

Mikrowellen-Thermographie

B. KOCH und H. OERTEL JR.

Mitteilung aus dem Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis (Haut-Rhin), Frankreich

(Z. Naturforsch. **22 a**, 270—274 [1967]; eingegangen am 8. November 1966)

Herrn Prof. Dr. M. CZERNY nachträglich zum 70. Geburtstag gewidmet

It is shown that microwave optical field patterns such as focal areas, field distributions and diffraction phenomena can readily be visualized using CZERNY's infrared thermosensitive transducer method (Evaporographie).

Bei mikrowellenoptischen Untersuchungen ergibt sich häufig die Notwendigkeit einer genaueren Kenntnis der Struktur des Strahlungsfeldes in der Umgebung von Brennoflächen, reflektierenden oder beugenden bzw. streuenden Objekten wie Blenden, Schirmen, Kanten usw. Gegenüber ähnlichen lichtoptischen Problemen liegt im Mikrowellenbereich jedoch die Schwierigkeit vor, daß die Ausmessung solcher Strahlungsfelder nur durch Abtastung mit Hilfe von Feldsonden erfolgen kann, die keinen unmittelbaren bildmäßigen Überblick liefern. Eine Verlegenheitslösung besteht in einer rasterförmigen Abtastung des betreffenden Raumgebietes unter Zuhilfenahme koordinatenmäßig gekoppelter und durch die von der Feldsonde registrierte örtliche Feldstärkenverteilung intensitätsgesteuerter lichtoptischer Hilfsmittel (Glühlämpchen, Oszillographenraster), wodurch eine synchron mit dem Abtastvorgang erfolgende photographische Fixierung der Feldstruktur ermöglicht wird¹.

Auch bei sorgfältigem Aufbau der Feldsonde ist hierbei eine gewisse Rückwirkung auf das Strahlungsfeld unvermeidlich, insbesondere ist die räumliche Auflösung wesentlich durch deren Form und Abmessung in nicht ohne weiteres erkennbarer Weise mitbestimmt.

Aus diesem Grunde erscheint der Versuch von Interesse, unter Vermeidung von Feldsonden eine unmittelbare bildmäßige Darstellung der Intensitätsverteilung eines Mikrowellenstrahlungsfeldes etwa in einer oder mehreren Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung zu erhalten, ohne diese Struktur wesentlich oder allenfalls nur in kontrollierbarer Weise zu beeinflussen.

Für die Lösung dieser Aufgabe bietet sich ein Verfahren des bildmäßigen thermischen Nachweises elektromagnetischer Strahlungsenergie außerhalb des Sensibilitätsbereiches photographischer Emulsionen an, das bereits vor längerer Zeit von CZERNY und Mitarbeitern² unter der Bezeichnung „Evaporographie“ in die Laboratoriumsmeßtechnik des ultraroten Spektralbereiches eingeführt und neuerdings bis zu einer gewissen technischen Reife entwickelt worden ist³.

Es beruht bekanntlich im wesentlichen auf der interferenzoptisch sichtbar gemachten Dickenänderung, die ein auf eine dünne Trägermembran aufgedampfter Ölfilm infolge der örtlichen Erwärmung einer auf der anderen Seite der Membran befindlichen und die nachzuweisende Ultrarotstrahlung absorbierenden Schwärzungsschicht erfährt.

Im folgenden werden die ersten Ergebnisse mitgeteilt, die dieses Verfahren bei Anwendung auf Strahlung des Millimeterwellengebietes bisher geliefert hat und die seine Weiterentwicklung in Richtung auf ein universeller brauchbares und quantitativ arbeitendes Nachweisverfahren des Millimeter- und Submillimeterbereiches als aussichtsreich erscheinen lassen.

A. Versuchsaufbau

Nachdem einige Vorversuche der Sublimierung einer nach dem Vorbild von CZERNY auf einer Kolodionmembran niedergeschlagenen Kampferschicht bei Atmosphärendruck noch zu keinem greifbaren Ergebnis geführt hatten, wurden die Versuche zu-

¹ H. KLEINWÄCHTER, A.E.Ü. **9**, 154 [1955]. — R. P. DOOLEY, Proc. IEEE **53**, 1733 [1965]. — W. E. KOCK, Proc. IEEE **54**, 331 [1966].

