

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 2

Anregungen für Unterricht und Lehre

ISBN 3 - 7896 - 0100 - 4

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.
Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.
Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage
www.solstice.de
werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Hans Werner Kohl

Beugung des Lichts - Neu gesehen mit dem Computer

Führt man im Unterricht das Phänomen "Beugung des Lichts" ein, so demonstriert man es wohl in der Regel an einem sehr engen Spalt, da hier eine einfache Gesetzmäßigkeit der Lichtverteilung vorliegt, die auch im Unterricht hergeleitet werden kann. Geht man dann im Experiment zu anderen Fällen von Beugung über, wie z.B. Beugung an einem weiten Spalt, an einer einzelnen Kante (Halbebene), an rechteckigen, kreisförmigen und dreieckigen Öffnungen oder an Hindernissen von komplementärer Form, so treten sofort weitaus kompliziertere Beugungsbilder auf, insbesondere dann, wenn es sich um den Fall Fresnelscher Beugung handelt, wenn also die an der Beugung beteiligten Lichtbündel nicht mehr aus nur parallelen

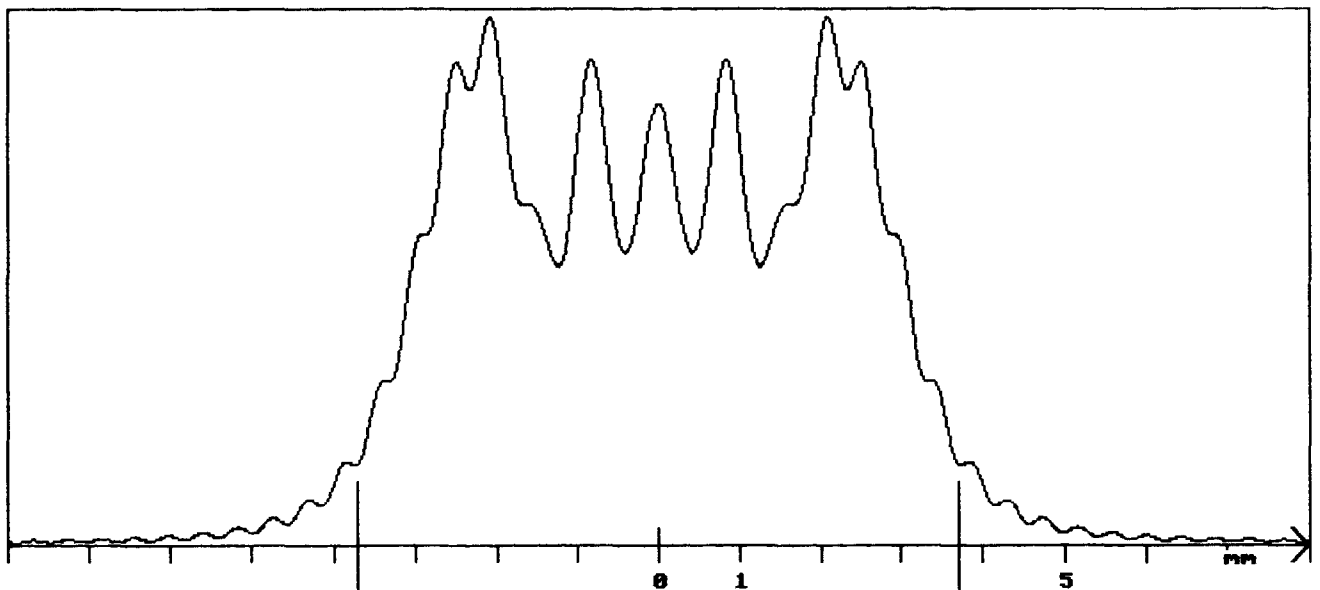


Abb. 1. Rechteckige Öffnung, Fresnel-Beugung. Intensitätsverteilung längs der Mittelparallele der längeren Seiten der geometrischen Schattenfigur. Der Funktionsterm enthält bestimmte Integrale ("Fresnelsche Integrale"), die mittels einer Näherung mit gebrochen-rationalen Funktionen oder durch numerische Integration berechnet werden.

Daten: Seitenlängen der rechteckigen Öffnung: 6,1 mm / 3 mm
Wellenlänge: 633 nm
Abstand der Lichtquellenebene: 18,4 m
Abstand der Beobachtungsebene: 4,00 m
Rechenzeit: 20 Min.

Lichtstrahlen bestehen. Will man auch diese Fälle rechnerisch behandeln, so sieht man sich, wenn überhaupt für den betreffenden Fall eine Formel für die Intensitätsverteilung existiert, oft vor teilweise erhebliche numerische Schwierigkeiten (bezogen auf das Niveau der Schulmathematik) gestellt. Hier nun kann der Computer entscheidende Hilfe leisten und zwar mit zwei Einsatzmöglichkeiten:

Zum einen können mit ihm in den Fällen, in denen eine Intensitätsfunktion existiert, relativ schnell Funktionswerte berechnet und Funktionsgraphen gezeichnet werden. Die Abbildungen 1 und 2 sind Beispiele hierfür. Die Funktionsterme sind aus der Kirchhoffschen Beugungstheorie abgeleitet, ihre Angabe muß hier aus Platzgründen entfallen.

Zum anderen können Intensitäten auch über das Huygens-Fresnel-Prinzip berechnet werden (s. [12]). Hier hat der Computer im we-

