Dreht man die Dose unregelmäßig von Hand so sinkt die CT-Kurve (Abb. 9; △). Verschiedene Arten der Dosen-Bewegung bedeuten verschiedene Misch- und Diffusionsvorgänge für den Entwickler. Daraus folgt, daß das Auftreten einer CT über 1 mit der Art der Entwicklung zusammenhängt. Man kann diesen Effekt offenbar als Nachbareffekt bezeichnen, denn die beiden Entwicklungsarten unterscheiden sich nur in den Transportmöglichkeiten für verbrauchten und unverbrauchten Entwickler. Das Maximum der CT-Kurven liegt offenbar bei 20 bis 30 mm^{-1}, also bedeutend höher, als man früher gefunden hatte. Dabei war der Effekt nicht so groß, und er hatte sein Maximum etwa bei 10 mm^{-1} [4].

Wenn wir allein den Einfluß des Diffusionslichthofes untersuchen wollten, konnten wir den Nachbareffekt durch eine geeignete Pinsel-Entwicklung ausschalten (Abb. 10). Dabei rotiert der Film auf einer Kreisbahn, während er von vier langen weichen Marderhaarpinseln alle 1,25 Sekunden gebürstet wurde. Dann ergaben sich die beiden unteren Kurven mit dem normalen Verlauf. Die fein gestrichelte Kurve entspricht einem Entwicklungsvorgang, bei dem nur ein Drehsinn angewandt wurde. Für die andere Kurve wurde der Drehsinn alle 30 Sekunden gewechselt. Diese Kurven zeigen also, daß die photographische CT auch deutlich von der Art der Entwicklung abhängt. Insbesondere folgt daraus, daß der Nachbareffekt nicht nur negativ als Störeffekt werden kann.

Experiment V. Einfluß des Spektralbereichs

Um den Einfluß der Wellenlänge auf die photographische CT kennen zu lernen, wurde an einer feinkörnigen und an einer grobkörnigen Emulsion mit drei verschiedenen Spektralbereichen gemessen (Abb. 11). Man erkennt an der Abbildung 12 (links IFF, rechts IU; beide mit Final entwickelt) deutlich, daß blaues Licht eine schlechtere CT ergibt, als langwellige Beleuchtung. Das kann an der stärkeren Lichtstreuung für kürzere Wellenlängen liegen. Außerdem ist die Emulsion für die kurzen Wellenlängen oft empfindlicher. Größere Empfindlichkeit bedeutet im allgemeinen größere Körner, und größere Körner bewirken eine Verschlechterung der CT, wie wir im Experiment II gesehen haben.

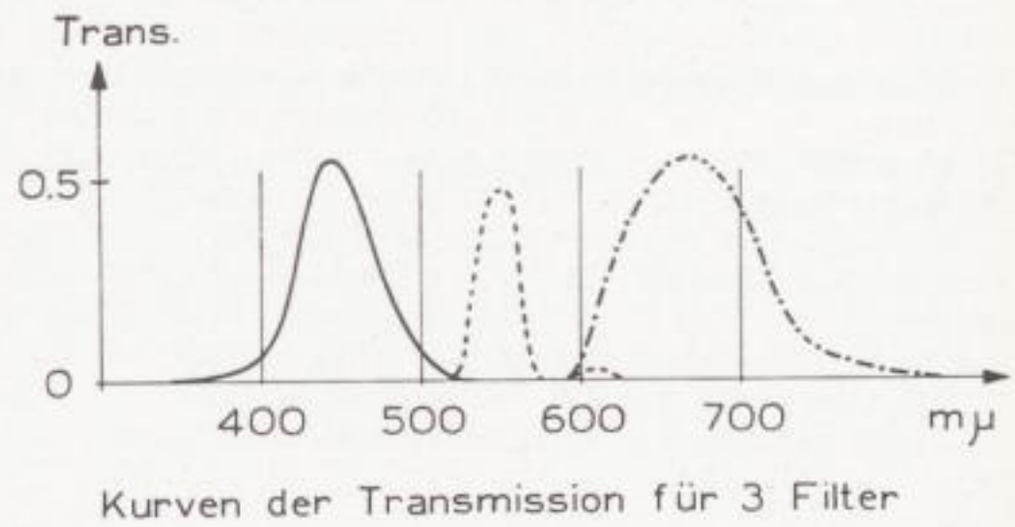


Abb. 11

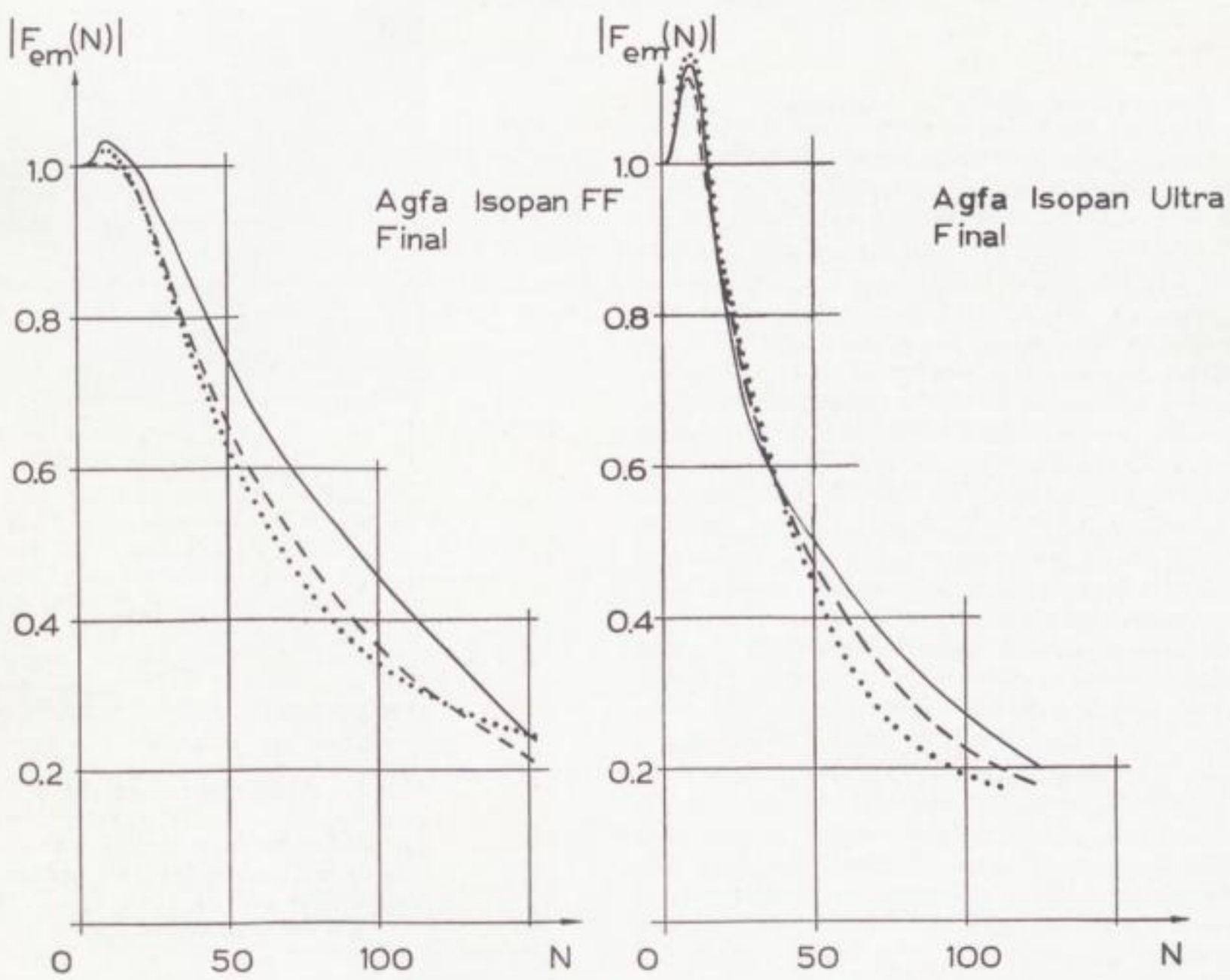


Abb. 12. Die Wellenlängenabhängigkeit der photographischen CT-Kurve
. . . . . kurzwelliges Licht (blau)
– – – – – – mittelwelliges Licht (grün)
———— langwelliges Licht (rot)

Zusammenfassung

Unsere Kurven geben einen Überblick über die CT-Funktionen $F_{em}(N)$ von verschiedenen photographischen Emulsionen. Diese Kurven beruhen auf dem Einfluß des Diffusionslichthofes und teilweise auf dem Nachbareffekt. Es erscheint bemerkenswert, daß der Nachbareffekt offenbar einen positiven Einfluß auf die Kontrastübertragungsfunktion ausübt. Der Einfluß des benutzten Objektivs und die Schwärzungskurve konnten rechnerisch eliminiert werden. Deshalb mußten auch die CT-Funktion des Objektivs und die Schwärzungskurve bestimmt werden. Eine genauere Veröffentlichung der Ergebnisse wird demnächst in zwei Aufsätzen in englischer Sprache im „Arkiv för Fysik" folgen.

LITERATUR

[1] Ingelstam-Djurle-Sjögren: J. Opt. Soc. Amer. *46*, 707 (1956).
[2] Ingelstam, E.: Phot. Korrespondenz *95*, 135 (1959), und in diesem Band, S. 13.
[3] Siehe V. Ronchi: Z. wiss. Phot. *39*, 2 (1940), mit Referenzen.
[4] Siehe z. B. Kapitel 24 in C. E. K. Mees: The Theory of the Photographic Process, New York, 1954.

D: BEDEUTUNG PHYSIOLOGISCHER PROBLEME FÜR DIE ÜBERTRAGUNGSTHEORIE

PHYSIOLOGISCHE PROBLEME DER BILDSCHÄRFE

Von Herbert Schober, München
(Institut für medizinische Optik)

Das auf der Netzhaut durch den optischen Abbildungsapparat des Auges (Hornhaut, Linse und Glaskörper) entworfene Bild eines Punktes stellt stets eine Zerstreuungsfigur dar, deren Größe und Form durch die geometrisch-optischen Fehlereigenschaften des abbildenden Systems und durch die Beugung an den Pupillenrändern bewirkt wird. Bekanntlich ist das Auge ein sehr schlechtes optisches Gerät, von dem einmal Helmholtz gesagt haben soll, „daß niemand es einem Gerätebauer abnehmen würde". Das abbildende System des Auges besitzt so ziemlich alle *geometrisch-optischen Fehler*, vor allem eine erhebliche sphärische und chromatische Aberration, Astigmatismus, Koma, Bildverzeichnung und Bildfeldwölbung. Außerdem ist kein Teil des optischen Systems zum anderen genau zentriert, so daß sich auch nicht mit Sicherheit eine optische Achse des abbildenden Systems festlegen läßt. Die sphärische Aberration ist in den einzelnen Zonen sehr unterschiedlich, da die Hornhautoberfläche als der an der Bilderzeugung am stärksten beteiligte Faktor keine sphärische, ja nicht einmal eine rotationssymmetrische Form besitzt. Nach Ivanoff kann die *sphärische Aberration* zwischen dem zentralen und dem peripheren Hornhautbereich mehr als 4 dptr betragen. Die wichtigste Folge dieses Umstandes ist die sogenannte Nachtmyopie (vgl. Abb. 1), d. h. die Abhängigkeit der Refraktionseinstellung von der Gesichtsfeldleuchtdichte. Der in heller Tagesbeleuchtung Rechtsichtige ist beim Leuchtdichteniveau einer Kinoleinwand etwa 0,5, bei Mondlicht etwa 1,5 bis 2 dptr kurzsichtig. Die *chromatische Aberration* zwischen dem roten und dem blauen Ende des Spektrums beträgt nach den Messungen von Wald und Griffin, Ivanoff u. a. beinahe 2 dptr (vgl. Abb. 2). Nach den Untersuchungen der subjektiven Stigmatoskopie und den Arbeiten von Polack und Lapique stellt das rechtsichtige Auge bei Beleuchtung durch unbuntes Licht der Farbtemperatur von 6000° auf den chromatischen Brennpunkt der gelben Wellenlängen etwa im Bereich der Natriumlinie ein.

Auch der *Beugungseffekt* nimmt bei der Abbildung im Auge recht beträchtliche Ausmaße ein. Da die Pupille im hellen Tageslicht nur etwa eine lichte Weite von 1,5 bis 2 mm hat, die Länge des Augapfels aber rund 24 mm beträgt, ist in heller Tagesbeleuchtung die Öffnung des abbildenden Systems nicht allzu groß. Die theoretischen Rechnungen von Schober und Jung und die praktischen Erfahrungen von Arnulf und seinen Mitarbeitern haben

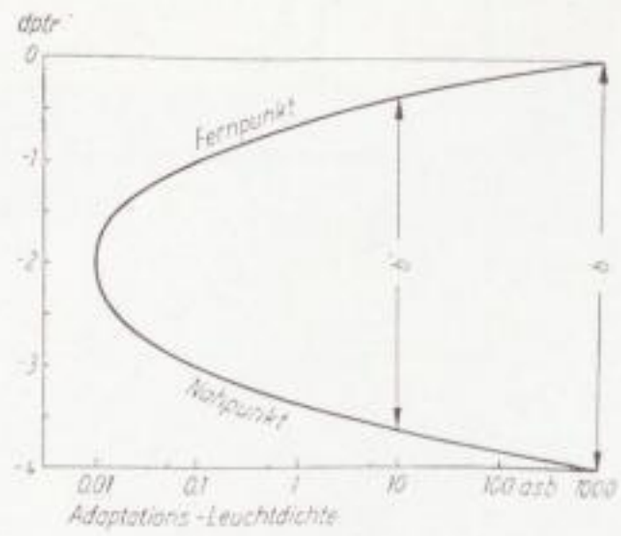


Abb. 1. Abhängigkeit der Lage des Fernpunktes und Nahpunktes sowie der Akkommodationsbreite von der Gesichtsfeldleuchtdichte (Adaptationsleuchtdichte) nach Palacios. Die Kurve gilt für den Rechtsichtigen.

ergeben, daß der Beugungsanteil und der geometrisch-optische Fehleranteil bei der Entstehung der Zerstreuungsfigur auf der Netzhaut bei einer Pupillenweite von rund 3,5 mm, also einer Pupillenweite, die guter künstlicher Beleuchtung entspricht, annähernd gleich groß sind.

Die unregelmäßige *Form der Zerstreuungsfigur* wird durch den immer vorhandenen unregelmäßigen und zum Teil auch durch den regelmäßigen Astigmatismus bewirkt. Der unregelmäßige Astigmatismus entsteht in erster Linie durch den histologischen Bau der Linse,

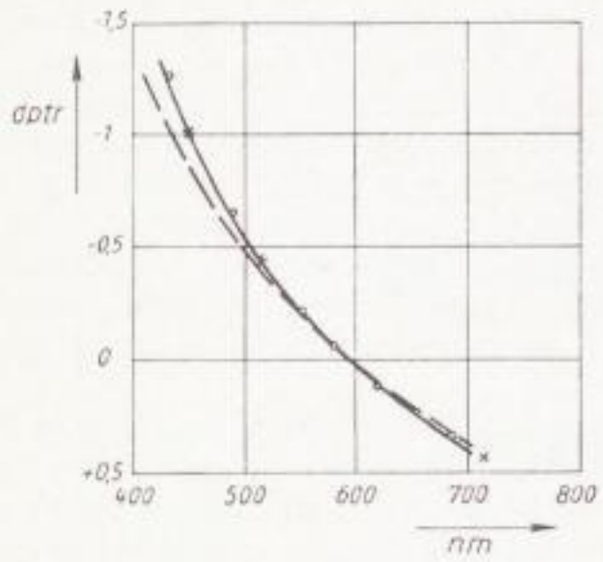


Abb. 2. Abhängigkeit der Refraktionseinstellung des rechtsichtigen Auges von der Wellenlänge des Lichtes, wenn Rechtsichtigkeit bei 589 nm (erfahrungsgemäßer Einstellpunkt) angenommen wird. Meßergebnisse von IVANOFF (ausgezogene) und von WALD und GRIFFIN (gestrichelte Kurve).

die sowohl eine Scheibchen- als auch eine Strahlenstruktur zeigt. Man könnte sie in einem groben, aber recht anschaulichen Bild als Kreuzung zwischen einer Zwiebel und einer Apfelsine bezeichnen. Der Scheibchenaufbau der Linse erzeugt vor allem die jede Abbildung eines Punktes begleitende Strahlenstruktur (Sternstrahlen!), die je nach dem Aufbau der Linse vom einen Beobachter als fünfzackiger,

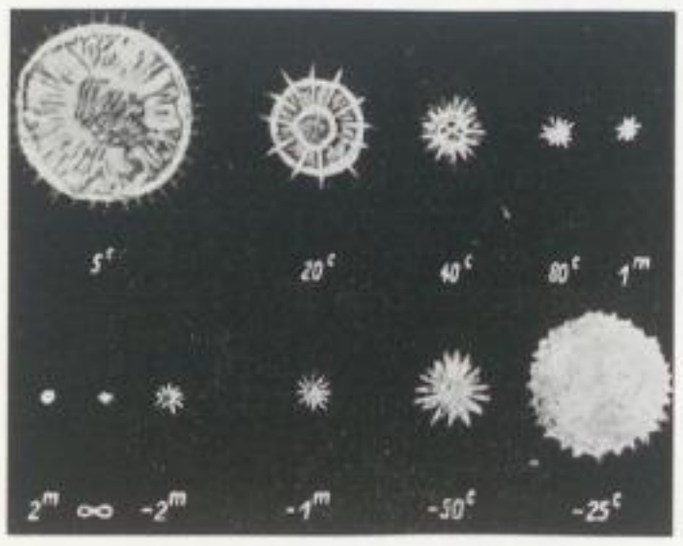


Abb. 3. Die Abbildung eines punktförmigen Objektes durch das rechtsichtige Auge bei Einstellung der Akkommodation auf verschiedene in cm bzw. in m angegebene Entfernungen. (Nach der Orginalzeichnung von O. MÜLLER-REE.) Man erkennt die charakteristischen Unterschiede in der Lichtverteilung der Zerstreuungsfigur, die bei hyperoper Einstellung ihr Maximum in einer ringförmigen Zone (5 cm bis 2 m) und bei myoper Einstellung im Zentrum besitzt (— 2,5 cm bis — 2 m). Abbildung aus H. SCHOBER, Das Sehen, Bd. 1, Fachbuchverlag Leipzig 1957.

vom anderen als sechs- oder mehrzackiger Stern gesehen wird (vgl. Abb. 3). Sie ist auch schuld an dem vor allem in der Zeit beginnender Alterssichtigkeit auftretenden mehrfachen Brennpunkt (monokulare Doppelbilder). Der reguläre Astigmatismus beträgt gewöhnlich zwischen 0,5 und 1,5 dptr in der Hornhaut mit lotrechter Achse, er wird allerdings gewöhnlich durch einen entgegengesetzten Linsenastigmatismus mit waagerechter Achse fast ganz oder zum überwiegenden Teil kompensiert.

Die ausgedehnte und unregelmäßig begrenzte Zerstreuungsfigur eines einzelnen Bildpunktes auf der Netzhaut überdeckt stets eine Fläche von mehreren Zapfen. Das Auflösungsvermögen der Netzhaut, vom Standpunkt der geometrischen Optik aus gesehen, würde daher wesentlich schlechter sein, als wir etwa durch die Messung der Sehschärfe feststellen. Die öfters vertretene Auffassung, daß die Auflösungsgrenze des Auges anatomisch durch die Zapfenstruktur bedingt sei — etwa in der Weise, daß zwischen zwei erregten Zapfen ein minder- oder unerregter liegen müsse — trifft in keiner Weise zu. Selbst bei bester Korrektur der geometrisch-optischen Fehler und bei der optimalen Pupillenweite von 3,5 mm bedeckt die Zerstreuungsfigur, welche ein einzelner Objektpunkt erzeugt, immer eine Fläche von 6 und mehr Netzhautzapfen. Das Auflösungsvermögen des Auges, die Sehschärfe und die Kontrastübertragungsfunktion sind immer physiologisch und nicht physikalisch oder anatomisch bestimmt.

Nach den ausführlichen und sorgfältig gemachten histologischen Untersuchungen der menschlichen Netzhaut, die 1941 von POLYAK in Chicago veröffentlicht worden sind, gewinnt man von der Netzhaut das folgende anatomische Bild (vgl. Abb. 4): Im innersten Bereich der Netzhautgrube, der Foveola (Sehwinkelausdehnung rund 1° 20′, Flächengröße rund 0,4 mm) findet man etwa 34 000 Zapfen. Die meisten zentral gelegenen unter ihnen, etwa 2500 auf

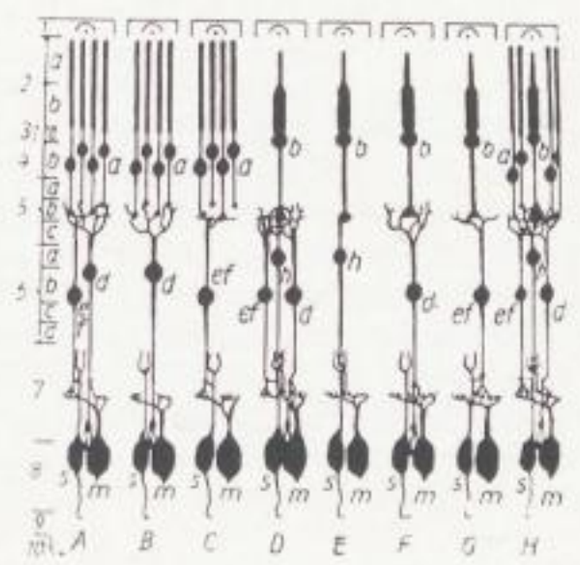


Abb. 4. Histologisches Bild der Netzhaut nach POLYAK.

An das Pigmentepithel (1) schließt sich das Niveau (2) der Zapfen und Stäbchen an. Dieses ist auf verschiedenen Wegen über das Niveau der Bipolarzellen (5 und 6) an das Niveau der Ganglienzellen (7 und 8) angeschlossen. Man betrachte zuerst den Fall A (reines Stäbchensystem). Hier werden mehrere Stäbchen von den Endfasern der Bipolarzellen (d, e und f) erfaßt. Die Niveaus werden in der älteren Literatur folgendermaßen bezeichnet: (1) Pigmentepithel, (2a) Zapfen- bzw. Stäbchen-Endglieder, (2b) Zapfen- bzw. Stäbchen-Fußteil, (3) äußere Grenzmembran, (4a und b) äußere und innere Zone der äußeren Körnerschicht, (5a, b und c) äußerer, mittlerer und innerer Teil der äußeren plexiformen Schicht, (6a, b, c und d) innere Körnerschicht, (7) innere plexiforme Schicht, (8) Ganglienzellenschicht, (9) Sehnervenfaserschicht, (10) innere Grenzmembran. Von den Bipolarzellen gehen Fasern zu den beiden Ganglienzellen (s) und (m). Im Falle B ist der Vorgang durch das Vorhandensein einer einzigen Bipolarzelle noch vereinfacht. Ähnliches gilt vom Fall C. Die Fälle D und E bis G stellen die Einzelschaltungsmöglichkeiten von Zapfen aus der Netzhautgrube über eine oder mehrere Bipolarzellen auf die zugehörigen Ganglienzellen der Netzhaut dar. Der Fall H zeigt die typische Schaltung in der Netzhautperipherie, die gemeinsame Erfassung von Stäbchen und Zapfen über Bipolarzellen durch das Ganglienzellensystem. Die Lichteinfallsrichtung ist von unten nach oben, die Schaltelemente werden also vor den Rezeptoren vom Licht erreicht.

einer Fläche von rund 0,1 mm = 20 Sehwinkelminuten, sind einzeln über noch später zu erwähnende Schaltschichten an je eine Sehnervenfaser geschaltet und stellen das Gebiet der höchsten Sehschärfe, den Bereich des eigentlichen *zentralen Sehens* dar. Je weiter man gegen die Peripherie der Netzhaut kommt, desto dicker und kürzer werden die Zapfen. Sie sind außerdem in wachsend größeren Gruppen parallel an eine Sehnervenfaser geschaltet und stets mit Stäbchen durchmischt, die an der gleichen Sehnervenfaser hängen. Das anteilsmäßige Verhältnis von Zapfen und Stäbchen in einem bestimmten Netzhautelement verschiebt sich also mit steigendem Abstand vom Gebiet des zentralen Sehens immer mehr zu Ungunsten der Zapfen. Jedoch gibt es auch in der Netzhautperipherie kein vollkommen zapfenfreies Gebiet, das etwa dem stäbchenfreien in der innersten Foveola entsprechen würde, genauso wie auch nur die Einzelschaltung von Zapfen, niemals aber die von Stäbchen, ja nicht einmal die Mehrfachschaltung von Stäbchen ohne gleichzeitige Mitschaltung von Zapfen an eine bestimmte Sehnervenfaser beobachtet werden kann. Diese Eigenart des Schaltsystems ist sowohl für die Erklärung der Abhängigkeit der Sehschärfe vom Netzhautort und Gesichtsfeldleuchtdichte als auch für die Unterschiede zwischen dem Sehen in heller Beleuchtung (Zapfensehen), in der Dämmerung (gemischtes Sehen) und in der Nacht (Stäbchensehen) bedeutsam.

Die Foveola bildet lediglich den inneren Teil der *Netzhautgrube* (Fovea centralis). Der früher dafür gebräuchliche, von SOEMMERING 1779 eingeführte Name „Gelber Fleck" (Macula lutea) sollte besser vermieden werden, da er zu Mißverständnissen Anlaß gibt. Seine Entstehung verdankt er dem Umstand, daß im Leichenauge, aber auch bei Betrachtung mit dem Augenspiegel in rotfreier Beleuchtung das Gebiet der Netzhautgrube auffallend gelb gefärbt erscheint. Die Bereiche des Gelben Flecks im Leichenauge und beim Spiegeln im lebenden Auge stimmen jedoch bei genauerer Beobachtung in ihrer Ausdehnung nicht überein und haben möglicherweise gar nichts miteinander zu tun. Einzelne erfahrene Beobachter (GULLSTRAND, NORDENSON u. a.) vertreten sogar die Ansicht, daß die Gelbfärbung der Netzhautgrube im lebenden Auge lediglich eine optische Täuschung bilde und nicht, wie man annehmen möchte, auf ein bestimmtes Pigment in diesem Netzhautbereich zurückzuführen sei.

Zwischen den Rezeptorzellen der Netzhaut, den Zapfen und Stäbchen, und den ihnen zugehörigen Sehnervenfasern liegen stets Schaltschichten (plexiforme Niveaus) aus verschiedenen Zellenarten (Bipolarzellen, Ganglienzellen, Horizontalzellen, amakrinen Zellen). Diese Schaltschichten regeln die Unterschiedsempfindlichkeit und Sehschärfe, den physiologischen Kontrast und die Farbempfindlichkeit. Sie sind also genauso bedeutsam wie die eigentlichen Rezeptoren, die Zapfen und Stäbchen. Über diese Schaltelemente schreibt POLYAK:

„Die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut haben Verbindung (sie bilden „Synapsen") mit den verschiedensten Arten von Bipolarzellen. Manche dieser Verbindungen gehören der multisynaptischen Art an, z. B. solche, die nach Art eines Staubwedels gebaut sind und die dazu dienen, den Impulsen von mehreren Stäbchen und Zapfen den Weg zu bahnen. In diesen Fällen gibt es keine ‚Eins-zu-Eins'-Beziehungen zwischen Zapfen oder Stäbchen und Bipolarzellen. Darüber hinaus gibt es aber Zwergbipolarzellen (midget bipolars), welche anscheinend dieser letztgenannten speziellen Bindung dienen. Diese Zellen haben einen einfachen Faserbau (Dendriten), welcher sich in der Nachbarschaft eines Zapfenfußes in eine größere Zahl von kurzen, dickeren und dünneren sekundären und tertiären Ästchen verzweigt, so daß dort ein kompaktes Faserbündel, ein Faserstrauß, entsteht, der wie eine halbgeöffnete Löwenzahnblüte aussieht; die Form dieses Faserbündels paßt genau auf den Zapfenfuß; dadurch entsteht eine monosynaptische (Einzel-) Verbindung zwischen einem Zapfen und dieser Type von Bipolarzellen in der Art, daß *ein* Zapfen nur mit *einer* dieser Zellen Verbindung erhält. In ähnlicher Weise konnten in der Netzhaut Zwergganglionzellen (midget ganglion cells) gefunden werden, welche in praktisch allen untersuchten Fällen eine individuelle Synapse mit dem Achsenzylinder einer bestimmten Zwergbipolarzelle bilden, so daß jedes winzige Bäumchen der letzteren durch den Baumgipfel des Dendriten (Faserbaum) einer einzelnen Zwergganglionzelle eingehüllt wird, wobei der Baumgipfel annähernd dieselbe Gestalt hat wie die Bipolarzelle. Allerdings gibt es, streng gesprochen, keine absolute ‚Eins-zu-Eins'-Koppelung zwischen Zapfen, Bipolar- und Ganglienzellen, da selbst im Zentralgebiet der Netzhautgrube neben den Zwergbipolarzellen auch diffuse Bipolarzellen zu finden sind. Ähnlich wie die Zwergbipolarzelle eine ‚private' Synapse mit der Zwergganglionzelle bildet, hat sie auch Kontakt mit den verschiedenen Arten anderer Bipolarzellen. Die ‚Eins-zu-Eins'-Beziehung besteht nur zur Wirksamkeit einer speziellen synaptischen Verbindung zwischen einem Zapfen und seiner ihm zugehörigen Zwergbipolar- und Ganglionzelle. Ein Teil der in einem Zapfen hervorgerufenen Impulse läuft immer in Nebenkanäle (diffuse Bipolar-, horizontale und amakrine Zellen), nur der allgemeine oder spezifische Einfluß des Zapfens scheint auf den monosynaptischen Kanal beschränkt zu sein."

Die histologischen Darstellungen von POLYAK haben auf die moderne Entwicklung der physiologischen Optik und auf die Erkenntnis der bestehenden Zusammenhänge einen entscheidenden Einfluß ausgeübt. Sie zeigen vor allem, daß die in der älteren physiologischen Optik bevorzugt angenommene Einzelverbindung zwischen einem Zapfen, seiner zugehörigen Schaltzelle und einer Sehnervenfaser nur einen seltenen Ausnahmefall darstellt. Fast immer sind mehrere Zapfen *und* Stäbchen in wechselnder Zahl an eine Sehnervenfaser gekoppelt und selbst dieses „Empfindungselement der Netzhaut" hat über die horizontalen und amakrinen Zellen ständig Verbindung zu den übrigen Netzhautgebieten. Man darf daher auch niemals ein Objektdetail oder irgendeinen im Gesichtsbereich auftretenden Sinnesreiz für sich allein beurteilen. Man muß ihn stets in Beziehung zu den Vorgängen im gesamten Gesichtsfeld setzen. Der alte experimentelle Brauch, Einzelreize zu betrachten und die Gesetzmäßigkeiten der physiologischen Optik mit Hilfe von Einzelreizen zu erarbeiten, erscheint unter diesen Gesichtspunkten als sehr fragwürdig. Was immer in einem „Infeld" passiert, gleichgültig, ob das Infeld in seiner Leuchtdichte einheitlich oder uneinheitlich, ob es klein oder groß ist, immer wird auch das „Umfeld" am Zustandekommen der Empfindung, an der Größe und Art der Schwelle usw. einen wesentlichen Anteil haben. Dabei ist unter dem Begriff „Umfeld" nicht allein die nähere Umgebung des „Infeldes", sondern das gesamte gleichzeitig erfaßbare Gesichtsfeld, unter Umständen auch noch das mit Hilfe von Blickbewegungen erfaßbare Umblickfeld zu verstehen. Das Gesichtsfeld des menschlichen Auges ist bekanntlich sehr ausgedehnt. Es erfaßt nach der Schläfenseite einen Winkelbereich von mehr als 90°, nach oben und nach unten etwa 50°. Insgesamt können wir also ohne Blickbewegungen beim Blick horizontal geradeaus mit unseren Augen in horizontaler Richtung einen Winkelbereich von über 180° erfassen. Wie bedeutungsvoll gerade dieser Umstand für die Wahrnehmung von Leuchtdichteunterschieden ist, können wir aus den praktischen Erfahrungen über die subjektive Kontrastempfindlichkeit, die subjektive Bildschärfe und die Detailerkennbarkeit im Kino und beim Fernsehen erkennen. Der Vorteil der Breitwandfilme liegt in erster Linie darin, daß sie einen wesentlich größeren Anteil des Gesichtsfeldes erfassen als die Normalkinowand oder gar der Fernsehschirm. Während bei der am weitesten getriebenen Breitwandprojektion, dem Todd-A.-O.-Verfahren,

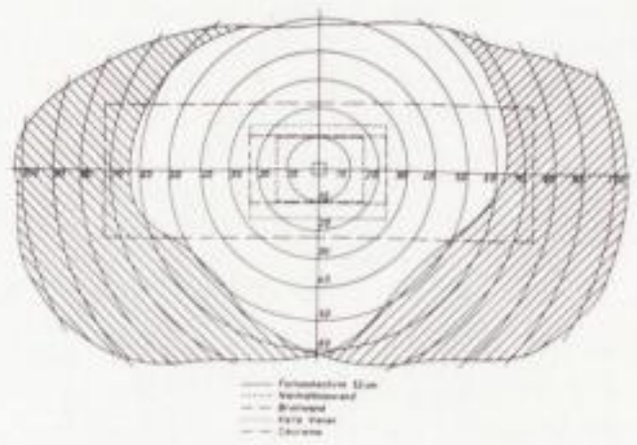


Abb. 5. Ausdehnung des Gesichtsfeldes und relativer Anteil von Kino- und Fernsehschirmen am gesamten Gesichtsfeld. Die äußeren schraffierten Gesichtsfeldteile werden immer nur von einem Auge erfaßt.

durch den Bildschirm 78% des gesamten Gesichtsfeldes eingenommen werden, sind es bei der Normalkinowand nur etwa 15 und beim Fernsehschirm sogar nur rund 6%. Auf diese Fragen wird noch anläßlich der Besprechung der Unterschiedsempfindlichkeit zurückzugreifen sein.

