

Einige Effekte der partiell kohärenten Abbildung

L. WENDLER

Sektion Physik, Universität Jena, Jena, DDR.

M. NITSCHKE

Sektion Technologie, Universität Jena, Jena, DDR.

In diesem Beitrag werden einige numerische Ergebnisse zur Modellierung der Beleuchtungsverhältnisse in optischen Systemen vorgestellt. Dabei werden die Einflüsse durch Dezentrierung der Lichtquelle und Öffnungsfehler bei verschiedenen Kohärenzparametern auf die Abbildungsqualität ausgewählter zweidimensionaler Objektstrukturen untersucht.

Einleitung

Die moderne Fotolithografie erfordert eine sehr genaue Kenntnis der Informationsübertragung durch das optische System. Die Betrachtung der beiden Grenzfälle bei kohärenter bzw. inkohärenter Beleuchtung spiegeln die auftretenden Erscheinungen nicht exakt wider. Außer der räumlichen Ausdehnung der Lichtquelle üben die Intensitätsverteilung über die Lichtquelle, deren Lage und Symmetrieeigenschaften, sowie auch noch vorhandene Restaberrationen einen wesentlichen Einfluß auf die Bildintensitätsverteilung aus.

In diesem Beitrag werden einige numerische Ergebnisse zur Modellierung der Beleuchtungsverhältnisse in optischen Systemen vorgestellt. Dabei werden die Einflüsse durch Dezentrierung der Lichtquelle und Öffnungsfehler bei verschiedenen Kohärenzparametern auf die Abbildungsqualität ausgewählter zweidimensionaler Objektstrukturen untersucht. Numerische und experimentelle Untersuchungen an einem Repeaterobjectiv zum Einfluß der partiellen Kohärenz auf die optische Abbildung mit Defokussierung sind in [4] veröffentlicht.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, dem Optik-Entwerfer Richtlinien für die Konstruktion von optischen Systemen für die Repeatertechnik in die Hand zu geben.

Grundgleichungen der partiellen Kohärenz

Das für die numerischen Untersuchungen verwendete Modell basiert auf der Theorie der partiell kohärenten Abbildung, wie sie von HOPKINS [1] entwickelt wurde. Eine aus quasimonochromatisch und raumkohärent strahlenden Elementarbezirken zusammengesetzte effektiv wirkende Lichtquelle mit der Intensitätsverteilung $i(\mu)$ beleuchtet ein isoplanatisches Gebiet der Objektebene OE .

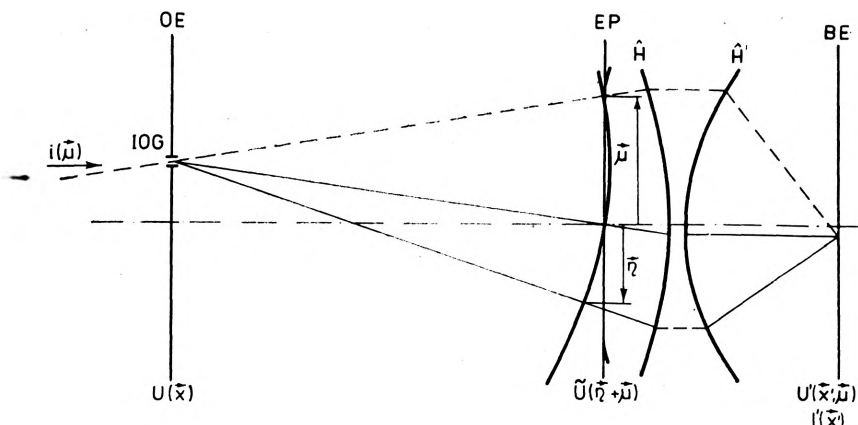


Abb. 1. Modell zur partiell kohärenten Abbildung
 OE - Objektebene, BE - Bildebene, EP - Eintrittspupille, IOG - isoplanatisches Objektgebiet

Das Objektamplitudenspektrum, das durch ein kohärent strahlendes Lichtquellenelement $i(\mu)$ in der Eintrittspupille hervorgerufen wird, kann näherungsweise aus der Fouriertransformation der komplexen Objektamplitudenverteilung $U(\mathbf{X})$ erhalten werden:

$$\tilde{U}(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu}) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(\mathbf{X}) \exp[-ik\mathbf{X}(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu})] d\mathbf{X}. \quad (1)$$

\mathbf{X} - Vektor in der Objektebene,

$\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\mu}$ - Richtungsvektoren in der Eintrittspupille.