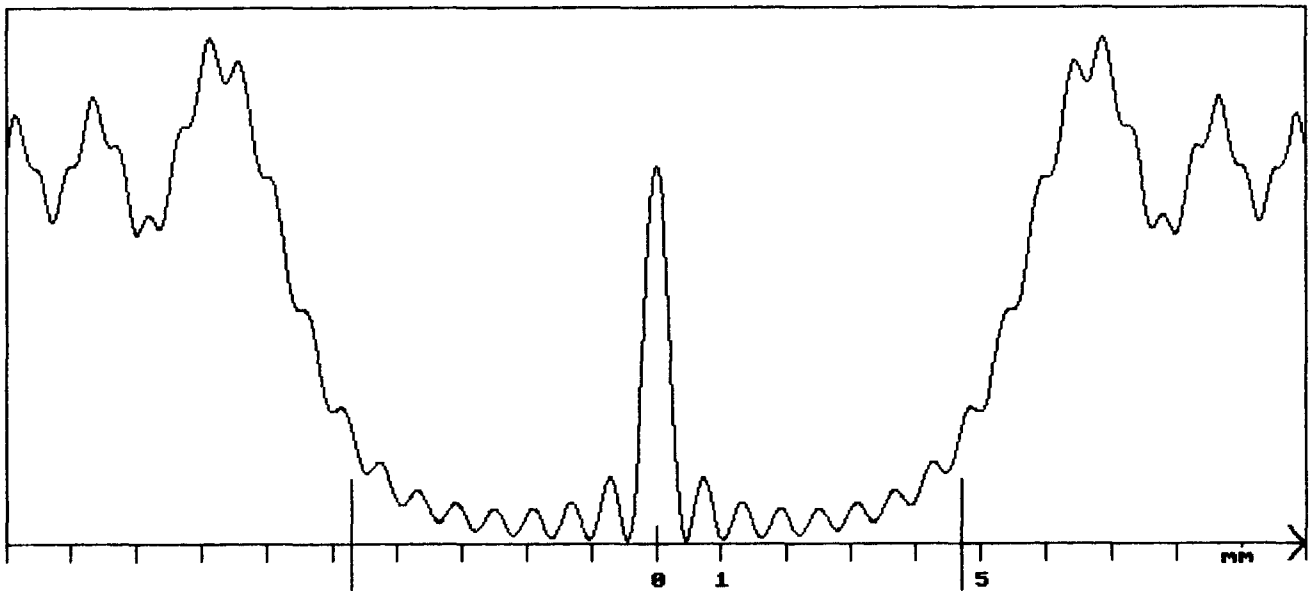


Abb. 2. Kreisförmiges Hindernis, Fresnel-Beugung. Intensitätsverteilung längs eines Durchmessers der geometrischen Schattenfigur. Der Funktionsterm besteht im wesentlichen aus einem bestimmten Integral, dessen Integrand u. a. eine Besselfunktion enthält. Deren Funktionswerte werden über eine Näherungsformel ermittelt, das bestimmte Integral wird nach einem der üblichen Verfahren zur numerischen Integration berechnet. Das zentrale Maximum ist der Poissonsche Fleck.

Daten: Scheibenradius: 3,5 mm
 Wellenlänge: 633 nm
 Abstand der Lichtquellenebene: 18,85 m
 Abstand der Beobachtungsebene: 6,51 m
 Rechenzeit: 250 Min.

sentlichen die Aufgabe, die (komplexen) Amplituden der vielen einzelnen Elementarwellen zu addieren. Dieses Verfahren ist vom Prinzip her einfach und eignet sich daher auch gut für die Schule (z.B. für Facharbeiten). Dabei hat es den Vorteil einer gewissen Universalität: es kann auch da noch Ergebnisse liefern, wo Funktionsterme entweder gar nicht mehr oder nur mit relativ großem mathematischen Aufwand ableitbar sind. Die Abbildungen 3 und 4 geben Beispiele zu diesem Verfahren. Den Vorteilen steht als einziger Nachteil die Tatsache gegenüber, daß eine hinreichend hohe Rechengenauigkeit mitunter recht lange Rechenzeiten erfordert. In den Fällen, wo die Berechnung von Funktionswerten nicht allzu viel Rechenzeit beansprucht, können die funktionalen Abhängigkeiten bei Beugungserscheinungen auch noch graphisch aufwendiger veranschaulicht werden:

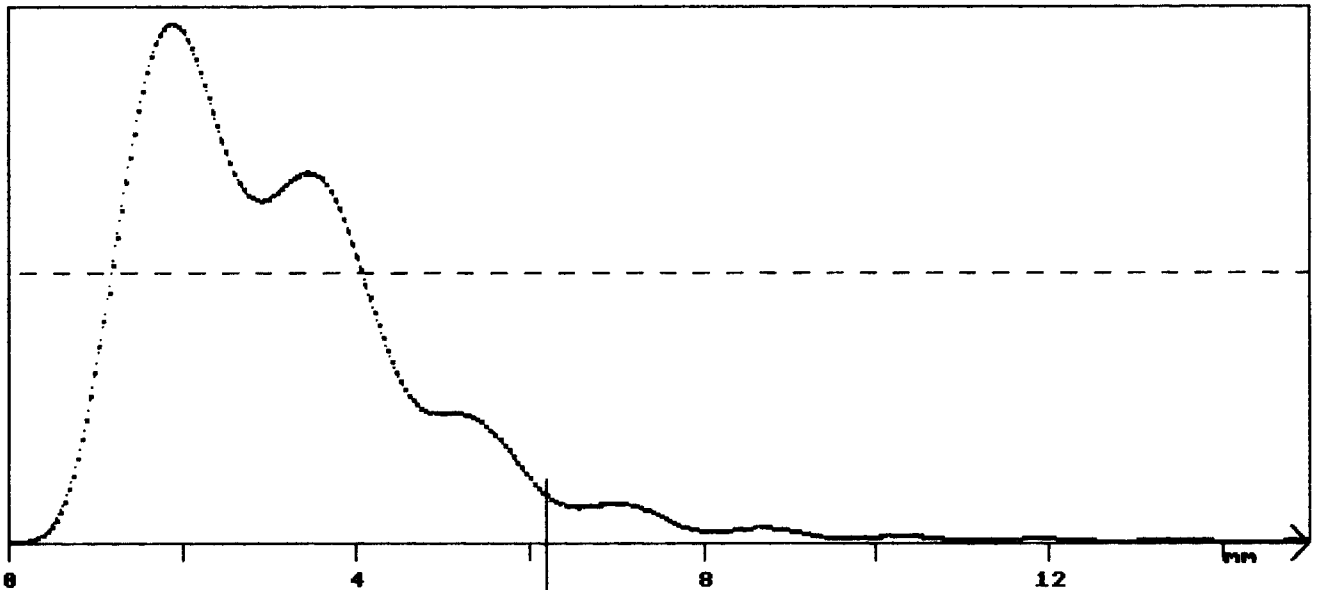


Abb. 3. Kreisförmige Öffnung, Fresnel-Beugung. Intensitätsverteilung längs eines Durchmessers der geometrischen Schattenfigur (Ursprung des Koordinatensystems im Kreismittelpunkt). Die großen Punkte repräsentieren die durch Summation nach dem Huygens-Fresnel-Prinzip gewonnenen Werte, die kleinen die mittels eines Funktionsterms berechneten. Der relative Fehler beträgt im Bereich des Maximums ca. 0,2%, überschreitet etwa in der Mitte die 1%-Grenze und wächst dann nach rechts bis etwa 12% an. Die gestrichelte Linie gibt die Intensität der ungestörten Lichtwelle in der Beobachtungsebene an.

