

Granulationsfreie Rekonstruktion von Hologrammen

P. BARLAI

Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie der Fraunhofer-Gesellschaft Karlsruhe

(Z. Naturforsch. 26 a, 1441—1443 [1971]; eingegangen am 22. Juni 1971)

Holographic Reconstruction without Granularity

Described is a method for holographic reconstruction of diffusely illuminated objects which suppresses the known effect of granularity. The experimental setup is modest. It consists of a source of polychromatic light. Additionally there are inserted a simple ground glass and a diffraction grating in the reconstruction wave. Holographic reconstruction without granularity is achieved by incoherent superposition of longitudinal modes of the reconstruction wave.

1. Problemstellung

Eine bekannte Erscheinung bei der Rekonstruktion von Hologrammen kohärent diffus beleuchteter Objekte ist immer eine unregelmäßige Granulation, die sich den Bildern überlagert. Diese Granulation bei diffus kohärenter Beleuchtung ist ein räumlich statistischer Vorgang, dessen Kenngrößen in mehreren Arbeiten angegeben werden^{1, 2}.

Die Störung durch die Granulation wird zu einem gravierenden Problem bei der holographischen Abbildung mikroskopisch feiner Strukturen, z. B. in der modernen Halbleitertechnologie. Die durchschnittliche Größe der Granulome ist etwa gleich der Auflösungsgrenze der für eine bestimmte Rekonstruktion gewählten optischen Apparatur¹, und daher ist der Effekt bei hohen Vergrößerungen besonders störend.

Die Versuche, die Granulation bereits bei der Aufnahme eines Hologramms zu vermeiden, führten alle nicht zum Erfolg^{3, 4}, denn ein Hologramm speichert ein dreidimensionales Wellenfeld mit dessen voller Information. (Dazu gehört auch die Granulation. Daß diese grundsätzlich im Hologramm registriert wird, wurde neulich an einem Experiment gezeigt⁵. Demnach erscheint die Granulation auch bei Durchstrahlung eines Hologramms mit einer inkohärenten ausgedehnten Lichtquelle und kann bei bestimmten Formen dieser Lichtquelle leicht nachgewiesen werden.) Eine bestimmte Granulationsverteilung

kann als Repräsentant eines stochastischen Prozesses aufgefaßt werden^{1, 5}. Mehrfachbelichtung eines Hologramms mit jeweils verschiedener Granulationsverteilung bei sonst gleichem Objekt würde bei Wiedergabe zu einer kohärenten Überlagerung der Repräsentanten führen und somit zu keiner Ausmittlung, sondern zu einer Granulationsverteilung mit den gleichen statistischen Kenngrößen einer Einzelbelichtung.

Ausmittlung ist demnach nur bei der Rekonstruktion eines Hologramms und nur durch inkohärente Überlagerung verschiedener Repräsentanten einer Granulationsverteilung möglich⁶. Dabei werden viele Einzelhologramme (oder Teilausschnitte eines Hologramms) mit verschiedener Granulationsverteilung zeitlich nacheinander rekonstruiert. Für einen technisch brauchbaren Einsatz hat das Verfahren jedoch den Nachteil eines großen Aufwands vor allem bei der Wiedergabe.

2. Granulationsfreie Weißlicht-Rekonstruktion

Bei dem im folgenden beschriebenen Verfahren zur Beseitigung der Granulation ist die Art der inkohärenten Überlagerung eine etwas andere. Im Interesse einer praktischen Anwendung ist eine möglichst einfache Anordnung zur Rekonstruktion erstrebenswert. Wenn eine einzige Wiedergabe granulationsfrei sein soll, dann muß die Überlagerung simultan erfolgen. Die einzige Eigenschaft von In-

Sonderdruckanforderungen an Dr. P. BARLAI, Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie der Fraunhofer-Gesellschaft, D-7500 Karlsruhe-Waldstadt, Breslauer Straße 48.

¹ S. LOWENTHAL u. H. ARSENAULT, J. Opt. Soc. Amer. **60**, 1478 [1970].

² G. SCHIFFNER, Die Granulation im diffus gestreuten Laserlicht, Dissertation, Technische Hochschule Wien 1966.

³ G. W. STROKE u. D. G. FALCONER, Phys. Letters **15**, 238 [1965].

⁴ H. KIEMLE u. D. RÖSS, Einführung in die Technik der Holographie, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt a. M. 1969, S. 105.

⁵ P. BARLAI, Z. Naturforsch. **26 a**, 1175 [1971].

⁶ W. MARTIENSSEN, Phys. Letters **24 A**, 126 [1967].

kohärenz, die dann dafür in Frage kommt, ist die Inkohärenz der Longitudinalmoden der rekonstruierenden Lichtquelle. Für eine möglichst vollständige Ausmittelung der Granulation muß die Rekonstruktion mit einer großen Anzahl von Longitudinalmoden vorgenommen werden, d. h. man muß zu einer breitbandigen, im Grenzfall zu einer Weißlichtquelle übergehen.