Werden die Vektoren in den Pupillen auf den Betrag 1 normiert und erfüllt das Abbildungssystem die Abbesche Sinusbedingung, dann wird das Objektamplitudenspektrum über die Systemfunktion $\tilde{K}(\boldsymbol{\eta})$ in den Bildraum übertragen. Das Bildamplitudenspektrum wird

$$\tilde{U}'(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu}) = \tilde{K}(\boldsymbol{\eta}) \tilde{U}(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu}). \quad (2)$$

Die komplexe Systemfunktion enthält die Wellenaberrationen, Systembegrenzungen und Filtereigenschaften des Abbildungssystems. Die Transformation des Bildamplitudenspektrums in den Bildraum und die inkohärente Superposition aller Bildintensitätsverteilungen der einzelnen Lichtquellenelemente führt auf die Intensitätsverteilung im Bildraum

$$I'(\mathbf{X}) = \iint_{LQ} \left| \iint_{-\infty}^{\infty} \tilde{K}(\boldsymbol{\eta}) \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} U(\mathbf{X}) \exp[-ik\mathbf{X}(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu})] d\mathbf{X} \right\} \exp[ik\mathbf{X}'(\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\mu})] d\boldsymbol{\eta} \right|^2 i(\boldsymbol{\mu}) d\boldsymbol{\mu}. \quad (3)$$

Eine ausführliche Darstellung des Modells der partiell kohärenten Abbildung ist in [1] und [2] enthalten.

Numerische Ergebnisse

Dezentrierung der Lichtquelle

Für die numerische Rechnung wurde als Lichtquelle das Modell eines Wabenkondensors verwendet. Durch Ablenden des Kondensors werden die Kohärenzverhältnisse der Abbildung beeinflusst.

Kohärenzparameter ist hierbei des Verhältnis von Beleuchtungsapertur zu objektseitiger Apertur des Abbildungssystems.

$$S = \frac{A_{\text{Beleuchtung}}}{A_{\text{Objektiv}}} \quad (4)$$

Die Größe der Dezentrierung des Wabenkondensors ist auf den Radius der Eintrittspupille bei $S = 0.5$ normiert. Das untersuchte Objekt zeigt die Abbildung 2. Es ist ein reines Intensitätsobjekt.

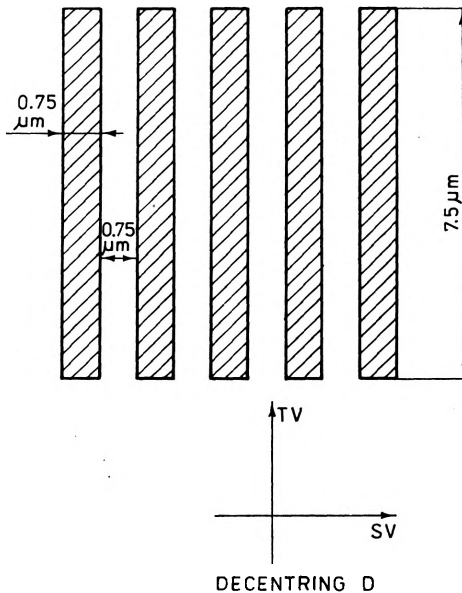


Abb. 2. Amplitudenverteilung im Objekt

Die Ergebnisse zur Dezentrierung der Lichtquelle gelten für ein Objektiv mit der bildseitigen numerischen Apertur von 0.36 und einer Wellenlänge von $\lambda = 435,8 \text{ nm}$. Zur Charakterisierung der Abbildungsqualität wurden die Linfoot-Kriterien zur integralen Bewertung herangezogen [3]. Abbildung 3 zeigt die Fidelität F in Abhängigkeit von der Dezentrierung D der Lichtquelle für das aberrationsfreie System. Sehr deutlich sieht man den starken Abfall der Fidelität, die ein Maß für die Ähnlichkeit zwischen Bild und Objekt ist, bei der nahezu kohärenten Abbildung für eine Dezentrierung