Daten: Lochradius: 3,09 mm
 Wellenlänge: 546 nm
 Abstand der Lichtquellenebene: 17,5 m
 Abstand der Beobachtungsebene: 17,5 m
 301 Summationspunkte ber. aus je 14400 Elementarwellen
 Rechenzeit: 1354 Min. (incl. Funktionswerte)

Zum einen kann die fotografische Registrierung einer Beugungsfigur simuliert werden. Dazu werden über die Verwendung eines Zufallszahlenalgorithmus Intensitäten in ein Punktraster aus weißen und schwarzen Punkten (Bildschirmpixel) übersetzt. Man definiert beispielsweise "korrekte Belichtung" so, daß man dem absoluten Intensitätsmaximum der Beugungsfigur eine reinweiße Fläche zuordnet, d.h. man wählt die Wahrscheinlichkeit, daß ein schwarzer Punkt gesetzt wird, hier gleich Null und kann damit dann auch Über- (ebenso Unter-)Belichtung erzeugen, um z.B. schwache Nebenmaxima hervorzuheben. Die Abbildungen 5 und 6 geben zwei Beispiele.

Eine zweite Möglichkeit der Veranschaulichung, zugleich eine

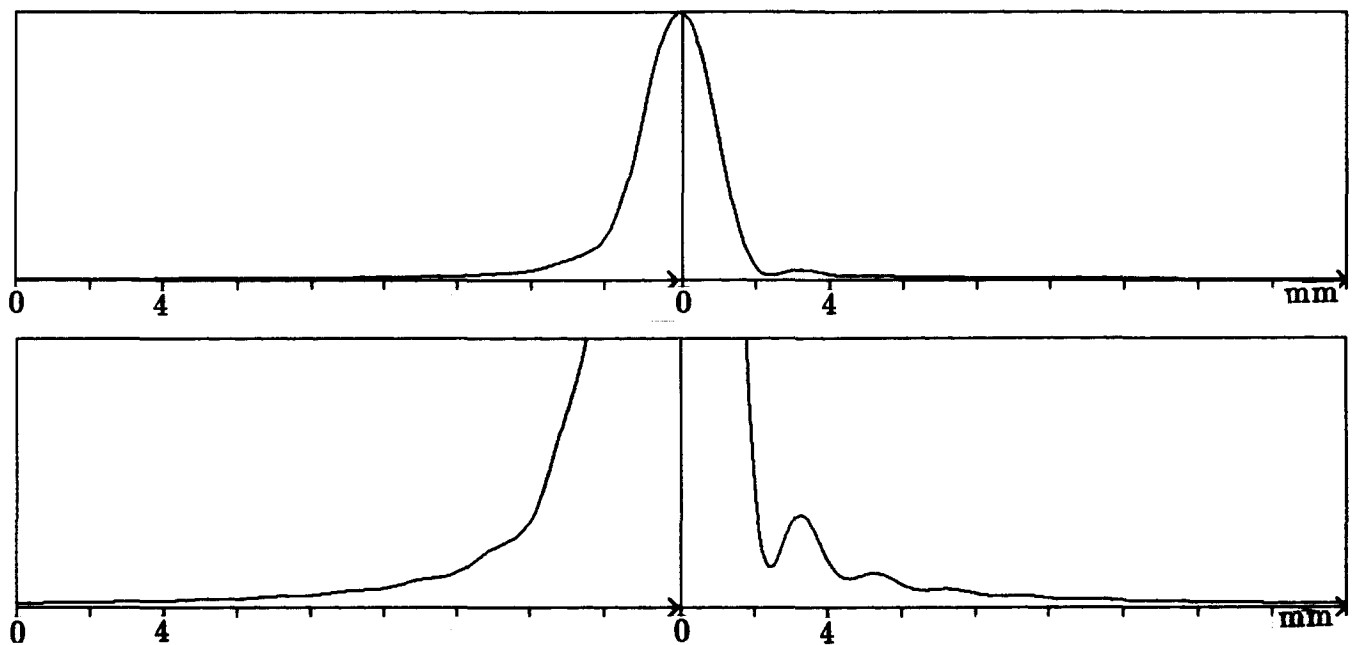


Abb. 4. Öffnung in Form eines gleichseitigen Dreiecks, Fresnel-Beugung. Intensitätsverteilung längs einer Schwerlinie der geom. Schattenfigur. Der Koordinatenursprung liegt in deren Schwerpunkt, hier tritt auch das Hauptmaximum der Intensität auf. Eine Ecke des Schattendreiecks liegt auf der rechten Hälfte der Abszissenachse. Die Kurve entstand durch lineares Verbinden von 601 durch Summation berechneten Kurvenpunkten, von denen jeder durch Überlagerung von 6236 Elementarwellen hervorging. Die entsprechende im Experiment beobachtbare (flächige) Beugungsfigur weist eine 120° -Drehsymmetrie auf. Das untere Diagramm zeigt einen Teil des um den Faktor 10 senkrecht zur Abszissenachse gestreckten Graphen des oberen Diagramms.

Daten: Seitenlänge der Dreiecksöffnung: 1,5 mm
 Wellenlänge: 633 nm
 Abstand der Lichtquellenebene: 18,1 m
 Abstand der Beobachtungsebene: 4,00 m
 Rechenzeit: 856 Min.