Die *absolute Lichtempfindlichkeit des Auges* ist von jeher im Mittelpunkt des Interesses der physiologischen Optik gestanden, da sie die einfachste Grundfunktion darstellt. Aus übereinstimmenden Messungen sehr vieler Beobachter geht hervor, daß ein geübter Beobachter bei maximaler Dunkeladaptation (mindestens 45 Minuten Aufenthalt in einem lichtlosen Raum), wenn er rechtsichtig und nicht über 50 Jahre alt ist, punktförmige etwa 0,1 s dauernde Reize der Wellenlänge 512 nm (Empfindlichkeitsmaximum der Netzhautstäbchen) in einem etwa 12 bis 15° seitlich vom Fixierpunkt gelegenen Netzhautbereich erkennen kann, sobald sie eine Hornhautbeleuchtungsstärke von 10^{-9} lx erzeugen. Unter Berücksichtigung der Größe des mechanischen Lichtäquivalents (0,00147 W/lm) und der Größe der Pupillenfläche (44 mm²) erhält man für die Schwellenleuchtdichte den Wert von $3{,}6 \cdot 10^{-10}$ erg/sec. Aus der Größe des Lichtquants bei 512 nm, die $4{,}31 \cdot 10^{-12}$ erg beträgt, ersieht man, daß zur Erreichung der Empfindungsschwelle pro Sekunde rund 80 Lichtquanten die Hornhaut des Beobachters treffen müssen. Berücksichtigt man die Lichtverluste durch Reflexion an den Grenzflächen von Hornhaut und Linse, sowie durch Streuung und Absorption im Augeninnern und bedenkt, daß der für die Lichtempfindlichkeit der Netzhaut verantwortliche Sehpurpur nur 13% des gesamten Netzhautvolumens einnimmt, so folgt aus der experimentell gewonnenen Mindesthornhautbeleuchtungsstärke von 80 Lichtquanten eine Netzhautbeleuchtungsstärke zwischen 2 und 10 Lichtquanten. Etwa zu den gleichen Zahlenwerten gelangt man auf dem Wege der quantenbiologischen Statistik. Man verwendet dazu eine entsprechende Erweiterung des Poissonschen Wahrscheinlichkeitsgesetzes in Form der Blau-Altenburger-Gleichung. Trägt man die Wahrscheinlichkeit einer Wahrnehmung als Funktion der dafür benötigten Reizenergie (bei der optischen Wahrnehmung der Netzhautbeleuchtungsstärke) in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf, so erhält man S-förmige Kurven in der Art der Gradationskurven der Photographie, deren Steilheit die Zahl der benötigten Quanten kennzeichnet. Auch aus diesen Kurven geht hervor, daß für die Wahrnehmung eines Lichtreizes mindestens 2, wahrscheinlich aber noch mehr Quanten erforderlich sind. Nach dem Blau-Altenburger-Gesetz kann mit Sicherheit entschieden werden, daß zumindest zwei Lichtquanten für die Schwellenwahrnehmung notwendig sind, weil die Einquantenkurve in dieser Darstellung eine grundsätzlich andere und von den experimentellen Ergebnissen einwandfrei abweichende Form hat. Die absolute Empfindungsschwelle des menschlichen Auges liegt im übrigen in der gleichen Größenordnung wie die absolute Empfindungsschwelle des Ohres.

Die weitaus wichtigste Sehfunktion ist die *relative Unterschiedsempfindlichkeit*, vielfach *photometrische Kontrastwahrnehmung* genannt. Sie wird durch die Differenz zwischen zwei benachbarten Leuchtdichten im Gesichtsfeld im Verhältnis zu ihrer Summe, also durch die Formel

$$K = \frac{B_1 - B_2}{B_1 + B_2} \cdot 100$$

definiert. Der photometrische Kontrast gehorcht dem sogenannten erweiterten Weber-Fechnerschen Gesetz, dessen Zusammenhänge in Abbildung 6 dargestellt sind. Die ursprüngliche Behauptung von Weber und Fechner, daß der photometrische Kontrast im Schwellenbereich unabhängig von den beiden Leuchtdichten B_1 und B_2 und von der Durchschnittsleuchtdichte im Gesichtsfeld konstant sei und etwa 1 bis 2% betrage, entspricht also keineswegs den Tatsachen. Dieses vereinfachte Weber-Fechnersche Gesetz gilt höchstens im engen Beleuchtungsbereich zwischen guter künstlicher und einer durchschnittlichen natürlichen Beleuchtung, also im Bereich zwischen 200 und 7000 asb. Alle auf das sogenannte logarithmische Kontrastgesetz, also auf die Konstanz der relativen Unterschiedsschwelle aufgebauten Spekulationen und die diesbezüglichen Rechenformeln, wie sie etwa in der Theorie von A. Kühl aufgestellt worden sind, haben daher in der Wirklichkeit einen sehr beschränkten Anwendungsbereich.

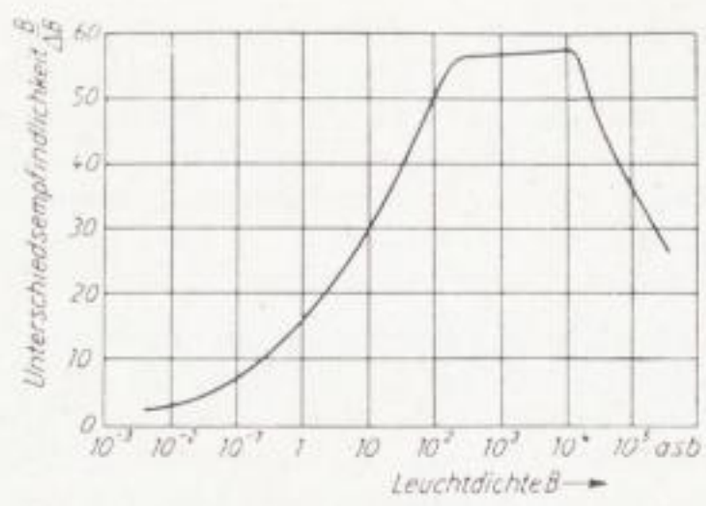


Abb. 6. Abhängigkeit der relativen photometrischen Empfindlichkeit (Kehrwert des photometrischen Kontrastes) von der Gesichtsfeldleuchtdichte. Die Kurve gibt das sogenannte erweiterte Weber-Fechnersche Gesetz nach König und Brodhun wieder.

Eine der größten Schwierigkeiten für die Aufstellung von Gesetzmäßigkeiten für die relative Unterschiedsschwelle liegt aber in der schon weiter oben erwähnten Tatsache, daß jeder Netzhautbereich Rückwirkungen auf die Empfindlichkeit der anderen Netzhautgebiete hat. Damit wird die relative Unterschiedsempfindlichkeit des Auges und die photometrische Kontrastfunktion eine Funktion der Umfeldleuchtdichte im gesamten Gesichtsfeld und des bei der Wahrnehmung bestehenden Adaptationszustandes des Auges. Nach den sehr ausführlichen experimentellen Untersuchungen von Schumacher und Blackwell erreicht die relative Unterschiedsempfindlichkeit im Durchschnitt dann ein Maximum, wenn die Adaptationsleuchtdichte und die Durchschnittsleuchtdichte im Gesichtsfeld nicht sehr stark vom Mittelwert zwischen B_1 und B_2 abweichen, wenn also das Umfeld ungefähr die gleiche Leuchtdichte wie das Infeld hat. Bei optischen Instrumenten wird damit die photometrische Kontrastempfindlichkeit eine Funktion des Instrumentengesichtsfeldes. Die Angabe von Kontrastfunktionen oder Kontrastübertragungsfunktionen hat daher hinsichtlich des Auges nur dann einen Sinn, wenn diese Funktionen unter Berücksichtigung aller jener Umstände gemessen werden, die sie entscheidend beeinflussen. Dazu gehören in erster Linie der Adaptationszustand, der Anteil des physiologischen Gesichtsfeldes am Instrumentengesichtsfeld und die Ausdehnung von Infeld und Umfeld.

Das *Auflösungsvermögen des Auges* ist neben der Unterschiedsempfindlichkeit die wichtigste Sehfunktion. Es hängt mit der letzteren eng zusammen, wird aber auch noch durch andere Momente wesentlich bestimmt. Man könnte unter Auflösungsvermögen des Auges zunächst die absolute Trennschärfe, das „minimum separabile" verstehen. Nach dem Rayleighschen Kriterium muß zur Auflösung eines Doppelpunktes zwischen zwei erregten Empfindungselementen der Netzhaut ein unerregtes oder zumindest mindererregtes Empfindungselement liegen. Es müssen also zwei gleichhelle Punkte dann noch gerade voneinander trennbar sein, wenn ihr Abstand dem Radius des Zerstreuungsscheibchens (im wesentlichen des Beugungsscheibchens) entspricht. Das wären nach den gemessenen und errechneten Daten ungefähr 20″ im Sehwinkel. Da ein solcher Sehwinkel mit dem Durchmesser eines Einzelzapfens im Bereich der obersten Netzhautgrube annähernd identisch ist, stellt er die „anatomische Grenze des Auflösungsvermögens" dar. Diese hohe Trennschärfe für zwei benachbarte Punkte wird allerdings in der Praxis niemals erreicht, selbst dann nicht, wenn man dazu Personen nimmt, deren Augen dem Idealzustand möglichst nahekommen, also eine möglichst gute Zentrierung ihres optischen Abbildungssystems und ein Minimum von Unregelmäßigkeiten in der Struktur der abbildenden Teile besitzen. Auch bei Zuhilfenahme künstlicher Pupillen (Einhaltung des Pupillendurchmessers von 3 mm) und genauer Einstellung des Adaptationszustandes, der Gesichtfeldleuchtdichte und des photometrischen Kontrastes werden in der Praxis für die Trennschärfe von zwei Einzelpunkten selten bessere Werte als 90″ gefunden. Sobald man aber nicht nur zwei Punkte, sondern zwei ausgedehnte Objekte, z. B. Linien oder andere Strichfiguren, voneinander trennen will, steigt die Sehschärfe sofort an. Sie liegt dann in diesem Falle für den rechtsichtigen Beobachter zwischen 40 und

60″. Die Noniussehschärfe und die Erkennbarkeit einer einzelnen Linie benötigt noch wesentlich kleinere Sehwinkel, die bei der Noniussehschärfe zwischen 5 und 10″, beim Erkennen einer schwarzen Linie auf hellem Untergerund bei etwa 0,5″ liegen. Unter Noniussehschärfe wird die seitliche Abweichung von zwei übereinanderstehenden Linien verstanden, die in einer geradlinigen Verbindung (Ablesung eines Noniusmaßstabes) liegen sollten.

Die ursprüngliche Begründung des Rayleighschen Kriteriums, daß zwischen der Größe des Einzelzapfens und der Trennschärfe des Auges ein exakter Zusammenhang bestehe, läßt sich heute weder aus anatomischen noch aus experimetellen Gründen aufrecht erhalten. Ein solcher Zusammenhang hätte zur Voraussetzung, daß zu jedem einzelnen Zapfen der Netzhautgrube auch wirklich eine eigene, von ihren Nachbarn getrennte Faser der Sehleitung gehört, die als Einzelfaser bis in die Hinterhaupthirnrinde weitergeführt ist. Nach den Ergebnissen der Netzhauthistologie sind aber selbst die Zapfen des inneren Teiles der Netzhautgrube und ihre Sehnervenfasern durch horizonale und amakrine Zellen untereinander verbunden. Diese Verbindung ist besonders bei herabgesetzter Beleuchtung praktisch bedeutsam und bewirkt weitgehend die Leuchtdichteabhängigkeit der Sehschärfe. Eine Trennung der einzelnen Leitungsfasern im innersten Teil der Netzhautgrube ist nur bei sehr hohem Beleuchtungsniveau (zwischen etwa 200 und 7000 asb oder bei Lähmung der nervösen Verbindungen durch Strychnin in einem sehr begrenzten Ausmaß gegeben. (Bekanntlich kann man durch Strychningaben, in geringer Menge in die Schläfengegend gespritzt, eine gewisse Erhöhung der Sehschärfe erreichen). Da also durchwegs, besonders aber bei niedrigem Beleuchtungsniveau, neben dem Einzelzapfen auch seine Nachbarn und neben dem einzelnen aus mehreren Zapfen und Stäbchen zusammengesetzten an einer Sehnervenfaser hängenden Empfindungselement der Netzhaut auch seine Nachbarn in den Zusammenhang einbezogen werden müssen, ist es bedeutsam, nicht nur die Ausdehnung, sondern auch die Art der Lichtverteilung in der Zerstreuungsfigur zu betrachten. Diese wird einmal durch physikalische Umstände, nämlich die Lichtbeugung an den Pupillenrändern und die optische Abbildungsgüte der brechenden Augenmedien, zum anderen aber auch durch die physiologische Erregbarkeit der einzelnen Netzhautteile und damit den physiologischen Kontrast (Machsche Kontrastfigur) bestimmt. Würde man voraussetzen, daß lediglich die Beugung die Lichtverteilung in der Zerstreuungsfigur regelt, was allenfalls bei einem optischen Instrument, niemals aber beim menschlichen Auge erlaubt ist, so kann man ohne Schwierigkeiten den Lichtabfall vom Zentrum zum Rande des Beugungsscheibchens berechnen. Liegen zwei leuchtende Objektpunkte so nahe nebeneinander, daß entsprechend dem Rayleighschen Kriterium der Rand des einen Beugungsscheibchens mit dem Mittelpunkt des anderen zusammenfällt, so entsteht das bekannte charakteristische, aus zwei Glockenkurven zusammengesetzte Bild der Lichtverteilung. Es enthält zwei Maxima der Netzhautbeleuchtungsstärke und zwischen ihnen eine sattelförmige Helligkeitsabnahme. Im Sattel fällt die Beleuchtungsstärke auf etwa 75 bis 80% der beiden Maxima ab. Unter der Voraussetzung, daß das eine Maximum auf den ersten, das zweite auf den dritten und der mittlere Sattel auf einen dazwischenliegenden mindergereizten Zapfen (Empfindungselement) fallen würde, müßte das Dreizapfen-System imstande sein, eine Leuchtdichteverringerung zu registrieren und damit die Existenz von zwei voneinander getrennten Lichtpunkten festzustellen. In diesem Falle wäre die Trennschärfe eine reine Folge der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges, von der auf den vorgehenden Seiten ausführlich gesprochen wurde. Für derartig kleine Punktreize reicht aber nach dem erweiterten Weber-Fechnerschen Gesetz der bestehende Beleuchtungsunterschied nicht aus. Es kann schon aus diesem Grunde die Trennschärfe keine reine Funktion der Unterschiedsempfindlichkeit sein, wie der amerikanische Ophthalmologe und Sinnesphysiologe Ogle neuerdings wieder deutlich ausgeführt hat. Mit Hilfe von Messungen, die er unter den größten Vorsichtsmaßregeln gemacht hat, konnte er zeigen, daß nicht der Unterschied zwischen der Beleuchtungsstärke in den beiden Maxima und im Sattel, also nicht der Beleuchtungsunterschied des mindergereizten Zapfens zu seinen Nachbarn, sondern lediglich der Unterschied zwischen jedem einzelnen Zapfen und dem nichtgereizten Netzhautteil für die Trennschärfe bedeutsam ist. Für das Auflösungsvermögen des Auges ist die gesamte Zerstreuungsfigur auf der Netzhaut und damit das Aussehen des Bildrandes der Zerstreuungsfigur maßgebend. Es ist also am Zustandekommen der Trennschärfe niemals ein Dreizapfen- oder Dreisehelementebereich- sondern eine viel größere Netzhautfläche beteiligt. Ogle drückt das etwa folgendermaßen aus: Wenn man den Unterschied zwischen einem einzelnen Punkt und einem Doppelpunkt erkennt, so liegt das nicht etwa daran, daß man zwischen zwei hellen Punkten eine dunklere Trennstelle sieht, sondern daß vielmehr die Zerstreuungsfigur des Doppelpunktsystems an der Trennung eine charakteristische Einschnürung an ihrem Rande erleidet. Nach den experimentellen Ergebnissen von Berger und Buchthal wird das Auflösungsvermögen des Auges für zwei benachbarte punktförmige selbstleuchtende Objekte bei Betrachtung gegen einen dunklen Hintergrund (Umfeld) mit zunehmender Leuchtdichte der beiden Objekte immer geringer. Es wachsen nämlich in diesem Falle nicht nur die wahrnehmbaren Durchmesser der beiden Zerstreuungsfiguren an, es wird auch ihre Randbegrenzung (Sternstrahlen) immer unübersichtlicher. Nach Fiorentini steigt in entsprechender Weise das Auflösungsvermögen des Auges bei konstant gehaltener Leuchtdichte der beiden Objektpunkte mit der Leuchtdichte des Umfeldes an. Nach den bisherigen Erfahrungen wird unter sonst konstant gehaltenen und optimalen Verhältnissen das höchste Auflösungsvermögen bei Leuchtdichteverhältnissen zwischen Objekt und Umfeld von 50 : 1 bis 100 : 1 erreicht. Mit diesen im Labor gemachten Erfahrungen stimmen auch die der Astronomen gut überein. Bei schwach leuchtenden Doppelsternen wird beispielsweise die Grenze von 50 : 1 häufig unterschritten, wenn beispielsweise der Nachthimmel durch Stadtdunst usw. aufgehellt ist. Dann werden sie schlechter voneinander trennbar. Umgekehrt ist das Leuchtdichteverhältnis zwischen Objekt und Umfeld bei sehr hellen Sternen (1. und 2. Größenklasse) zu groß, so daß sie viel schlechter voneinander trennbar sind als etwa Doppelsterne der 3. bis 5. Größenklasse.

Bei ausgedehnten Objekten und vor allem bei Strichgittern und Streifenmustern (Foucaultsche oder Guillerysche Sehzeichen, aber auch bei den Goldmannschen Schachbrettmustern) spielt neben dem photometrischen Kontrast, nämlich dem relativen Leuchtdichteunterschied zwischen Infeld und Umfeld, der physiologische Kontrast eine wichtige Rolle. Unter *physiologischem Kontrast* versteht man eine aktive Hemmwirkung erregter Netzhautbereiche auf ihre Nachbarschaft, die dazu führt, daß die Nachbarsehelemente eines stark gereizten Sehelementes unempfindlicher werden. Der physiologische Kontrast bewirkt die hohe Sehschärfe des Auges bei der doch immerhin schlechten geometrisch-optischen Abbildung. Er erreicht, daß die Netzhaut örtlich ihre (mit den Worten des Photographen gesprochen:) Gradation verändert und nach Bedarf steiler oder flacher macht. Vom Standpunkt der Filtertheorie der optischen Abbildung würde das bedeuten, daß durch den physiologischen Kontrast die Bewertung der höheren oder niedrigeren Raumfrequenzen entscheidend verändert werden kann. Beobachtet man beispielsweise eine Kante, die eine helle Fläche von einer dunklen Umgebung abgrenzt, so findet man nicht ein stufenförmiges Ansteigen der Leuchtdichte, sondern einen etwas eigenartigen, als *Machschen Kontraststreifen* bezeichneten Verlauf der Helligkeit. Die Helligkeit steigt weder sprunghaft noch entsprechend der Beugung am Bildrand in einer schwach gekrümmten Gradationskurve an, man findet vielmehr zwischen den beiden Leuchtdichtebereichen einen hellen und einen dunklen Streifen. Das Machsche Kontrastphänomen spielt begreiflicherweise bei allen Fragen, die mit der Detailerkennbarkeit und dem Auflösungsvermögen des Auges zusammenhängen, eine wichtige Rolle. Es ist daher auch in den letzten Jahren wieder zum Gegenstand der Forschung, besonders im Bereich des Optischen Instituts in Florenz (Ronchi, Fiorentini u. a.) geworden. Da der Machsche Kontraststreifen einen deutlichen Unterschied zwischen dem lichttechnisch meßbaren Leuchtdichteverlauf und dem subjektiven Helligkeitseindruck offenbart, ist es nicht leicht, zu einem allgemein gültigen Urteil über sein genaues Aussehen und die dabei bestehenden quantitativen Verhältnisse zu gelangen.

Selbst wenn man alle Kontrastphänomene im Sinne des aktiven physiologischen Kontrastes und nicht allein den oben formelmäßig festgelegten photometrischen Kontrast bei der Definition des Auflösungsvermögens und der Sehschärfe berücksichtigen würde, fehlt

SLUB
Wir führen Wissen.

noch immer eine wichtige und immer vorhandene Eigenschaft des Gesichtssinnes, nämlich die *Formenempfindlichkeit*. Das „minimum separabile" ist niemals ohne „minimum legibile" oder „minimum cognobile" zu erfassen. Das haben bereits die Sinnesphysiologen und Augenärzte um die Jahrhundertwende, allen voran C. v. Hess, E. Landolt und E. Pergens klar erkannt, als sie den Versuch machten, ein *Internationales Normsehzeichen* zu definieren, das von allen Schwierigkeiten, die der Formensinn in das Problem hineinbringt, frei sein sollte. Das Ergebnis aller dieser Überlegungen war bekanntlich der *Landoltring*, ein ringförmiges geschlitztes Sehzeichen mit quadratischer Schlitzöffnung, wobei die Strichdicke und damit auch die Schlitzweite den fünften Teil des Außendurchmessers des Ringes beträgt. Die Schlitze sind bei den einzelnen Ringproben verschieden gelagert, der Prüfling soll nach Uhrzeit die Schlitzlage angeben. Die Praxis hat gezeigt, daß nicht alle Schlitzlagen untereinander gleichwertig sind. Die Lagen 3, 6, 9 und 12 Uhr werden wesentlich leichter erkannt als die schrägen Lagen 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 und 11. Nach den experimentellen Untersuchungen des Verfassers ist das nicht etwa eine Folge des Hornhaut- und Linsenastigmatismus, sondern der mit der Wahrnehmung eines optischen Reizes untrennbar verbundenen Richtungslokalisation. Bei den üblichen Sehproben der Augenärzte (Ziffern oder Buchstaben) herrscht begreiflicherweise der Formensinn über alle anderen Empfindungsmerkmale vor. In den letzten Jahren hat man vor allem unter dem Einfluß der Arbeiten von Goldmann und französischer Forscher Rasterteste (Strichraster und Punktraster) in Form der Foucaultschen Miren und der Goldmannschen Schachbrettmuster (vgl. Abb. 7) als Ersatz für den Landoltring empfohlen. Es ist aber noch keineswegs entschieden, ob sie gegen-

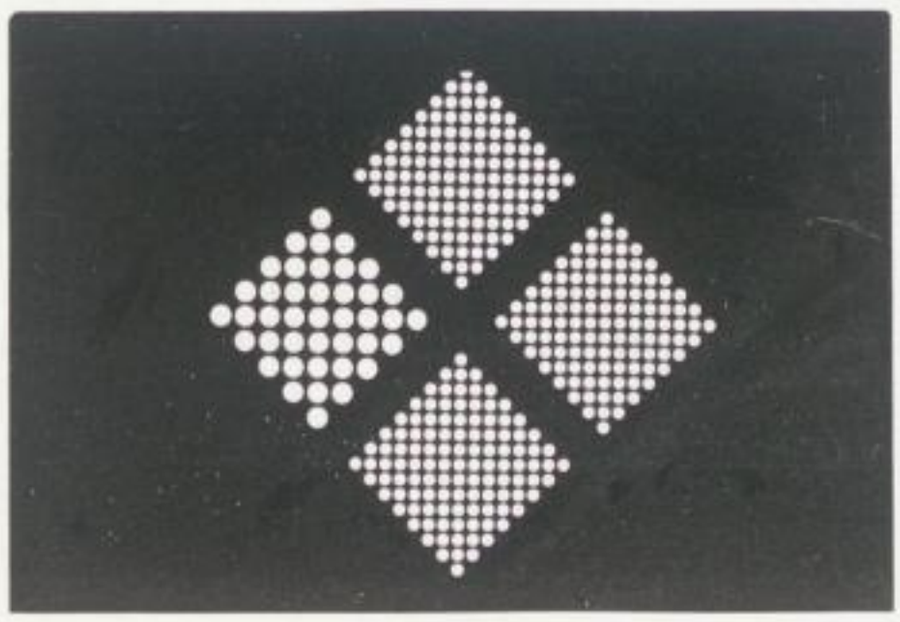


Abb. 7. Das Goldmannsche Schachbrettmuster als Test für das Auflösungsvermögen des Auges.

über diesem einen wirklichen Fortschritt darstellen. Die Sätze, welche der bekannte und erfahrene Ophthalmologe A. Brückner 1932 in seinem „Kurzen Handbuch der Augenheilkunde" schrieb, haben auch heute noch nicht ihre Bedeutung verloren. Er sagt: „Es kommt für gewöhnlich bei der klinischen Prüfung der Sehschärfe auf eine Untersuchung des Formensinnes heraus. Der Versuch, diesen bei der Prüfung auszuschalten, etwa durch Anwendung des Landoltschen Ringes, wie es der Autor dieses Sehzeichens glaubte, ist als nicht geglückt zu bezeichnen; die Annahme, daß bei der Erkennung der Lücke des Landoltschen Ringes ausschließlich das Minimum separabile in Betracht komme, trifft nicht zu. Auch die internationale Kommission, die 1905 sich mit dieser Frage befaßte, hat bewußt bei der Empfehlung ihrer Sehprobentafeln, insbesondere auch des von ihr herangezogenen Landoltschen Ringes von dieser Schwellenbestimmung Abstand genommen, weil auch hierbei der Formensinn der ausschlaggebende Faktor ist. Alle Versuche, die neuerdings z. B. in der Schweiz augenscheinlich unter Nichtberücksichtigung der älteren Forschungen auf diesem Gebiet darauf ausgehen, eine klinische, quantitativ exakte Methode zu gewinnen, scheinen von vorneherein aussichtslos. Wir müssen daran festhalten, daß die klinische Prüfung der Sehschärfe mit den üblichen Sehzeichen im wissenschaftlichen Sinne durchaus ungenau ist, da in das Resultat eine große Zahl von Faktoren eingehen, die im Einzelfalle sich gar nicht übersehen lassen."

Unter dem Begriff der Sehschärfe werden in der wissenschaftlichen Literatur und der augenärztlichen und augenoptischen Praxis sehr viele Funktionen des Gesichtssinnes zusammengefaßt, die eigentlich streng voneinander unterschieden werden sollten. Die wichtigsten unter ihnen sind:

1. *Die einfache Trennschärfe*, also die Fähigkeit des Auges, benachbarte Punkte oder Striche voneinander zu trennen. Für sie ist in erster Linie der photometrische und physiologische Kontrast, in einer nicht zu vernachlässigenden Weise aber auch der Formensinn, verantwortlich.

2. *Die Erkennbarkeit von Einzelzeichen*, zu der beispielsweise die üblichen Methoden der augenärztlichen Sehprüftafeln gehören. Sie hängt zwar grundsätzlich von den gleichen Umständen ab wie die einfache Trennschärfe, jedoch ist der Einfluß des Formensinnes bei ihr weitaus stärker als bei der ersteren.

3. *Die Noniussehschärfe* als Fähigkeit, die seitliche Verschiebung von zwei in nahezu gerader Fortsetzung übereinander stehenden Strichen zu erkennen. Die Noniussehschärfe beträgt beim rechtsichtigen Durchschnittsbeobachter etwa 5—8 Winkelsekunden und ist damit um beinahe den Faktor 10 besser als die beiden zuerst genannten Funktionen. Interessanterweise stimmt sie in ihrem Wert und in ihrer Abhängigkeit von Nebenbedingungen genau mit der räumlichen beidäugigen *Tiefensehschärfe* überein.

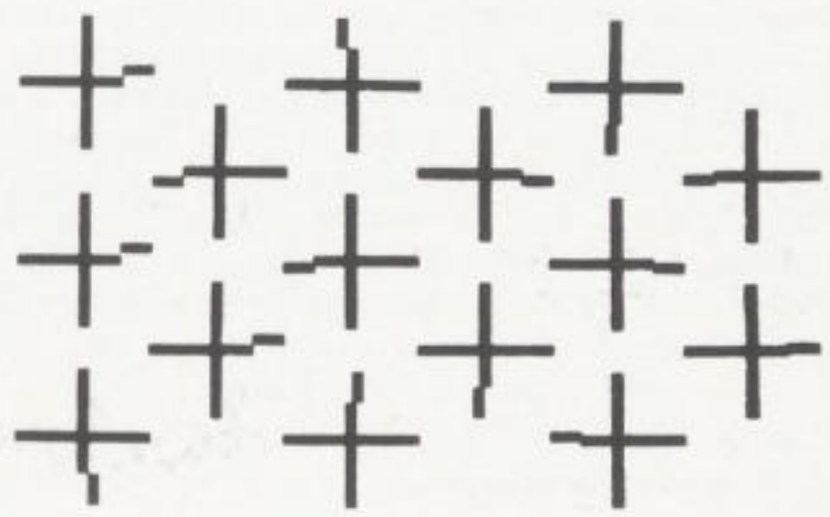


Abb. 8.
Teste für die Ermittlung der Noniussehschärfe.

Diese Tatsache wird üblicherweise als Beweis dafür angesehen, daß das binokulare räumliche Sehen auf der seitlichen Verschiebung der Netzhautbilder in beiden Augen, der sogenannten Querdisparation, beruht.

4. *Das Lesevermögen.* Diese Funktion hat eigentlich mit den unter den Punkten 1 bis 3 genannten Seheigenschaften recht wenig zu tun. Sie hängt auch viel stärker von psychologischen Momenten, z. B. der Auffassungsgabe, als von Kontrast und Formensinn ab. Das kann man schon an der Schwierigkeit erkennen, die auftritt, wenn man in einem Schriftsatz nach Druckfehlern suchen will. Das Lesevermögen ist leider noch immer aus historischen Gründen mit dem Begriff der Sehschärfe und des Auflösungsvermögens vermischt, weil die Augenärzte ursprünglich als Nahbrillen lediglich „Lesebrillen" für den Feierabend verschrieben. Auch heute noch wird vielfach nur in der Ferne mit Einzelsehzeichen die Trennschärfe und der Formensinn bestimmt, während man in der Nähe noch immer die alten Leseproben benutzt, obwohl die Nahbrille heute längst keine Lesebrille, sondern die wichtigste Arbeitsbrille geworden ist.

Faßt man die über den Kontrast und das Auflösungsvermögen des Auges bzw. den Formensinn Gesagte zusammen, so ergibt sich ungefähr das folgende Bild:

Für die Erkennbarkeit eines Details ist sowohl der Kontrast als auch die Sehwinkelgröße maßgebend, unter der das Detail gesehen wird. An der Wahrnehmungsgrenze ist annähernd das Produkt aus dem photometrischen Kontrast und der Sehwinkelgröße in Minuten konstant, so daß man also zur Wahrnehmung kleiner

Details großen Kontrast benötigt und umgekehrt bei großen Details der photometrische Kontrast geringer sein kann. Die durch dieses Produkt bestimmte Konstante hängt aber noch entscheidend von der Adaptationsleuchtdichte und von der Ausfüllung des Gesichtsfeldes ab. Bei hoher mittlerer Gesichtsfeldleuchtdichte ist die Detailwahrnehmbarkeit wesentlich besser als bei niedriger (erweitertes Weber-Fechnersches Gesetz!) und ebenso können wenige in einem gleichmäßigen Gesichtsfeld vorhandene Details leichter erkannt werden als solche in einem sehr ungleichmäßigen Gesichtsfeld. Das mögen vielleicht Binsenwahrheiten sein. Sie sind es aber nicht, denn man hat in der klassischen physiologischen Optik stets das Einzeldetail und nur ein kleines Umfeld betrachtet und niemals auf das gesamte Gesichtsfeld bezogen. Bedenkt man, daß für die Erregungsleitung im Sehnerven nach CHACKO allein 800 000 Fasern zur Verfügung stehen, denen nach den Messungen von ØSTERBERG und WERTHEIM ebensoviele Empfindungselemente in der Netzhaut entsprechen, und bedenkt man, daß wegen der Verschmelzungsfrequenz von einem einzelnen Netzhautelement im Durchschnitt bis zu 50 Einzelreizen in der Sekunde wahrgenommen werden können, so kommt man zu der ungeheuren Informationskapazität des Auges von etwa 50 x 800 000 = 40 Millionen bit. Sie ist nach JACOBSON etwa 200mal so groß als jene des Ohres, und darin liegt auch der Grund, weshalb eine gute Fernsehsendung so viel größere Schwierigkeiten macht als eine gute Rundfunk-UKW-Sendung.