² M. CZERNY, Z. Phys. **53**, 1 [1929]. — M. CZERNY u. P. MOLLET, Z. Phys. **108**, 85 [1938]. — W. WITTE, Dissertation Frankfurt (Main) 1959. — H. GOBRECHT u. W. WEISS, Z. angew. Phys. **5**, 207 [1953].

³ G. W. McDANIEL u. Z. ROBINSON, Appl Optics **1**, 311 [1962].



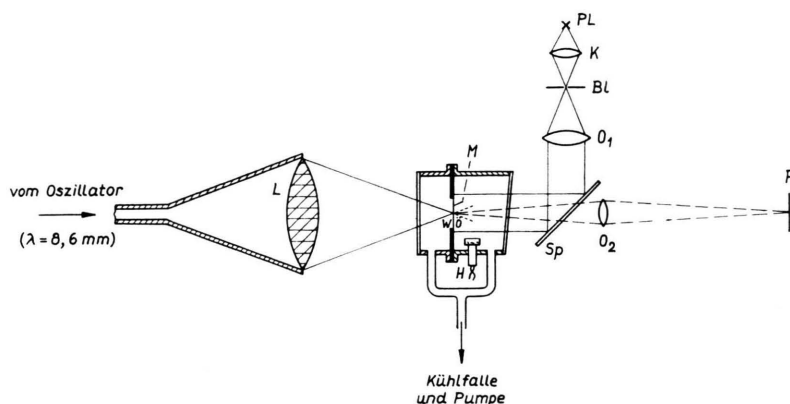


Abb. 1. Experimentelle Anordnung. L = Polyäthylenlinse ($D = 15$ cm, Bildweite $S = 20$ cm), M = Strahlungsempfindliche Membran mit Wismutschicht (W) und Ölfilm (Ö), H = Heizelement mit Ölschiffchen, Sp = Halbdurchlässiger Planspiegel, PL = Punktlichtlampe, Bl = Lochblende, K = Kondensor, O₁, O₂ = Abbildungsobjektive, P = Photoschicht.

nächst unter Verwendung einer im wesentlichen nach den in der Literatur enthaltenen Vorbildern des Ultrarotverfahrens^{2,3} aufgebauten Vakuumkammer fortgesetzt, vgl. Abb. 1.

Die Strahlungsenergie eines Klystron-Oszillators von 8,6 mm Wellenlänge wurde mittels einer in der Öffnung eines kreiskegelförmigen Hornstrahlers angeordneten Polyäthylenlinse ($D = 15$ cm) in einer Bildweite von 20 cm (Aperturöffnung demnach $2\vartheta = 0,75$) auf die in einem mit Glasfenster von 5 mm Dicke abgeschlossenen Vakuumgefäß angeordnete strahlungsempfindliche Schicht (s. u.) fokussiert. Dabei befand sich die absorbierende Schicht auf der der einfallenden Strahlungsenergie zugewandten Seite, während die Beleuchtung des auf der Rückseite kondensierten Ölfilms in bekannter Weise über einen halbdurchlässigen Spiegel mit einer Wolfram-Punktlichtlampe (gelegentlich auch mit einer Quecksilberhöchstdrucklampe) erfolgte. Für die photographischen Aufnahmen der sich ausbildenden Farberscheinungen wurde Negativfarbfilm AGFA CN 17, gelegentlich auch Umkehrfilm AGFA CN 18 und KODAK EKTACHROME, in allen Fällen mit einer Belichtungszeit von $1/5$ s bei Blende 2,8 verwendet. Der Abbildungsmaßstab betrug immer $1,75 : 1$.

Das aus Messing hergestellte Vakuumgefäß von 90 mm Innendurchmesser und etwa 105 mm Länge wurde auf etwa $5 \cdot 10^{-3}$ Torr evakuiert und enthielt außer der auf einem Aluminiumring mit einer freien Öffnung von 40 mm Durchmesser aufgebrachten strahlungsempfindlichen thermographischen Schicht in der hinteren Kammer ein von außen heizbares Metallschiffchen mit dem zu verdampfenden Öl. Die Evakuierung des durch die Membran in zwei Kammern unterteilten Versuchsgefäßes erfolgte zwecks Vermeidung von Druckunterschieden über eine genau gleich dimensionierte Schlauchverzweigung unter Vorsatz einer Kühlfalle. Zur Unterdrückung störender Lichtreflexe bei der interferenzoptischen Beobachtung des Mikrowellenbildes wurde das hintere Abschlußfenster um etwa 10° gegen die optische Achse der Beleuchtungsanordnung geneigt.