$D > 0.8$. Durch die Dezentrierung $D > 0.8$ wird ein Maximum des Raumfrequenzspektrums ausgeblendet, weil die auf den Pupillendurchmesser normierte Grundfrequenz des Objektes 0.8 ist. Je inkohärenter das Licht wird, desto verwaschener sind die Maxima. Daraus resultiert ein geringerer Informationsverlust, weil in den partiell kohärenten Fällen immer noch Anteile des Objektspektrums die Pupille passieren.

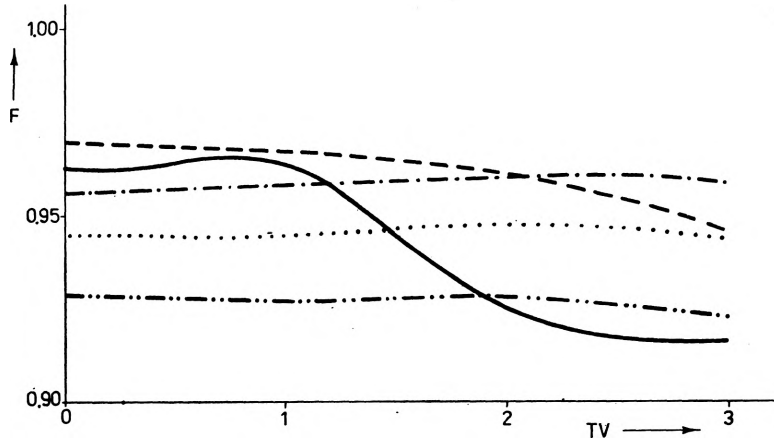


Abb. 3. Darstellung der Fidelität F in Abhängigkeit von der Dezentrierung D für ein aberrationsfreies System:
 — $S = 0$; - - - $S = 0.25$; - · - $S = 0.5$; · · · $S = 0.75$; - - - $S = 1$

Zur Charakterisierung der Abbildungsqualität der Balkengruppe eignet sich besonders gut der Transmissionsfaktor. Bei der Bewertung der Abbildung dieses Objektes kommt es vor allem auf das Auflösungsvermögen bzw. den Kontrast der Grundfrequenz an. In Anlehnung an die Theorie von HOPKINS [1] läßt sich ein spezieller Transmissionsfaktor TF so aufstellen, daß er den linearen Anteil der Intensitätsübertragung bei partiell kohärenter Beleuchtung repräsentiert. Die Raumfrequenzen des Objektes erstrecken sich vorwiegend in meridionaler und sagittaler Richtung. Im Transmissionsfaktor werden deshalb nur diese Raumfrequenzen berücksichtigt:

$$TF(|\eta|) = \frac{1}{4} \iint_{LQ} i(\mu) d\mu \int_{LQ} [\tilde{K}^*(\mu) \tilde{K}(\mu + \eta_1) + \tilde{K}^*(\mu) \tilde{K}(\mu + \eta_2) + \tilde{K}^*(\mu) \tilde{K}(\mu - \eta_1) + \tilde{K}^*(\mu) \tilde{K}(\mu - \eta_2)] i(\mu) d\mu. \quad (5)$$

η_1 — Raumfrequenzvektor in sagittaler Richtung,

η_2 — Raumfrequenzvektor in meridionaler Richtung.

Dieser Transmissionsfaktor stellt eine Verbindung zwischen der inkohärenten Intensitätsübertragungsfunktion und der kohärenten Amplitudenübertragungsfunktion dar. In den Abbildungen 4 bis 6 ist der Betrag

des Realteils des Transmissionsfaktors, multipliziert mit der wirksamen Fläche (Integrationsgebiet) im Frequenzraum als Übertragungsfaktor $\bar{U}F$ dargestellt. Dabei zeigt sich sehr gut die Korrelation der Bewertungsmöglichkeit des Übertragungsfaktors mit den Linfoot-Kriterien.