Wie sich die *Detailerkennbarkeit mit dem Netzhautort* ändert, ist noch nicht genau bekannt. Die Sehschärfe sinkt mit der Entfernung vom Fixierpunkt sehr rasch ab. Schon in 2° seitlichem Abstand ist sie auf nahezu 1/10 ihres Bestwertes gefallen. Dafür steigt aber auch die Wahrnehmbarkeit für bewegte Reize, so daß sich Fragen der Informationskapazität der einzelnen Netzhautbereiche nicht so ohne weiteres beantworten lassen. Ebenso sinkt die Detailwahrnehmbarkeit mit dem Lebensalter. Mit 40 Jahren werden nach LUCKIESH nur mehr 90%, mit 60 Jahren nur mehr 74% und mit 80 Jahren sogar nur mehr 47% der im Lebensalter von 20 Jahren wahrnehmbaren Details erkannt. Ganz ungelöst ist noch die Frage, ob die Detailwahrnehmbarkeit in der Ferne oder in der Nähe größer ist (AUBERT-FÖRSTERsches Phänomen). Hier finden sich in der Literatur sehr widersprechende Angaben, die noch im Lauf der Zeit aufgeklärt werden müssen. Vor allem ist es wichtig, den Scheitelpunkt des Sehwinkels eindeutig zu definieren und ihn entweder in den vorderen Brennpunkt des Auges (Brennpunktsehschärfe) oder in den objektseitigen Hauptpunkt (Hauptpunktsehschärfe) zu legen. Beide Definitionen haben ihre Vor- und Nachteile. Bei der Brennpunktsehschärfe ist man vom Refraktionszustand des Beobachters unabhängig, dafür spielt aber der Akkommodationszustand eine wichtige Rolle, bei der Hauptpunktsehschärfe ist genau das umgekehrte der Fall. Die beidäugige Sehschärfe und Informationskapazität des Auges ist im Durchschnitt größer als die einäugige, vor allem dann, wenn die Gesichtsfeldleuchtdichte gering ist. Nach LYTHGOE besteht überhaupt eine sehr auffallende Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte.

Ebenfalls noch nicht restlos geklärt ist die Abhängigkeit der Sehfunktionen von der Lichtfarbe. Die photometrische und physiologische Kontrastempfindlichkeit scheint im Gelblicht höher zu sein als in anderen Lichtfarben, die Sehschärfe ist nach SCHOBER und WITTMANN im Bereich des Empfindlichkeitsmaximums des Auges um nahezu 20% besser als im Weißlicht. Wie weit dabei allerdings die chromatischen Abbildungsfehler des Hornhaut-Linsensystems eine Rolle spielen ist noch nicht geklärt.

Die hier gemachten Ausführungen zeigen, daß es sehr schwierig ist, eine Kontrastübertragungsfunktion oder auch nur eine genaue Informationskapazität des Auges bzw. seine Nachrichtenentropie zu definieren. Das kann nur unter ganz bestimmten eingeschränkten Bedingungen und mit entsprechender Vorsicht geschehen. Vor allem spielt dann auch die Art und Form der benutzten Details, also die Frage um die brauchbaren Sehzeichen (Optotypen) eine große und oft entscheidende Rolle.

LITERATUR

SCHOBER, H., Das Sehen, 2. Aufl., Fachbuchverlag Leipzig. Band 1 (1957), Band 2 (1958).

Diskussionsbemerkung

Herr HANSEN bemerkt zur Farbabhängigkeit des „Kontrastes", daß man die Gelbfilterwirkung, d. h. das sonnige Aussehen einer Landschaft bei Betrachtung durch ein Filter, das alle Wellenlängen unter 500 nm abschneidet, zweifellos erkennen könne. Er habe das auch seinerzeit an einer Wasserstoffröhre bemerkt, die nur die Balmerserie ausstrahlte. Wenn man ein solches Rohr durch ein Filter betrachtet, das nur die rote Linie durchläßt, so sieht es merkwürdigerweise heller aus. Das würde bedeuten, daß irgend ein Bereich der sichtbaren Strahlung einen negativen Effekt auf den Helligkeitseindruck hätte. Er schlägt vor, daß man sich mit diesem Problem experimentell stärker beschäftigen sollte.

SLUB
Wir führen Wissen.

DIE KONTRASTEMPFINDLICHKEIT DES AUGES

Von Dr. K.-J. Rosenbruch, Braunschweig
(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)

In Ergänzung und zur Erläuterung der Ausführungen, die Herr Professor Schober über den Zusammenhang von Kontrast und Sehschärfe gemacht hat, soll über einige eigene Messungen kurz berichtet werden.

Von der Vielzahl der Faktoren, die beim Sehen zusammenwirken, soll hier nur jener Einfluß behandelt werden, der entscheidend auf die Übertragungskapazität anspricht, nämlich die Kontrastempfindlichkeit des Auges. Es soll deshalb festgestellt werden, wie groß der Objektkontrast sein muß, damit für getrennt wahrgenommene Objekte ein bestimmter Sehwinkel erreicht wird. Diese Größe wird vom Kontrast, von der Form und der Beleuchtungsstärke der Objekte und der Adaptationsleuchtdichte abhängen und natürlich auch davon beeinflußt, welches Kriterium man für das subjektive Maß „getrennt wahrnehmbar" zu Grunde legt.

Die mittlere Beleuchtungsstärke der Prüfobjekte wurde zwischen 0,5 Lux und 100 Lux geändert. Diese Objekte wurden von 25 normalsichtigen Beobachtern in verschiedenen Entfernungen senkrecht zum Objekt beobachtet, so daß der Sehwinkel, unter dem eine Periode erschien, zwischen 1′ und 20′ schwankte. Am Objekt selbst wurde dabei nicht die Gitterkonstante, sondern nur der Kontrast zwischen K = 0,90 und K = 0,03 geändert. Der Beobachter sollte nur durch Veränderung seines Abstandes zum Prüfobjekt seinen Sehwinkel soweit vergrößern (oder verringern), bis er die Zahl der dargebotenen Perioden gerade noch sicher auszählen konnte. Man erhält so den erforderlichen Kontrast, der zum Erkennen von Objekten bestimmter Sehwinkelgröße erforderlich ist. Die Versuche wurden bei verschiedener Kantensteilheit, verschiedener Beleuchtung und verschiedener Zahl der Gitterlinien, sowohl der transparenten als auch der im reflektierten Licht leuchtenden Prüfobjekte gemacht.

Beobachtungsbedingungen eine Kontrastempfindlichkeitskurve für das Auge zu bestimmen.

Die Anwendbarkeit dieses Ergebnisses wurde für den praktischen Fall der Projektion einer Kleinbildaufnahme, die auf Umkehrfilm gemacht war, demonstriert.

Die Kontrastübertragungsfunktion des Kleinbildobjektivs der Aufnahmekamera zusammen mit dem Umkehrfilm sei z. B. für die Bildmitte bekannt. Der entwickelte Film wird dann mit dem Projektionsobjektiv, dessen Kontrastübertragungsfunktion für die Bildmitte ebenfalls bekannt ist, an eine diffus reflektierende Wand projiziert. Bezogen auf das Kleinbildformat wird die Gesamtkontrastübertragungsfunktion durch Kurve 2, Abbildung 2, dargestellt. Die als Abszisse angegebenen Linien pro mm müssen nur durch den Vergrößerungsfaktor, der von der Projektionsentfernung abhängt, geteilt werden, um die auf der Projektionswand geltenden Linien pro mm bei den entsprechenden Kontrasten zu erhalten. Die mittlere Beleuchtungsstärke soll auf der Projektionswand 50 Lux betragen. Für einen Beobachter mit mittlerer Augenempfindlichkeitskurve (und bei den Bedingungen der Abb. 1), der sich dieses Projektionsbild aus der halben Projektionsentfernung ansieht, gilt, wie sich aus der Abbildung 2 ergibt, daß nur jener Teil von ihm noch erkannt werden kann, der links vom Schnittpunkt beider Kurven liegt. Die Kurve 1 (Abb. 2) gibt hier den zum deutlichen Sehen erforderlichen Kontrast an, die Kurve 2 gibt den vorhandenen Kontrast an.

Es läßt sich für jeden Punkt links vom Schnittpunkt P bzw. P′ der beiden Kurven 2 und 3 die Zahl der erkennbaren Graustufen angeben. Mit zunehmendem Abstand der beiden Kurven wächst also auch die Zahl der erkennbaren Graustufen; bei fest vorgegebener Augenempfindlichkeitskurve sieht man also bei der gestrichelten Kurve 3 der Abbildung 2 bei gleicher Struk-

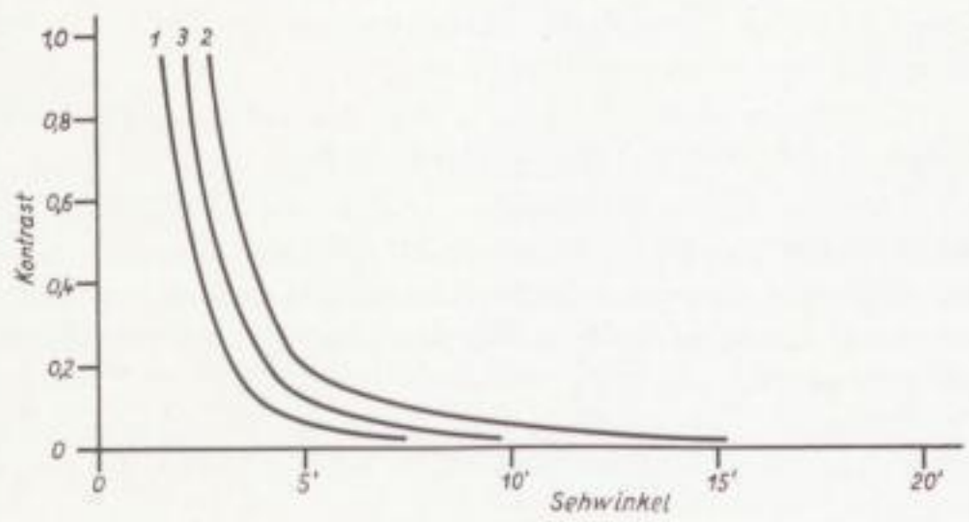


Abb. 1: Kontrast-Grenzempfindlichkeit des Auges bei 50 Lux Beleuchtungsstärke der periodischen Prüfobjekte und 10 Perioden:
Kurve 1: gemessene größte Kontrastempfindlichkeit,
Kurve 2: gemessene geringste Kontrastempfindlichkeit,
Kurve 3: von 25 Beobachtern arithmetisch gemittelte Kontrastempfindlichkeit.

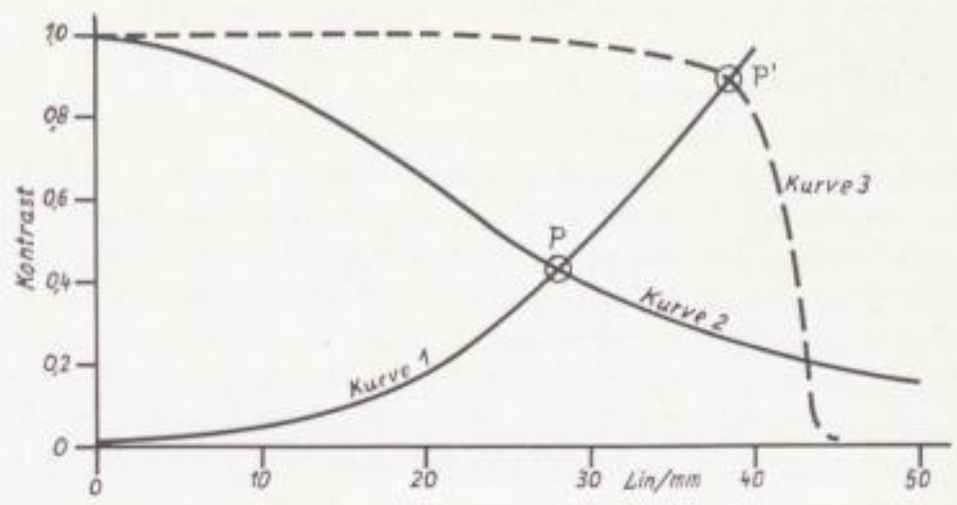


Abb. 2. Kurve 1: Kontrast-Grenzempfindlichkeit des Auges (Kurve 3, Abb. 1) dargestellt in Lin/mm (bezogen auf die halbe Projektionsentfernung bei einem Projektor mit f = 80 mm Brennweite).
Kurve 2: Kontrastübertragungskurven des Übertragungssystems Objektiv x Film x Projektionsobjektiv.
Kurve 3: Kontrastübertragungskurve eines fast idealen Gesamtübertragungssystems.

In Abbildung 1 sind einige typische Grenzempfindlichkeitskurven eingetragen. Die Kurve 1 zeigt die Werte, die für den Beobachter mit bester Sehschärfe, Kurve 2 die für den schlechtesten Beobachter von den untersuchten 25 Personen gelten, und zwar bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von 50 Lux und 10 Perioden des Prüfobjektes.

Es wurde nun sowohl die Streuung der Beobachtungsergebnisse bei einer Versuchsperson, sowie die Abhängigkeit der Versuchsergebnisse von der Leuchtdichte, der Periodenzahl und der Kantensteilheit gemessen, und es zeigte sich, daß es gelingt, bei definierten

turgröße der Objekte mehr Graustufen und erhält somit mehr Information von dem Objekt. Strukturfeinheiten, die über die Punkte P bzw. P′ in Abbildung 2 hinausgehen, können vom Auge nicht mehr wahrgenommen werden. Die Informationskapazität des optischen Übertragungssystems kann nur in dem Bereich ausgenutzt werden, den das Auge entsprechend den jeweiligen Bedingungen ausschöpfen kann. Den Einfluß dieser Bedingungen und die Grenze dieses Bereiches für den „durchschnittlichen" Beobachter zu finden, war der Zweck der durchgeführten Untersuchungen.

SLUB
Wir führen Wissen.

ALLGEMEINE QUALITÄTSBEWERTUNGEN PHOTOGRAPHISCHER BILDER

Von Dr. E. H. Linfoot, Cambridge, England

1. Einleitung

Eine systematische Diskussion der Qualität photographischer Systeme dürfte erst dann mit Erfolg unternommen werden, wenn man eine auf klare Weise formulierte Theorie der Qualitätsabschätzung photographischer Bilder zur Verfügung hat. Vor fünf Jahren existierte eine derartige Theorie noch nicht; auch heute ist sie erst in den frühesten Entwicklungsstufen und noch nicht stabilisiert. Es soll hier über einige neugewonnene Resulate auf diesem Gebiet der Qualitätsabschätzung kurz berichtet werden, die mit Hilfe der neuen schnellen elektronischen Rechenmaschine EDSAC II in Cambridge erhalten worden sind.

Die Eigenschaften eines optischen Systems, das eine inkohärent beleuchtete (oder auch selbstleuchtende) Objektfläche abbildet, werden in jeder Lichtwellenlänge λ durch seine *komplexe Kontrastübertragungsfunktion* $\tau(u, v; x, y; \lambda)$ völlig charakterisiert. Es läßt sich nämlich die Punktbildfunktion $w(x', y'; x, y; \lambda)$, die die Intensitätsverteilung im Bilde eines im Punkte (x, y) der Objektfläche sich befindenden Lichtpunktes beschreibt, durch τ mit Hilfe der Gleichung

$$w = F^* \left[\tau e^{-2\pi i (ux + vy)}\right] \tag{1}$$

darstellen, wobei F^* die konjugierte Fouriertransformierte bezeichnet.

Folglich läßt sich jede Qualitätsabschätzung irgendwelcher Art, wenn sie nur als Funktionalmittelwert*) von w darstellbar ist, auch als Funktionalmittelwert von τ darstellen. In den meisten praktischen Fällen hängt die Funktion τ nicht nur von den Raumfrequenzen (u, v) in der Bildfläche ab, sondern auch von (x, y), d. h. das System liefert eine verschiedene Kontrastübertragung in verschiedenen Teilen seines Feldes. Da diese aber nur langsam mit (x, y) variiert, dürfen wir das Feld in sogenannte *Gebiete des Isoplanatismus* (oder *Isoplangebiete)* aufteilen, derart, daß in jedem die Variation von τ mit (x, y) vernachlässigbar klein bleibt. Um die Bildqualität für das ganze Feld auszuwerten, rechnen wir sie einzeln für eine Reihe von diesen Isoplangebieten und bilden nachher den geeigneten Mittelwert.

Dadurch ist das Problem auf die Auswertung der Bildqualität in einem einzelnen Isoplangebiet zurückgeführt. Wie schon bekannt, werden die groben Züge oder größere Details eines optischen Objektes fast einwandfrei auch durch Linsen von nur mäßiger Qualität wiedergegeben; dagegen werden die feinsten Details durch verschiedene Systeme auf verschiedene Weise reproduziert. Überdies werden die Mängel eines Systems hoher Qualität erst durch eine Verschlechterung der Wiedergabe von kontrastarmen freien Details wahrnehmbar. Daher verliert man wenig bei der Untersuchung der Qualität eines optischen Systems, wenn man von Anfang an die Diskussion auf die Wiedergabe kontrastarmer feiner Details beschränkt.

Diese Einschränkung gestattet eine weitgehende Vereinfachung unseres Problems, da der photographische Prozeß, obgleich er wesentlich nichtlinear ist, sich bei einer Untersuchung niedrigkontrastiger Bilder als annähernd linear behandeln läßt. Daher scheint es zweckmäßig, Qualitätsabschätzungen photographischer Objektive zu formulieren in bezug auf ihre Fähigkeit, die feinen Details in den Bildern einer zufälligen niedrigkontrastigen Objektmenge wiederzugeben.

*) Unter Funktionalmittelwert ist hier zu verstehen ein normiertes Integral, dessen Wert nicht etwa von einem einfachen Zahlenparameter abhängt, sondern von dem Werteverlauf einer darin enthaltenen, parameterartigen Funktion — z. B. w.

In diesem Falle kann man der Wirkung der photographischen Verwaschung in der Emulsionsschicht dadurch Rechnung tragen, daß man die Konvolution der optischen Punktbildfunktion w mit einer geeigneten photographischen Verwaschungsfunktion w_1 bildet oder, was auf dasselbe herauskommt, daß man τ mit einem *Annahmefaktor* $\tau_1 = \tau_1(u, v; \lambda)$ multipliziert. Denn es ist ja

$$w * w_1 = F^* \left[\tau \tau_1 e^{-2\pi i (ux + vy)}\right],$$

wobei $\tau_1 = F[w_1]$ den erwähnten Annahmefaktor darstellt [2]. Das Produkt $\tau \tau_1$ ist die komplexe Kontrastübertragungsfunktion des Systems Objektiv—plus—Emulsion, gültig für das vorgeschriebene Beleuchtungsniveau und für die vorgeschriebenen Entwicklungsumstände. Natürlich kann eine Veränderung dieser Umstände eine bedeutsame Veränderung der Kontrastübertragung $\tau \tau_1$ verursachen. Die praktischen Messungen von $\tau \tau_1$ lassen sich auf einfache und direkte Weise dadurch ausführen, daß man mit dem System eine Reihe sinuswelliger Raster von geeignet beschränktem Kontrast durch einen Kollimator photographiert. Zu diesem Zwecke kann man auch „rechteckige" Raster brauchen, d. h. Raster mit einfachen parallelen Streifen, indem man die dabei erhaltenen Messungen späterhin durch die geeignete Umrechnung transformiert.

Vier einfache und natürliche Qualitätsbewertungen optischer Bilder lassen sich mit Hilfe der folgenden Begriffe formulieren:

1. Fidelität Φ, als r.m.s.-Unterschied zwischen den normierten Intensitätsverteilungen im Bilde und im flächenhaften Objekte definiert (d. h. als Wurzel des Mittelquadrats der Differenz der zwei normierten Verteilungsfunktionen),

2. Korrelationsqualität Q, d. h. die numerische Korrelation zwischen diesen beiden Verteilungsfunktionen,

3. Strukturauflösungsvermögen T, d. h. das Verhältnis des Strukturinhaltes des Bildes zu jenem des Objektes [5], [9],

4. Schließlich können wir die Bildqualität auf tiefergehende Weise durch den Informationsinhalt des Bildes im Sinne der Kommunikationstheorie [1], [11] abschätzen.

Es läßt sich zeigen, daß die erste dieser Bewertungen mit der zweiten und dritten auf einfache Weise verbunden ist durch die Gleichung

$$\Phi = 2Q - T. \tag{2}$$

Auch kann die dritte als Grenzfall der vierten betrachtet werden [9]. Die Frage der wechselseitigen Verbindungen der vier Bewertungen ist natürlich ebenfalls von Bedeutung; sie wird derzeit gerade untersucht. Man weiß bereits, daß bei Systemen mit nur kleinen Aberrationen alle vier Bewertungen praktisch equivalent sind. Es soll auch erwähnt werden, daß 4Q mit einer natürlichen Verallgemeinerung der Strehlschen Definitionshelligkeit übereinstimmt, wenn die Objektmenge als völlig zufällig vorausgesetzt wird [10]. In diesem Falle dürfen wir 4Q auch die photographische Definitionshelligkeit nennen.

Wir definieren jetzt die Qualität eines photographischen Systems als statistisches Mittel der Bewertungen der von ihm erzeugten Bilder der Mitglieder einer zufälligen Objektmenge. Auf diese Weise ergibt jede Bildbewertung eine entsprechende Bewertung des Systems.

Alle Bewertungen lassen sich als Funktionale $w * w_1$ ausdrücken, wobei w und w_1 die schon erwähnten Funktionen sind. Daraus folgt, daß sie sich auch als Funktionen des Produktes $\tau \tau_1$

ausdrücken lassen. Insbesondere erhalten wir von Φ, von Q, von T und von dem Informationsinhalt vier Bewertungen eines photographischen Systems, die nach geeigneter Normierung durch folgende Ausdrücke gegeben werden:

$$\gamma \iint_{-\infty}^{\infty} (1 - |1 - \tau\tau_1|^2)\, du dv \quad \text{(photograpische Fidelität)} \tag{3}$$

$$2\gamma \iint_{-\infty}^{\infty} \tau\tau_1\, du dv \quad \text{(photographische Definitionshelligkeit)} \tag{4}$$

$$4{,}36\,\gamma \iint_{-\infty}^{\infty} |\tau\tau_1|^2\, du dv \quad \text{(photograph. Strukturauflösungsvermögen)} \tag{5}$$

$$5{,}30\,\gamma \iint_{-\infty}^{\infty} \log_e \{1 + |\tau\tau_1|^2 R\}\, du dv \quad \text{(Informationsdichte; bits per Fläche eines Beugungsscheibchens)}, \tag{6}$$

wobei γ die Konstante $2\,F^2\,\lambda^2/\pi$ bezeichnet (F ist die Blendenzahl des Systems). In dem letzten Integrand bedeutet R das ‚signal-to-noise'-Verhältnis; anders gesagt, das Verhältnis des statistischen Mittels der auf die Raumfrequenz (u, v) bezogenen Intensitätsschwankungskraft im Objekt zu der auf dieselbe Raumfrequenz bezogenen Kornschwankungskraft (Rauschpegel) der Emulsion. Der konstante Wert R = 100 entspricht einer ziemlich ‚reinen' Wiedergabe der feinen Details in dem photographischen Bilde; dagegen lassen sich bei R = 8 die feinsten Details von der Kornschwankung nicht mehr gut unterscheiden.

Eine photographische Qualitätsbewertung, die allein auf die Punktbildfunktion oder auf die Kontrastübertragung eines Systems begründet wird, hat folgenden Nachteil: Sie läßt außer Betracht die Ungewißheiten, die aus der endlichen Größe der zufällig verteilten, lichtempfindlichen Teilchen in der Emulsionsschicht, sowie auch aus den statistischen Schwankungen ihrer Verteilung, entstehen. Diesen Effekten hat man den Namen *Emulsionsgeräusch* gegeben. Wegen des Emulsionsgeräusches zeigen zwei Photographien desselben Objektes kleine lokale Unterschiede, die dennoch so groß sein können, daß sie die feinsten Details des Bildes ertränken. Umgekehrt wird es bei der Vergleichung zweier fast identischer photographischer Bilder wegen des Emulsionsgeräusches unmöglich zu unterscheiden, ob die abgebildeten optischen Objekte tatsächlich identisch sind oder nicht. Daraus läßt sich schließen, das das Unterscheidungsvermögen eines photographischen Systems durch sein Emulsionsgeräusch vermindert wird.

Eine realistische Qualitätstheorie photographischer Systeme soll nicht nur ihre Kontrastübertragung, sondern auch ihr Unterscheidungsvermögen im obigen Sinne in Betracht ziehen. Das wird von den ersten drei der erwähnten Bewertungen nicht geleistet; sie sind durch die Eigenschaften der Funktion $w * w_1$ oder, was auf dasselbe herauskommt, des Übertragungsfaktors $\tau\tau_1$ völlig festgelegt und eine Variation des Rauschpegels läßt sie unverändert.

Ein quantitatives Maß des Unterscheidungsvermögens im obigen Sinne ist aber zur Hand; es ist der Informationsinhalt der Bilder im Sinne von C. E. Shannon [1]. Genauer gesagt, es wird das Unterscheidungsvermögen eines mit vorgeschriebenem Felde und mit statistisch vorgeschriebener Objektmenge wirkenden Systems dadurch ausgewertet, daß man den über diesem Felde gerechneten Informationsinhalt der Bilder der gegebenen Objektmenge zweckmäßig normiert [3], [4]. Offensichtlich verlangt ein hohes Unterscheidungsvermögen auch eine hohe Kontrastübertragung, man kann ja die Bewertung durch Informationsinhalt der Bilder sogar einfach ansehen als Bewertung durch einen zweckmäßig gewogenen Funktionalmittelwert der Kontrastübertragung des Systems, gerade wie die drei ersten Qualitätsbewertungen.

Die letzte Aussage läßt sich im Ausdruck (6) für den uns hier interessierenden Fall einer völlig zufälligen Objektmenge sofort verifizieren. Von diesem engeren Standpunkt aus ergibt (6) eine Qualitätsbewertung, die mit (3), (4) und (5) völlig analog ist, nur daß sie auch noch die Möglichkeit bietet, durch den Parameter R die Wirkung des Geräusches ebenfalls zweckmäßig in die Rechnung einzunehmen. Wenn man sich aber davon überzeugen will, daß die durch diese Formel angegebene Methode, das Geräusch zu berücksichtigen, wirklich zweckmäßig ist, so wird es nötig, den Zusammenhang mit der Informationstheorie, d. h. mit der Entropie, zu betrachten.

2. Gerechnete Sonderfälle

Jede der vier obenerwähnten Bewertungen hat ihre eigenen Vorteile, die im allgemeinen auch bezahlt werden müssen. Es bleiben zum Beispiel bei einer kleinen, glatten Koordinatenverzerrung in der Bildebene das photographische Strukturauflösungsvermögen sowie auch die Informationsdichte effektiv unverändert; dabei mögen aber die Fidelität und die Korrelationsqualität stark vermindert werden. In der Tat vermögen die zwei letzterwähnten Bewertungen die Ähnlichkeit zwischen Objekt und Bild nur in bezug auf eine vorgeschriebene Zuordnung zwischen Objektfläche und Bildfläche abzuschätzen. Dies schadet bei kleinen, zweiachsig symmetrischen Aberrationen nicht, da man in diesen Fällen die richtige Flächenzuordnung leicht feststellt. Wenn aber Koma vorhanden ist, wie es bei Großfeldsystemen gewöhnlich vorkommt, kann man nicht mehr leicht einsehen, wie diese Zuordnung am zweckmäßigsten festzulegen ist. Wie anderswo gezeigt [10], läßt sich bei der Qualitätsauswertung eines optischen Systems hinsichtlich einer zufälligen Objektmenge diese Schwierigkeit überwinden. Es wird dann bei richtiger („optimaler") Flächenzuordnung die photographische Korrelationsqualität mit der photographischen Definitionshelligkeit wesentlich identisch.

Anderseits tragen das photographische Strukturauflösungsvermögen und die Informationsdichte der etwaigen räumlichen Phasenverzerrung des Bildes nicht direkt Rechnung, weil sie nämlich von τ und von τ_1 nur durch den absoluten Betrag des Produktes $\tau\tau_1$ abhängen. Insbesondere können sie den Kontrastumkehrungen nicht Rechnung tragen, die der sogenannten Pseudoauflösung entsprechen. Das ist natürlich zu erwarten, da das photographische Strukturauflösungsvermögen in einem gewissen Sinne [5] nur mit dem statistischen Betrage der in den Bildern enthaltenen Feinstruktur zu tun hat, die Informationsdichte ihrerseits nur mit dem Unterscheidungsvermögen des Systems [3]. Keine dieser zwei Bewertungen zieht es explizite in Betracht, inwieweit das Bild dem Objekt wirklich gleicht. Trotzdem ergibt sich als Folge der besonderen Eigenschaften aller achsensymmetrischen optischen Systeme mit sphärischen oder deformierten Flächen und mit den gewöhnlichen einfachen Öffnungsgestalten, daß ein System von hoher Informationsleistung auch eine hohe Korrelationsqualität und eine hohe Fidelität besitzt.

Als Sonderfall stimmt das photographische Strukturauflösungsvermögen eines Systems, das eine zufällige, niedrigkontrastige Objektmenge abbildet, mit seiner Informationsabschätzung bis auf eine Normierungskonstante überein, wenn die statistisch vorgeschriebene Strukturkraft P der Objektmenge klein in bezug auf den Rauschpegel N der Emulsion vorausgesetzt wird. Im allgemeinen entstehen analoge, wenn auch minder einfache Verhältnisse aus den beiden Tatsachen, daß erstens das Bild eines punktförmigen Objekts nur dann scharf sein kann (im Sinne eines großen äquivalenten Bandradius [9]), wenn es auch klein ist, und zweitens, daß die räumlichen Ordnungsverhältnisse zwischen den verschiedenen Objektpunkten auch in dem Bilde erhalten bleiben. Natürlich braucht dieses Resultat bei Systemen mit Aperturen oder mit optischen Flächen von komplizierterer Art nicht mehr gültig zu bleiben, z. B. bei photographischen Teleskopen, die mit Objektivgittern oder mit Gitterspektrographen ausgerüstet sind. Bei diesen Instrumenten ist zwar die Informationsabschätzung eine zweckmäßige; dagegen gibt die Fidelitätsabschätzung keine Andeutung der optischen Qualität.

SLUB
Wir führen Wissen.

Aus den soeben gemachten Bemerkungen geht hervor, daß man die relativen Vorzüge der in Betracht kommenden vier Qualitätsbewertungen nicht mit Nutzen derart untersuchen kann, daß man ein optisches System einfach als Beispiel eines allgemeinen Kommunikationssystems betrachtet. Es wird im Gegenteil die ganze Diskussion durch die höchst spezielle Natur der Klasse der zentrierten optischen Systeme, wenn man sie vom Standpunkte der Kommunikationstheorie betrachtet [11], tiefgehend beeinflußt. Zur Zeit scheint es zweckmäßiger, zunächst mit einer komparativen Untersuchung der verschiedenen Qualitätsbewertungen in ausgewählten, praktisch interessanten Sonderfällen anzufangen.

Aus diesem Grunde ist ein rechnerisches Studium der im Abschnitt 1 beschriebenen Bewertungen unternommen worden, für den Sonderfall eines Kleinfeldmonochromats (λ = 5000 Å) mit den ausgewählten Beträgen 0, λ, 2λ der sphärischen Aberration 1. Ordnung. Dieser bildet eine zufällige, niedrigkontrastige Objektmenge auf die sogenannte Emulsion 10 ab, die in einer früheren, mit G. Black gemeinsamen Arbeit des Verfassers schon benutzt worden ist [8]. Der Annahmefaktor τ_1 dieser Modellemulsion ist in Abbildung 1 als Funktion der Raumfrequenz ω dargestellt. Das kleine sekundäre Maximum bei 210 Linien/mm hat, wie wir später sehen werden, wenig praktische Bedeutung.

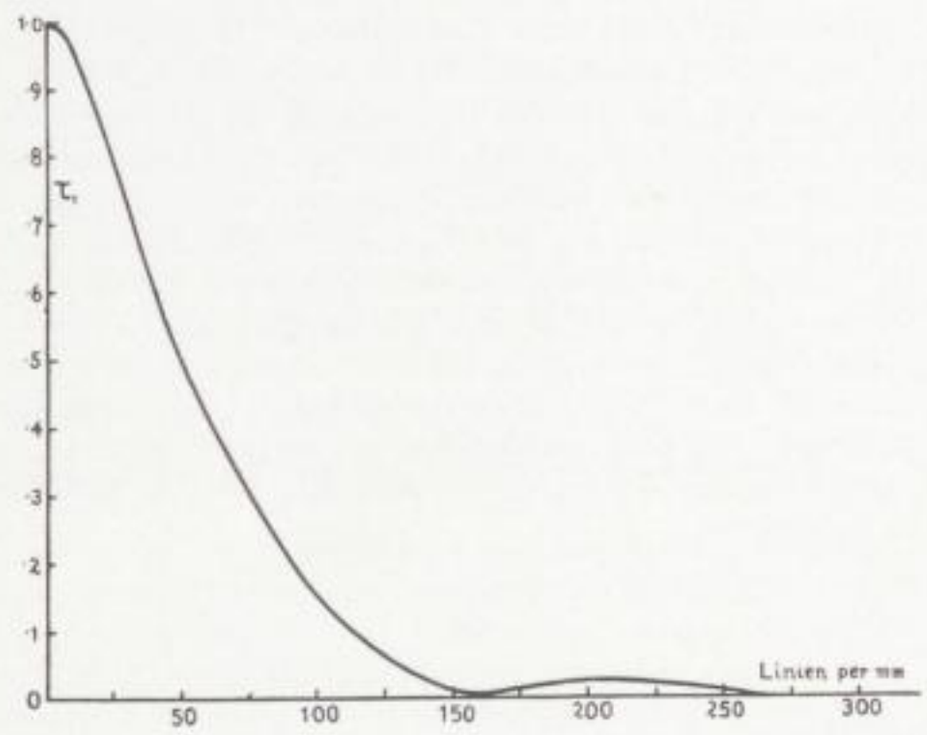


Abb. 1. Annahmefaktor τ_1 einer photographischen Modellemulsion (siehe Text).