Aufbau und Herstellung der thermographischen Schichten:

— Trägermembran. Diese wurde wie üblich durch Spreiten einer 5-proz. Lösung von Kollodium in Amylacetat auf einer Oberfläche von destilliertem Wasser hergestellt und danach selbstklebend auf den bereits genannten Aluminiumring aufgebracht. Die Dicke der Membran kann auf Grund der Eigeninterferenzfarbe mit $0,1 \mu$ angenommen werden. Trotz erheblicher Sorgfalt bei der Herstellung gelang es bei diesen ersten Versuchen noch nicht, immer völlig homogene und faltenfreie Membranen größeren Durchmessers zu erhalten. Außerdem erwies sich ihre mechanische Festigkeit gegenüber schwachen Druckdifferenzen in beiden Kammerhälften oder anderweitigen geringen mechanischen Beanspruchungen vielfach als unzureichend.

— Absorptionsschicht. Auf ihre Eignung für den Nachweis von Mikrowellenstrahlung wurden im Vakuum aufgedampfte dünne Absorber-Schichten aus Ag, Sb, Pb und Bi geprüft: Es wurde in Abhängigkeit von der in der Verdampfungsapparatur eingewogenen Menge in einer Mikrowellenmeßbrücke bei 8,6 mm Wellenlänge der Transmissions- und Reflexionsfaktor durch einen Null-Vergleich mit kalibrierten Reflexions- und Dämpfungsgliedern gemessen⁴.

In den Abb. 2 a) bis d) sind die Ergebnisse dieser Messungen zusammen mit dem sich hieraus rechnerisch ergebenden Absorptionsverlauf dargestellt. Aus ihnen geht die besondere Eignung von Bi als Absorbersubstanz hervor, da bei diesem Metall die Abhängigkeit des Absorptionsvermögens von der der eingewogenen Menge proportionalen Schichtdicke am geringsten und daher deren Einhaltung bei vorgegebenen Absorptions- und Reflexionsvermögen am unkritischsten ist. Dagegen erweist sich Ag wegen

⁴ Der Zusammenhang der Dicke mit der eingewogenen Menge unterliegt z. Zt. einer gesonderten Untersuchung, über die — ebenso wie über die Meßergebnisse bei 3,2 cm Wellenlänge — anderweitig berichtet werden wird.