In den Abbildungen 4 bis 6 sieht man, daß die besten Abbildungseigenschaften, verbunden mit hoher Invarianz der Intensitätsverteilung des Bildes bei Dezentrierung der Lichtquelle für das aberrationsfreie System zwischen den Kohärenzparametern $0.25 < S < 0.75$ zu finden sind. Das wird auch durch die Intensitätsschnitte für das aberrationsfreie System, die in Abbildung 7 zu sehen sind, bestätigt.

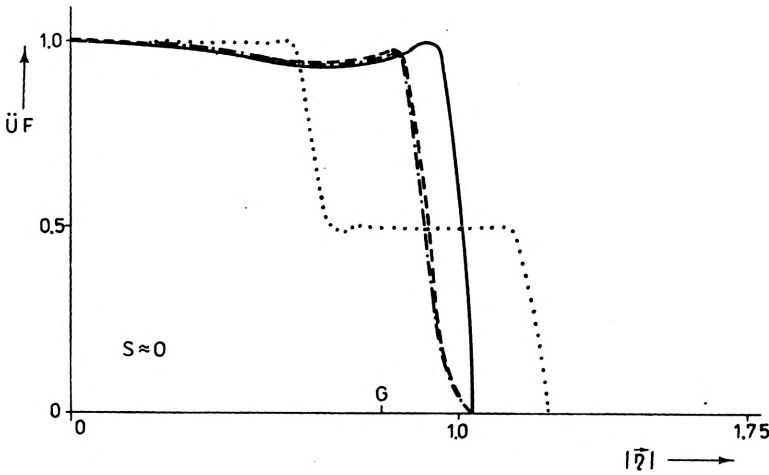


Abb. 4. Darstellung des Übertragungsfaktors $\bar{U}F$ für $S = 0$
 — $SV = 0, TV = 0$; - - - $SV = 1, TV = 0$; - · - $SV = 0, TV = 1$; ··· $SV = 3, TV = 3$