Um die Wechselwirkung unter Beugung, Aberrationen und photographischer Verwaschung besser zu übersehen, sind alle Rechnungen für die fünf Werte 2, 4, 8, 12, 16 des Öffnungsverhältnisses des Systems durchgeführt worden. Beim Öffnungsverhältnis 16 spielt die optische, von der Beugung und von der Wellenaberration bewirkte Ausbreitung die Hauptrolle; beim Öffnungsverhältnis 2 dagegen die in der Emulsion vorkommende Verwaschung.

Kleine Veränderungen der Fokaleinstellung müssen in die Diskusion einbezogen werden, da es ja keine eindeutige Definition einer besten Einstellung eines Systems gibt, das an sphärischer Aberration leidet. Anderseits dürfen wir die Wellenverzerrung, die dieser Aberration entspricht, für konstant über das ganze Feld halten, d. h. das System als aplanatisch betrachten.

Ausführlich wird hier nur über diejenigen Fälle berichtet, für die die sphärische Aberration 2λ beträgt; die entsprechenden Resultate für die ebenfalls untersuchten Werte 0 und λ der sphärischen Aberration sollen nur beiläufig angedeutet werden, da sie zu ganz ähnlichen Schlüssen führen.

Für ein System mit der sphärischen Aberration 2λ wird die Wellenverzerrung $\varphi(r)$ in der Austrittspupille durch die Gleichung

$$\varphi(r) = 2\lambda(r^4 + Br^2) \qquad (7)$$

gegeben, wobei der Parameter B die Fokuseinstellung angibt, während die Polarveränderliche r von 0 im Zentrum der Austrittspupille bis zum Werte 1 an ihrem Rande läuft. Der paraxialen Fokuseinstellung entspricht der Wert B = 0, dem Randfokus der Wert B = −2, dem Mittelfokus der Wert B = −1.

Abbildung 2, die auf den berechneten Werten von ungefähr 1800 numerischen Doppelintegrationen beruht, zeigt die Werte der Kontrastübertragungsfunktion τ des Luftbildes. Die Ordinate B gibt die Fokaleinstellung gemäß (7) an; die Abszisse stellt die reduzierte Linienfrequenz $s = 2\,\omega/\omega_0$ dar, die bei der Abschnittsfrequenz $\omega_0 = (F\lambda)^{-1}$ des optischen Systems den Wert 2 annimmt. (F bedeutet hier das Öffnungsverhältnis). Längs jeder horizontalen Linie B = konst. ergibt der Werteverlauf von $\tau = \tau(s)$ die Kontrastübertragungsfunktion für die durch B angegebene Einstellung. In den schraffierten Gebieten ist $\tau < 0$, d. h. der Kontrast wird umgekehrt (Pseudoauflösung).

Aus Abbildung 2 entnimmt man, daß $\tau \geq 0$ für $-1.37 < B < -0.9$. Es erscheinen also keine Kontrastumkehrungen in diesem Fokusbereich, der den Mittelfokus B = −1 enthält und dessen Länge etwa das Viertel der Distanz zwischen Paraxialfokus und Randfokus beträgt. Für ein System ohne Aberration wäre dieser umkehrungsfreie Bereich ungefähr 30% länger. Auf der paraxialen Seite des Mittelfokus (B > −1) treten die Kontrastumkehrungen zuerst nur bei den höheren Raumfrequenzen auf, wo τ_1 in fast allen praktischen Fällen sehr klein geworden ist. Wegen der Kleinheit von τ_1 haben diese Kontrastumkehrungen keine bedeutsame Wirkung auf die Qualität des photographischen Bildes. Auf der anderen Seite des Mittelfokus (B < −1) tritt eine Kontrastumkehrung erst in der Nähe der Linienfrequenz $(4\,F\,\lambda)^{-1}$ für B = −1.4 auf; für B = −2 ist sie schon stark genug geworden, um das photographische Bild wahrnehmbar zu beeinflussen.

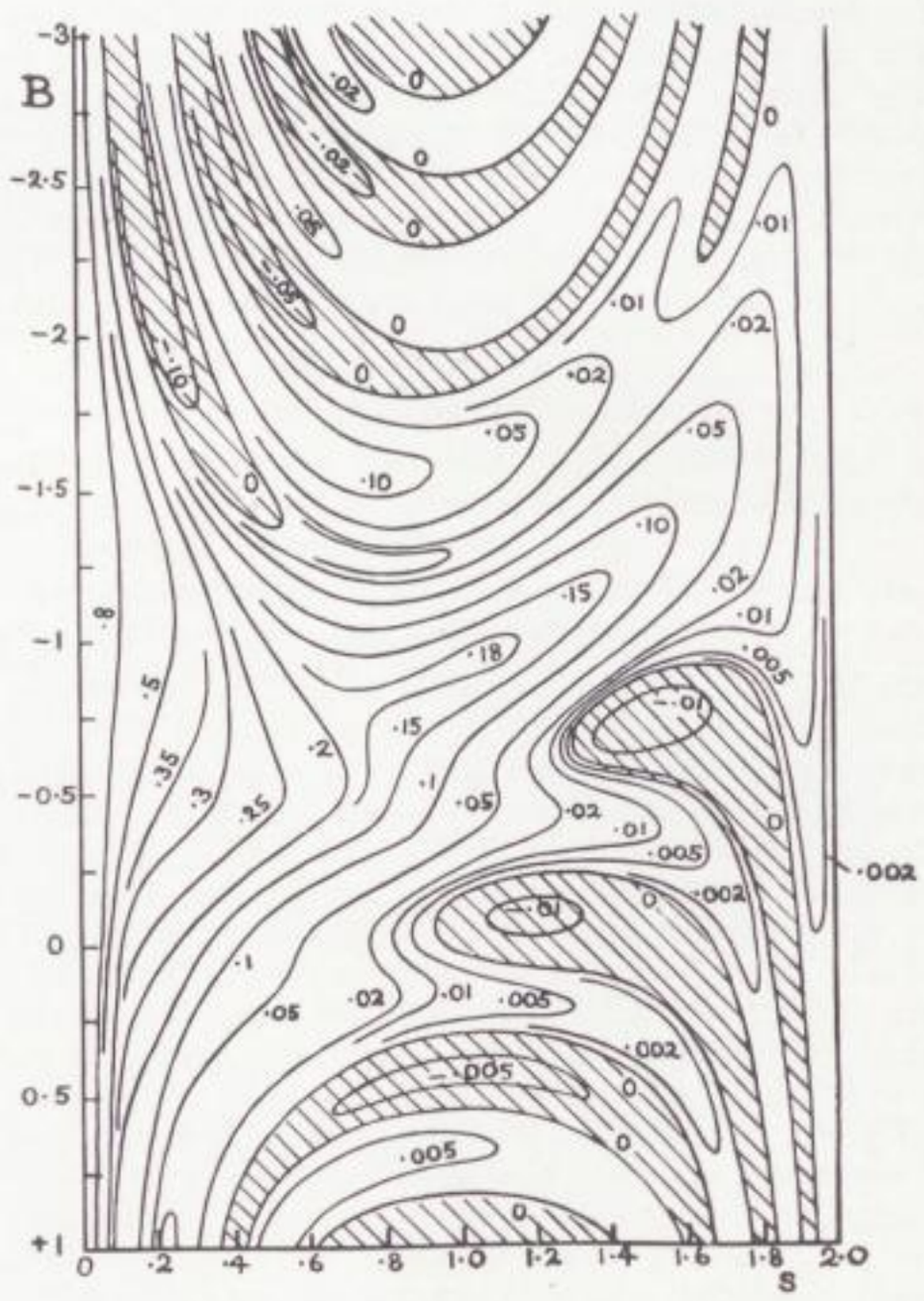


Abb. 2. Kontrastübertragung τ eines Monochromats mit zwei Wellenlängen primärer sphärischer Aberration, bei verschiedenen Fokaleinstellungen. Die Ordinate B gibt gemäß (7) (siehe Text) die Einstellung an; dem Werte B = 0 entspricht der paraxiale Fokus, dem Werte B = −2 der Randfokus, dem Werte B = −1 der Mittelfokus. Die Abszisse s stellt die normierte Raumfrequenz dar, die bei der Abschnittsfrequenz $(F\lambda)^{-1}$ des Systems den Wert 2 annimmt. Die Kurven mit beigesetzten Zahlen geben die τ-Werte an. In den schraffierten Gebieten ist $\tau < 0$ (Pseudoauflösung). Längs jeder horizontalen Linie B = konst. stellt der Werteverlauf von τ die Kontrastübertragungsfunktion $\tau(s)$ dar, die der zugehörigen Einstellung entspricht.

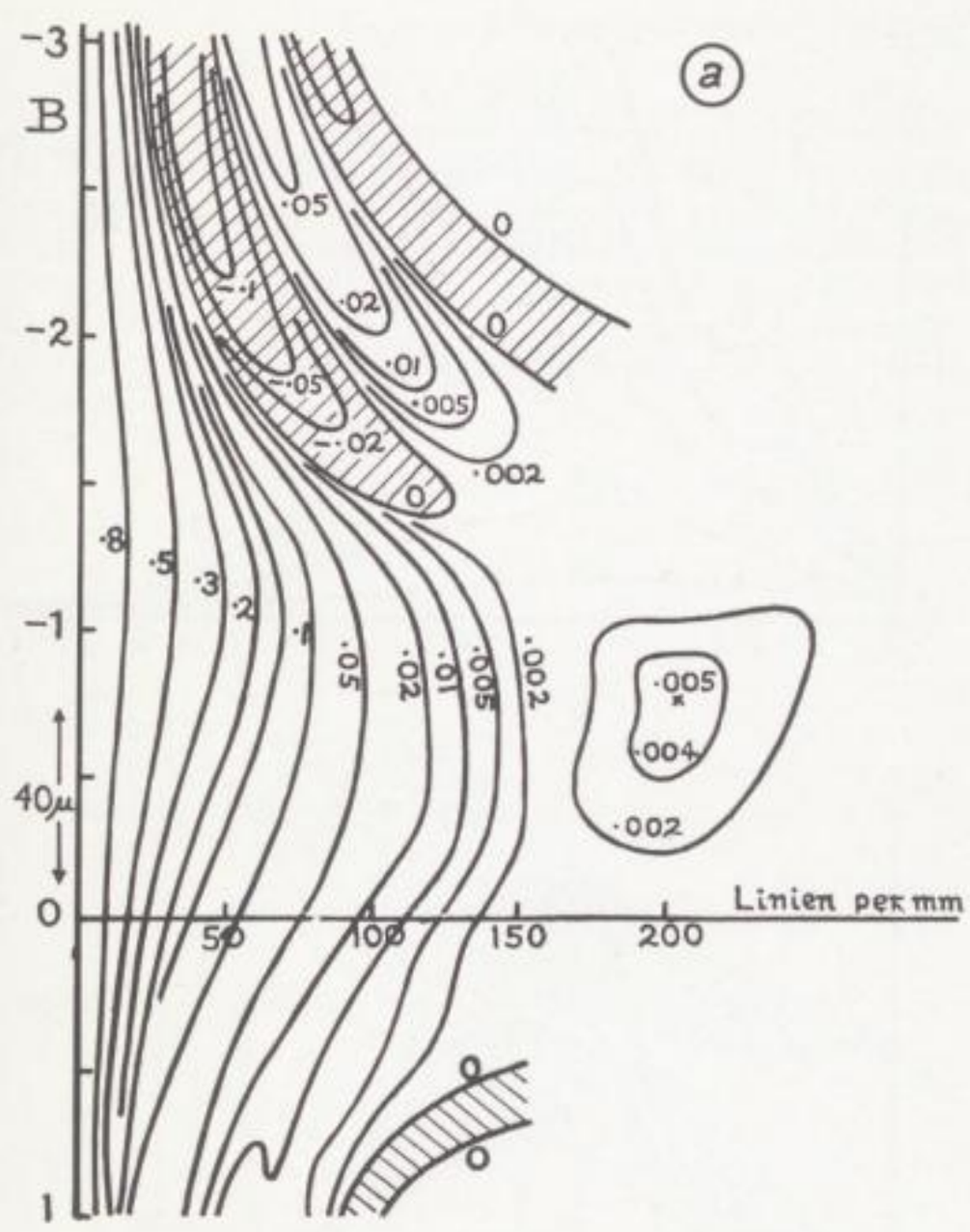


Abb. 3a. Öffnungsverhältnis F/4.

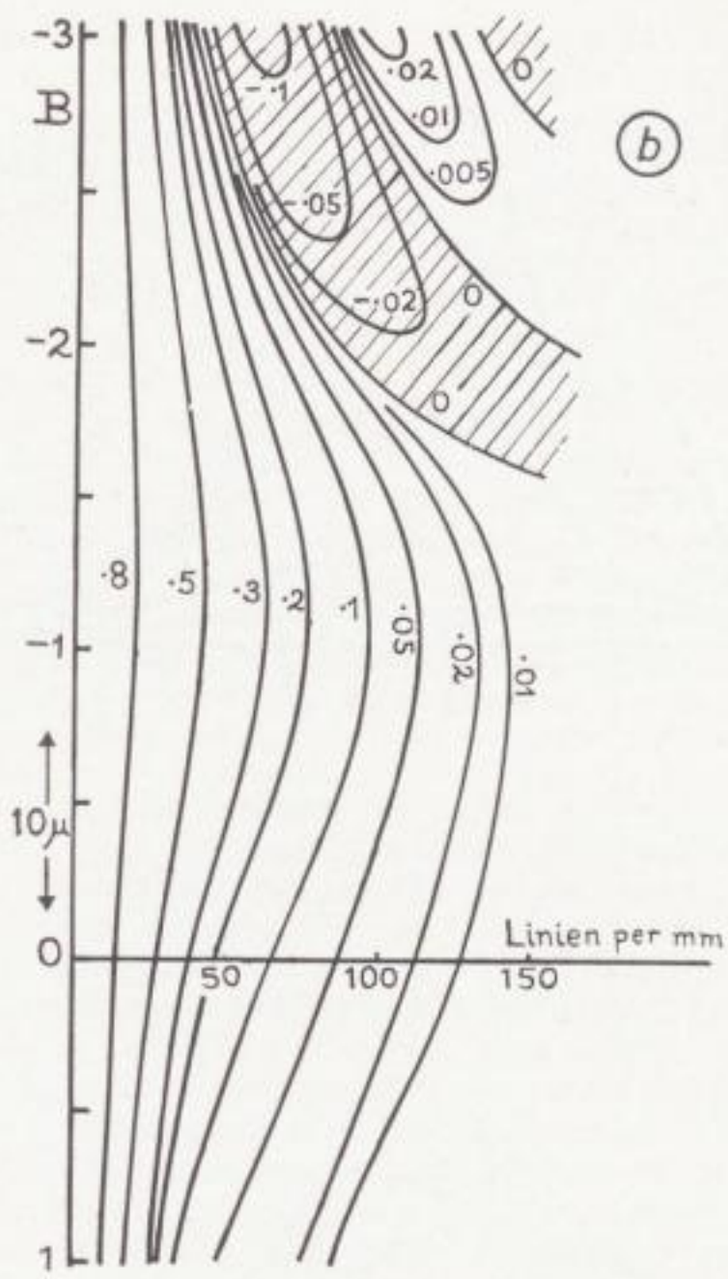


Abb. 3b. Öffnungsverhältnis F/2.

Abb. 3. Photographische Kontrastübertragung $\tau\tau_1$ eines Monochromats mit zwei Wellenlängen primärer sphärischer Aberration, zusammen mit einer der Abb. 1 entsprechenden Modellemulsion. Hier bedeuten die Abszissen Linien per mm; die Ordinate B hat dieselbe Bedeutung wie in Abb. 2. Die Kurven geben die Werte von $\tau\tau_1$ an; in den schraffierten Gebieten ist $\tau\tau_1 < 0$ (Pseudoauflösung).

Die Eigenschaften des photographischen Bildes werden nicht direkt durch die τ-Werte bestimmt, sondern durch die Werte des Produktes $\tau\tau_1$, das die Kontrastübertragung des Systems Linse-plus-Emulsion darstellt. Als Funktion der normierten veränderlichen s betrachtet, hängt τ_1 natürlich nicht nur von den Eigenschaften der Emulsion ab, sondern auch von dem Öffnungsverhältnis des Systems. Abbildung 3a zeigt die Werte der photographischen Kontrastübertragungsfunktion $\tau\tau_1$ im Falle eines F/4-Systems, Abbildung 3b im Falle eines F/2-Systems, je mit der Modellemulsion 10. Dabei haben die Abszisse s und die Ordinate B dieselbe Bedeutung wie in Abbildung 2.

Der kleine Hügel in der Nähe von Punkt $s = 0.8$, $B = -0.75$ zeigt die Wirkung des schon erwähnten sekundären τ_1-Maximums auf die photographische Übertragungsfunktion $\tau\tau_1$. Die Wirkung dieses Hügels auf die Qualitätsbewertungen ist offensichtlich äußerst gering.

In Abbildung 4 stellen die Kurven die vier berechneten Qualitätsbewertungen für die Fälle (7) dar, wobei die primäre sphärische Aberration 2λ beträgt und τ_1 durch Abbildung 1 angegeben wird. In der vierten Bewertung (6) wird $R = 100$ angenommen, was einem ziemlich ‚reinen' Bilde entspricht.

In allen untersuchten Fällen stimmen die vier Bewertungen miteinander sehr gut überein. Bei jedem der ausgewählten Öffnungsverhältnisse liegt nach jeder Bewertung der „beste" Fokus dicht bei Mittelfokus ($B = -1$). Nach jeder Bewertung ist die Einstellungstoleranz, die einer 20%igen Verminderung der Qualität entspricht, bei festgegebenem Öffnungsverhältnis ungefähr dieselbe.

Es ist gar nicht verwunderlich, daß Fidelität (Abb. 4a) und photographische Definitionshelligkeit (Abb. 4b) bis auf eine Normierungskonstante gut miteinander übereinstimmen. Denn aus der Identität

$$1 - |1 - \tau\tau_1|^2 = 2R(\tau\tau_1) - |\tau\tau_1|^2 \qquad (8)$$

folgt unmittelbar, daß die Bewertungen (3), (4), (5) durch die Gleichung

$$\text{(phot. Fidelität)} = \text{(phot. Definitionshelligkeit)} - \frac{1}{4 \cdot 36}\,\text{(phot. Strukturauflösung)} \qquad (9)$$

verbunden sind. Von bedeutsamerem Interesse ist die enge Übereinstimmung zwischen denjenigen Bewertungen (Abb. 4a, 4b), die auch das Vorzeichen von $\tau\tau_1$ (oder allgemeiner ihre komplexe Amplitude) in Betracht ziehen, und denjenigen, die nur von dem absoluten Werte $|\tau\tau_1|$ abhängen (Abb. 4c, 4d). Bei allen obenerwähnten berechneten Sonderfällen bemerkt man, daß man nichts von praktischer Bedeutung verliert, wenn man die Qualität des Systems durch $|\tau\tau_1|$ anstatt durch $\tau\tau_1$ selbst abschätzt. Man weiß aber nicht, inwieweit dasselbe für Systeme mit größeren, auch unsymmetrischen Bildfehlern noch gültig bleibt. Es läßt sich zwar aus allgemeineren optischen Überlegungen noch einsehen [10], daß obige vier Bewertungen miteinander immer gut übereinstimmen müssen, wenn die Bildfehler klein sind, aber es ist auch klar, daß eine Divergenz zwischen den beiden Bewertungstypen auch bei nur mäßiger Koma zu erwarten wäre.

Bei der Abschätzung optischer Qualität durch den Informationsinhalt ist es bequem, die Informationsdichte in den Bildern entweder in bits per Beugungsscheibchen oder in megabits per cm² auszudrücken. Ersteres scheint bei festgegebener Apertur 2H des Systems (z. B. in vielen astronomischen Anwendungen) und in allgemeinen theoretischen Untersuchungen zweckmäßig zu sein, letztere in der gewöhnlichen Photographie. Da es bei dem Öffnungsverhältnis F eine Anzahl $0.2140/\lambda^2F^2$ von Beugungsscheibchen per cm² gibt, ist es eine einfache Sache, aus der einen in die andere Einheit zu transformieren. Abbildung 5 zeigt die Kurven, die man aus Abbildung 4d auf diese Weise erhält. Die Kurven der Abbil-

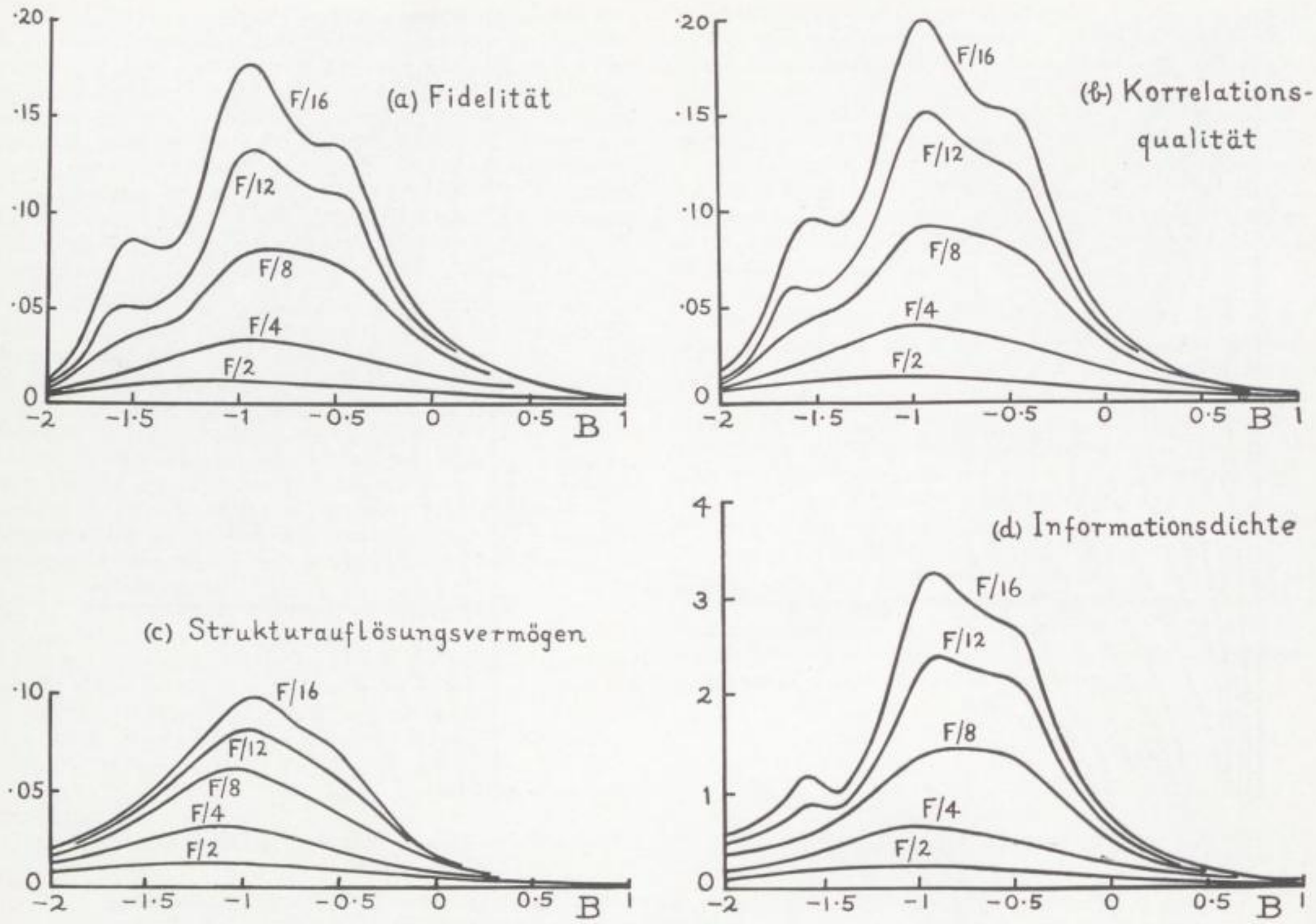


Abb. 4. Qualitätsbewertungen eines Systems mit zwei Wellenlängen sphärischer Aberration: (a) Fidelität, (b) photographische Definitionshelligkeit, (c) Strukturauflösungsvermögen, (d) Informationsdichte in den Bildern einer zufälligen Objektmenge im Falle R = 100 (siehe Text). Der Wert von B gibt gemäß (7) die Fokaleinstellung an; jede Kurve bezieht sich auf ein System mit dem beigeschriebenen Öffnungsverhältnis.

dung 5 sollen eine anschaulichere Darstellung geben der Abhängigkeit der photographischen Bildqualität von dem Öffnungsverhältnis F bei festgehaltenen Bildfehlern. Die entsprechende Transformation der Abbildung 4a (photographische Definitionshelligkeit) wäre damit äquivalent, $(1/F^2)$-mal der photographischen Definitionshelligkeit als Maß der Bildqualität einzuführen*). Aus Abbildung 4 folgt dann, daß letztere Qualitätsbewertung mit der Bewertung durch den Informationsbetrag per cm² (Abb. 5) bis auf eine Normierungskonstante gut übereinstimmt.

*) J. FOCKE [13] hat vor kurzem vorgeschlagen, das Produkt $H_R V$ als Schärfekriterium des Luftbildes zu nehmen, wobei V die klassische Definitionshelligkeit und H_R den normierten Blendenradius darstellen. Nach den obigen Erwägungen wäre es vielleicht natürlicher, $H_R{}^2V$ statt $H_R V$ zu benutzen.

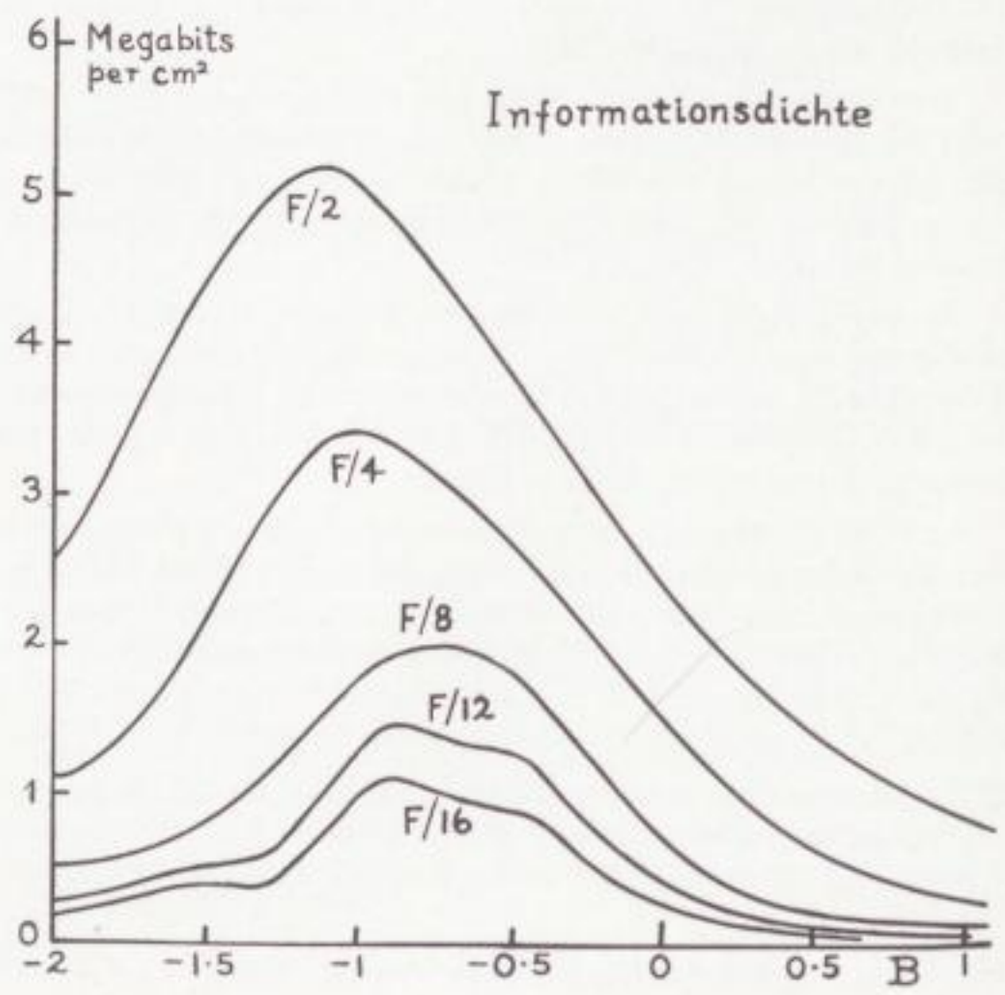


Abb. 5. Informationsbeitrag per cm² in den Bildern einer zufälligen Objektmenge, die von einem Monochromat mit zwei Wellenlängen sphärischer Aberration photographisch abgebildet wird. Dabei wird der Annahmefaktor der Emulsion durch Abb. 1 angegeben und der Wert des „signal to noise"-Verhältnisses R zu 100 angenommen. Jede Kurve bezieht sich auf ein System des beigeschriebenen Öffnungsverhältnisses. Die Abszisse B gibt wieder die Fokaleinstellung an.

3. Informationsverteilung zwischen den verschiedenen Linienfrequenzen

Es scheint, daß wir eine besonders nützliche graphische Darstellung der Leistungsfähigkeit eines photographischen Systems erhalten können, indem wir für die Bilder einer zufälligen niedrigkontrastigen Objektmenge die mittlere Informationsdichte über das vorgeschriebene Feld gemäß den Beiträgen analysieren, die von den verschiedenen Linienfrequenzen geliefert werden; dies alles für eine Strecke von Fokaleinstellungen, wie z. B. in Abbildung 6.

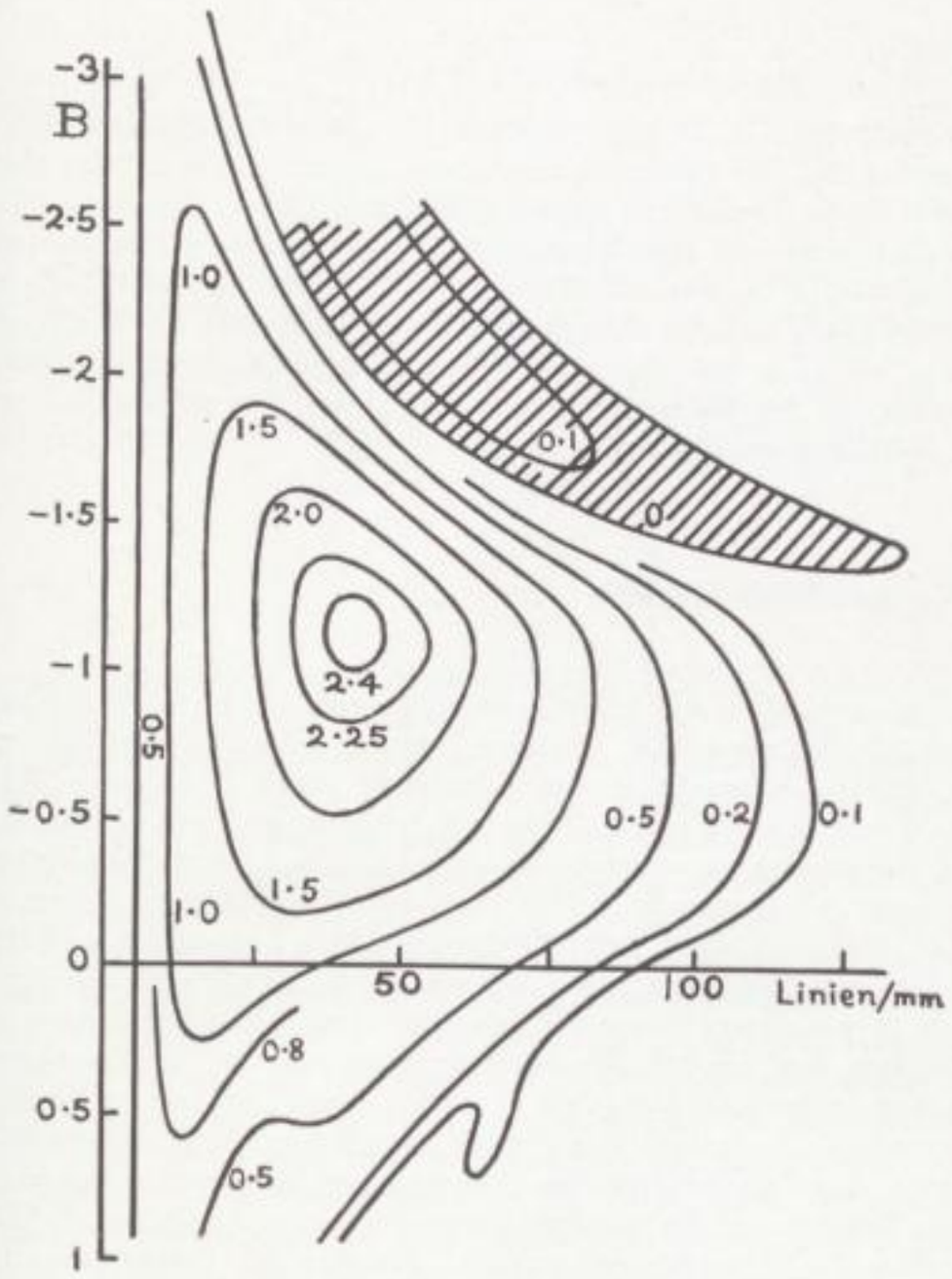


Abb. 6. Relative Informationsbeiträge der verschiedenen Linienfrequenzen für den in Abb. 5 dargestellten Fall eines F/4 photographischen Systems mit zwei Wellenlängen sphärischer Aberration und mit R = 100. Die Ordinate B gibt die Fokaleinstellung an. Längs jeder horizontalen Linie B = konst. stellt der durch die Kurven angedeutete Werteverlauf den Informationsbeitrag in bits per Beugungsscheibchen per s-Einheit dar, wobei s die normierte Linienfrequenz der Abb. 2 bezeichnet. Die Abszisse des mit x angedeuteten (s, B)-Maximums kann als Schärfeindex des Systems aufgefaßt werden.