Es ist bekannt, daß die Wiedergabe eines Hologramms mit einer solchen Lichtquelle Dispersion zeigt, was gleichbedeutend ist mit einer Zerlegung des Spektrums der Lichtquelle in eine bestimmte Anzahl von Longitudinalmoden. Eine dispersionsfreie, oder besser eine achromatische Wiedergabe von Hologrammen ist aber auch bei Weißlicht-Rekonstruktion möglich, indem man ein Beugungsgitter geeignet in den Rekonstruktionsstrahlengang stellt, welches die durch das Hologramm verursachte Dispersion wieder aufhebt⁷. Diese Achromatisierung bewirkt, daß die vielen, nebeneinander liegenden Rekonstruktionen durch das Beugungsgitter übereinander gebracht werden. Die Anzahl der unterscheidbaren Rekonstruktionen entspricht der Anzahl von unterscheidbaren Longitudinalmoden; daher bedeutet die eben beschriebene Achromatisierung eine inkohärente Überlagerung. Dadurch wird die Granulation aber noch nicht beseitigt, sondern erscheint mit der gleichen statistischen Verteilung wie bei der Rekonstruktion eines Hologramms mit einer monochromatischen Lichtquelle, denn bei Weißlicht-Rekonstruktion lassen sich alle Rekonstruktionen durch eine determinierte Transformation auf eine einzige Rekonstruktion zurückführen. Sie alle zeigen die gleiche Mikrostruktur der Granulation; die Achromatisierung macht nur diese determinierte Transformation wieder rückgängig⁵ (Abb. 1, links).

Wellentheoretisch-optisch bedeutet dies folgendes: bei räumlich kohärenter Beleuchtung des Hologramms durch eine Weißlichtquelle ist auch eine zu einem bestimmten Longitudinalmode gehörende Rekonstruktion räumlich kohärent, zeigt also eine bestimmte, statistische Amplituden- und Phasenverteilung mit zeitlich feststehenden Phasendifferenzen, und alle Rekonstruktionen zeigen die gleiche Verteilung bezüglich Amplitude und Phase. Granulationsfrei ist die Wiedergabe erst dann, wenn alle Re-

konstruktionen verschiedene Amplituden- und Phasenverteilung haben, wenn sie also verschiedene Repräsentanten des anfangs erwähnten stochastischen Prozesses sind. Dann muß die Wirkung der Disper-

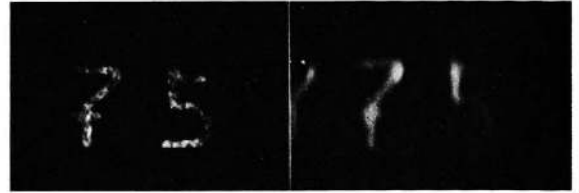


Abb. 1. Teilausschnitt einer Rekonstruktion eines Hologramms im Licht einer Quecksilberdampfhochdrucklampe. Sämtliche spektralen Anteile der Lampe tragen zur Rekonstruktion bei. Achromatische Wiedergabe durch ein (holographisch gewonnenes) Beugungsgitter. Links in Abb. 1 verbleibt nach der Achromatisierung die Granulation. Dies ist ein Beweis für die Genauigkeit der Methode, denn die durch Achromatisierung erzeugten Bildfehler müssen kleiner sein als die Auflösungsgrenze, damit die Granulation erkennbar bleibt. Rechts in Abb. 1 wird granulationsfreie Wiedergabe durch Einfügen einer Mattscheibe bei sonst unveränderter Geometrie erreicht. Größe der Zahlen in der Rekonstruktion: 1 mm.

sion, die als determinierte Transformation zu verstehen ist, ebenfalls statistisch erfolgen (genauer: die Dispersion bewirkt nur eine Lageveränderung, läßt aber Amplitude und Phase unbeeinflusst. Die Lageveränderung muß determiniert bleiben, damit das Beugungsgitter sie wieder rückgängig machen kann.) Dies geschieht am einfachsten durch Einfügen einer Mattscheibe an der Stelle, wo die durch das Hologramm dispergierte Rekonstruktion entsteht, denn eine Mattscheibe verwandelt eine Wellenfront mit determinierter Amplitude und Phase in eine solche mit statistisch bestimmten Kenngrößen. Jetzt führt eine inkohärente Überlagerung der verschiedenen Rekonstruktionen durch das Beugungsgitter zu einer Ausmittelung der Granulation (Abb. 1, rechts), denn diese sind verschiedene Repräsentanten eines stochastischen Prozesses und daher statistisch unkorreliert. Die holographische Wiedergabe gleicht nun dem im inkohärenten Licht betrachteten Original, eine einheitlich diffuse Fläche erscheint hier wie dort strukturlos⁸.