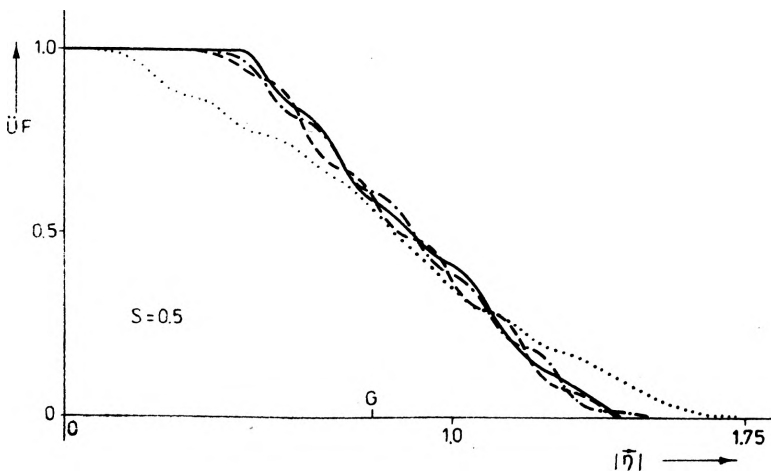


Abb. 5. Darstellung des Übertragungsfaktors $\bar{U}F$ für $S = 0.5$

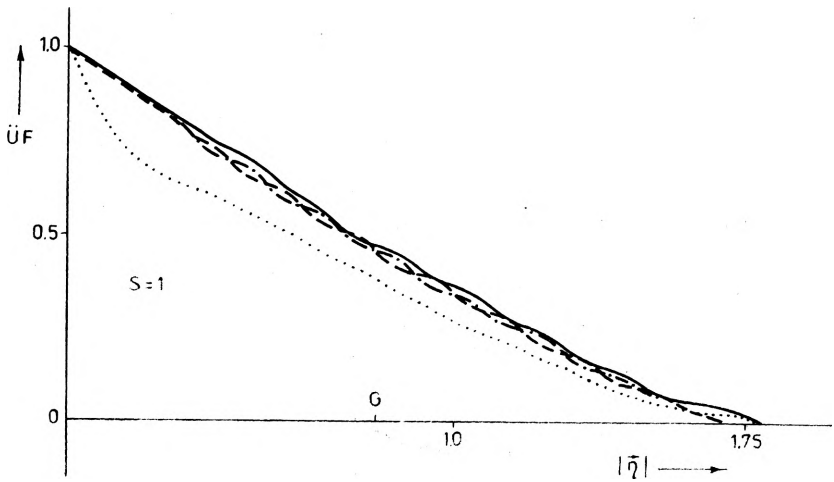


Abb. 6. Darstellung des Übertragungsfaktors $\ddot{U}F$ für $S = 1$

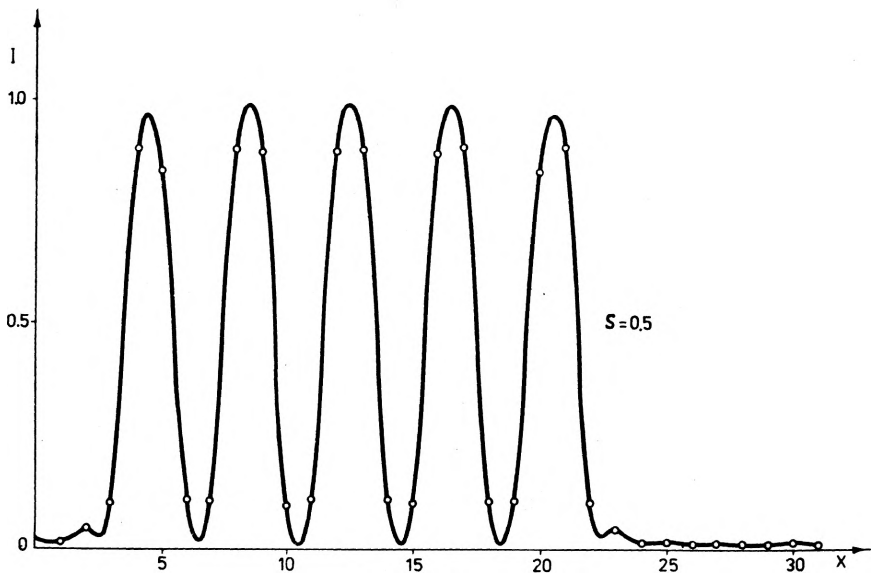


Abb. 7. Schnitt durch die Intensitätsverteilung der Balkengruppe im Bildraum

Dezentriert man die Lichtquelle orthogonal zu der in Abbildung 2 angegebenen Richtung, dann treten die gleichen Effekte, nur wesentlich schwächer in den Intensitätsschnitten auf. In Richtung der Dezentrierung treten die Effekte in einer zu dieser Grundfrequenz entsprechenden Größe auf. Eine Dezentrierung in diagonaler Richtung zum Objekt (45°) ergibt eine Superposition der beiden zueinander orthogonalen Dezentrierungsrichtungen.

Partiell raumkohärente Abbildung mit Öffnungsfehler

Hochleistungsobjektive für fotolithografische Prozesse werden in der Regel nach der Definitionshelligkeit optimiert. Das ist jedoch nicht immer sinnvoll, insbesondere dann nicht, wenn der Kohärenzparameter kleiner als 1 ist.

Im Prozeß der Optimierung optischer Systeme werden die Wellenaberrationen in Form der Zernike-Kreispolynome dargestellt:

$$W(r, \Phi) = \sum_{m,n} a_{mn} \cos(m\Phi) R_m^n(r), \quad (n = m, m+2, \dots), \quad (6)$$

r, Φ — Polarkoordinaten in der Austrittspupille des optischen Systems.