Hierin ist das System ein F/4-Monochromat mit zwei Wellenlängen sphärischer Aberration, zusammen mit der Emulsion 10. Bei dieser Modellemulsion steht der Rauschpegel noch zur Verfügung. Es wird das Verhältnis $R = P/N$ gleich 100 vorausgesetzt, was einem ziemlich „reinen" Bild entspricht. Mit Hilfe der Figur sieht man leicht ein, welche Einstellung für die Wiedergabe kleiner Details von vorgegebener Größe die beste sei. Die Kurven geben die Werte der Funktion $5.30\ s \log_e \{ 1 + |\tau\tau_1|^2 R \}$ an, d. h. die relativen Informationsbeiträge, die den verschiedenen kleinen Linienfrequenzstrecken $(s, s + ds)$ entsprechen. Um der Anschaulichkeit willen werden aber die Abszissen in Linien per mm ausgedrückt; es stellt z. B. der s-Wert 0.20 eine Frequenz von 50 Linien per mm dar. Die Ordinate B gibt wie vorher die Fokaleinstellung an. Man sieht sofort ein, daß die feinen Details (Linienfrequenz 10 bis 80 per mm) das meiste zur Information beitragen.

Durch das (s, B)-Maximum des ebengenannten Ausdrucks $5.30\ s \log_e \{ 1 + |\tau\tau_1|^2 R \}$ werden eine besondere Fokaleinstellung ($B = -1.125$ im gegenwärtigen Falle) und eine besondere zugehörige Linienfrequenz (ungefähr 42 Linien per mm) definiert. Letztere dürfte vielleicht als photographischer Schärfeindex des Systems für den vorhandenen Wert 100 des „signal-to-noise"-Verhältnisses R aufgefaßt werden. Bei jeder festgehaltenen Einstellung des Systems wird durch das s-Maximum der ebengenannten Funktion auf der entsprechenden horizontalen Linie B = konst. eine zugehörige Linienfrequenz bestimmt, die einen entsprechenden Schärfeindex für das System bei der gegebenen Einstellung definiert. Bei Defokussierung fällt dieser Schärfeindex von seinem größten Wert schnell ab. Im Falle der Abbildung 6 vermindert eine Defokussierung bis zum Randfokus den Index schon auf ein Drittel seines größten Wertes.

Bei einer Abnahme des „signal-to-noise-Verhältnisses R von 100 bis auf 8 vermindert sich der durch das (s, B)-Maximum definierte Schärfeindex von 42 auf 30 Linien per mm. Dabei bleibt der zugehörige B-Wert fast unverändert in der Nähe von $B = -1$.

Das hier angedeutete Verfahren hat den Vorteil, auch bei Systemen mit unsymmetrischen, über das Feld stark wechselnden Bildfehlern eine ebenso anschauliche Darstellung ihrer Leistungsfähigkeit zu geben, wie bei dem in Abbildung 6 dargestellten Sonderfall. Nur werden die Rechnungen, die zu dieser Darstellung nötig sind, um ein Vielfaches länger. Das ist aber seit der Entwicklung der schnellen elektronischen Rechenmaschinen kein entscheidender Nachteil mehr.

Zum Schlusse möchte ich Herrn P. Swinnerton-Dyer und Frl. C. P. Wilks meinen herzlichen Dank ausdrücken. Herr Swinnerton-Dyer hat mit der Rechenmaschine EDSAC II des Mathematischen Laboratoriums in Cambridge die große Anzahl numerischer Integrationen ausgeführt, worauf alle hier angegebenen Resultate beruhen. Frl. Wilks hat mir wertvollen Beistand mit den sich daran anschließenden Rechnungen und mit der Vorbereitung der Abbildungen geleistet.

LITERATUR

[1] Shannon, C. E.: Bell System Tech. J. 27 (1948), 379–423, 623–656.
[2] Fellgett, P. B.: J. of the Optical Soc. Amer. 43 (1953), 271–282.
[3] Fellgett, P. B., and E. H. Linfoot: Phil. Trans. Roy. Soc. A 247 (1955), 369–407.
[4] Linfoot, E. H.: J. of the Optical Soc. Amer. 45 (1955), 808–819.
[5] Linfoot, E. H.: J. of the Optical Soc. Amer. 46 (1956), 740–752.
[6] Linfoot, E. H.: Beitrag an *Astronomical Optics*, Red. Z. Kopal, North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1956, 38–49, 71–76.
[7] Hopkins, H. H.: Proc. Phys. Soc. 69 (1956), 562–576.
[8] Black, G., and E. H. Linfoot: Proc. Roy. Soc. A 239 (1957), 522–540.
[9] Linfoot, E. H.: Optica Acta 4 (1957), 12–16.
[10] Linfoot, E. H.: Optica Acta 5 (1958), 1–14.
[11] Linfoot, E. H.: Physica 24 (1958), 476–494.
[12] Coltman, J. W.: J. of the Optical Soc. Amer. 44 (1954), 468–471.
[13] Focke, J.: Optik 14 (1957), 92–94.

F: ANWENDUNG DER ÜBERTRAGUNGSTHEORIE AUF ALLGEMEINE PHOTOGRAPHISCHE PROBLEME

ANWENDUNG DER ÜBERTRAGUNGSTHEORIE AUF VERSCHIEDENE PRAKTISCHE PROBLEME

Von H. Frieser

1. Einleitung

Bei der Anwendung der Übertragungstheorie in der Praxis wird die Art des photographischen Problems von Bedeutung sein. Im allgemeinen wird man zwei Gruppen von Problemen unterscheiden können. Bei der einen kommt es im wesentlichen darauf an, kleine Details noch zu erkennen ohne Rücksicht auf eine photographische Ähnlichkeit zwischen Bild und Objekt. Solche Probleme treten bei vielen technischen, physikalischen und biologischen Anwendungen auf (astronomische Aufnahme, Spektralaufnahme, Licht- und Elektronenmikroskopie, Röntgenphotographie). Bei der Betrachtung der Bilder werden u. U. optische Hilfsmittel angewendet. Bei der zweiten Gruppe von Aufnahmen wird eine möglichst große Ähnlichkeit zwischen Bild und Objekt gefordert. Hier genügt nicht die Ebenerkennbarkeit mit optischen Hilfsmitteln, sondern die Details müssen auch bei Betrachtung des Bildes aus einem gewissen Betrachtungsabstand möglichst eben so gut sichtbar sein, wie sie es bei einer entsprechenden Betrachtung des Originals wären. In den folgenden Ausführungen werden beide Arten der Betrachtung berücksichtigt werden.

2. Bilderzeugung bei Forderung nach Erkennbarkeit

Die Erkennbarkeit eines Details wird behindert einerseits durch die Kontrastverminderung durch die Verwaschung, andererseits durch die Kornstruktur des Bildes. Letzteres kann man folgendermaßen erfassen: Man geht zweckmäßig von einem aufbelichteten Raster mit dem Rasterlinienabstand r aus und untersucht, wie dieser Raster im Bild bei mikrophotometrischer Abtastung mit einer Meßfläche von der Größe $\frac{r}{2} \cdot \frac{r}{2}$ festgestellt werden kann. Im Bild soll nach Kontrastverringerung durch Verwaschung im Mittel eine Schwärzungsdifferenz $\Delta S = S_{max} - S_{min}$ erhalten werden. Mißt man nun den Raster mit einer quadratischen Meßfläche von der Seitenlänge $\frac{r}{2}$, so werden die gemessenen Werte für Maximal- und Minimalschwärzung wegen der Kornstruktur der Schicht um Mittelwerte schwanken, und es kann sogar der Fall eintreten, daß an einer belichteten Stelle des Rasters die Schwärzung kleiner als an einer benachbarten unbelichteten ist. Die Streuung der Schwärzung bei der Schwärzung S ist entsprechend Gleichung (37) und (20) der vorstehenden Abhandlung

$$\sigma(S) = \frac{G(S = 0{,}5)\sqrt{S} \cdot \sqrt{2}}{\frac{r}{2}} \quad . \tag{1}$$

Damit der Raster im Bild erkannt wird, darf ΔS gegenüber σ nicht zu klein sein, d. h. es darf der Quotient $\frac{\Delta S}{\sigma}$ einen bestimmten Wert nicht unterschreiten. Für deutliche Sichtbarkeit muß nach vorläufigen Versuchen

$$\frac{\Delta S}{\sigma} \geqslant 5 \tag{2}$$

sein, für schwache Erkennbarkeit genügt ein kleiner Wert. Die Verhältnisse werden durch Abb. 1 erläutert (schematisch). Es wurde ausgegangen von einem Strichraster und einer Schicht mit einem k-Wert [Gl. (2)] $k = 30\,\mu$ und $G(S = 0{,}5) = 1\,\mu$ [Gl. (38)]. Als Abszisse ist die Raumfrequenz, als Ordinate die ΔS-Werte für verschiedene Neigung der S-Kurve (ausgezogene Kurve) und die Werte von σ (gestrichelt) für verschiedene Schwärzungen eingezeichnet. Nimmt man an, daß für die Erkennbarkeit genügt, wenn $\frac{\Delta S}{\sigma} \geqslant 1$ ist, so gibt der Schnittpunkt entsprechend ΔS- mit der σ-Kurve die eben noch auflösbare Raumfrequenz (Auflösungsvermögen) an. Man kann mit Abb. 1 die Veränderung des Auflösungsvermögens mit steigender Belichtung (d. h. steigende Schwärzung) ermitteln. Bei kleinen Schwärzungen, d. h. im Durchhang der Schwärzungskurve, ist deren Neigung (g) klein. Sie steigt mit steigender Schwärzung, um schließlich einen konstanten Wert (γ-Wert) zu erreichen. In Abb. 1 ist ein Beispiel durch eine stärker gezeichnete Kurve angegeben, welche zeigt, daß das Auflösungsvermögen mit steigender Schwärzung zunächst zunimmt (steigende g-Werte) und dann nach Erreichung eines konstanten g-Wertes (Maximum) abnimmt (da σ mit steigender Schwärzung zunimmt), wie dies auch experimentell gefunden wird. Das Diagramm zeigt deutlich den Einfluß der Kornstruktur auf das Auflösungsvermögen und macht klar, daß es wegen dieses Einflusses nicht ohne weiteres zur Bestimmung der Verwaschung verwendet werden kann. Aus den vorstehenden Überlegungen lassen sich einige wichtige Schlüsse auf die zweckmäßig zu verwendende Empfindlichkeit ziehen. Im folgenden soll von der Wirkung der Verwaschung abgesehen werden, was mit guter Annäherung gemacht werden kann, wenn man von einem sehr kontrastarmen Objekt ausgeht. In einer späteren Arbeit soll auch der Einfluß der Verwaschung berücksichtigt werden.

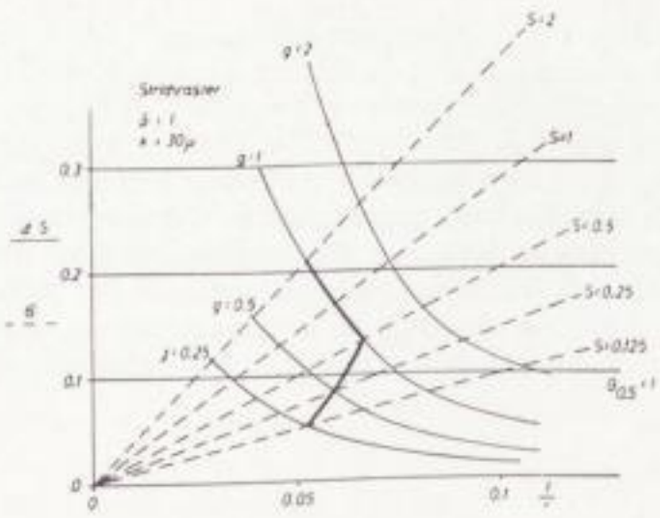


Abb. 1. Ermittlung des Auflösungsvermögens aus der Schwärzungsdifferenz und der Streuung.
—— ΔS für verschiedene Gradienten (g)
- - - - σ für verschiedene Schwärzungen
Aussteuerung des Originalsinusrasters $\hat{p} = 1$
Verwaschung des Diffusionslichthofes mit $k = 30\,\mu$

Nach den vorstehenden Überlegungen darf bei der Wiedergabe eines Rasters mit dem Rasterabstand r die Streuung, gemessen mit einer Meßfläche von der Seitenlänge r/2, höchstens den Wert σ^* annehmen, der proportional $\frac{\sqrt{S}}{r}$ ist [1]. Nach Gleichung (37) der vorstehenden Abhandlung ist die Streuung auch proportional dem mittleren Korndurchmesser, so daß gilt:

$$\sigma^* \sim \frac{d}{r}\sqrt{S}\,. \tag{3}$$

Nun ist die Empfindlichkeit etwa proportional der dritten Potenz des Korndurchmessers [1]:

$$\varepsilon \sim d^3 \tag{4}$$

Somit erhält man für die zur Wiedergabe des Rasters (r) höchste zulässige Empfindlichkeit

$$\varepsilon^* \sim \frac{\sigma^{*3}\, r^3}{S^{3/2}} \sim \frac{r^3}{S^{3/2}}\,, \tag{5}$$

da σ^* durch den Wert von ΔS festgelegt ist [Gl. (2)]. Die Gleichung (5) soll im folgenden beispielsweise auf die Mikrophotographie angewendet werden.

Man erhält den Rasterabstand im Bild (r) durch Vergrößern des Rasterabstandes r_0 des Originals mit der Vergrößerung v ($r = r_0 v$). Für die Herstellung der Aufnahme wird es immer günstig sein, wenn die Belichtungszeit möglichst klein ist. Dies ist dann der Fall, wenn die Empfindlichkeit groß und die Vergrößerung klein ist, d. h. der Ausdruck $\frac{\varepsilon}{v^2}$ möglichst groß ist. Nach (5) ist aber die Empfindlichkeit begrenzt und von r bzw. v abhängig. Es gilt, wenn man in (5) v an Stelle von r einführt:

$$\frac{\varepsilon^*}{v^2} \sim \varepsilon^{*\frac{1}{3}}\,. \tag{6}$$

Daraus folgt, daß bei gegebenem Objekt und gegebener Bildschwärzung, die zur Erzielung von in bezug auf Detailwiedergabe und Korn gleichwertiger Bilder erforderliche Belichtungszeit um so kleiner ist, je empfindlicher der Film ist. Dies gilt aber nur für Lichtexposition. Bei Elektronenexposition gilt ein anderes Gesetz

$\varepsilon \sim d^n$, wobei n etwa zwischen 1,3 und 2

liegt. Es ist dann

$$\frac{\varepsilon^*}{v^2} = \varepsilon^{*\frac{n-2}{n}}$$

Bei $n = 2$ ist $\frac{\varepsilon^*}{v^2}$ also unabhängig von ε^*. Bei < 2 ist es sogar günstig, Schichten mit kleiner Empfindlichkeit zu verwenden.

3. Anwendung auf die bildmäßige Photographie

Die Anwendung der Übertragungstheorie für die bildmäßige Photographie ist besonders deshalb schwierig, weil hier eine Reihe von psychologischen und physiologischen Fragen eine ausschlaggebende Rolle spielt. Es ist vielfach eine Frage des Geschmackes, der der Mode unterworfen ist, ob wir ein Bild als gut, brauchbar oder unbrauchbar beurteilen. Verhältnismäßig einfach ist die Sachlage zu beurteilen bei Reproduktionen, wo eine identische Wiedergabe gefordert wird. Auch beim Fernsehen ist das Problem dadurch einfach, da schon durch die elektrische Übertragung eine Maximalfrequenz gegeben ist, bis zu der möglichst kein Frequenzabfall eintreten darf. Legt man als Maximalfrequenz elektrisch 5 MHz zugrunde, so entspricht das bei 400 Zeilen Bildhöhe bei Aufnahme auf Normalfilm 26 Zeilen/mm (13 Linien/mm), bei 16 mm Schmalfilm 56 Zeilen/mm (28 Zeilen/mm). Bei diesen Raumfrequenzen muß die Wiedergabe noch gut sein, und man kann feststellen, daß das für das Umkehrverfahren auch bei Schmalfilm mit recht guter Annäherung zutrifft.

Schwieriger ist die Beurteilung, wenn es sich um die Wiedergabe von Naturausschnitten oder von Portraits handelt. Hier sind die notwendigen Übertragungsbedingungen bloß durch ausführliche systematische Versuche feststellbar. Grundsätzlich wird es zweckmäßig sein, immer so vorzugehen, daß man den Übertragungsprozeß mit physikalischen Mitteln bis zum endgültigen Bild untersucht, und das endgültige Bild von Versuchspersonen beurteilen läßt. Man kann so einer von den Versuchspersonen ermittelten Bildqualität die physikalisch gemessenen Bildeigenschaften zuordnen.

Von Bedeutung ist bei der Beurteilung die Frage des Betrachtungsabstandes. Man kann entweder als Betrachtungsabstand die sogenannte deutliche Sehweite, das sind 250 mm festlegen. Dadurch werden aber vor allem Vergrößerungen zu streng beurteilt, da man diese im allgemeinen, wenn es sich um größere Formate handelt, aus einem größeren Abstand betrachtet. In diesem Fall ist es üblich, die doppelte lange Seite des Bildes als Betrachtungsabstand zu wählen. Es wird erforderlich sein, das Bild in bezug auf Körnigkeit und Schärfe zu beurteilen.

a) Körnigkeit

Für ein ideales Bild wird man verlangen, daß im Betrachtungsabstand die Körnigkeit nicht sichtbar ist. Es wurde der Begriff der Grenzvergrößerung eingeführt, das ist die Vergrößerung, der man ein Negativ oder Positiv unterwerfen kann bis es im Abstand von 25 cm betrachtet keine sichtbare Körnigkeit mehr aufweist.

Die Grenzvergrößerung wird vor allem von L. A. Jones und Higgins [2] in einer Reihe von Arbeiten untersucht, vor allem auch im Zusammenhang mit anderen die Körnigkeit charakterisierenden Größen. Hansen und Keck [3] leiteten theoretisch den Zusammenhang zwischen der Grenzvergrößerung und der mittleren Schwärzungsschwankung ab. Sie konnten zeigen, daß die Grenzvergrößerung umgekehrt proportional dem Wert von G ist [Gl. (38) der vorstehenden Abhandlung] und auch im Zusammenhang mit dem aus dem Callierkoeffizienten gewonnenen Körnigkeitswert K steht. Letzteres konnten auch Eggert und Küster [4] und Frieser und Hornung [5] für Kopie und Vergrößerung zeigen.

b) Schärfe

Zur Beurteilung der Schärfe von Bildern wurde von Jones und Higgins [6] der Verlauf an einer aufgenommenen scharfen Kante verwendet. Als Acutance (A) wird der quadratische, zwischen festgelegten Grenzen bestimmte Mittelwert des Gradienten des Schwärzungsverlaufs an dem Kantenbild genommen, der nach Higgins und Wolfe [7] noch durch den Schwärzungsunterschied dividiert wird. Nach diesen Autoren [7] ist aber für die Beurteilung der Qualität eines Bildes hinsichtlich der Wiedergabe kleiner Details („Definition") nicht nur die „Acutance" (A), sondern auch das Auflösungsvermögen (AV in Linien/mm) maßgebend, und sie geben folgenden Ausdruck für die „Definition" an:

$$A\left(1 - e^{-0{,}007\,AV^2}\right).$$

Eine Beurteilung von Bildern hinsichtlich der Schärfe und Körnigkeit wurde von Frieser und Hornung vorgenommen [5]. Sie machten mit einer Kleinbildkamera Aufnahmen eines Objektes, welches eine Grauskala und Raster verschiedenen Rasterabstandes enthält. Die Aufnahmen wurden in verschiedener Entfernung, also mit verschiedenem Abbildungsmaßstab vorgenommen und schließlich auf dasselbe Format vergrößert. Die Vergrößerungen beurteilte man dann aus der doppelten Bildbreite und beobachtete, welches Raster gerade noch aufgelöst werden kann. Die Ergebnisse dieser Versuche, die mit drei verschiedenen Filmsorten hergestellt wurden, zeigt die Abb. 2. Als Abszisse ist der Rasterabstand im Negativ aufgetragen, welcher bei Betrachtung des vergrößerten Positivs in 250 mm Abstand eben aufgelöst wird, als Ordinate die Vergrößerung. Außerdem enthält die Darstellung noch einige, vom Koordinatenursprung ausgehende Grade, welche verschiedenen Sehwinkeln bzw. Linienzahl/Bildbreite entsprechen (Bildbreite = $\frac{1}{2}$ Betrachtungsabstand). Auf der Ordinatenachse ist noch die

Länge der langen Seite, d. h. der Bildbreite des Negativs eingetragen, die der angegebenden Vergrößerungszahl entspricht. Die Beurteilung der Bilder ergab, daß ein Bild noch als ausreichend scharf bezeichnet wurde, wenn etwa 1000 Linien/Bildbreite erkannt werden konnten. Bilder unter 1000 Linien/Bildbreite hatten bereits eine mangelnde Schärfe. Ausgezeichnete Schärfe wurde aber erst

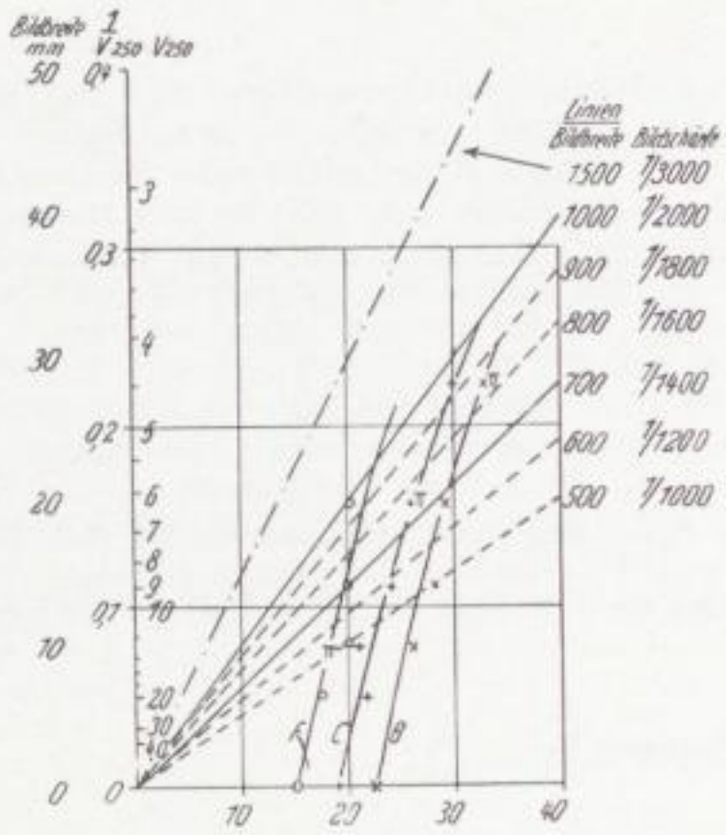


Abb. 2. Vergrößerung und eben auflösbarer Rasterabstand.
Abszisse: Eben auflösbarer Rasterabstand.
Ordinate: Vergrößerung bei Betrachtungsabstand 250 mm; Negativbreite bei Bildbreite 125 mm.
Linien gleich Bildschärfe.
○ Film F (Agfa Isopan FF)
+ Film C (Agfa Isopan F)
× Film B (Kodak SS)
// Punkt von dem an die Körnigkeit sichtbar wird.

bei Bildern beurteilt, die etwa 1500 Linien/Bildbreite zeigten, wie es nur bei Kontaktkopien von großformatigen Aufnahmen erhalten wurde. Für jeden Film ist auch noch der Punkt eingetragen, bei dem die Versuchsperson die Körnigkeit als störend empfand. Dies ist bei grobkörnigen, empfindlichen Filmen bereits bei niedrigeren Vergrößerungen der Fall als bei den Feinkornfilmen. Im allgemeinen folgt aus den Versuchen, daß bei Feinkornfilmen die mangelnde Schärfe die Vergrößerung begrenzt, während bei empfindlichen, d. h. grobkörnigen Filmen das Korn die Vergrößerungsfähigkeit begrenzt. Eine Erläuterung findet dieser Versuch durch die Abb. 3. Hier sind die Schwärzungsdifferenzen eingetragen, die man erhält, wenn man ein Sinusraster mit der Aussteuerung $\hat{p} = 1$ und einer Verwaschung entsprechend $k = 30\,\mu$ aufnimmt und mit verschiedenen Vergrößerungen (v) vergrößert. Die Neigung der Schwärzungskurve des Gesamtprozesses ist zu $g = 1$ angenommen. Bei der Vergrößerung soll keine weitere Verwaschung eintreten. Als Ordinate ist die Raumfrequenz $\frac{1}{r}$ in der Vergrößerung eingetragen sowie der Winkel (α), unter dem ein Rasterelement in einem Betrachtungsabstand von 250 mm erscheint. Die Zahl der Linien pro Bildbreite (125 mm) ist ebenfalls angegeben. Außerdem enthält die Darstellung den Schwärzungsunterschied, der im Bild erreicht sein muß, damit der Raster vom Auge noch aufgelöst wird. Nur in dem Gebiet links von dieser Kurve tritt also Auflösung ein. Diese Kurve ist nur schematisch zu werten. Sie wird aus der Filterfunktion einer kreisförmigen Öffnung ermittelt und die Nullstelle auf $\alpha = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ gelegt*).

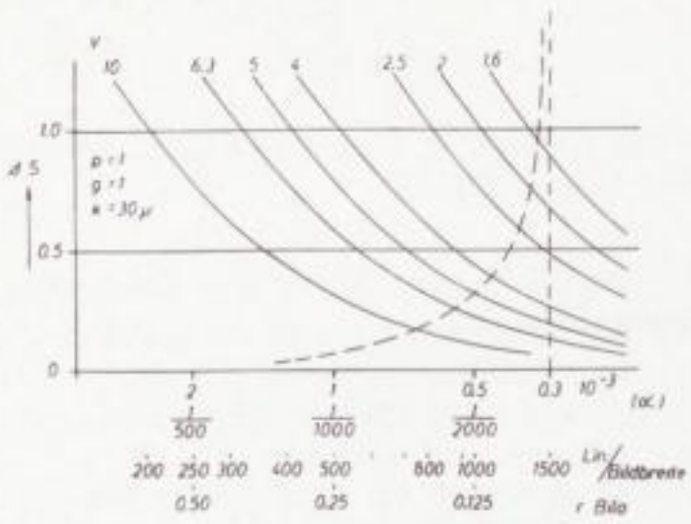


Abb. 3. Erkennbarkeit eines Rasters bei einem Betrachtungsabstand von 250 mm (schematisch).
Ordinate: Rasterlinienabstand (r) im Bild (mm); Winkel (α), in dem r in 250 mm erscheint ($\alpha = \frac{r}{250}$); Linien/Bildbreite für Bildbreite = 125 mm.
Abszisse: —— ΔS bei einem Sinusraster mit der Aussteuerung im Original $\hat{p} = 1$, Gradient der Schwärzungskurve $g = 1$ und Verwaschung des Diffusionslichthofes: $k = 30\,\mu$ für verschiedene Vergrößerungen.
- - - - Minimaler Schwärzungsunterschied, bei dem ein Raster eben noch erkannt werden kann in Abhängigkeit vom Winkel α (schematisch, zur Berechnung wird als Kontrastübertragungsfaktor des Auges die Filterfunktion einer kreisförmigen Öffnung angenommen, deren Nullstelle bei $\alpha = 0{,}3 10^{-3}$ liegt).

Eine bessere Beurteilung erhält man noch auf folgendem Weg: Man bestimmt die Kontrastübertragungsfunktion des Gesamtprozesses, indem man einen Strichraster mit dem Objekt aufnimmt und diesen Strichraster mikrophotometrisch auf der Vergrößerung ausmißt. Diese verschiedenen Vergrößerungen können nun auf bildmäßige Wirkung beurteilt werden, und man kann auf diese Weise einen Zusammenhang zwischen der Kontrastübertragungsfunktion des Gesamtprozesses und der Qualitätsbeurteilung des Bildes erhalten. Es ist möglich, durch besondere Vorkehrungen die Kontrastübertragungsfunktion willkürlich zu verändern, so daß man auch die bildmäßige Wirkung von ungewöhnlichen Kontrastübertragungsfunktionen beurteilen kann. Die Versuche, welche noch im Gange sind, ergaben, daß in dem Fall, daß der Wert der Kontrastübertragungsfunktion 0,5 bei 500 Linien/Bildbreite beträgt, die Schärfe als sehr gut zu bezeichnen ist. Ist dies schon bei 300 Linien/Bildbreite der Fall, so ist bereits deutlich ein Schärfeverlust zu beobachten, und bei 200 Linien/Bildbreite ist das Bild als unscharf zu bezeichnen.

*) Die Kurve stimmt gut mit der von K.-J. Rosenbruch bestimmten überein. (Optik 16 (1959) 135 – 145).

LITERATUR

[1] Frieser, H., u. E. Klein: Z. Elektrochem. *58* (1954), 655.
[2] Jones, L. A., u. G. C. Higgins:
[3] Hansen u. Koch: Z. wiss. Phot. *37* (1938), 86, 99.
[4] Eggert, J., u. A. Küster: Veröff. Agfa 6 (1939), 186.
[5] Frieser, H., u. W. Hornung: Z. wiss. Phot. *40* (1941), 88.
[6] Jones, L. A., u. G. C. Higgins: SMPTE *58* (1952), 277.
[7] Higgins, G. C., u. R. N. Wolfe: SMPTE *65* (1956), 26.

MESSUNG DES KONTRAST-ÜBERTRAGUNGS-FAKTORS BEI FERNSEHFILMAUFZEICHNUNGEN

Von Dr. J. Goldmann
(Bayerischer Rundfunk, Fernsehstudio, München)

1. Gestellte Aufgabe

Ein ideales Filmaufzeichnungsgerät (FAZ) soll es ermöglichen, ein angeliefertes FS-Signal so zu speichern, daß bei einem späteren Durchlauf des Filmes durch den Filmabtaster (FAT) das nunmehr erzeugte Signal möglichst wenig vom ursprünglichen Signal abweicht. Damit diese Forderung erfüllt werden kann, muß das Übertragungsmaß jedes einzelnen Gliedes der gesamten Übertragungskette, also auch dasjenige des als Speicher verwendeten Filmes genau bekannt sein und laufend überwacht werden. Selbstverständlich sind die gewählten Meßmethoden und Meßgrößen teilweise durch die Eigenarten des FS-Betriebes bedingt. Aus diesem Grunde möge zunächst der vollständige Übertragungsweg von der Aufzeichnung zur Abtastung geschildert werden.

2. Prinzip der Signalspeicherung mittels Filmaufzeichnung und Filmabtastung

In Bild 1 sind die für die Speicherung und Abtastung wichtigen Einzelprozesse schematisch dargestellt. Bei der Aufzeichnung erzeugt das von einer FS-Kamera gelieferte elektrische Signal ein Bild auf einer Bildröhre hoher Qualität (ebener Schirm, gute Randschärfe). Dieses Bild wird durch eine Filmkamera mit schneller Schaltzeit (kleiner als 2 msec) aufgenommen. Um aus dem entwickelten Film wieder ein FS-Signal zu gewinnen, wird das Filmbild im Abtaster durch einen von links nach rechts in Zeilenfolge wandernden Lichtpunkt konstanter Helligkeit beleuchtet. Da das aus dem Film austretende Licht der Transparenz des jeweils beleuchteten Bildpunktes entspricht, liefert eine damit beleuchtete Photozelle Spannungen, die der Transparenz des Bildpunktes streng proportional sind.

Leider besteht diese Proportionalität nicht mehr zwischen der Film-Transparenz und der Leuchtdichte des photographierten Schirmbildes einerseits und zwischen dieser und der das Schirmbild erzeugenden Kameraspannung andererseits. Um trotzdem die gewünschte Proportionalität zwischen der dem Aufzeichner angelieferten und der vom Abtaster abgelieferten Spannung zu erhalten, sind weitere Maßnahmen notwendig. Die Überlegungen nehmen ihren Ausgang am besten von den Eigenschaften der Bildröhre im Aufzeichner. Bei passend gewählter Bezugsspannung gilt zwischen Steuerspannung U_4 und Schirmhelligkeit H mit guter Annäherung die Beziehung

$$\log H = \gamma_1 \cdot \log U_4$$

wobei γ_1 für die jeweilige Röhre eine Konstante ist, die zwischen 1,8 und 2,7 liegen kann.

Die FS-Kamera sei so eingestellt, daß sie für Bild Weiß eine Spannung $U_1 = U_w$ und für Bild Schwarz eine Spannung $U_1 = 0{,}05\ U_w$ abgibt. Wird die Kameraspannung direkt der Bildröhre zugeleitet, d. h. $U_4 = U_1$ gemacht, so ergibt sich bei einem γ_1 von z. B. 2,4 nach obiger Formel ein Helligkeitsumfang des Schirmbildes von $2{,}4 \cdot 1{,}3 = 3{,}1$, der weit über demjenigen liegt, den der Film verarbeiten kann. Wenn aber zur Kameraspannung U_1 eine konstante Spannung U_0 addiert und dann der Bildröhre zugeführt wird, also $U_4 = U_2 = U_0 + U_1$ gemacht wird, verringert sich nach obiger Formel der Helligkeitsumfang. So genügt im gewählten Beispiel ein $U_0 = 0{,}113\ U_w$, um den Helligkeitsumfang von 3,1 auf 2,0 zu senken.