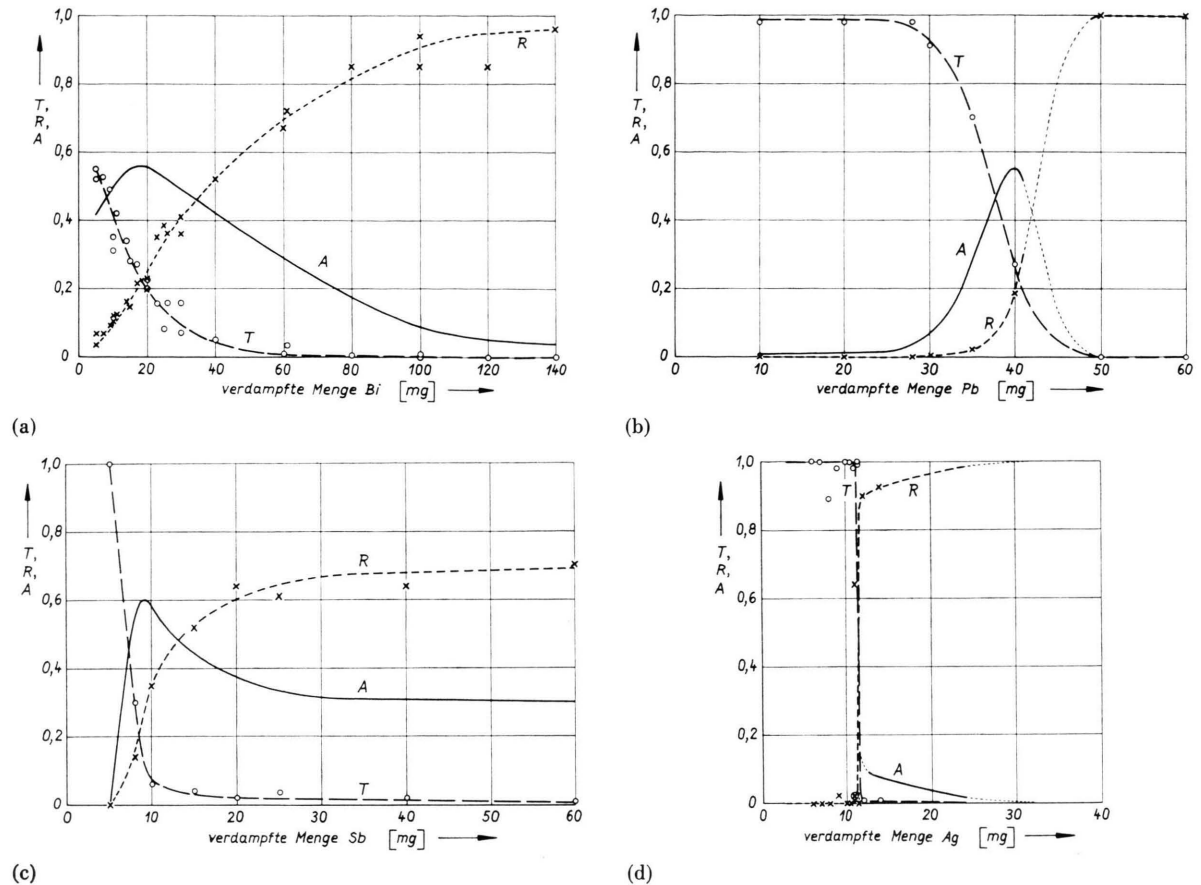


Abb. 2. a) Transmission T und Reflexionsvermögen R von Wismut-Aufdampfschichten, daraus abgeleitet Absorptionsvermögen A . — b) Gleiche Werte für Blei. — c) Gleiche Werte für Antimon. — d) Gleiche Werte für Silber.

des fast sprunghaften Überganges von sehr hoher zu sehr geringer Durchlässigkeit (bzw. von sehr geringer zu sehr hoher Reflexion) als Absorptionssubstanz nicht geeignet.

Für die Versuche wurden Schichten im Bereich des theoretisch unerwartet hohen Maximums mit etwa 55% Absorption, d. h. einer kontrollierbaren Schwächung der Mikrowellenstrahlung verwendet. Demgegenüber bietet die Anwendung von Pb infolge der geringeren Absorption und Reflexion die prinzipielle Möglichkeit einer noch merklich geringeren Beeinflussung des Strahlungsfeldes und damit einer Thermographie in mehreren Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese Möglichkeit wurde im Augenblick jedoch noch nicht weiter verfolgt. Störend trat die geringe Haltbarkeit dieser Schichten infolge Oxidation in Erscheinung.

— Ölschicht. In Übereinstimmung mit den in der Literatur mehrfach gegebenen Hinweisen hat sich

im Verlauf dieser Versuche n-Hexadekan (reinst, für Gaschromatographie) als besonders geeignet erwiesen. Der Dampfdruck von 0,008 Torr bei 300 °K führt bei einem Kammerdruck von $5 \cdot 10^{-3}$ Torr und einer Kammertemperatur von 28 °C zu einem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Kondensation und Verdampfung, d. h. zu zeitlich stabilen Grundschichten (Stabilität der Grundfarbe auch bei dickeren Schichten, s. u.).

Die aus Gründen der Einfachheit benutzte Verdampferanordnung erwies sich wegen ihrer unsymmetrischen Anordnung für die Erzielung dünner homogener Ölfilme (d. h. gleichmäßig subtraktiver Interferenzfarben 1. oder 2. Ordnung) über die ganze Schicht als unbefriedigend. Sie wurde aus äußeren Gründen zunächst beibehalten. Zwecks Einstellung einer gleichmäßigen Grundfarbe (Ockergelb) wurden jedoch Schichtdicken entsprechend Interferenzen 5. oder 6. Ordnung verwendet. Hierdurch ist einerseits