Der Koeffizient a_{02} repräsentiert den Abstand der Gaußschen Bildebene von der besten Einstellebene für die Definitionshelligkeit. Die Einstellebene wird so gewählt, daß die Quadratsumme aller Koeffizienten a_{02} über das Bildfeld und die spektrale Verteilung betrachtet ein Minimum wird. Das gilt jedoch nur für inkohärente Beleuchtung.

Im weiteren wird nur ein isoplanatisches Objektgebiet bei quasimonochromatischer Beleuchtung betrachtet. Besitzt das optische System einen Restfehler, der im wesentlichen durch a_{04} (Öffnungsfehler 3. Ordnung) bestimmt ist, dann weicht bei partiell kohärenter Beleuchtung die beste Einstellebene von der für inkohärente Beleuchtung ab. Eine Reihe numerischer und experimenteller Untersuchungen hat ergeben, daß die beste Einstellebene eine Funktion des Kohärenzparameters, der Objektklasse (charakterisiert durch die Grundfrequenz) und des Restfehlers a_{04} ist.

Für jede konkrete Abbildung läßt sich ein Verhältnis a_{02}/a_{04} angeben, bei welchem die Abbildungsqualität ein Optimum erreicht. Dabei gilt für alle Kohärenzparameter: $0 < a_{02}/a_{04} \leq 3$.

Die beste Einstellebene liegt zwischen der Gaußschen Bildebene ($a_{02}/a_{04} = 3$) und der besten Einstellebene für die Definitionshelligkeit ($a_{02} = 0$). In jedem Fall wird mit $S \rightarrow 0$ auch $a_{02}/a_{04} \rightarrow 3$ laufen. Ein Demonstrationsbeispiel dazu ist in [5] veröffentlicht. Problematisch für die Optimierung gestalten sich die Verhältnisse dann, wenn ein optisches System in einem Spektralbereich abbildet. Wie falsch die Beurteilung der Leistungsfähigkeit an Hand der Definitionshelligkeit in diesem Fall sein kann, soll hier an einem konkreten Objektiv dargestellt werden. Das Objektiv wurde für die Wellenlänge $\lambda = 435.8$ nm optimiert. Eine Analyse der Objektivs für die Wellenlängen $\lambda = 434.8$ nm und $\lambda = 437.4$ nm ist in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Die Energieverteilung in den einzelnen Wellenlängen wurde in den Zeichnungen nicht berücksichtigt. Das dargestellte Objekt ist eine Balkengruppe (hier als Schnitt durch die Mitte dargestellt). In den Bildern entspricht $Y' = 0$ der Abbildung auf der optischen Achse und $Y' = 25$ mm der Abbildung am Bildrand. Alle Intensitätsverteilungen und Definitionshelligkeiten sind in der besten Einstellebene für $\lambda = 435.8$ nm berechnet.

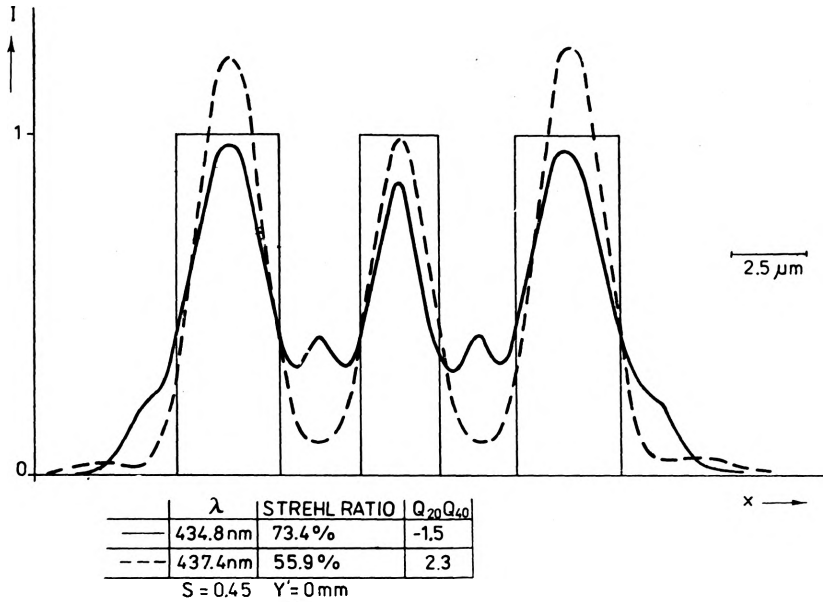


Abb. 8. Schnitt durch die Intensitätsverteilung der Balkengruppe im Bereich der optischen Achse