Die Hinzufügung der Gleichspannung geschieht in dem in Bild 1 mit „Grundhelligkeit" bezeichneten Gerät. Durch passende Wahl der Grundhelligkeit und der Blendenzahl des Objektivs läßt sich bei genügender Lichtreserve immer erreichen, daß im günstigsten Arbeitsbereich des Filmes aufgezeichnet wird.

Da die Schwärzungskurve des Filmes für große Bereiche nicht mehr durch eine einfache Potenzfunktion dargestellt wird, ist auch die Dichte des Filmes nicht einfach log U_2 proportional, wenn U_2 direkt an die Bildröhre gelegt wird.

Aus diesem Grunde wird U_2 über ein weiteres Gerät, den Gradationsvorverzerrer, geleitet. Er wird so eingestellt, daß zwischen log U_2 und log U_3 die inverse funktionelle Beziehung besteht wie diejenige der Schwärzungskurve des benutzten Filmes. (U_2: Eingangsspannung; U_3: Ausgangsspannung am Gradationsvorverzerrer.) Mit diesen Maßnahmen läßt sich erreichen, daß zwi-

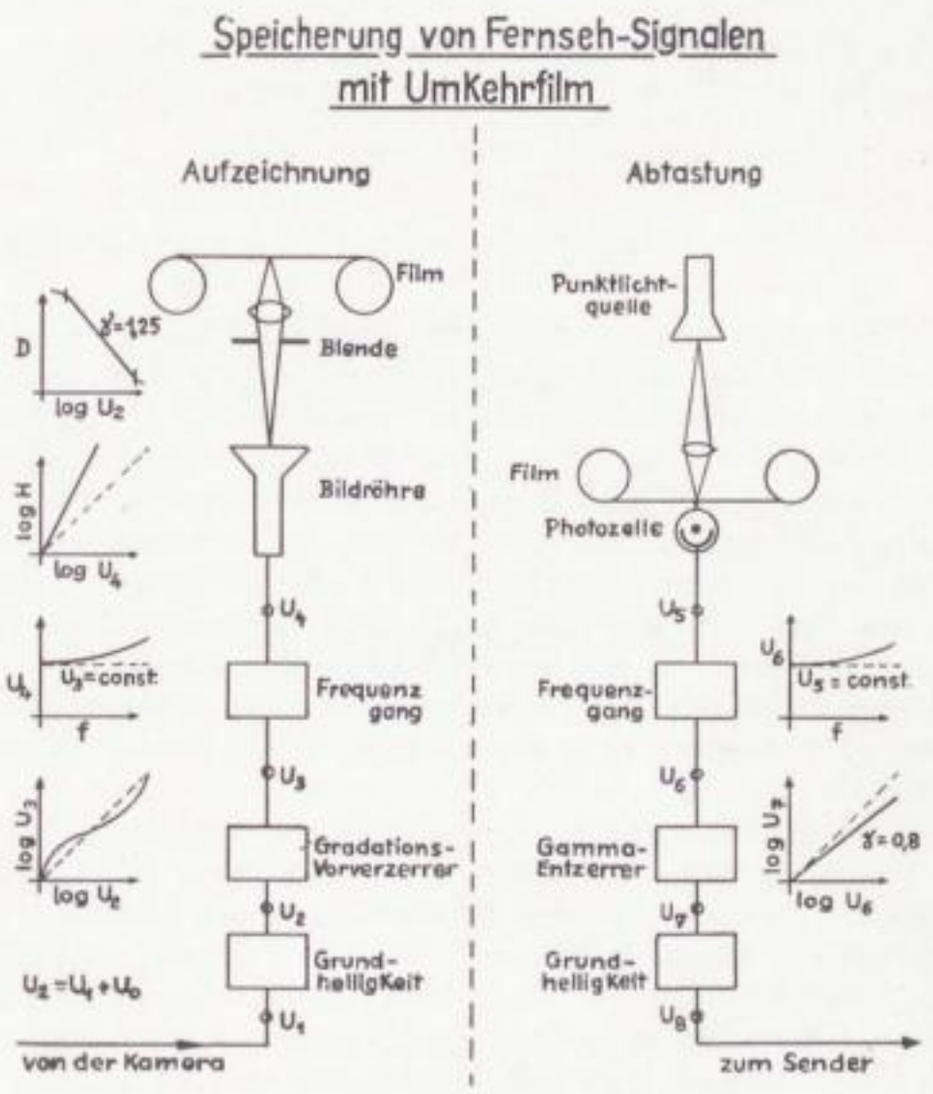


Abb. 1

schen Filmdichte D und Kameraspannung U_1 hinreichend genau gilt:

$$D = A - \gamma \cdot \log (U_0 + U_1)$$

A, U_0: Konstant

γ: Konstant, bedingt durch Film, Gamma der Bildröhre, Objektivöffnung und U_0
Wünschenswert: = 1,25

Die im Fernsehbetrieb benutzten Abtaster enthalten einen einstellbaren Gammaentzerrer. Wird nun das Gamma des Abtasters reziprok zum Gamma der Aufzeichnung eingestellt, so liefert der Abtaster bei passend eingestellter Verstärkung eine Spannung $U_7 = U_0 + U_1$. In einem weiteren Gerät „Grundhelligkeit" wird die zur Aufzeichnung benötigte Spannung U_0 wieder abgezogen: $U_8 = U_7 - U_0$, und die ursprünglich von der Kamera angelieferte Spannung U_1 wieder gewonnen. Der gesamte Kontrastübertragungsfaktor ist dann gleich Eins.

Diese Beziehung gilt mit hinreichender Genauigkeit aber nur, wenn die FS-Kamera Flächenstücke überträgt, deren Ausdehnung nicht zu klein ist. Werden dagegen Strichraster von konstantem Helligkeitsumfang, aber steigender Feinheit übertragen, sinkt der gesamte Kontrastübertragungsfaktor infolge derjenigen der Bildröhren, Objektive und des Filmes. Dementsprechend sinkt mit steigender Rasterfeinheit die vom Abtaster gelieferte Spannung U_8. Dieser Fehler läßt sich teilweise durch Frequenzgangkorrekturen beheben (vgl. Bild 1).

Die vom Abtaster gelieferte Spannung U_8 unterscheidet sich aber von der ursprünglichen Spannung U_1 noch durch eine additive Komponente, die Störspannung U_R, so daß für die Übertragung zwischen U_1 und U_8 gilt:

$$U_8 = K \cdot U_1 + U_R$$

K: Kontrastübertragungsfaktor über alles.

Die Größe von U_R ist durch die Körnigkeit der Bildröhren in FAZ und FAT, die Körnigkeit des Filmes und statistische Schwankungen des Stromes in der Photozelle des Abtasters bedingt. Da die Spannung U_R durch statistische Vorgänge verursacht wird, ist eine spätere Kompensation durch weitere Zusatzgeräte nicht möglich. Es muß also durch Auswahl geeigneter Materialien dafür gesorgt werden, daß der jeweils erzeugte Anteil an U_R hinreichend klein ist.

3. Festlegung der Meßgrößen und verwendetes Testsignal

Wie die Ausführungen im 2. Abschnitt zeigen, gelingt eine befriedigende Speicherung von FS-Signalen auf Film nur, wenn eine Vielzahl von Betriebswerten genau aufeinander abgestimmt werden. Da im Studio der Abtaster unabhängig von der Aufzeichnung betrieben und überwacht wird, genügt die Kontrolle des Kontrastübertragungsfaktors der Aufzeichnung. Die Überwachung des laufenden Betriebes erstreckt sich am besten auf den gesamten Prozeß, d. h. auf die Messung des Kontrastübertragungsfaktors zwischen der Kameraspannung U_1 und der zugeordneten Filmdichte D. Im Betrieb des FS-Studios des Bayerischen Rundfunks werden folgende charakteristischen Werte laufend gemessen und überwacht:

1. Abhängigkeit der Dichte D von der Signalspannung U_1, die einer zehnstufigen Grautreppe entspricht;
2. Abhängigkeit der maximalen und minimalen Dichte (D max und D min) von der Rasterfrequenz für fünf verschiedene Frequenzraster bei konstanter Kameraspannung;
3. Größe und Charakter des Störsignals U_R als Funktion der Dichte in der Grautreppe.

Nicht gemessen werden bisher Phasenbeziehungen zwischen U_1 und D.

Um die jedesmalige mühsame Einstellung einer FS-Kamera auf ein geeignetes optisches Testbild und die anschließende Messung der Kameraspannung zu vermeiden, wurde beim Bayerischen Rundfunk ein elektrischer Testbildgeber entwickelt. Dieser arbeitet mit besonders stabilisierten Röhrenschaltungen und liefert ein genau

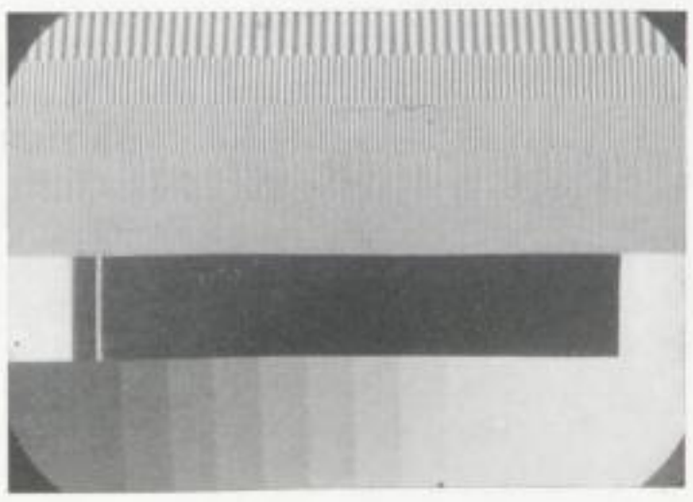


Abb. 2

bekanntes Normsignal, das auf dem Schirm einer Bildröhre ein Bild wie Abbildung 2 erzeugt. Vor Beginn und nach Schluß jeder Aufzeichnung werden ca. 2 m Film mit diesem Testsignal belichtet.

4. Prinzip des Meßgerätes

Zur Messung der im 3. Abschnitt angegebenen charakteristischen Werte des Kontrastübertragungsfaktors wurde beim Bayerischen Rundfunk ein Meßgerät entwickelt, dessen Prinzip im Bild 3 dargestellt ist. Ein Mikroprojektor entwirft ein stark vergrößertes Bild des zu messenden Filmes auf einer rotierenden Dose, die ein kreisrundes Loch entsprechend dem im Fernsehen verwendeten Bildpunkt hat. Die Vergrößerung beträgt 1 : 85, der Lochdurchmesser 0,9 mm. Das durch das Loch in die Dose eintretende Licht wird über zwei Spiegel in die hohle Rotationsachse gelenkt und fällt auf eine Photozelle mit SE-Vervielfacher. Der erzeugte Gleichstrom wird gemessen, er ist der mittleren Transparenz direkt proportional.

Durch das Umlaufen des Loches werden hintereinander Punkte des Filmes, die auf dem Umfang eines Kreises ($r = 190\ \mu$) liegen, abgetastet. Entsprechend den Schwankungen der Filmdichte auf dem Umfang dieses Meßkreises liefert die Photozelle außerdem noch einen Wechselstrom. Nach entsprechender Verstärkung läßt sich seine Kurvenform in einem Oszillographen messen. Der quadratische Mittelwert wird nach Durchlaufen eines Bandpasses, der eine dem Fernseh-System analoge Grenzfrequenz hat, in einem handelsüblichen Geräuschspannungsmesser angezeigt.

Der Film kann mit einem Kreuzschlitten so eingestellt werden, daß der Meßkreis auf jeden gewünschten Teil des Filmes fällt. Da der Durchmesser des Meßkreises kleiner als die Streifenbreite der Grautreppe (Bild 2) gewählt wurde, kann er ganz in eine Stufe gelegt werden. In diesem Fall ist die gelieferte Wechselspannung allein durch die Körnigkeit des Filmes bedingt. Sie wird im Geräuschspannungsmesser gemessen und mit der Spannung verglichen, die erzeugt wird, wenn in den Strahlengang zwischen Mikroprojektor und Meßdose eine Lochscheibe mit 6 Öffnungen geschaltet wird. Das Verhältnis dieser beiden Spannungen wird in db ausgedrückt, mit einem durch das Gamma des Abtasters bedingten additiven Korrekturglied versehen und als Störabstand in Abhängigkeit von der Kameraspannung aufgetragen. Es ist direkt ein Maß für die Störspannung, die durch Körnigkeit des Bildschirmes im Aufzeichner und Filmkorn verursacht ist.

Der Störabstand wird stets über ein Bandfilter gemessen, dessen obere Grenzfrequenz derjenigen eines Fernsehkanals, d. h. 5 MHz, entspricht. Es stören aber die tiefen Frequenzanteile der Störspannung (entsprechend einem großen Filmkorn) beim Betrachten eines Fernsehbildes mehr als die hohen Frequenzanteile

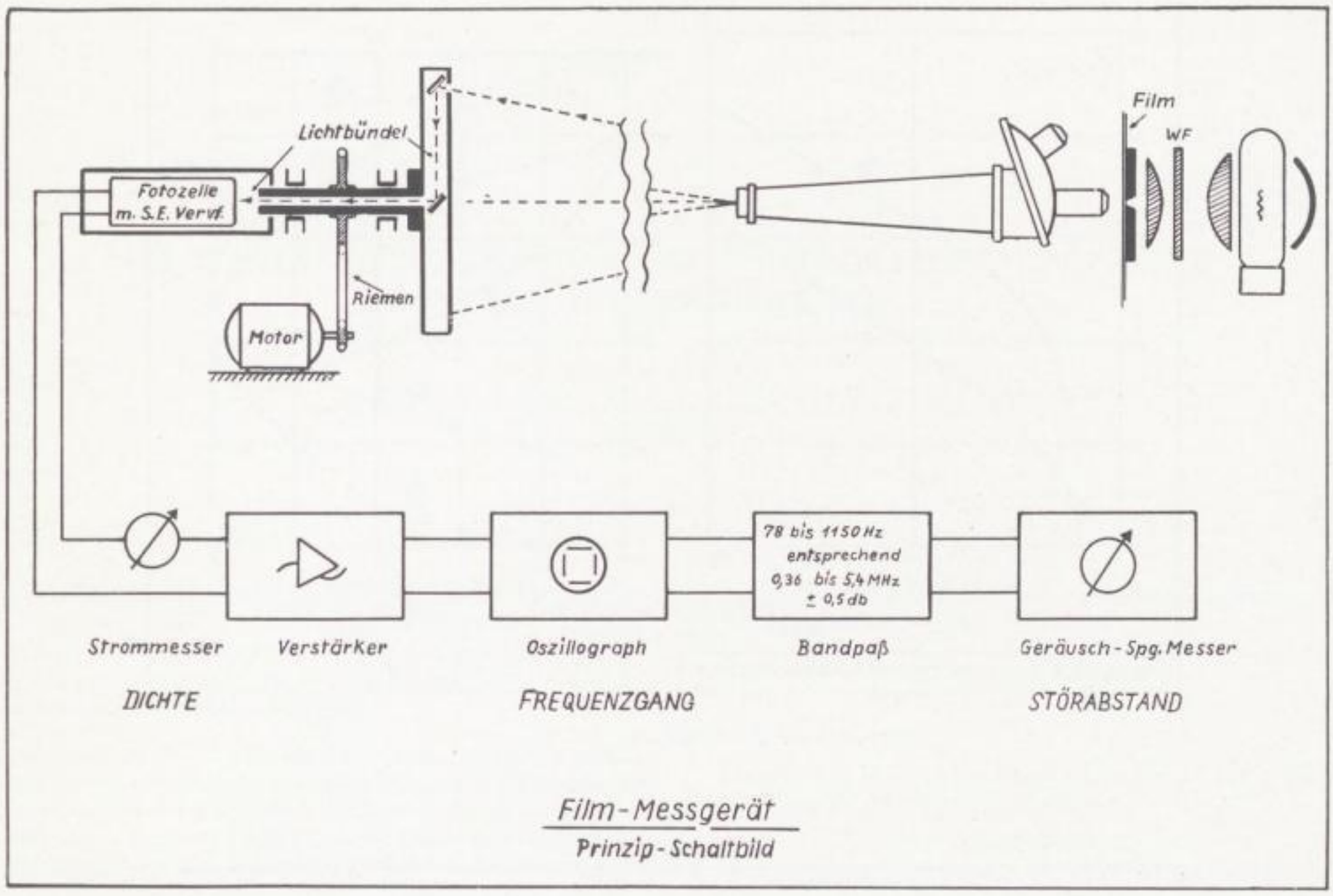


Abb. 3

gleicher Amplitude (entsprechend einem feineren Filmkorn). Soll also die Maßzahl für den Störabstand dem visuellen Störeindruck entsprechen, empfiehlt es sich, bei der Messung die Störspannung zusätzlich über ein Frequenzbewertungsfilter, wie es durch den CCIR normiert wurde, zu führen.

Zur Messung von maximaler und minimaler Transparenz in einem aufgezeichneten Frequenzraster wird der Meßkreis auf dieses Raster gelegt. Es hat sich gezeigt, daß am zweckmäßigsten nicht der quadratische Mittelwert der erzeugten Wechselspannung, sondern der maximale oder minimale Spannungswert mit dem Oszillographen gemessen wird. Als Bezugswert für Weiß wird die hellste Stufe der Grautreppe gewählt. Um einen bequemen Bezugswert für Schwarz zu gewinnen, wird durch eine in den Strahlengang geschaltete Scheibe die Hälfte des Bildes abgedeckt. Die erhaltenen Werte werden als Funktion der das Raster erzeugenden Frequenz aufgetragen.

5. Anwendungsbeispiele

In den folgenden Bildern sind einige Beispiele von Messungen des Kontrastübertragungsfaktors im laufenden FS-Betrieb dargestellt.

In Bild 4 ist die Abhängigkeit der vom Abtaster gelieferten Spannung U_8 als Funktion der Kameraspannung U_1 aufgetragen. Die Kurve entstand durch Ausmessung der Transparenz der zehnstufigen Grautreppe, die vom Testsignal (Bild 2) erzeugt wird, und Umrechnung dieser Werte auf die Ausgangsspannung U_8 unter der Voraussetzung, daß das Gamma des Abtasters reziprok zum Gamma der Aufzeichnung eingestellt wird.

Wie die Meßwerte zeigen, ist die Spannung U_8 mit einer für die praktischen Erfordernisse recht befriedigenden Genauigkeit proportional zur Spannung U_1, der Kontrastübertragungsfaktor also gleich eins.

In welchem Maße die Frequenzabhängigkeit des Kontrastübertragungsfaktors und die Körnigkeit des Filmes, gemessen als Störabstand, vom Entwicklungsverfahren abhängen, zeigt ein Vergleich der Meßwerte von Bild 5. Zwei gleich belichtete Filme derselben Emulsionsnummer wurden nach den bei zwei Anstalten gebräuchlichen Standardverfahren (1) und (2) umgekehrt.

Der bei (1) erzielte Störabstand ist zwar um 6 db geringer, d. h. die Körnigkeit um 1 : 2 schlechter als die Werte bei (2), dagegen ist aber die Frequenzabhängigkeit des Kontrastübertragungsfaktors

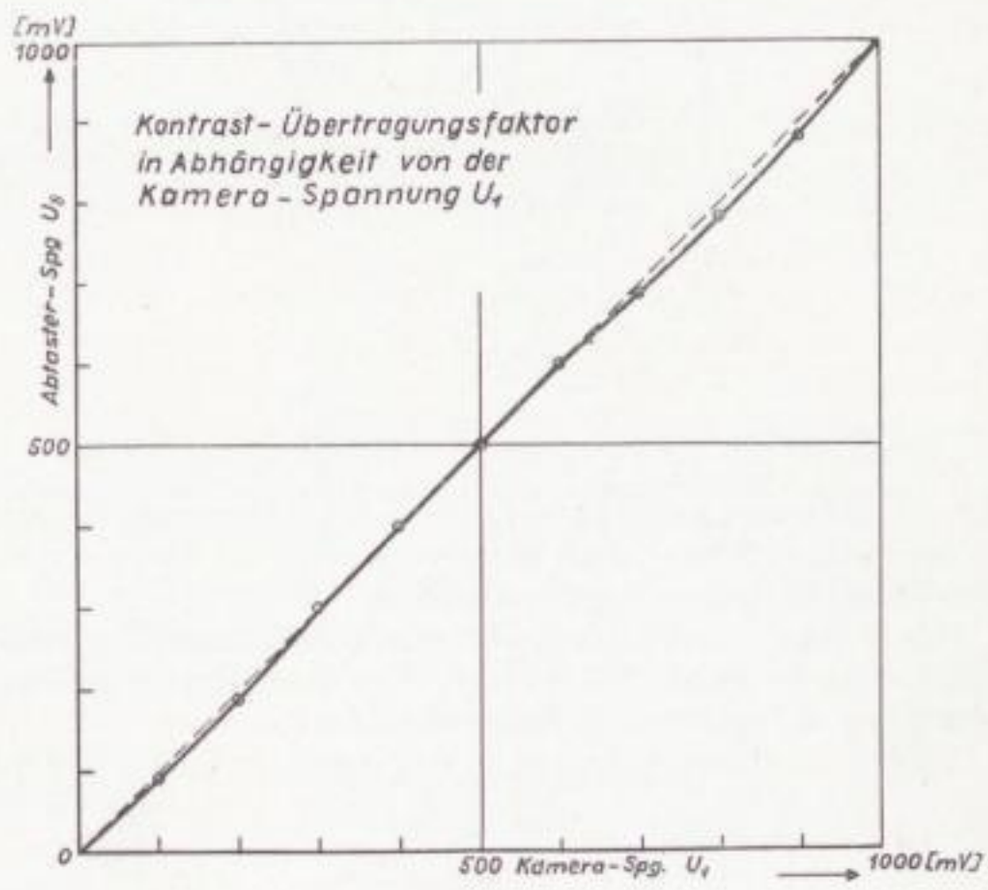


Abb. 4

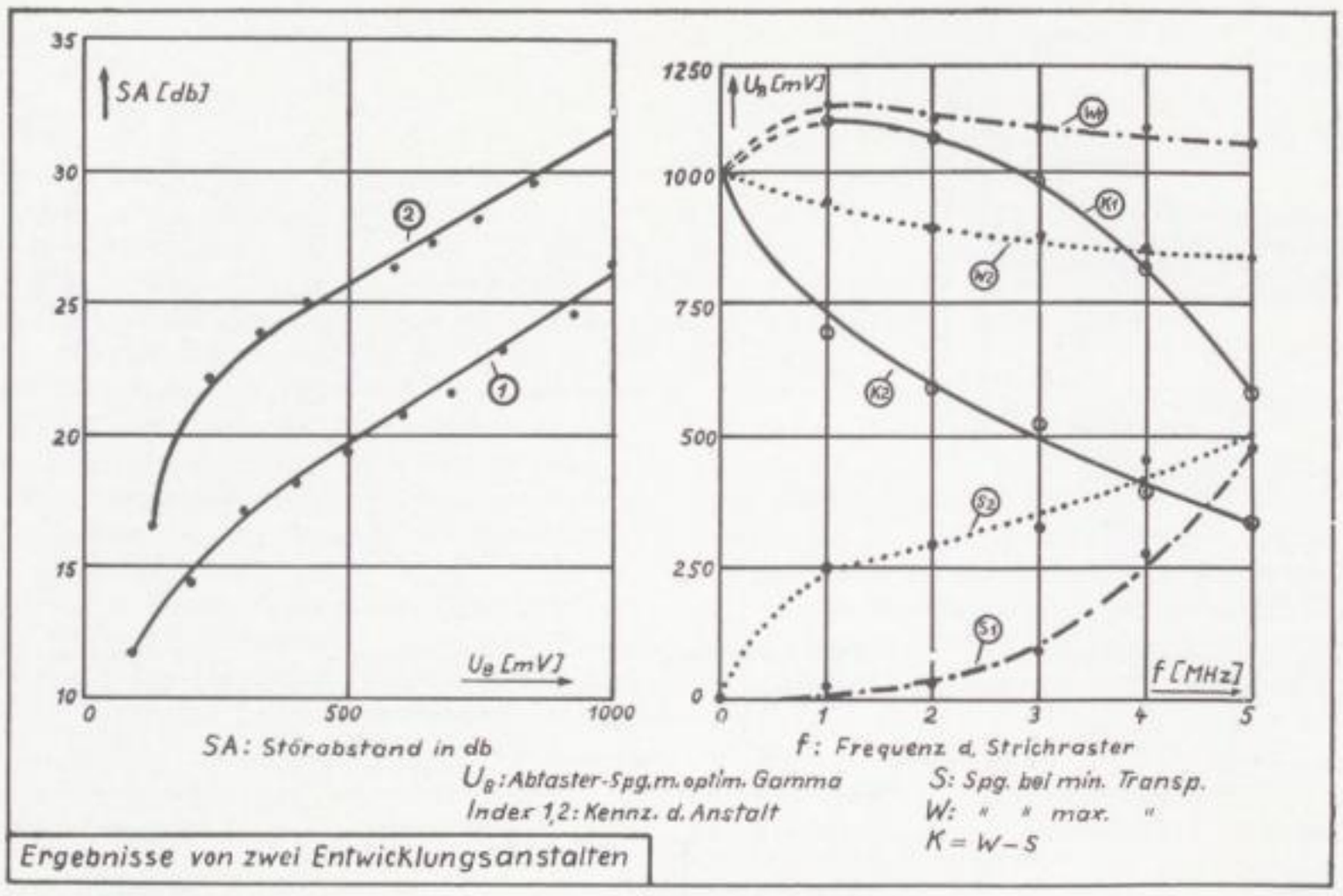


Abb. 5

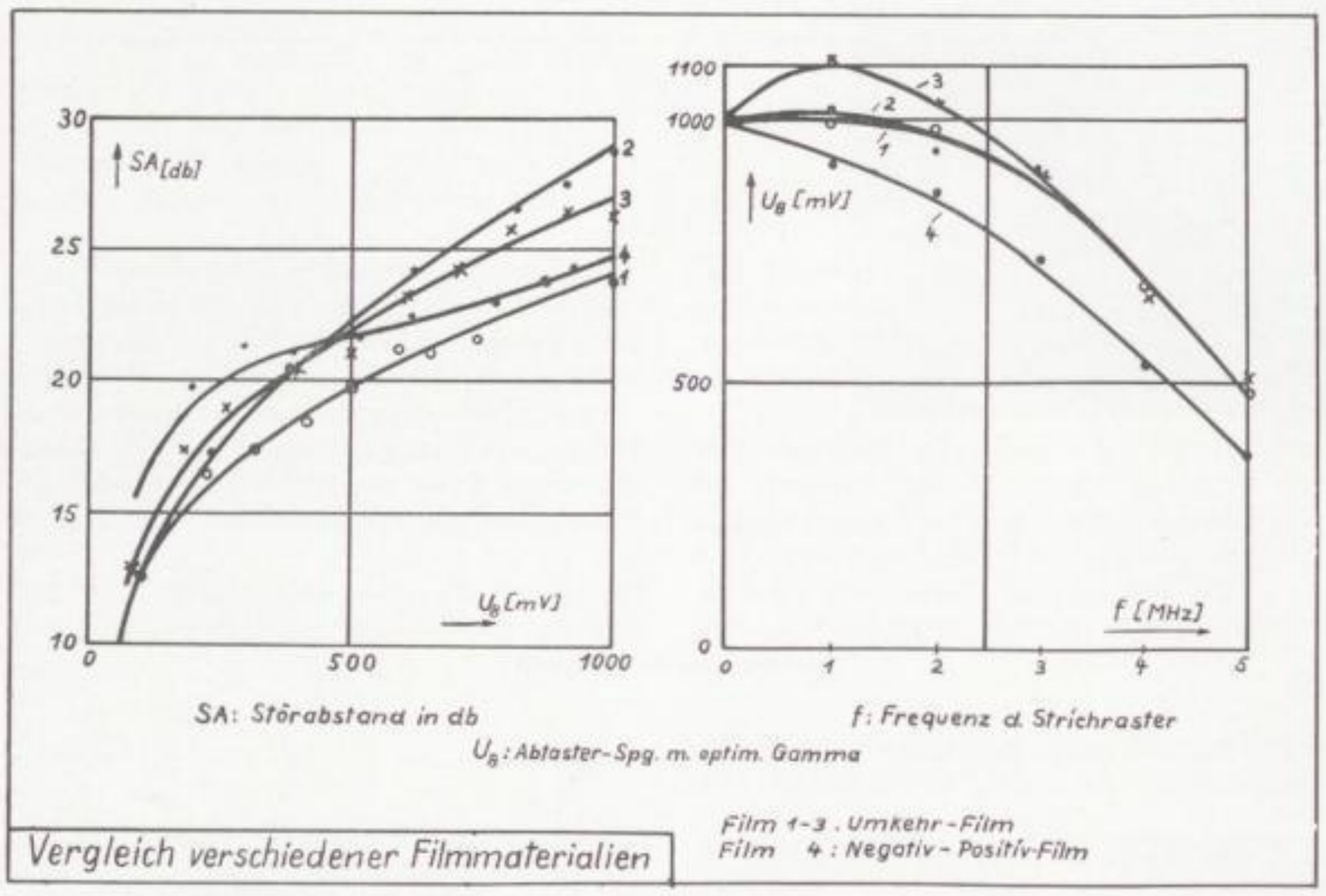


Abb. 6

von (1) geringer als diejenige von (2). Eine Abtastung des von (2) entwickelten Filmes ergab dementsprechend den Eindruck größerer Unschärfe und geringeren Rauschens.

Bild 6 zeigt den Vergleich von vier verschiedenen Filmmaterialien. Film 1—3 sind Umkehrfilme, Film 4 ein Negativ-Positiv-Film. Ein visueller Vergleich ergab folgendes Resultat:

Nach Körnigkeit geordnet ist Film 1 der beste, Film 2 fast wie 1, Film 4 zwischen 1 und 2; Film 3 hat die geringste Qualität.

Nach Schärfeneindruck geordnet erschien Film 3 am schärfsten, Film 4 am unschärfsten, Film 1 und 2 in der Schärfe gleich und zwischen 3 und 4.

Die Meßergebnisse des Störabstandes und des Kontrastübertragungsfaktors als Funktion der Rasterfrequenz bestätigen diese Aussagen weitgehend.

DIE KONTRASTÜBERTRAGUNG DER PHOTOGRAPHISCHEN PLATTE IM ELEKTRONENMIKROSKOP

Von Dr. E. Klein
(Aus dem Wissenschaftlich-Photographischen Labor der Agfa AG, Leverkusen)

Die von Frieser [1] durchgeführten theoretischen Betrachtungen und experimentellen Untersuchungen über die Kontrastübertragung durch die photographische Schicht bei Lichtbelichtung wurden in einer gemeinsamen Arbeit [2] auf die Belichtung mit Elektronen erweitert (Elektronenmikroskop).

Damit ein durch das Objekt gegebenes Detail durch die photographische Schicht wiedergegeben werden kann, muß die Bedingung erfüllt werden, daß der entstehende Schwärzungskontrast ΔS mindestens um einen Faktor q (wobei $q \approx 5$) größer sein muß als die durch die Körnigkeit der Schicht (bei Elektronenbestrahlung) gegebene mittlere Schwärzungsschwankung $\sqrt{\overline{\Delta S^2}}$, so daß also gilt:

$$\Delta S \geqq q \sqrt{\overline{(\Delta S^2)}_E} \quad . \tag{1}$$

Linke und rechte Seite der Gleichung lassen sich wie folgt ausdrücken: Für die Schwärzung S gilt allgemein

$$S = \frac{1}{2{,}3} N_o \overline{f_e} \quad , \tag{2}$$

wobei N_o die Anzahl der entwickelten Silberkörner und $\overline{f_e}$ das arithmetische Mittel der Projektionsfläche der Silberkörner bedeuten. Für N_o kann die Größe $E \cdot \varphi$ eingeführt werden, wenn E die Anzahl der pro cm² auffallenden Elektronen und φ die pro Elektron entwickelbar gemachten Halogensilberkörner sind

$$S = \frac{1}{2{,}3} E \cdot \varphi \overline{f_e} \quad . \tag{3}$$

Da für Elektronenbelichtung die Schwärzung bei kleinen Belichtungen linear mit der Belichtung E zunimmt, gilt also ferner

$$S = \varepsilon E, \tag{4}$$

wobei $\varepsilon = \left(\frac{dS}{dE}\right)_{S \to o}$ als Empfindlichkeitsmaß vorgeschlagen wird. Eine rasterartige Massenverteilung im Objekt möge, durch die Kontrastübertragungsfunktion des Elektronenmikroskopes (noch nicht bekannt) moduliert, eine sinusförmige Elektronendichteverteilung $\hat{E}(x)$ mit der Aussteuerung $\hat{p}\left(\frac{\text{Amplitude}}{\text{Mittelwert}}\right)$ bewirken, die auf die photographische Schicht auftrifft.