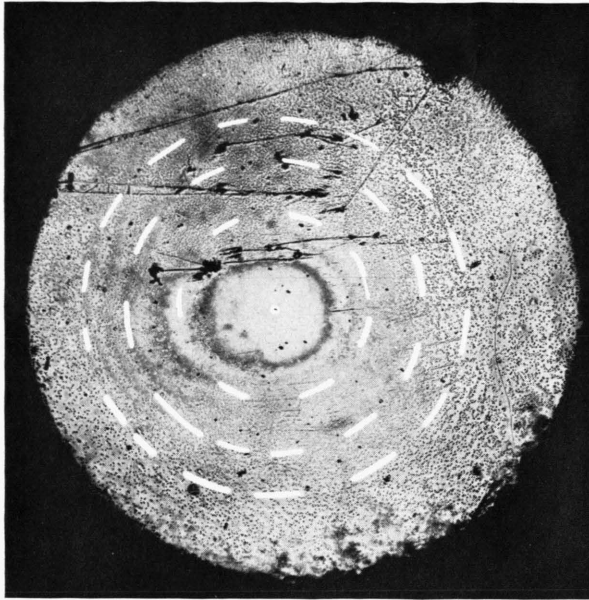


Abb. 3. Brennpunktfläche der Mikrowellenlinse mit $P=40$ mW; Bestrahlungszeit 3 min. Zum Vergleich:

- Äußerer Kreis:* Beugungstheoretischer Durchmesser der AIRY-Scheibe,
Mittlerer Kreis: Durchmesser für 0,25-fache Maximalintensität,
Innerer Kreis: Durchmesser für 0,5-fache Maximalintensität unter Voraussetzung gleichmäßiger Ausleuchtung der Linsenapertur.

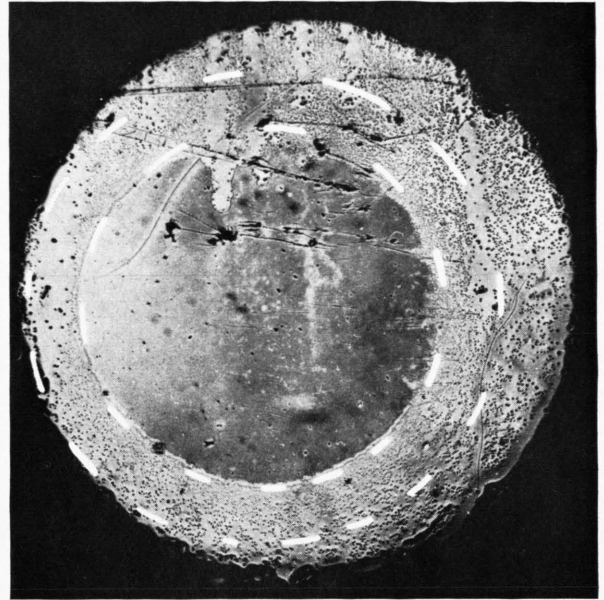


Abb. 4. Brennpunktfläche der Mikrowellenlinse mit $P=100$ mW, Bestrahlungszeit 3 min. Zum Vergleich:

- Innerer Kreis:* Beugungstheoretischer Durchmesser der AIRY-Scheibe bei gleichmäßiger Ausleuchtung der Linsenapertur.
Äußerer Kreis: Theoretischer Durchmesser bei parabolischer Ausleuchtung.

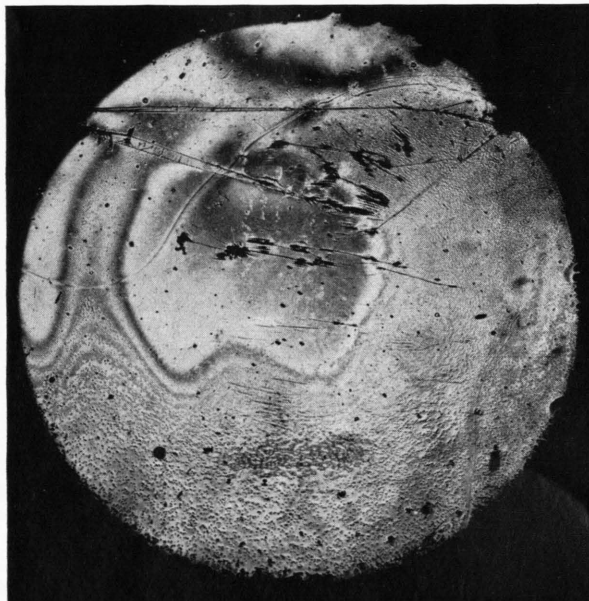


Abb. 6. Beugungsfigur eines Spaltes von 5 mm Breite, $P=40$ mW.