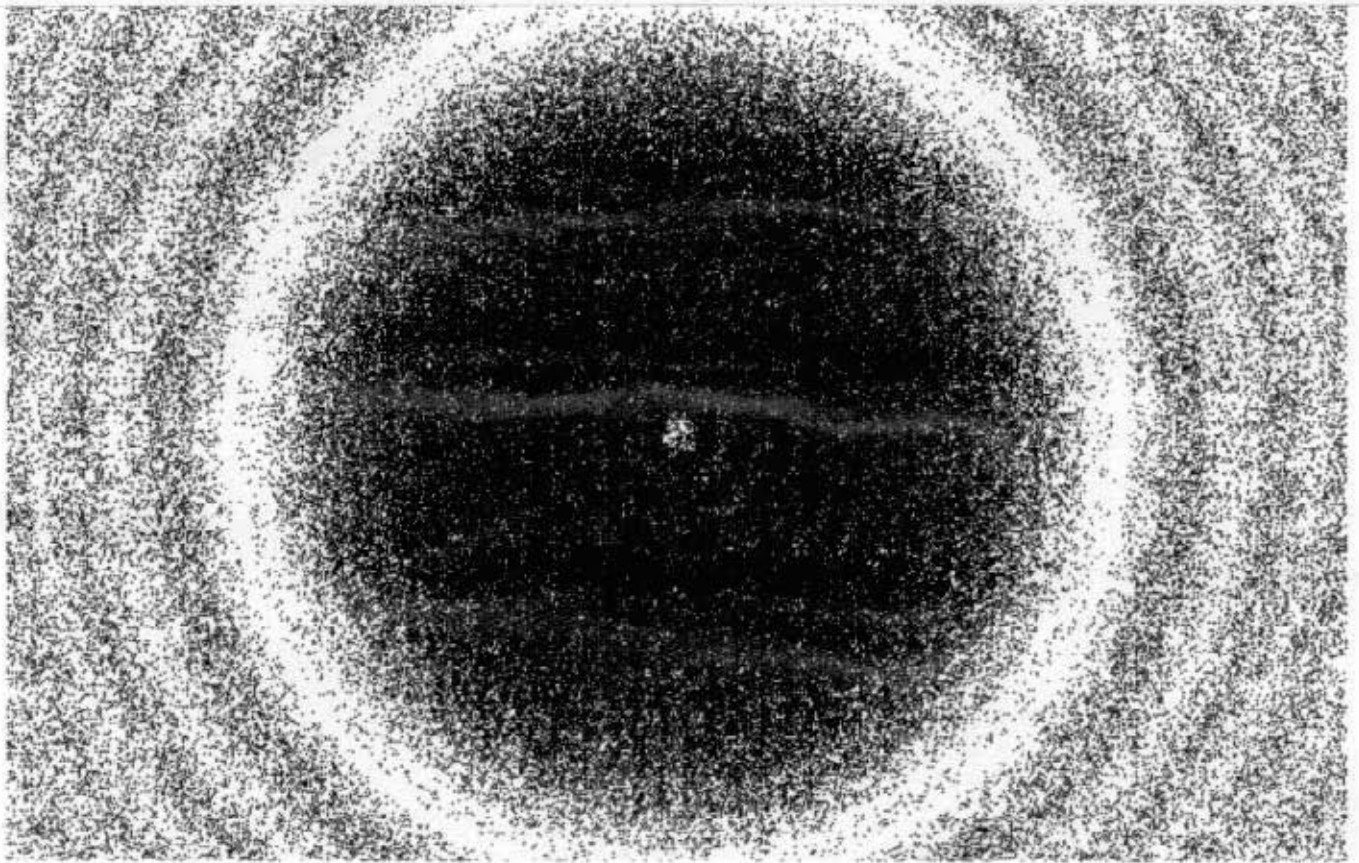


Abb. 5. Kreisscheibe wie in Abb.2, "korrekt belichtet".

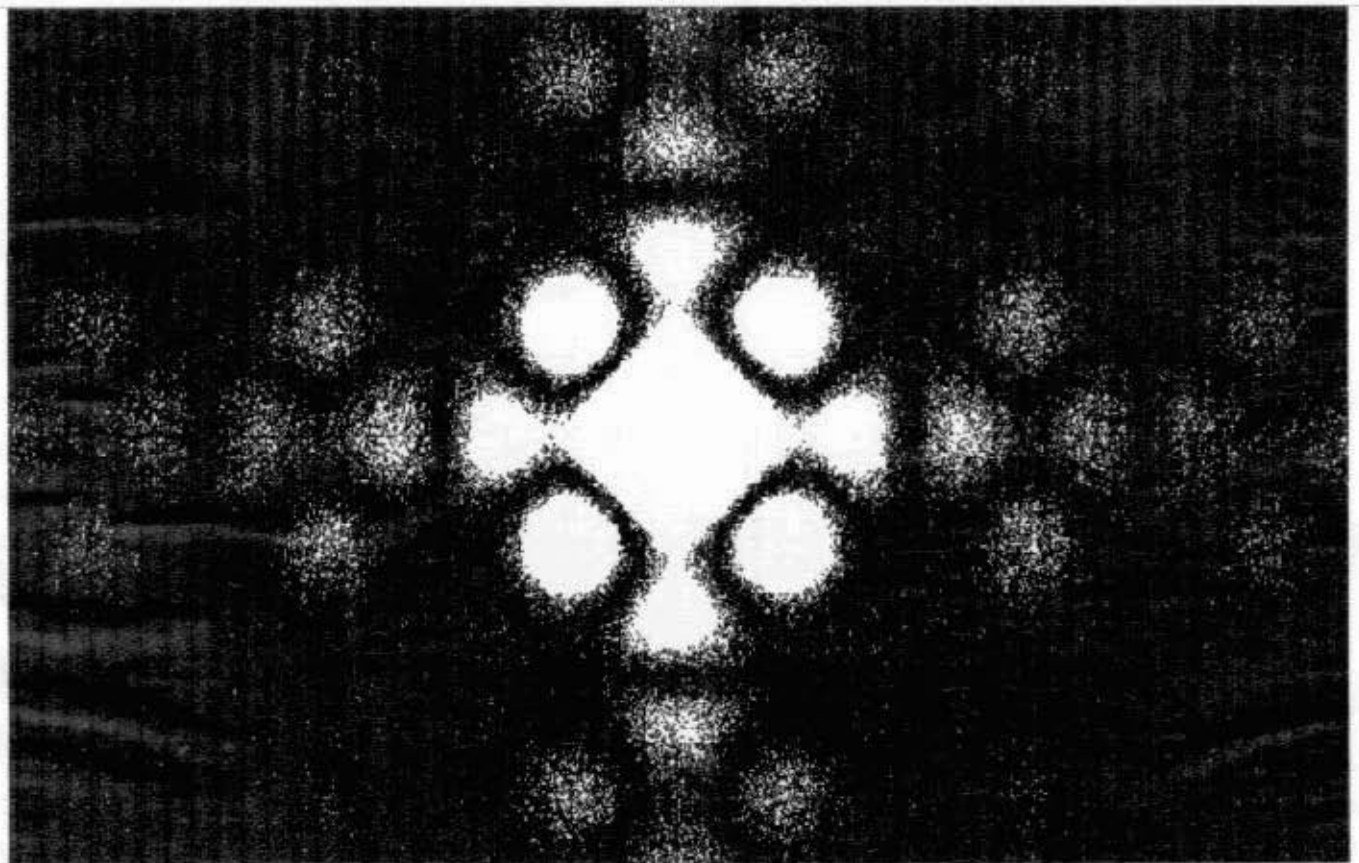


Abb. 6. Kreuzförmige Öffnung, Fraunhofer-Beug., "überbelichtet".

auch graphisch recht ansprechende, ist die 3D-Darstellung von Intensitätsfunktionen. Die Abbildungen 7 bis 13 geben hierzu Beispiele. Für diese Darstellungen wurde keiner der üblichen Algorithmen zur Darstellung von Flächen benutzt, weil einmal deren maximale Auflösung (Bildschirmpixel) als zu grob und zweitens deren Abbildung von Flächenelementen ("Netzmaschen") als Vierecke als zu eckig empfunden wurde. Stattdessen wurde vom Verfasser ein Programm entwickelt (s. [13]), dessen auf eine Flächendichte bezogene 36-fache Auflösung gegenüber einer Bildschirmauflösung von 640 x 400 Punkten die Möglichkeiten eines 24-Nadel-Druckers (hier NEC P6+) optimal nutzt und hinreichend "glatte" und "runde" Kurven erzeugt.