Experimentell ergibt sich nun, daß die durch die Streuung der Elektronen in der Schicht entstehende Belichtungsverteilung E(x) um einen Deltaspalt durch eine Verwaschungsfunktion $\Phi(x)$ von der Form

$$\Phi(x) = 10^{-\frac{2x}{k}} \tag{5}$$

beschrieben werden kann, deren Fouriertransformierte F(N) die Kontrastübertragungsfunktion liefert. k ist bei Elektronenbelichtung im Gegensatz zu einer Lichtbelichtung unabhängig von der Korngröße, jedoch eine Funktion der Beschleunigungsspannung und der Schichtdicke. Man erhält

$$F = \frac{0{,}54}{0{,}54 + (kN)^2} \quad , \tag{6}$$

wenn N die Frequenz ist.

Damit wird in der photographischen Schicht aus $\hat{p}$ die Größe $\hat{p}F$, und über Gl. (4) folgt unmittelbar

$$\Delta S = 2\,\hat{p}\,F(N)\,S_o \tag{7}$$

mit S_o = mittlere Schwärzung.

Für die mittlere quadratische Schwärzungsschwankung durch die Körnigkeit folgt bei Elektronenbelichtung aus Gl. (3) und (4)

$$\overline{(\Delta S^2)}_E = \beta(M) \frac{\varepsilon \cdot S}{M} \tag{8}$$

Hierbei ist M die Meßfläche, mit der abgetastet wird, und $\beta(M)$ eine experimentell zu bestimmende Funktion, die der Tatsache Rechnung trägt, daß bei kleinen Meßflächen die für die Berechnug von $\overline{\Delta S^2}$ gemachte Voraussetzung nicht mehr gültig ist, daß die Anzahl der Kornhaufen (mit der Kornanzahl φ) innerhalb der Meßfläche M groß sein muß. Ist der Rasterabstand im Objekt r_o, so wird er auf der photographischen Schicht zu $r_o \cdot v$, wenn v die lineare Vergrößerung ist. Ferner gilt

$$N = \frac{1}{r_o v} \text{ und } M = \frac{r_o^2}{4} \quad . \tag{9}$$

Mit den Gleichungen (7), (8), (9) wird aus Gl. (1):

$$4\,\hat{p}^2 F^2\left(\frac{1}{r_o v}\right) \cdot S_o^2 \geqq 4 q^2 \beta^2 (r_o v) \frac{\varepsilon \cdot S_o}{r_o^2 \cdot v^2} \quad . \tag{10}$$

Man kann hieraus diejenige Empfindlichkeit ε^* einer photographischen Schicht berechnen, die maximal zulässig ist, um das Detail von der Größe r_0 noch wiedergeben zu können. Es gilt:

$$\varepsilon^* = \frac{\hat{p}^2 F^2\left(\frac{1}{r_o \cdot v}\right) \cdot S_o \cdot r_o^2 v^2}{q^2 \beta^2 (r_o \cdot v)} \tag{11}$$

Diese Gleichung läßt sich auswerten, wenn die Größen k (im allgemeinen $30 < k < 50$) und $\beta(r_0 v)$ experimentell bestimmt sind, und die Aussteuerung $\hat{p}$ des Objektes bekannt ist.

Aus physiologischen Gründen darf ΔS einen Minimalwert $s \approx 0{,}02$ nicht unterschreiten.

LITERATUR

[1] Frieser, H.: Vortrag Kölner Kolloquium 1958.
[2] Frieser, H., u. E. Klein: Zeitschr. f. angew. Physik *10*, 337 (1958).
Frieser, H., E. Klein u. E. Zeitler: Zeitschr. f. angew. Physik *11*, 190 (1959).

BEDEUTUNG DER INFORMATIONSTHEORIE IN DER MEDIZIN (RÖNTGENPHOTOGRAPHIE) UND IN DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

Von Dr. R. Röhler
(Institut für medizinische Optik der Universität München)

In der Röntgenphotographie lassen sich durch Veränderung der Röhrenspannung, der Belichtungszeiten, Verstärkerfolien usw. die Abbildungseigenschaften sehr leicht in weiten Grenzen verändern. Bei der großen Zahl der veränderlichen Parameter ist es besonders schwierig, die für die Abbildung günstigste Kombination von Werten zu finden, zumal dann, wenn man sich bei der Beurteilung der Güte einer Aufnahme auf subjektive Urteile stützen muß. Daher ist es begreiflich, daß man bemüht ist, ein objektives Gütemaß zu finden, nach welchem verschiedene Aufnahmen verglichen werden können, und es scheint möglich zu sein, mit Hilfe der Informationstheorie ein solches Gütemaß aufstellen zu können.

Die Röntgenphotographie ist auch vom theoretischen Standpunkt aus für die ersten Versuche in dieser Richtung sehr geeignet, weil man hier sehr genau weiß, auf welche Details es bei der Abbildung ankommt. In der bildmäßigen Photographie, in der ein objektives Gütemaß ebenfalls sehr erwünscht wäre, ist die Situation dadurch komplizierter, daß es nicht von vornherein klar ist, welchen Bildelementen die größte Bedeutung zukommt.

Allgemein ist in der Optik die Aufgabe, ein Maß für die Informationsübertragung anzugeben, bedeutend schwieriger als in der Nachrichtentechnik. Das wird sofort deutlich, wenn man versucht, die nachrichtentechnische Methode der Informationsberechnung unverändert anzuwenden. Man wird dabei auf folgende Überlegung geführt: Wenn ein optisches Bild N verschiedene unabhängige Punkte besitzt und jeder Bildpunkt q verschiedene Leuchtdichtewerte annehmen kann, so entstehen N^q verschiedene Möglichkeiten. Setzt man mangels genauerer Kenntnis für alle dieser möglichen Bilder die gleiche Wahrscheinlichkeit voraus, so ergibt der bekannte Informationsansatz als Informationsinhalt eines Bildes den Wert

$$I = q \log_2 N.$$

Beim Vergleich verschiedener abbildender Systeme erhält man dann das Ergebnis, daß ein Bild um so mehr Information enthält, je mehr unabhängige Bildpunkte es besitzt und je mehr Kontraststufen unterschieden werden können. Diese Aussage ist aber in vielen Fällen geradezu falsch, wie man an folgendem Beispiel sieht, in welchem eine optische und eine nachrichtentechnische Möglichkeit zur Informationsübertragung besteht, so daß beide Fälle verglichen werden können. Es möge sich um die Übermittlung der geographischen Lage eines Punktes relativ zu zwei bekannten Bezugspunkten handeln. Für die nachrichtentechnische Übermittlung genügt es, zwei zusätzliche Bestimmungsstücke des betreffenden Dreiecks anzugeben. Je größer die Stellenzahl dieser Zahlenwerte ist, desto größer ist die dadurch übertragene Information. Bei der optischen Übertragung des betreffenden Dreiecks kommt es in gleichem Maße auf die Schärfe der Abbildung an, da dadurch die Genauigkeit bestimmt wird, mit der der Auswerter den Ort des Punktes feststellen kann. Es ist indessen für den Informationsinhalt des Bildes gleichgültig, wieviel Objektpunkte außer den drei Eckpunkten des Dreiecks abgebildet worden sind und wieviel unterscheidbare Kontraststufen das Bild enthält. Die zahlenmäßige Auswertung nach obiger Formel führt selbst bei der Beschränkung auf zwei Kontraststufen auf einen viel zu großen Wert, da alle Bildpunkte, die innerhalb des Dreiecks liegen, bei der Berechnung mitgezählt werden.

Der Grund für diese Diskrepanz liegt in dem Umstande, daß das optische Objekt und der Nachrichtensender sich nicht vollständig entsprechen[1]). Das optische Objekt ist in der Regel ein Raumgebiet der uns umgebenden Wirklichkeit. Der Sender in der Nachrichtentechnik, mit dem wir die Tätigkeit eines menschlichen Intellekts verbinden müssen, überträgt demgegenüber keineswegs einen Teil der Wirklichkeit, vielmehr wählt er aus der Wirklichkeit als einem gewaltigen Reservoir gewisse Einzelheiten aus, die er in Form von Nachrichten auf das Übertragungssystem gibt. Der Vorrat an Material, aus dem er seine Nachrichten schöpft, ist für den menschlichen Intellekt unübersehbar groß. Die Auswahl des zu übertragenden Teils aus diesem Vorrat geschieht nach dem Gesichtspunkt, daß die Nachricht für den Empfänger interessant oder wichtig sein soll. Auch die Genauigkeit, mit der eine Einzelheit vom Sender übertragen wird, richtet sich danach, wieweit sie für den Empfänger wichtig ist. Bei der Berechnung des Informationsinhaltes von Nachrichten setzt man als Idealfall eine vollkommene Übereinstimmung zwischen Sender und Empfänger in der Bewertung von „wichtig" und „unwichtig" voraus und hat es daher beim Übertragungsprozeß nur mit Nachrichten zu tun, die gleichmäßig wichtig sind. Der Auswahlprozeß, der der Übertragung vorhergeht, kann dabei unberücksichtigt bleiben.

Die Auswahltätigkeit, die der Sender durchführt, fehlt dem optischen Objekt. Das abzubildende Objekt ist ein unmittelbar gegebener Teil der uns umgebenden anschaulichen Wirklichkeit. Es enthält eine unübersehbare Menge von Einzelheiten. Die Auswahl der Einzelheiten, die abgebildet werden, sind durch das abbildende System bestimmt. Das Bild wird jedoch letzten Endes danach beurteilt werden müssen, was ein menschlicher Beobachter daraus an wichtigen Einzelheiten entnehmen kann. Bei der Abbildung besteht im allgemeinen keine Möglichkeit, wichtige Einzelheiten gegenüber unwichtigen zu bevorzugen. Daher wird das Bild sowohl wichtige als auch unwichtige Einzelheiten enthalten. Ferner werden durch die Unvollkommenheiten der Abbildung ebenfalls wichtige und unwichtige Einzelheiten verlorengehen. Vergleicht man zwei verschiedene Abbildungssysteme miteinander, so ist es leicht möglich, daß zwar das eine insgesamt mehr Einzelheiten wiedergibt als das andere, letzteres jedoch mehr wichtige Einzelheiten abbildet.

Beim Vergleich zwischen optischem Objekt und Sender darf nicht übersehen werden, daß auch ein Nachrichtensystem nicht alle Signale des Senders getreu an den Empfänger wiedergibt. Durch verschiedene Störquellen wird die Nachricht während der Übertragung verändert. Wenn der Empfänger trotzdem die richtige Nachricht erhält, so liegt das daran, daß die Nachricht durch ein System von Zeichen ausgedrückt wird, die gegenüber solchen Störungen relativ unempfindlich sind (z. B. Buchstaben oder Telegraphiezeichen). Gegen eine gelegentliche Verfälschung von Zeichen versieht man die Nachricht mit einer Redundanz, die es erlaubt, die falschen Zeichen aus dem Zusammenhang zu erkennen und zu korrigieren. Die Umsetzung von Nachrichten in geeignete Zeichen, die das System ohne wesentliche Veränderung passieren und die eine ausreichende Redundanz besitzen, wird als Verschlüsselung bezeichnet. Bei der informationstheoretischen Untersuchung von Nachrichtensystemen kann ohne weiteres vorausgesetzt werden, daß diese Verschlüsselung in der richtigen Weise erfolgt ist, so daß alle Nachrichten des Senders den Empfänger erreichen. Die Untersuchung richtet sich daher weniger auf die Frage, was übertragen wird, als darauf, in welcher Zeit es übertragen wird. Bei Übertragungsproblemen, in denen diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, wie z. B. bei der Übertragung von Musik, bemerkt man eine starke Unsicherheit bei der Verwendung informationstheoretischer Rechnungen. Die zur Übertragung von Musik notwendige Bandbreite kann nicht objektiv, sondern nur unter Zuhilfenahme von Geschmacksurteilen festgelegt werden.

1) Die folgenden Überlegungen zum Begriff der „Wirklichkeit" lehnen sich an die ausführliche Untersuchung von R. RICKERT: „Grenzen der naturwissenschaftlichen Begriffsbildung", Tübingen 1921, an.

Die Möglichkeit der Verschlüsselung fehlt in der Optik weitgehend. Eine informationstheoretische Bewertung der Abbildung muß daher mit einer Trennung von wichtigen und unwichtigen Objektelementen beginnen. Um zu einer solchen Trennung zu gelangen, muß zunächst bekannt sein, nach welchen Auswahlprinzipien dabei verfahren werden soll. Diese Auswahlprinzipien entziehen sich in der Regel einer physikalischen Analyse. Sie sind durch menschliche Werte bedingt und nicht in allen Fällen exakt anzugeben. Nur bei Abbildungsaufgaben, die der Untersuchung ganz bestimmter Fragen dienen, wie es in erster Linie bei wissenschaftlichen Problemen der Fall ist, kann eine Trennung von wichtigen und unwichtigen Einzelheiten durchgeführt werden. So kann man z. B. in der medizinischen Röntgenphotographie ziemlich genau angeben, auf welche Einzelheiten es zur Diagnose bestimmter Krankheiten ankommt. Es ist aber gut denkbar, daß das gleiche Bild zur Klärung verschiedener Fragen herangezogen wird. Dann können die wichtigen Elemente für die verschiedenen Fragen durchaus unterschiedlich sein.

Durch die Fragestellung ist ferner die Objektmenge bestimmt, die zur Abbildung bzw. Auswertung überhaupt in Frage kommt. Die Objektmenge muß eindeutig festliegen, damit Wahrscheinlichkeitsangaben für die einzelnen Bildelemente möglich sind. Die Beschränkung der Betrachtung auf eine bestimmte Objektmenge bringt es mit sich, daß ein einzelnes Objekt, das durch seine Leuchtdichteverteilung in der Objektebene gegeben sein möge, in den einzelnen Objektpunkten nicht mehr beliebige Leuchtdichtewerte annehmen kann. Analog dem Redundanzproblem in der Nachrichtentechnik kann man die Berechnung von Informationsinhalten nicht auf die einzelnen Objektpunkte gründen, sondern muß die Bereiche ermitteln, die von den übrigen Teilen des Objekts unabhängig sind, d. h. deren Gestalt und Leuchtdichteverteilung nicht durch statistische Gesetzmäßigkeiten mit denjenigen anderer Elemente verbunden ist. Die relative Häufigkeit solcher Bezirke dient dann zur Informationsberechnung. Solche unabhängigen und im vorher dargelegten Sinne wichtigen Elemente sollen Details genannt werden. Die explizite Angabe solcher Details ist eine schwierige Aufgabe und führt in der Regel auf komplizierte topologische Betrachtungen.

In der Röntgenphotographie ist die Situation deswegen besonders übersichtlich, weil aus Gründen der biologischen Strahlenbelastung zur experimentellen Untersuchung von Abbildungfragen schon seit längerer Zeit künstliche Nachbildungen von interessanten Objekteinzelheiten, sogenannte Phantome, verwendet werden. Dabei wird eine Form gewählt, bei der die verschiedenen Elemente auch übersichtlich und unabhängig voneinander angeordnet sind. Die Möglichkeit, solche Phantome zu konstruieren, verdankt man dem schon erwähnten Umstand, daß sich die wichtigen Einzelheiten hinsichtlich Größe und Kontrast sehr gut festlegen lassen.

Im allgemeinen Fall wird durch die gegebene Objektmenge eine entsprechende Detailmenge bestimmt. Es soll vorausgesetzt werden, daß die Anzahl der verschiedenen Details endlich ist. Bei der Betrachtung kontinuierlicher Mannigfaltigkeiten treten zusätzliche Schwierigkeiten auf, die eine gesonderte Behandlung erfahren müssen. Jedes dieser Details kommt mit einer mittleren Häufigkeit in einem Objekt vor, und zwar in einer Reihe von Zuständen, deren Zahl wiederum als endlich vorausgesetzt werden soll. Die Zustände eines Details können hinsichtlich seiner Anordnung, aber auch hinsichtlich seiner Größe, Leuchtdichte usw. verschieden sein. Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die einzelnen Zustände vorkommen werden ebenfalls durch die Objektmenge festgelegt.

Bei der Abbildung eines Objektes durch ein optisches System werden die Details infolge der Unvollkommenheit der Abbildung in bestimmter Weise verändert. Die Veränderung ist bei Kenntnis des Systems in Rechnung zu setzen, so daß hierdurch allein noch kein Informationsverlust eintritt. Durch die statistischen Schwankungen, die das optische Rauschen verursachen, sind die Bilder jedoch nicht eindeutig bestimmt, sondern weisen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung auf. Daher kann es vorkommen, daß im Bild die Zustände eines Details nicht richtig erkannt werden. Da in der Einteilung der Details und ihrer verschiedenen Zustände eine gewisse Willkür besteht, soll diese Einteilung so getroffen werden, daß verschiedene Details nicht miteinander verwechselt werden können, sondern nur die verschiedenen Zustände eines Details. Diese Verabredung führt zu einer Vereinfachung der folgenden Formalausdrücke.

Nimmt man als einfachsten Fall an, daß bei einem Detail nur zwei Zustände zu unterscheiden sind, die sich durch ihren Leuchtdichtewert kennzeichnen lassen, so kommt dem i-ten Zustand des Details ($i = 1,2$) eine Objektleuchtdichte B_i zu. Bei Kenntnis des optischen Rauschens läßt sich dann die Wahrscheinlichkeit $w_i(B')\,dB'$ angeben, daß das Detail mit einer Leuchtdichte abgebildet

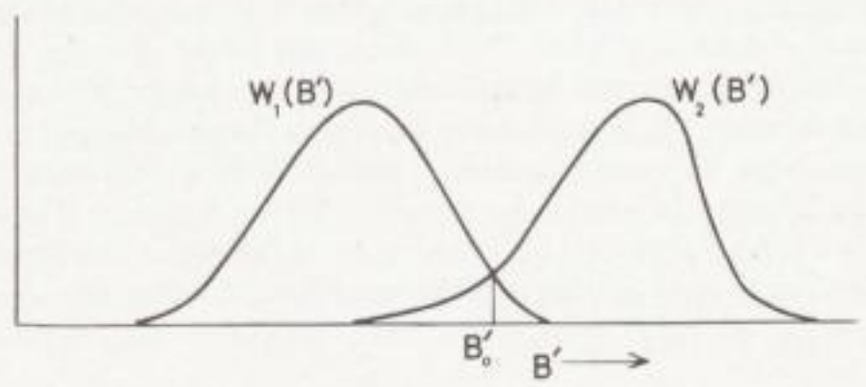


Abb. 1

wird, die im Intervall $(B', B' + dB')$ liegt. Wenn eine Verwechslungsmöglichkeit vorliegen soll, entstehen dabei zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich überlappen (Bild 1). Es gibt einen Wert B'_0, der die beiden Verteilungen trennt, so daß

$$w_1(B') > w_2(B') \text{ wenn } B' < B'_0$$
$$w_1(B') < w_2(B') \text{ wenn } B' > B'_0$$

gilt. Ein Beobachter, der die entstehenden Bilder auswertet, wird in jedem Falle, in dem $B' < B'_0$ ist, dem Detail den Zustand 1, im anderen Falle den Zustand 2 zuschreiben. Man erhält dann Wahrscheinlichkeiten $p_k(i)$ dafür, daß ein Detail im Zustand i so abgebildet wird, daß es im Zustand k erscheint.

Im allgemeinen lassen sich mehr als zwei Zustände eines Details unterscheiden. Ferner reicht zur Charakterisierung eines Zustandes meistens nicht ein Leuchtdichtewert aus, sondern es sind mehrere Parameter, die Größe, Lage und Leuchtdichte beschreiben, notwendig. Dann erhält man mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die sich gegenseitig überlappen. In jedem Falle wird man aber entsprechende Wahrscheinlichkeiten $p_k(i)$ berechnen können.

Mit den definierten Wahrscheinlichkeiten läßt sich nach Shannon leicht der Informationsverlust von Objekt und Bild und damit auch der durch die Abbildung erzeugte Informationsverlust angeben. Sei $p^{(\nu)}(i, j)$ die Wahrscheinlichkeit, daß das ν-te Detail im Zustand i im Objekt und im Zustand j im Bild erscheint, ($i, j = 1,2, \ldots, k_\nu$), mit

$$\sum_{i,j} p^{(\nu)}(i, j) = 1,$$

und η_ν die relative mittlere Häufigkeit des ν-ten Details in einem Objekt, dann ist nach der von Shannon eingeführten Terminologie

$$H(x) = -\sum_\nu \eta_\nu \sum_{i,j} p^{(\nu)}(i, j) \log \sum_j p^{(\nu)}(i, j)$$

der Informationsgehalt eines Objektes. Ferner ist

$$p_j^{(\nu)}(i) = \frac{p^{(\nu)}(i, j)}{\sum_i p^{(\nu)}(i, j)}$$

die relative Wahrscheinlichkeit, daß das Detail im Objekt den Zustand i hatte, wenn es im Bild den Zustand j annimmt. Der Index j ist dabei fest, so daß

$$\sum_i p_j^{(\nu)}(i) = 1$$

ist. Damit wird der durch die Abbildung erzeugte Informationsverlust

$$H_y(x) = -\sum \eta_\nu \sum_{i,j} p^{(\nu)}(i, j) \log_2 p_j^{(\nu)}(i),$$

so daß der Informationsinhalt des Bildes

$$R = H(x) - H_y(x)$$

zu setzen ist.

In R besitzt man ein Gütemaß des Bildes. Die Güte des abbildenden Systems kann nur unter Bezugnahme auf die abzubildende Objektmenge angegeben werden. Sie könnte beispielsweis als

$$G = \frac{R}{H(x)}$$

definiert werden.

In der bildmäßigen Photographie ist die Anwendbarkeit der Informationstheorie in Frage gestellt, weil man die abzubildenden Details nicht kennt. Der einzige Weg zur Bestimmung der Details, die vom durchschnittlichen Beobachter aufgefaßt werden, scheint in der Durchführung von Reihenbefragungen zu liegen. Man muß dabei jedoch bedenken, daß es schwer ist, eine stationäre Menge von Testobjekten und Versuchspersonen zu finden. Unter „stationär" wird nach N. Wiener folgendes verstanden: Wenn man eine Reihe von Testen durchgeführt hat, bekommt man Mittelwerte für bestimmte Größen mit den zugehörigen Fehlergrenzen. Werden die Versuche fortgesetzt, so muß man sicher sein, daß sich die Mittelwerte innerhalb der Fehlergrenzen nicht mehr ändern. Diese Stationaritätsbedingung erfüllen aber nur sehr spezielle Mengen. Hinreichende Bedingungen dafür lassen sich bei mathematischen oder physikalischen Größen formulieren. Beispielsweise ist der Ergodensatz, also die Forderung der Vertauschbarkeit von Zeitmittel und Scharmittel, eine hinreichende Bedingung. Handelt es sich jedoch bei den zu untersuchenden Mengen um Versuchspersonen, so dürfte eine Formulierung derartiger Bedingungen auf prinzipielle Schwierigkeiten stoßen. Beispielsweise wäre es denkbar, daß sich während der Durchführung der Reihenbefragung der Geschmack des befragten Personenkreises verändert. Ferner ist bei einer experimentell festgestellten Abweichung von der Stationarität nicht ohne weiteres zu entscheiden, ob es sich dabei um Fehler in der Objektmenge oder der Menge der Beobachter handelt. Letzen Endes erweist es sich hier wiederum, daß Fragen, die den persönlichen Geschmack und die menschliche Individualität berühren, sich schwer durch einen mathematischen, selbst statistischen Kalkül erfassen lassen.

DIE VERMINDERUNG DES STÖRPEGELEINFLUSSES BEI DER MESSUNG VON KONTRASTÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN

Von Dipl.-Phys. Günther Langner
(Aus dem Institut für Elektronenmikroskopie, Düsseldorf)

Eine Möglichkeit zur Messung der Kontrastübertragungsfunktion eines optischen Abbildungsgerätes besteht darin, das Fourier-Spektrum einer in dem Gerät gewonnenen Aufnahme mit der Gradation Eins von einem Testobjekt zu ermitteln, dessen Fourier-Spektrum bekannt ist. Um dabei den Einfluß des statistischen Störpegels zu vermindern, gibt es zwei Wege: einmal kann man das Prinzip der Verminderung des Störpegels durch Wiederholung anwenden, indem man z. B. n verschiedene Aufnahmen des gleichen Objektes übereinander kopiert. Ist das auf die Meßfläche bezogene mittlere Schwankungsquadrat σ^2, so reduziert es sich dabei bekanntlich zu $\sigma'^2 = \frac{1}{n}\sigma^2$. Bei Objekten mit einem eindimensionalen Fourier-Spektrum, z. B. Spalte, Balken, Kanten, Strichgitter usw., kann man bei der Herstellung der Kopie diese während der Belichtung mit konstanter Geschwindigkeit um die Strecke l bewegen. Ist die Meßfläche immer ein Quadrat mit der Kantenlänge a, so reduziert sich dann das mittlere Schwankungsquadrat auf $\sigma'^2 = \frac{a}{l}\sigma^2$. Das gleiche erreicht man durch einen Spalt mit der Länge l und der Breite a als Meßfläche. Abbildung 1a zeigt das Bild einer Kante, wie es in einem Lichtschattenmikroskop erhalten wurde, das zu Untersuchungen von Problemen diente, die beim Röntgenstrahlschattenmikroskop auftreten. In Abbildung 1b sind zwei, in Abbildung 1c vier Aufnahmen übereinander kopiert. In Abbildung 1d wurde eine Aufnahme während der Belichtung der Kopie mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung der Kante um 10 cm verschoben.

Ein zweiter Weg zur Verminderung des Störpegels besteht darin, daß man zunächst die Autokorrelierte der Vorlage ermittelt und dann deren Fourier-Spektrum bestimmt. Nach dem Satz von Wiener und Khinchin erhält man dann das Energie-Spektrum $\Phi^2(N)$. Es sei die Raumfunktion der Vorlage F(x). Die Autokorrelierte ist dann

$$\Psi(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi)\, F(x+\xi)\, d\xi\,; \qquad (1)$$

mit

$$\Phi(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi)\, e^{-2\pi i N \xi}\, d\xi \qquad (2)$$

gilt dann

$$\left|\Phi(N)\right|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x)\, e^{-2\pi i N \xi}\, dx \qquad (3)$$

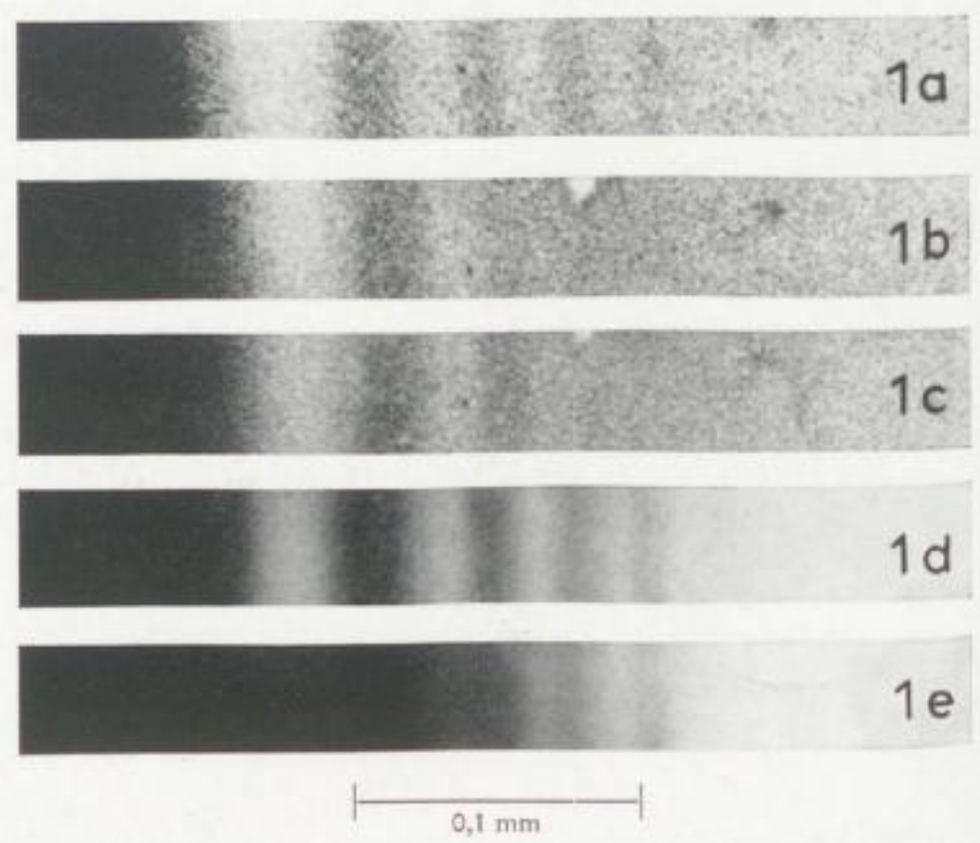


Abb. 1. Die Verminderung des Störpegeleinflusses bei der Messung von Kontrastübertragungsfunktionen.

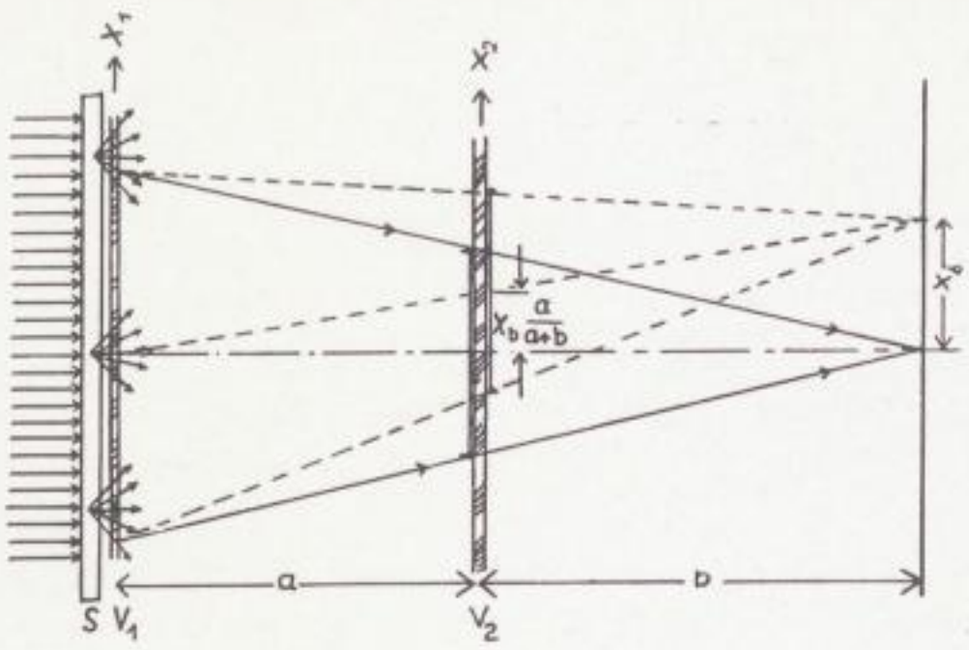


Abb. 2

Optische Korrelationsfunktionen kann man auf verhältnismäßig einfache Weise mit einer Anordnung gewinnen, die der Autor bei MEYER-EPPLER (1956)*) zitiert fand, und die Schema Abbildung 2 zeigt. Die Vorlage V_1 wird vermöge der Streuscheibe S (z. B. Opalscheibe) diffus beleuchtet. Bei geeigneter Dimensionierung kann man die auftretenden Strahlwinkel so klein halten, daß die Abhängigkeit der Leuchtdichte vom Winkel zu vernachlässigen ist. Im Abstand a befindet sich die Vorlage V_2 im Abbildungsmaßstab $\frac{a}{a+b}$, mit der V_1 korreliert werden soll. Im Abstand b von V_2 sei die Bildebene. Es ist dann die Leuchtdichte $B(x_b, y_b)$ an einer Stelle x_b, y_b der Bildebene proportional dem Integral der Transmission $\tau_1(x_1, y_1)$ von V_1 multipliziert mit der Transmission τ_2 der um $x_b \frac{a}{a+b}$, $y_b \frac{a}{a+b}$ verschobenen Vorlage V_2 und stellt somit in der Form (für eine Koordinate)

$$B(x_b) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} \tau_1(x_1)\, \tau_2\left[x_b + \frac{a}{a+b} x_1\right] dx_1 \qquad (4)$$

die Korrelationsfunktion dar. Gilt nun $\tau_1(x_1) = \tau_2\left(\frac{a}{a+b} x_1\right)$, so gewinnt man die Autokorrelierte. Die Autokorrelierte für das Bild der Kante, nach Abbildung 1a zeigt Abbildung 1e.

*) W. MEYER-EPPLER: VDI-Zeitschr. 98, (1956), S. 600–604. Technische Anwendung moderner Korrelationsverfahren.

OPTISCHE MODELLANORDNUNG (FALTUNGSAPPARATUR) FÜR BILDGÜTE-UNTERSUCHUNGEN

Von Dipl.-Ing. E. HEYNACHER
(Optisches Institut der Technischen Universität Berlin)

Bei Bildgüte-Untersuchungen an beliebigen, inkohärent strahlenden Objekten kann man den Einfluß des Objektivs prinzipiell auf zwei Arten berücksichtigen: 1. Man führt eine Fourier-Zerlegung des Objektes durch, multipliziert mit der Übertragungsfunktion des Objektivs und erhält das Bild durch Fourier-Inverstransformation dieses Produktes; 2. Man benutzt zur Charakterisierung des Objektivs das von ihm entworfene Punktbild. Mit seiner Hilfe erhält man das Bild durch Faltung des Objektes mit dem Punktbild. Für die Beschreitung des Weges über den Fourier-Raum muß man in der Lage sein, bequem zweidimensionale Fourier-Integrale zu ermitteln; für die Beschreitung des direkten Weges gilt das gleiche für die Ermittlung zweidimensionaler Faltungsintegrale.