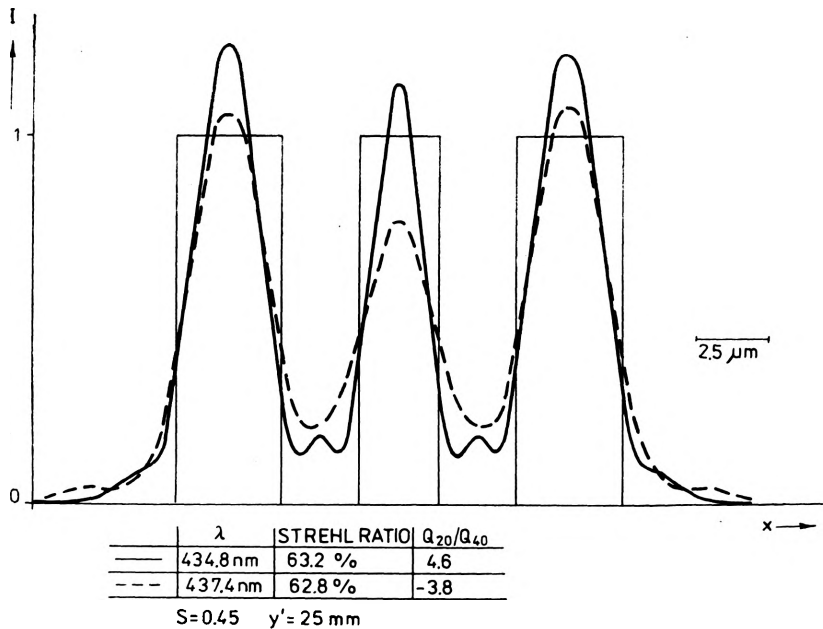


Abb. 9. Schnitt durch die Intensitätsverteilung der Balkengruppe am Bildrand

In Abbildung 8 gehört die günstigere Intensitätsverteilung zur schlechteren Definitionshelligkeit. Aus der Intensitätsverteilung ist deutlich der dominierende Einfluß des Verhältnisses a_{02}/a_{04} ersichtlich. Koeffizienten höherer Ordnung bringen keine wesentlichen Beiträge in diesem konkreten Fall.

In Abbildung 9 sind die Definitionshelligkeiten nahezu gleich, nur das Verhältnis a_{02}/a_{04} weicht sehr stark voneinander ab.

Allgemeingültige Kriterien für die Wichtung und die Verhältnisse der Polynomkoeffizienten zueinander lassen sich nicht angeben. Sie sind in Abhängigkeit von den konkreten Anforderungen an das optische System stets neu zu bestimmen. Die Definitionshelligkeit ist zwar ein hinreichendes Kriterium für ein gutes optisches System, aber keinesfalls immer notwendig.

[1] HOPKINS H. H., J. Opt. Soc. Am. **47** (1957), 508-526.

[2] NITSCHKE M., Dissertation, TH Ilmenau, 1974.

[3] LINFOOT E. H., Qualitätsbewertung optischer Bilder, Braunschweig-Vieweg Verlag, 1980.

[4] BÖSE R., NITSCHKE M., Feingerätetechnik **26** (1977), 257-262.

[5] NITSCHKE M., 8. Frühjahrsschule "Optik", Oberhof 1976, Tagungsbd. (S. 307).

*Received December 12, 1979
in revised form March, 13, 1980*

Некоторые эффекты в частично когерентном изображении

В представленной работе рассматриваются некоторые численные результаты для моделирования соотношения освещения в оптической системе. При этом исследуется влияние децентрированного источника света и сферической аберрации при различных когерентных параметрах на качество изображения отобранных двумерных структур.