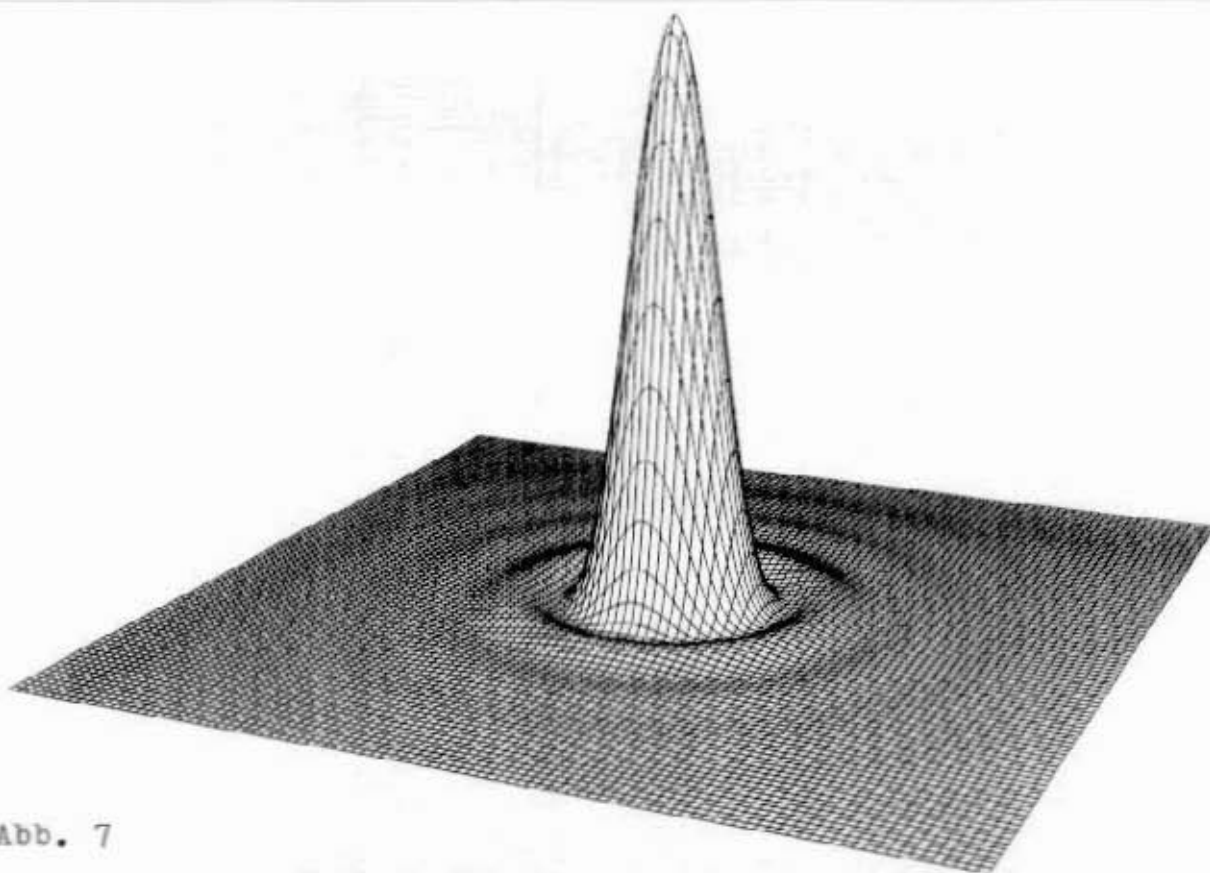


Abb. 7

Zu den Abbildungen 7 bis 13:

- Abb. 7: Kreisförmige Öffnung
- Abb. 8: Rechteckige Öffnung (Amplitude)
- Abb. 9: Rechteckige Öffnung (Intensität)
- Abb. 10: Quadratische Öffnung
- Abb. 11: Öffnung in Form eines gleichseitigen Dreiecks
- Abb. 12: Quadratisches Hindernis
- Abb. 13: Öffnung in Form eines Kreuzes (wie Abb. 6)

Die Abbildungen 10 und 12 stellen Fälle von Fresnel-Beugung, die anderen Fälle von Fraunhofer-Beugung dar.