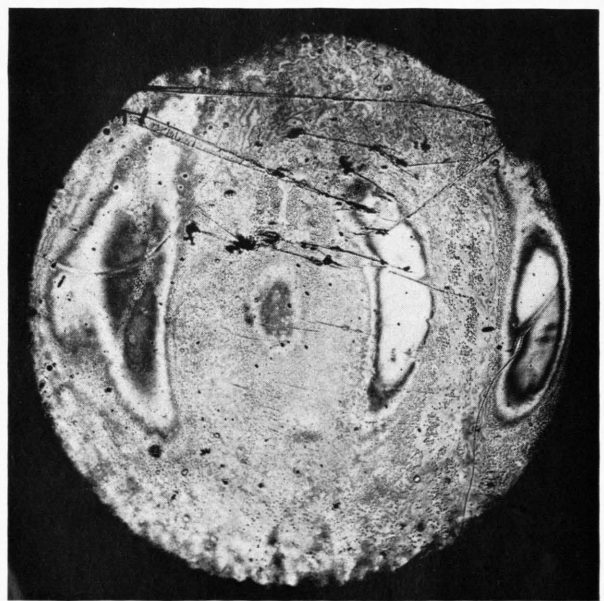


Abb. 5. Beugungsfigur eines Stabes von 3 mm Dicke, $P=40$ mW.

eine relative Unempfindlichkeit des Verfahrens, andererseits eine größere „Dynamik“ gegenüber Intensitätsunterschieden (Ausbildung von 5 bis 6 Interferenzstufen – vgl. Abschnitt B) bedingt.

B. Aufnahme-Ergebnisse

Für die Herstellung der im folgenden besprochenen Mikrowellen-Thermographien wurden zwei verschiedene Verfahren benutzt:

a) Vor Beginn der Energieeinstrahlung auf die Schicht wurde ein verhältnismäßig dicker Ölfilm hergestellt, dessen ockergelbe Grundfarbe einer Interferenz 5. oder 6. Ordnung entsprach. Nur auf diese Weise konnte infolge der technischen Unzulänglichkeit der Verdampfungsanordnung ein einigermaßen homogener Untergrund erhalten werden. Die danach begonnene Einstrahlung von Mikrowellenenergie (≈ 40 mW, gemessen mit bolometrischem Leistungsmeßgerät) lieferte nach etwa 3 Min. ein stabiles Bild. Quantitativ war bei einer Dämpfung von -6 dB, d. h. bei einer Energieeinstrahlung von etwa 10 mW auf eine solche „dicke“ Schicht (Interferenzfarbe 5. Ordnung) auch bei längerer Bestrahlung keine sichtbare Änderung der Grundfarbe mehr festzustellen, während bei dünneren (jedoch noch inhomogen gefärbten Schichten) schon mit wesentlich geringeren Leistungen bzw. Bestrahlungszeiten Bilder entsprechend geringeren Intensitätsumfanges hergestellt werden konnten.

Nach Unterbrechung der Energieeinstrahlung verschwindet das Mikrowellenbild allmählich, man erhält nach etwa 3 Min. die homogene Grundfarbe der Schicht zurück, die auf diese Weise beliebig oft verwendet werden kann.

b) Vor Beginn der Ölverdampfung wurde bereits Mikrowellen-Energie eingestrahlt. Bei dem danach in Gang gesetzten Verdampfungsprozeß kondensiert der Ölfilm nur an den nichtbestrahlten Stellen. Durch geeignete Steuerung der Verdampfung erhält man insbesondere an den Rändern der Beugungsfiguren deren Intensitätsstruktur aus den entstehenden farbigen Interferenzstreifen, wobei Einstrahlungszeit und „Dynamik“ des Bildes gegeneinander abgewogen werden können.