Für eine granulationsfreie Wiedergabe hat man also folgenden Aufbau: Weißlichtquelle — Hologramm — Mattscheibe am Ort der Rekonstruktion — Beugungsgitter.

⁷ D. J. DE BITETTO, Appl. Phys. Letters **9**, 417 [1966].

⁸ Eine mit inkohärentem Licht beleuchtete, einheitlich diffuse Fläche erscheint strukturlos im wesentlichen durch simultane Überlagerung von Transversalmoden der inkohären-

ten Lichtquelle. Eine Reduktion der Anzahl der Transversalmoden auf einen oder einige wenige führt auch bei inkohärenter Beleuchtung zur Erscheinung der Granulation.

Zum Abschluß dieses Kapitels einige quantitative Daten. Die Anzahl der unterscheidbaren Longitudinalmoden hängt vom Hologramm und von der Bandbreite der rekonstruierenden Lichtquelle ab. Jedem Punkt auf dem Original entspricht ein bestimmtes Beugungsgitter auf dem Hologramm mit einer durch die Aufnahmegeometrie bestimmten Anzahl von Furchen. Daher hat ein Hologramm das gleiche spektrale Auflösungsvermögen wie ein Beugungsgitter mit der gleichen Anzahl von Furchen in der ersten Ordnung, nämlich

$$Q = \nu / \Delta\nu = N \tag{1}$$

(Q = Auflösungsvermögen oder „Güte“, ν = Lichtfrequenz, $\Delta\nu$ = Frequenzunsicherheit, N = Anzahl der Furchen).

Bei $N \gg 1$ und einer spektralen Bandbreite B der Lichtquelle läßt sich die mittlere Frequenzunsicherheit $\overline{\Delta\nu}$ unter Verwendung von (1) näherungsweise zu

$$\overline{\Delta\nu} = \frac{1}{B} \int_{\nu_m - \frac{1}{2}B}^{\nu_m + \frac{1}{2}B} \Delta\nu \, d\nu = \frac{\nu_m}{Q} \tag{2}$$

(ν_m = Mittenfrequenz) angeben.

Demnach zerlegt das Hologramm das Strahlungsfeld in

$$n = \frac{B}{\nu_m} Q \tag{3}$$

unabhängige, inkohärente Longitudinalmoden.

Die Granulation verursacht bei kohärenter Wiedergabe eines Hologramms Fluktuationen der Lichtintensität I in der Rekonstruktion um einen Mittelwert \bar{I} mit dem relativen Schwankungsquadrat⁶

$$\overline{\Delta I^2 / \bar{I}^2} = 1. \tag{4}$$

Inkohärente Überlagerung von n Rekonstruktionen führt zu dem kleineren Schwankungsquadrat

$$\overline{\Delta I^2 / \bar{I}^2} = 1/n, \tag{5}$$

und zwar unabhängig von der speziellen Art der inkohärenten Überlagerung.

Bei einer Weißlichtquelle ist B/ν_m von der Größenordnung eins, also ist die Anzahl der Longitudinalmoden n in diesem Fall etwa gleich dem Auflösungsvermögen des Hologramms. Bei Hologrammen mit schräg einfallender Referenzwelle und mit Durchmessern von 1 bis 10 cm liegt Q im allgemeinen in der Größenordnung von 10^4 bis 10^5 und damit ist nach (5) die Granulation bis auf einen praktisch unmeßbar kleinen Wert ausgemittelt.

3. Verallgemeinerung auf Hologramme mit nichtsphärischer Referenzwelle

Das dargelegte Verfahren wurde an Hologrammen mit sphärischer Referenzwelle experimentell mit Erfolg erprobt. Man kann Hologramme mit beliebig geformter Referenzwelle aufnehmen, jedoch muß für eine genaue Rekonstruktion die Referenzwelle exakt reproduziert werden. Es ist denkbar, das Verfahren auch auf solche Hologramme anzuwenden. Dazu muß man von einer Weißlichtquelle einen Transversalmode isolieren, was gleichbedeutend mit räumlich kohärenter Beleuchtung ist. Die für die Rekonstruktion notwendige Nachbildung der Wellenfront der Referenzwelle wirkt wieder in gleicher Weise auf alle Longitudinalmoden des Strahlungsfeldes, d. h. zwischen allen Longitudinalmoden besteht ein determinierter Zusammenhang, so daß die nachfolgende Kombination von Hologramm, Mattscheibe und Beugungsgitter auch hier zu einer achromatischen, granulationsfreien Wiedergabe führen muß.

Diese Arbeit wurde aus Mitteln des Bundesministeriums der Verteidigung ermöglicht.