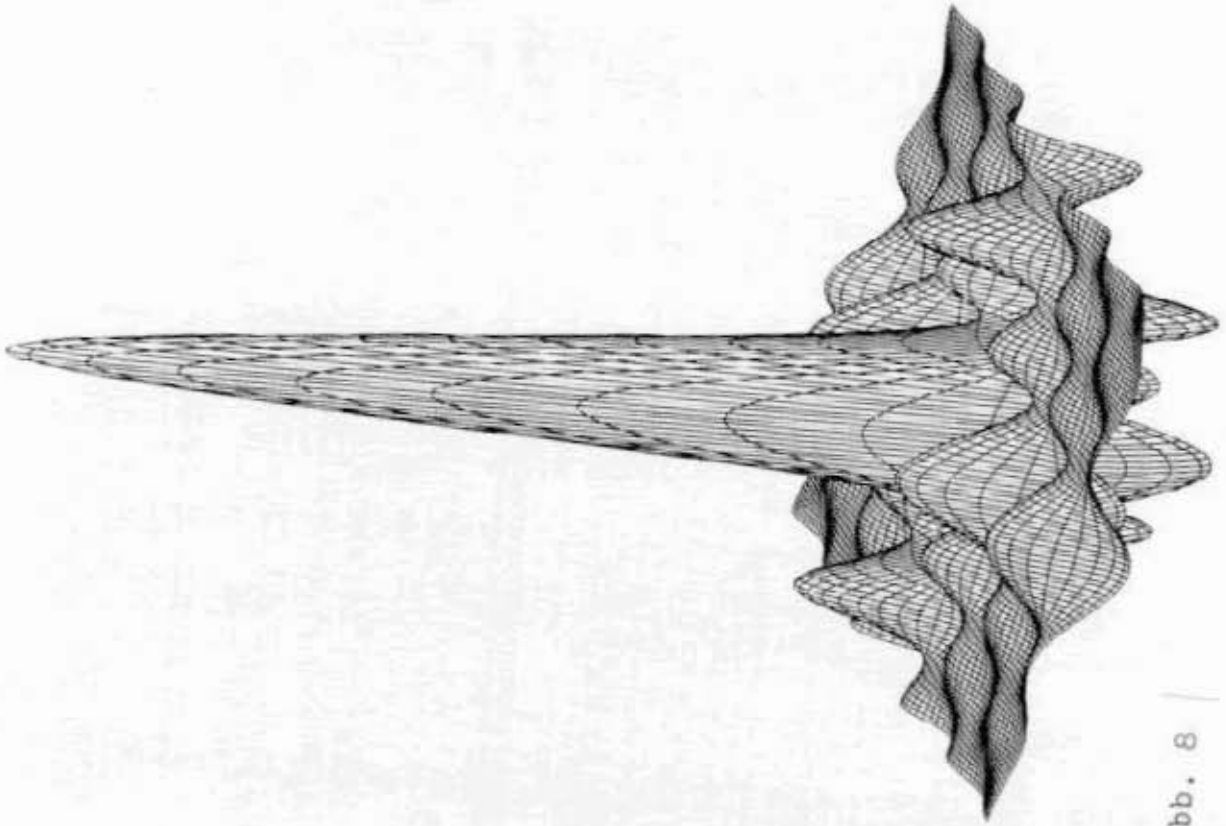


Abb. 8

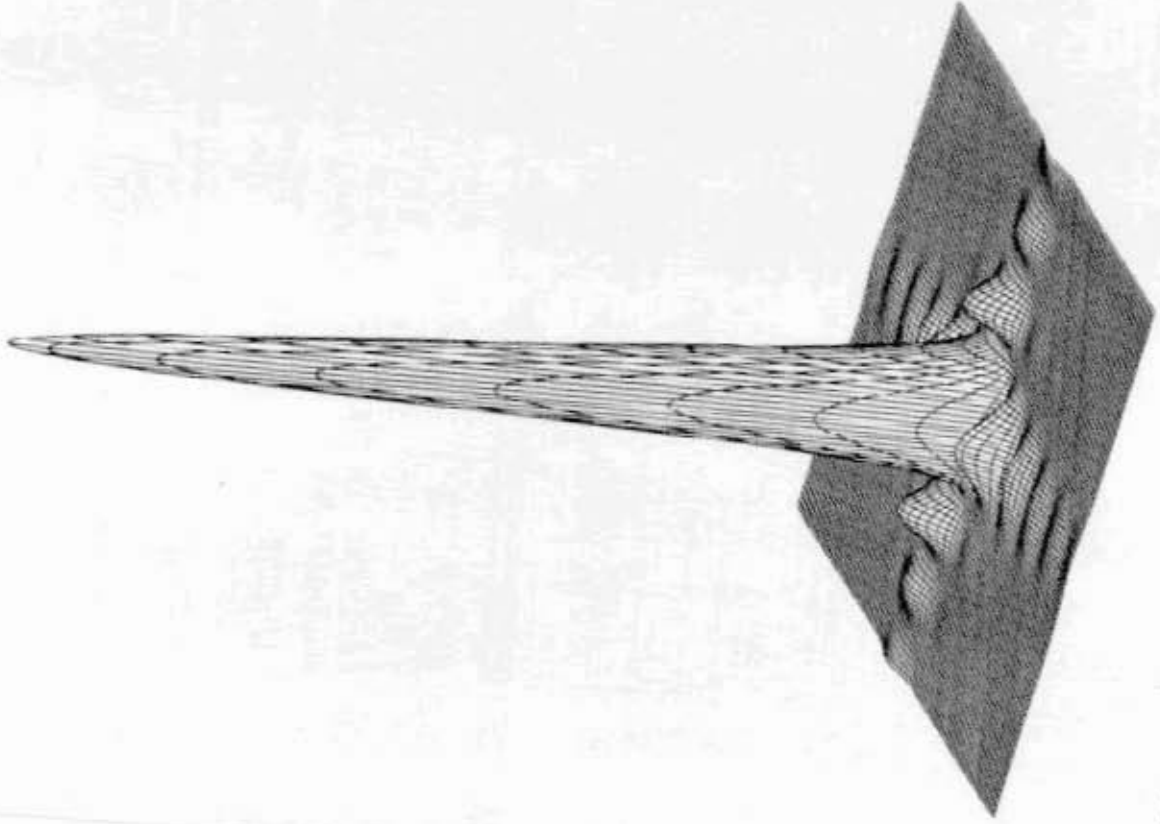


Abb. 9

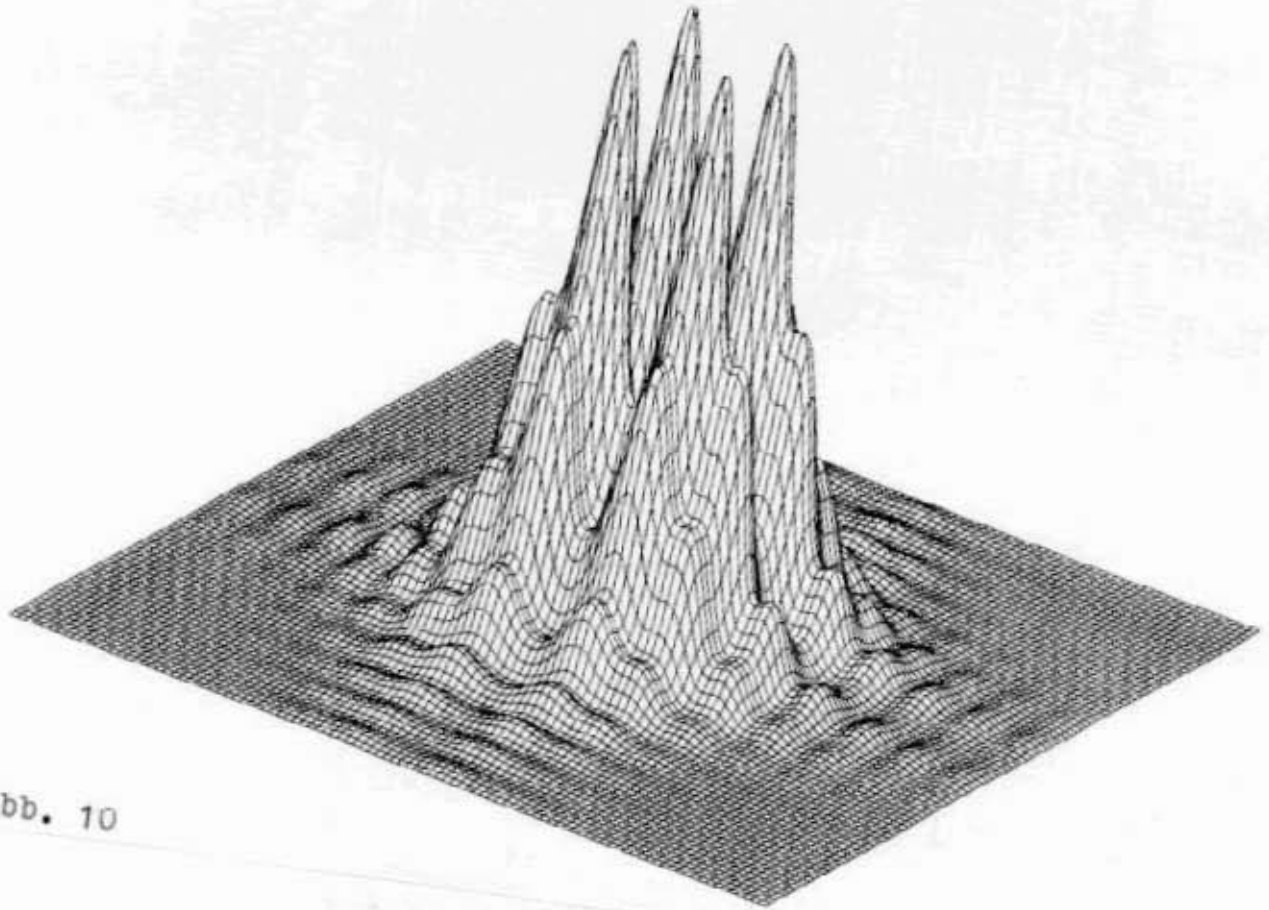


Abb. 10

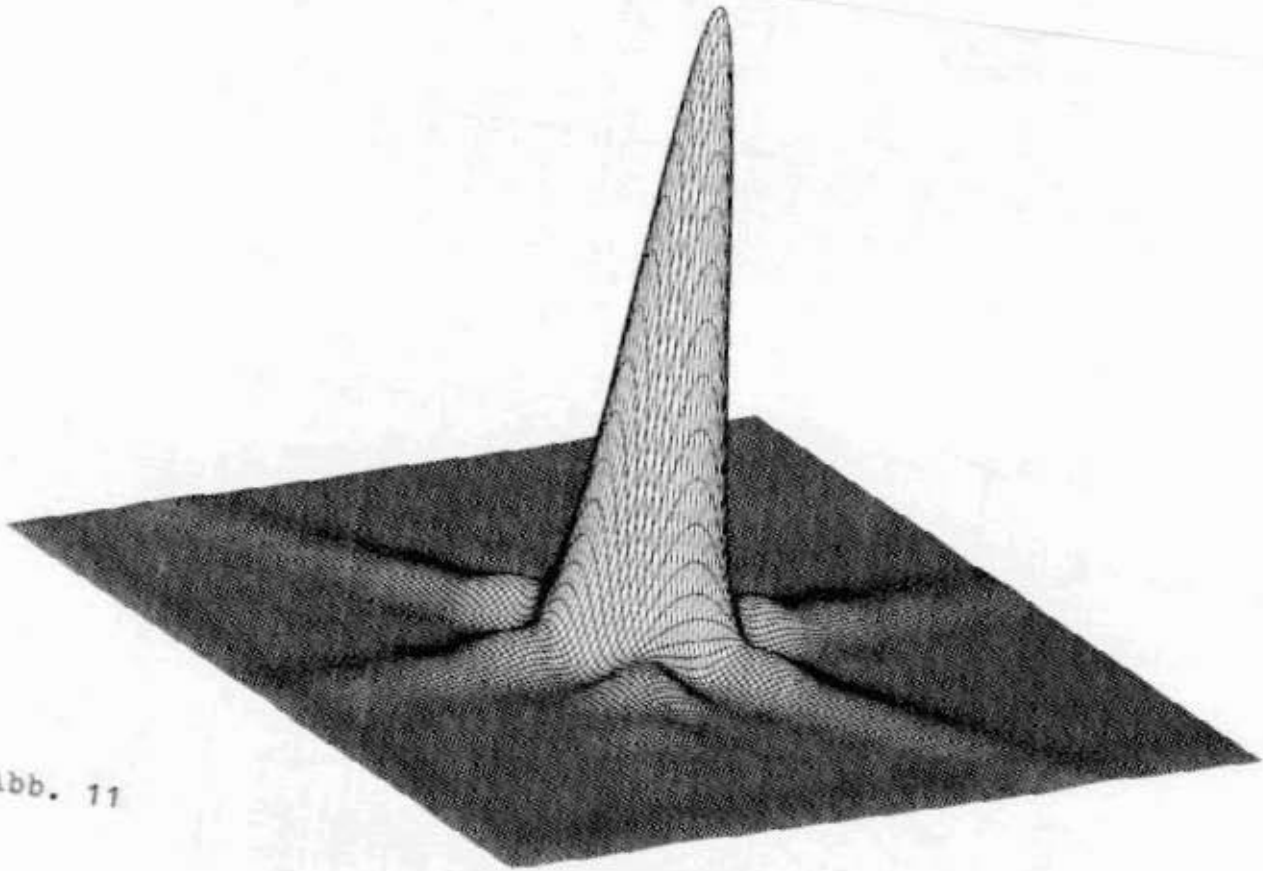


Abb. 11

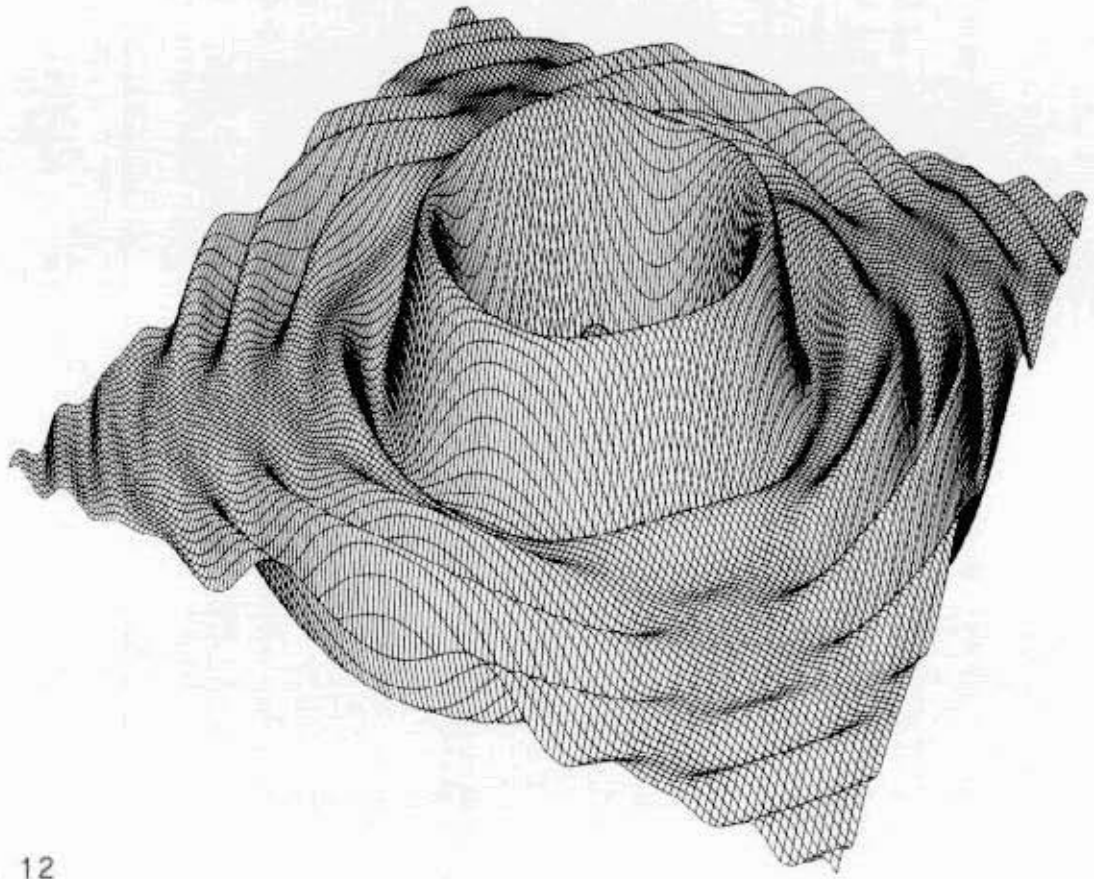


Abb. 12

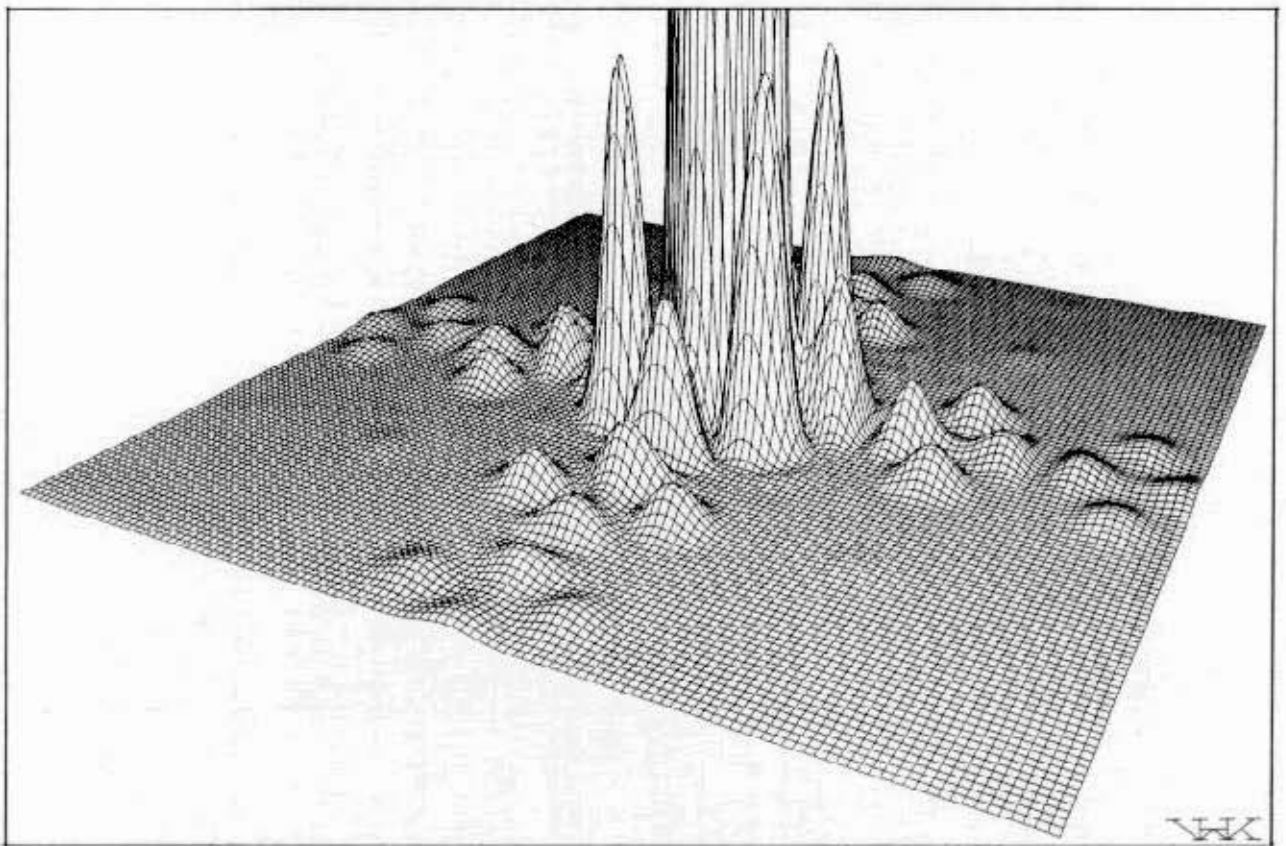


Abb. 13

Literatur

- [1] R.W. Pohl: Optik und Atomphysik. 11. Aufl. - Berlin: Springer 1963.
- [2] E. Hecht: Optik (Schaum's outline). - Hamburg: McGraw-Hill Book Company GmbH 1987.
- [3] E. Hecht: Optics Second Edition. - Reading, Mass.: Addison-Wesley 1988.
- [4] M.V. Klein - T.E. Furtak: Optik. - Berlin: Springer 1988.
- [5] M. Born: Optik. 3. Aufl. - Berlin: Springer 1981.
- [6] A. Sommerfeld: Optik. 3. Aufl. - Thun: Harri Deutsch 1978.
- [7] S. Flügge(Hg.): Handbuch der Physik, Band XXIV. - Berlin: Springer 1956.
- [8] M. Abramowitz - I.A. Stegun (Hg.): Handbook of Mathematical Functions. - New York: Dover Publications 1972.
- [9] M. Alonso - E.J. Finn: Fundamental University Physics, II. - Reading, Mass.: Addison-Wesley 1969.
- [10] A. Papoulis: Systems and Transforms with Applications in Optics. - New York: McGraw-Hill 1968.
- [11] J.J. Stamnes: Waves in Focal Regions. - Bristol: Adam Hilger 1986
- [12] H.W. Kohl: "Beugung mit dem Computer". - Erscheint in MNU 1991
- [13] H.W. Kohl: "Funktionen zum Anschauen". - Erscheint in Didaktik der Mathematik 1991