Abb. 3 * zeigt das nach Methode b) erhaltene Beugungsbild des Fokus der oben erwähnten Mikrowellen-Linse. Aus einem Vergleich mit den unter der Annahme einer homogenen Ausleuchtung der Linsenapertur berechneten Durchmesser-Kreisen für das erste Beugungsminimum (AIRY-Scheibe) sowie für den 0,25- und 0,5-fachen Wert der Maximalintensität (in der Abb. gestrichelt eingezeichnet) erkennt man, daß die das Zentrum – in dem der Ölfilm voll verdampft ist – umgebenden Interferenzringe aufsteigender Ordnung (bis zu $n=5$) die Intensitäts-schichtung der Beugungsfigur wiedergegeben ^{4a}. Hierdurch ist bei weiterem Ausbau des Verfahrens eine Möglichkeit zur quantitativen Erfassung von Intensitätsstrukturen gegeben.

Abb. 4 stellt das bei starker Energieeinstrahlung (≈ 100 mW) erhaltene und infolge Überstrahlung scharf berandete Bild der AIRYSchen Beugungsscheibe dar. Der Fußpunkt der Intensitätsstruktur ist als eng gestaffeltes Interferenzstreifensystem unmittelbar an der scharfen Berandung noch erkennbar ⁵.

Zum Vergleich mit den theoretischen Verhältnissen sind in die Aufnahmen die für eine konstante und für eine parabolische Ausleuchtung $I_r = I_{\max}(1 - (r/D)^2)$ gültigen Durchmesser der AIRY-Scheiben eingezeichnet. Hieraus ergibt sich bereits die halbquantitative Schlußfolgerung, daß die Annahme einer homogenen Ausleuchtung zu einer besseren Übereinstimmung mit der Beobachtung führt, als die auf Grund der objektseitigen Einstrahlung über den metallischen Trichter an sich näher liegende Annahme einer ungleichförmigen Ausleuchtung. Die Erklärung hierfür besteht vermutlich in den höheren Absorptionsverlusten in den mittleren Partien der Bikonvexlinse gegenüber den dünneren Randpartien.

Abb. 5 stellt das bei Einschieben eines 3 mm dicken Stabes in den Mikrowellenstrahlengang unmittelbar vor dem Eintrittsfenster der Vakuumkammer, d. h. etwa 4 cm vor der strahlungsempfindlichen Schicht resultierende Beugungsbild dar. Man erkennt den gestörten zentralen Fokus sowie Andeutungen zweier Seitenmaxima, deren Unsymmetrie durch eine Unsymmetrie des Strahlenganges bedingt ist ⁶.

Schließlich stellt Abb. 6 das Beugungsbild eines 5 mm breiten Spaltes an Stelle des Stabes der Abb. 5

* Abb. 3 bis 6 auf Tafel S. 272 b.

^{4a} Die Schwarz-Weiß-Wiedergabe der farbigen Originale läßt die feineren Einzelheiten und Kontraste der Bildstruktur leider nur undeutlich erkennen, während Fehler der Schicht demgegenüber herausgehoben werden.

⁵ Die am oberen Schichtrand erkennbaren Tropfen sind durch Abfließen des Ölfilms vom Träggerring hervorgerufen.

⁶ Der obere Farbkreis ist durch Inhomogenität der Ölschicht bedingt und steht in keiner Beziehung zum Beugungsbild.

dar. Die gegenüber dem zentralen Maximum stark ausgeprägten Seitenmaxima sind deutlich erkennbar. Eine genaue Diskussion der Intensitätsverhältnisse dieser FRESNELSchen Beugungsfiguren liegt außerhalb des Rahmens dieses ersten Berichtes. Die gezeigten Beispiele sollen zunächst nur qualitative Hinweise auf die Möglichkeit einer späteren Ausbildung des Verfahrens zu einer quantitativen Methode geben.

C. Ausblick

Trotz der noch offensichtlichen Mängel der Aufnahmetechnik erscheint ihre Weiterentwicklung in Richtung auf ein generell anwendbares optisches Un-

tersuchungsverfahren im Bereich der Millimeter- und Zehntelmillimeterwellen aussichtsreich. Die hierfür noch zu lösenden Aufgaben sind etwa folgende:

Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit,
Erhöhung der mechanischen Stabilität der Trägermembran bei gleichzeitiger Vergrößerung ihrer nutzbaren Fläche,
Durchführung von Aufnahmen bei Atmosphärendruck, d. h. Unabhängigkeit von einem Vakuumgefäß.

Wir danken Herrn Dr. H. W. KOCH für wertvolle Beratung und Mitwirkung bei der Herstellung der strahlungsempfindlichen Schichten.