Es wurde kurz über zwei optische Faltungs-Integratoren berichtet. Der erste gestattet eine punktweise Ausmessung der Faltungsintegrale und ist für Meßzwecke ausgezeichnet brauchbar. Die zweite Anordnung liefert die Werte der Faltungsintegrale über ihren ganzen Definitionsbereich auf einmal als Helligkeitswerte auf einem Auffangschirm, also das optische Bild selbst. Sie hat für Untersuchungen zur optischen Abbildungsgüte den Vorteil, daß sie die Einbeziehung des beobachtenden Auges in die Bildbeurteilung möglich macht.

Die beiden Geräte sind prinzipiell folgendermaßen aufgebaut: Punktbild und Objekt sind in beiden Fällen als Durchlässigkeitsverteilungen je eines Filters (von einigen Zentimetern im Durchmesser) realisiert. In der ersten Anordnung befinden sich in einer gleichmäßig ausgeleuchteten Ebene Punktbild- und Objekt-Filter aufeinandergelegt und in dieser Ebene gegeneinander verschiebbar. Die integrale Durchlässigkeit dieser Filterkombination wird in Abhängigkeit von der Verschiebung gemessen. Sie ist entsprechend der Definition der Faltung proportional zum Wert des Faltungsintegrals am Ort der Verschiebung. In der zweiten Anordnung befindet sich das Punktbild-Filter vor einer beleuchteten Opalscheibe, die in einem bestimmten Raumwinkel gleichmäßig strahlt. Im Abstand A davor befindet sich das Objekt-Filter. Im Abstand B ($B > A$) ist eine Auffangebene (Mattscheibe, Photoplatte) angeordnet. Dort wird das Faltungsintegral zwischen Punktbild- und Objekt-Funktion in Abhängigkeit von den Bildkoordinaten, also die Helligkeitsverteilung im Bild des Objektes, beobachtet. Über das Verhältnis der Abstände B—A zu B läßt sich (in den Grenzen, die durch die Forderung nach der Vernachlässigbarkeit der Apparaturbeugung gesteckt sind) die Größenanpassung der Maßstäbe in den Funktionsebenen der Punktbild- und Objekt-Funktion vornehmen. (Komplizierte Teste brauchen nur einmal hergestellt zu werden.)

Zur Illustration wurden zu zwei gegebenen Punktbildern verschiedener Gestalt die in der zweiten Faltungs-Apparatur gewonnenen, zugehörigen Bilder eines Cobb-Testes vorgeführt.

Über die Anwendung optischer Analogie-Geräte zur Ermittlung zweidimensionaler Faltungsintegrale wird bei W. L. BRAGG (Lightning calculations with light, Nature 154, 69—72, 1944) berichtet. Der Vorschlag, die hier skizzierte zweite Anordnung für Bildgüte-Untersuchungen zu benutzen, wurde für spot diagrams als Punktbilder schon von MURCOTT und GOTTFRIED (Use of spot diagrams to synthesize the image of resolving power test charts; JOSA 45, 582—583, 1955) gemacht.

Über das umrissene Thema wird ausführlicher auf der Jahrestagung der DGfaO in Wien berichtet.

SLUB
Wir führen Wissen.

VORSCHLAG ZU EINER VEREINHEITLICHUNG DER NOMENKLATUR

Anschließend an das Kolloquium „Qualität der photographischen Bildwiedergabe" in Köln vom 19.–20.. März 1958 haben wir an die Autoren der vorstehenden Artikel Fragebögen geschickt mit dem Ziel, die für die optische Übertragungstheorie wichtigen Begriffe zu vereinheitlichen.

Die Auswertung der Fragebögen ergibt die in der folgenden Tabelle zusammengefaßten Bezeichnungen.

Einem Vorschlag von Herrn Dipl.-Phys. Lukosz, Technische Hochschule Braunschweig, folgend wählten wir als Abkürzung für die Übertragungsfunktion CPT, wodurch besonders klar wird, daß die Übertragungsfunktion sowohl den Kontrast (C) als auch die Phase (P) beinhaltet.

Die in den Fragebögen vorgeschlagenen Symbole für die einzelnen Größen sind so vielseitig, daß wir sie nicht, ohne eigenmächtig zu erscheinen, auf einen Nenner bringen können; es muß deshalb eine Vereinheitlichung der Symbole bis zu einem späteren Treffen entsprechend vieler Fachleute abgewartet werden.

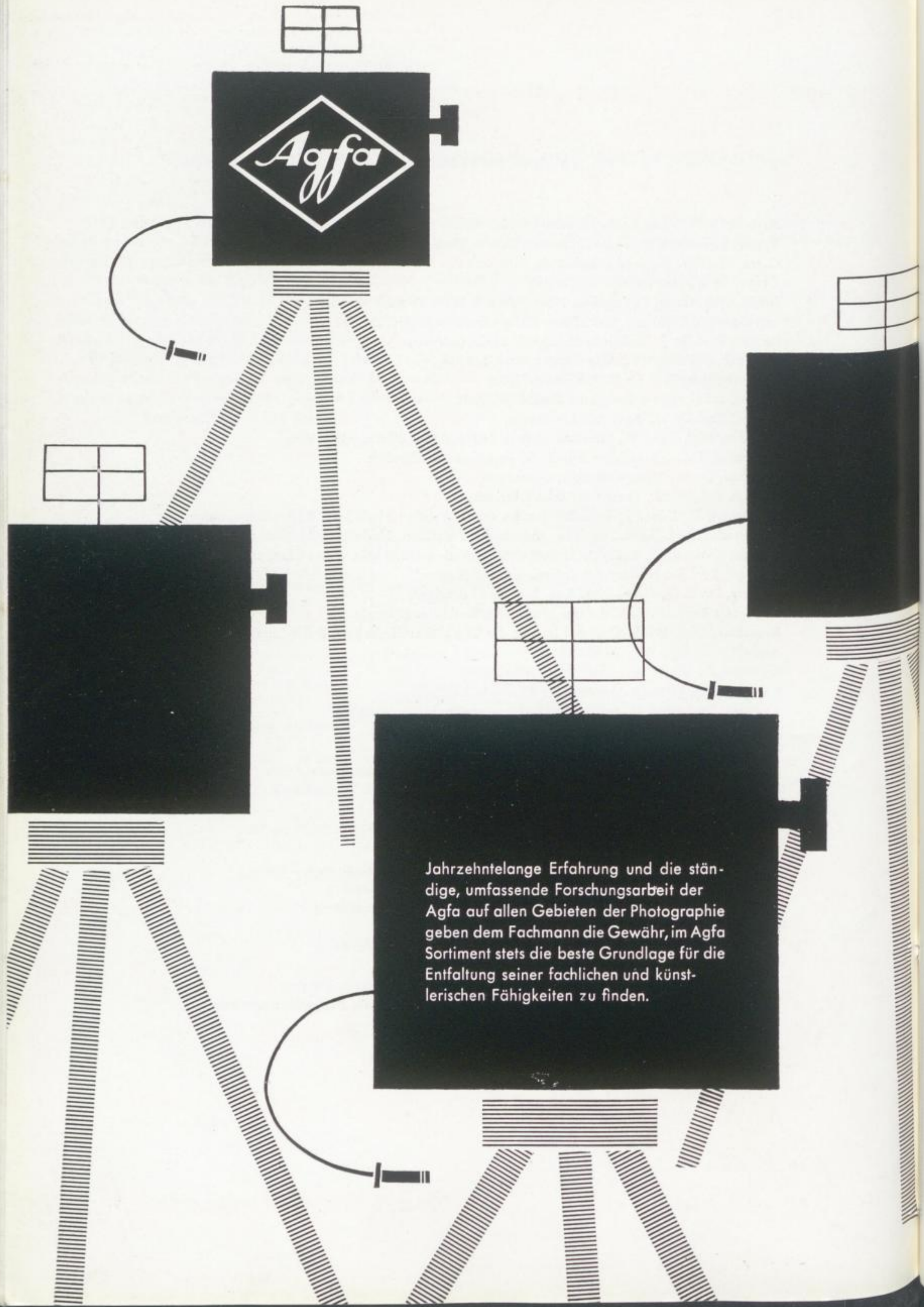
Professor Dr. H. Frieser — Dr. Franke

Bezeichnung deutsch	englisch	französisch	Abkürzung	Einheit	Zusammenhänge
Übertragungsfunktion	function of contrast transfer	fonction de filtrage	CPT		
Kontrastübertragung	contrast transfer	transfert de contraste	CT		$CT = \lvert CPT \rvert$
Phasenübertragung	phase transfer	déphasage (transfert de phase)	PT		$PT = -i \lg \frac{CPT}{\lvert CPT \rvert}$
Raumfrequenz	spatial frequency	frequence spatiale		mm^{-1}, μ^{-1}	
Rasterabstand	line spacing	pas		mm, μ	
Raumkoordinate	space coordinate	coordonée d'espace			
Raumfunktion	space function	fonction d'espace			
Fouriertransformierte	Fourier transform	Transformée de Fourier			
Faltung	convolution	convolution			
Schwankungsspektrum	noise power (Wiener) spectrum	spectre			

TEILNEHMERVERZEICHNIS

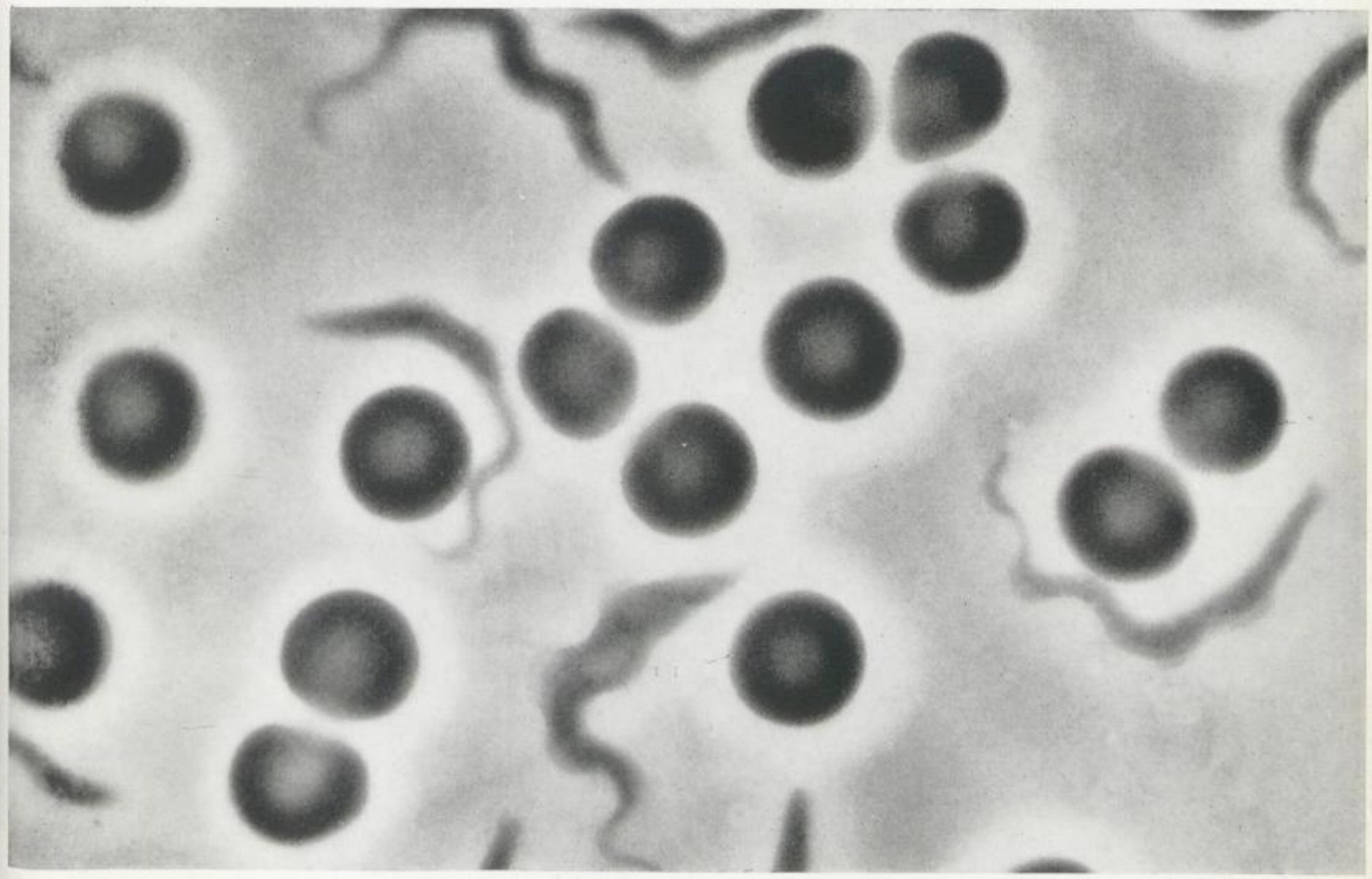
Botden, Dr. P., Firma Philips, Eindhoven (Holland)
Buseck, Dipl.-Phys. W., Firma Ernst Leitz GmbH, Wetzlar
Cario, Prof. Dr., Technische Hochschule, Braunschweig
Debot, Dr. R., Universität Liège (Belgien)
Dohle, Dipl.-Chem. F., Staatliche Höhere Fachschule für Photographie, Köln
van Dorsten, Dipl.-Ing. A. C., Firma Philips, Eindhoven (Holland)
Eggert, Prof. Dr. J., Technische Hochschule Zürich (Schweiz)
Feneberg, Dipl.-Phys. P., Agfa Camera Werk, München
von Fragstein, Prof. Dr. C., Universität, Köln
Franke, Dr. G., Firma Ernst Leitz GmbH, Wetzlar
Frieser, Prof. Dr. H., Agfa AG, Leverkusen
Gebelein, Dipl.-Phys. M., Staatliche Höhere Fachschule für Photographie, Köln
Goldmann, Dr. J., Bayerischer Rundfunk, Fernsehstudio, München
Günther, Dr. N., Firma Carl Zeiss, Oberkochen
Hansen, Prof. Dr. G., Firma Carl Zeiss, Oberkochen
Hartmann, Dipl.-Ing. J., Optisches Institut der Technischen Hochschule, Berlin-Charlottenburg
Heynacher, Dipl.-Ing. E., Optisches Institut der Technischen Hochschule, Berlin-Charlottenburg
Hertel, Dipl.-Ing. J., Optisches Institut der Technischen Hochschule, Berlin-Charlottenburg
Hopkins, Prof. Dr. H., Imperial College, London (England)
Horner, Dr. R. G., Firma Ilford Ltd., Brentwood (England)
Ingelstam, Prof. Dr. E., Technische Hochschule, Stockholm (Schweden)
Kämmerer, Dipl.-Ing. J., Optisches Institut der Technischen Hochschule, Berlin-Charlottenburg
Klein, Dr. E., Agfa AG, Leverkusen
Lacomme, P., Institut d'Optique, Paris (Frankreich)
Lau, Prof. Dr., Deutsche Akademie der Wissenschaften, Berlin
Langner, Dipl.-Phys. G., Institut für Elektronenmikroskopie, Düsseldorf
Le Poole, Prof. Dr. J., Technische Hochschule, Delft (Holland)
Linfoot, Dr. E. H., The Observatories, Cambridge (England)
Lohmann, Dr. A., Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Braunschweig
Lukosz, Dr. W., Physikalisches Institut der Technischen Hochschule, Braunschweig
Maréchal, Prof. Dr. A., Institut d'Optique, Paris (Frankreich)
Mergler, Dr. H., Firma Adox Fotowerke Dr. C. Schleussner GmbH, Frankfurt am Main
Pitts, Dr. E., Firma Kodak, Harrow (England)
Reuther, Prof. Dr. R., Photographisches Institut der Technischen Hochschule, Dresden
Röhler, Dr. R., Institut für medizinische Optik der Universität, München
Rosenbruch, Dr. K., Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
Rosenberg, Dr., Agfa Camera Werk, München
Rosenhauer, Dr. K., Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
Sauer, Dr. H., Firma Carl Zeiss, Oberkochen
Schober, Prof. Dr. H., Institut für medizinische Optik der Universität, München
Slevogt, Prof. Dr. H., Optisches Institut der Technischen Hochschule, Berlin-Charlottenburg
Theile, Dr. R., Institut für Rundfunktechnik, Nürnberg
Zeitler, Dr. E., Agfa AG, Leverkusen
Zöllner, Dr. H., Jena

SLUB
Wir führen Wissen.


Agfa
Jahrzehntelange Erfahrung und die ständige, umfassende Forschungsarbeit der Agfa auf allen Gebieten der Photographie geben dem Fachmann die Gewähr, im Agfa Sortiment stets die beste Grundlage für die Entfaltung seiner fachlichen und künstlerischen Fähigkeiten zu finden.

841 – 93 – 11

Diese lebenden Parasiten aus der Gruppe der Flagellaten wurden durch Phasenkontrast-Aufnahme mit Mikroblitz 300 Ws und der LEICA am Mikroansatz MIKAS festgehalten.
Abbildungsmaßstab des 24 x 36 mm Negativs 375:1, vergrößert auf 2500:1.



841-93-11

ERNST LEITZ GMBH WETZLAR

Präzision und Zuverlässigkeit

heißen die obersten Gebote der
LEICA-Fertigung. Überall dort, wo diese
Eigenschaften zur Bedingung gemacht werden,
finden Sie die LEICA im Einsatz.
Sie ist das immer bereite
und zuverlässige Hilfsmittel für
Forscher, Wissenschaftler und Techniker.

Wo Zuverlässigkeit entscheidet *Leica*

SLUB
Wir führen Wissen.

Kodak

RETINA REFLEX S

mit Wechselobjektiven von 28 bis 135 mm und Belichtungsautomatik

Hier ist sie, die neue RETINA REFLEX S von Kodak. Sie hat wirklich alles, was zu einer Spitzencamera von heute gehört: hochwertige Color-Objektive mit automatischem Schärfentiefe-Anzeiger, Synchro-Compur-Verschluß, RETINA Belichtungsautomatik und - als echtes Kennzeichen der Spiegelreflex-Camera - die formatfüllende Mattscheibe.

RETINA REFLEX S
mit Color-Objektiv
f: 2,8/50 mm
DM 578.-

Auf Wunsch auch mit dem noch lichtstärkeren Objektiv f: 1,9/50 mm lieferbar.

Kodak Cameras und Kodak Filme sind die meistgekauften der Welt.

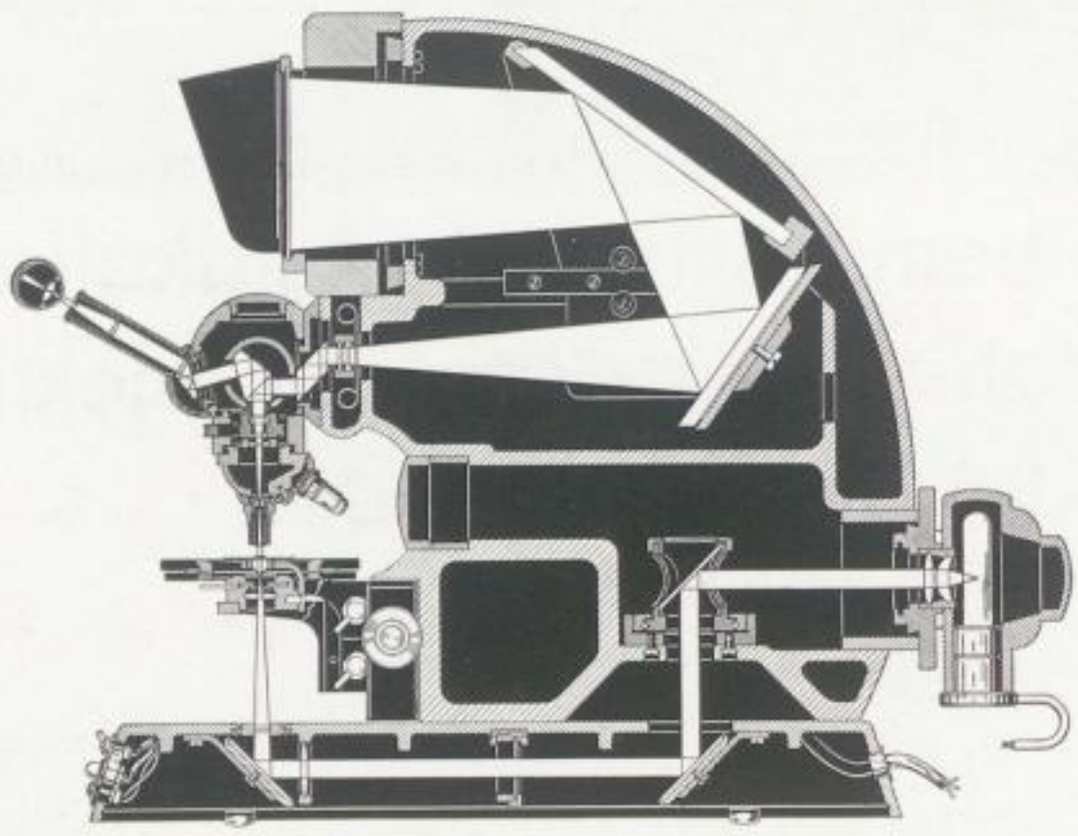
Kodak AG. Stuttgart-Wangen

Ret

Das super-genaue Einhalten der mathematisch und physikalisch festgelegten Werte eines Objektivs begründet mit den Ruf des Hauses SCHNEIDER

XENON XENOTAR XENAR SYMMAR TELE-ARTON TELE-XENAR SUPER-ANGULON ANGULON

JOS. SCHNEIDER & CO., OPTISCHE WERKE, KREUZNACH/RHLD.



ULTRAPHOT II

das neue Kameramikroskop

mit vollautomatischer Belichtungseinrichtung

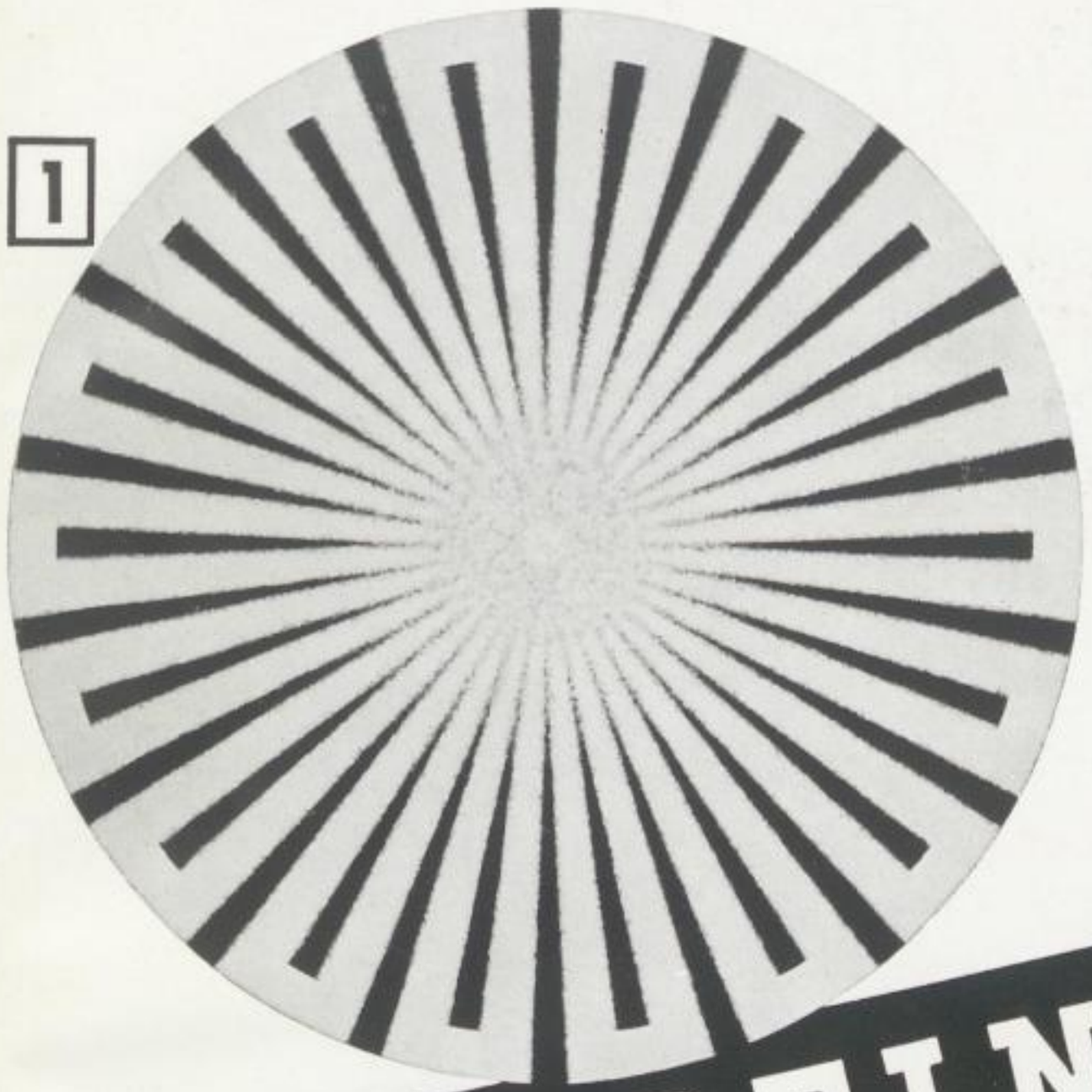
Mikroskop, Kamera und Beleuchtungseinrichtung in einem Gerät vereint · Bequeme Bedienung · Lichtführung nach dem Köhlerschen Prinzip · Ansetzmöglichkeit für drei verschiedene Leuchten, u. a. für elektrisch gesteuerte Bogenlampe · Ausbaufähigkeit für Arbeiten im durchfallenden und auffallenden Licht sowie für Polarisationsmikroskopie und für schwach vergrößerte Übersichtbilder · Stufenlose Änderung des Abbildungsmaßstabs · Automatische Steuerung der Belichtungszeit · Stets aufnahmebereite, ausbaufähige Plattenkamera 9 x 12 cm, gegen Einrichtung für Mattscheiben-Projektion auszutauschen

Fordern Sie bitte Prospekte und Angebote

CARL ZEISS · OBERKOCHEN / WÜRTT.

CARL ZEISS

Überbelichtung = Unschärfe



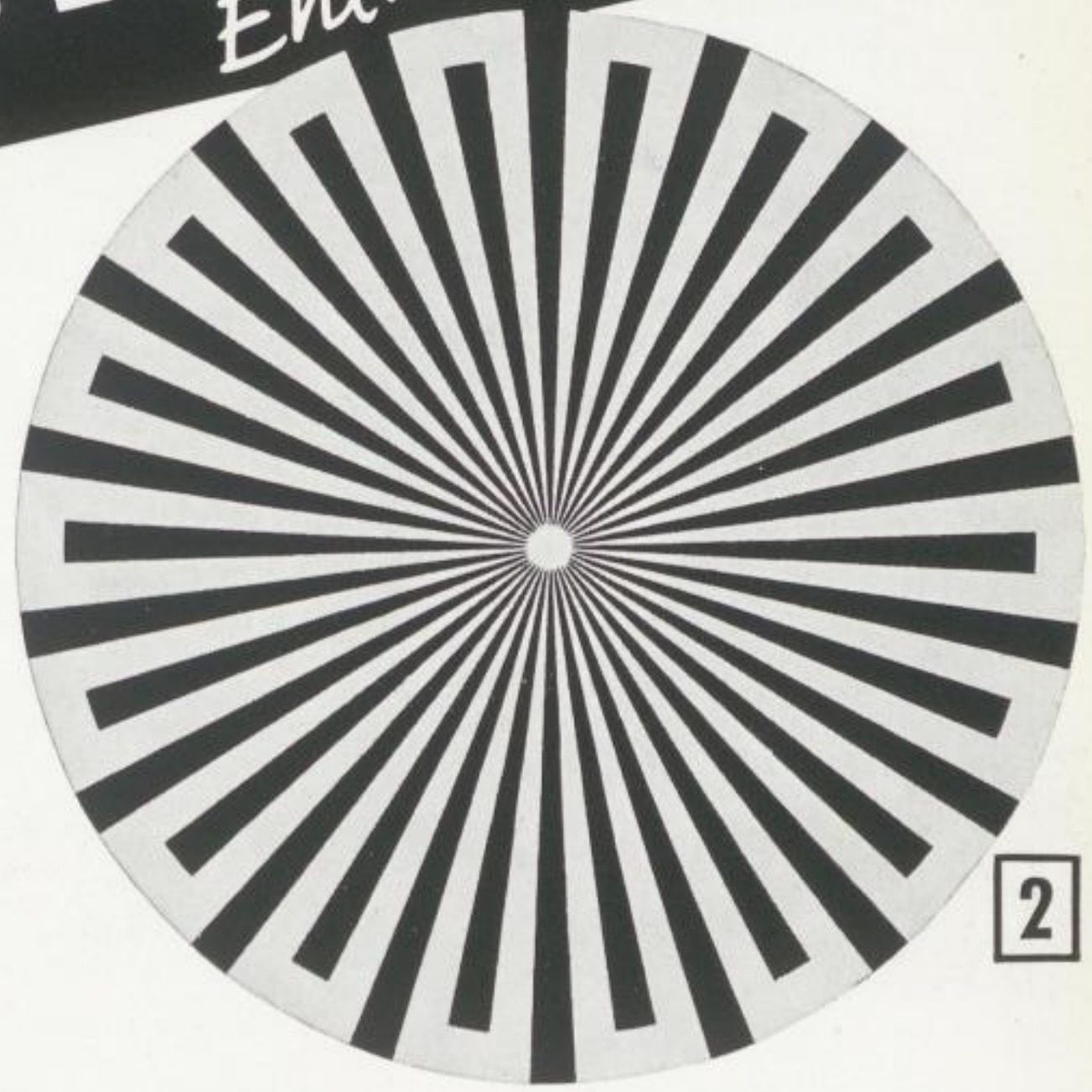
In welchem Umfange Überbelichtungen die Bild-Schärfe verschlechtern, beweisen erst Testaufnahmen. Hier sind unter völlig gleichen Bedingungen 2 Testfiguren photographiert. Aufnahme 1 (oben links) wurde dreifach überbelichtet, Aufnahme 2 (unten rechts) dagegen knapp belichtet, wie es für die

NEOFIN *Entwicklung*

erforderlich ist. Der Vergleich der Testbilder offenbart, wie stark sich bei Überbelichtungen die Schärfe verändert.

Daher unser Rat: knappe Belichtung und Oberflächenentwicklung mit NEOFIN.

Fordern Sie die „NEOFIN-Technik" von:



TETENAL-PHOTOWERK · HAMBURG-BERLIN

SLUB
Wir führen Wissen.

HELWICH VERLAG

SPEZIALVERLAG FÜR PHOTOGRAPHISCHE FORSCHUNG UND FÜR WISSENSCHAFTLICHE UND ANGEWANDTE PHOTOGRAPHIE

DEM FORTSCHRITT DER PHOTOGRAPHIE
DIENEN UNSERE PUBLIKATIONEN

Fachzeitschrift und Sonderhefte:

PHOTOGRAPHISCHE KORRESPONDENZ

INTERNATIONALE ZEITSCHRIFT
FÜR WISSENSCHAFTLICHE UND ANGEWANDTE
PHOTOGRAPHIE
UND DIE GESAMTE REPRODUKTIONSTECHNIK

95. Jahrgang (1959)

OFFIZIELLES ORGAN
DER WISSENSCHAFTLICHEN SEKTIONEN
DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT
FÜR PHOTOGRAPHIE IN KÖLN
DER PHOTOGRAPHISCHEN GESELLSCHAFT IN WIEN
DER GRAPHISCHEN LEHR- U. VERSUCHSANSTALT

DIE PHOTOGRAPHISCHE EMPFINDLICHKEIT

VON J. W. MITCHELL, UNIVERSITY OF BRISTOL
(1. Sonderheft der „Phot. Korr.")

IMAGE DISSECTION IN HIGH-SPEED PHOTOGRAPHY

VON J. S. COURTNEY-PRATT,
UNIVERSITY OF CAMBRIDGE
(2. Sonderheft der „Phot. Korr.")

Fachbücher

WISSENSCHAFTLICHE PHOTOGRAPHIE

ERGEBNISSE
DER INTERNATIONALEN KONFERENZ
FÜR WISSENSCHAFTLICHE PHOTOGRAPHIE
IN KÖLN 1956

Im Auftrage der Deutschen Gesellschaft
für Photographie e. V. Köln
herausgegeben von O. HELWICH

732 Seiten, 930 Abbildungen (Ganzleinenband)

KURZZEIT- PHOTOGRAPHIE UND HOCHFREQUENZ-KINEMATOGRAPHIE

KONGRESS-BERICHTSBAND
ÜBER DEN
IV. INTERNATIONALEN KONGRESS
ÜBER KURZZEITPHOTOGRAPHIE UND
HOCHFREQUENZ-KINEMATOGRAPHIE
IN KÖLN 1958

Im Auftrage der Deutschen Gesellschaft
für Photographie e. V. Köln
herausgegeben von
H. SCHARDIN u. O. HELWICH

400 Seiten, 598 Abbildungen (Ganzleinenband)

Prospekte vom

VERLAG DR. OTHMAR HELWICH
DARMSTADT

TELEPHON: 74860 HOFFMANN-STRASSE 59 TELEGRAMME: PHOKO

– Phot. Bu

I 4° 1042 So.-H. 3

SLUB
Wir führen Wissen.

SLUB
Wir führen Wissen.

SLUB
Wir führen Wissen.

SLUB DRESDEN
3 1262129
III/IB/106 Lp 6944/60 373