

Diffraktive Optik (O9)

Ziel des Versuches

Das Prinzip der diffraktiven Optik, die Beugung und Interferenz von Licht ausnutzt, soll an einer fresnelschen Zonenplatte kennen gelernt werden. Bestimmte Bereiche einer transparenten CD werden als äußerer Teil einer fresnelschen Zonenplatte genutzt und damit optische Abbildungen bei verschiedenen Wellenlängen realisiert. Aus den Abbildungsverhältnissen werden die Brennweiten, die Zonenzahlen von zwei Zonenplatten und der Rillenabstand der CD ermittelt.

Theoretischer Hintergrund

Diffraktiv optische Elemente (DOE) gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie leicht, klein, lichtstark und in die Nanotechnologie integrierbar sind und mit deren Hilfe herstellbar sind. Sie spielen eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung der optischen Kommunikationstechnik. Mit Hilfe von DOE sind die Funktionen von klassischen dispersiven optischen Elementen, wie z. B. Linsen, Prismen und Strahlteilern, realisierbar.

Diffraktiv optische Elemente nutzen die Beugung von transmittiertem Licht bei Durchgang durch eine Platte mit einer periodischen Oberflächenstruktur. Diese Platte wird als *Zweidimensionales Hologramm* bezeichnet. Hinter dem Hologramm interferieren die gebeugten Lichtwellen und überlagern sich im Fernfeld zum eigentlichen reellen Bild. Die Hologramme werden aus Beugungsbildern einfacher Strukturen berechnet und in Glas oder Plastik geprägt. Dynamische DOE werden mittels LCD-Display oder Mikrospiegelarray realisiert und werden zur Strahlprofilformung von Lasern oder zur Korrektur von Abbildungsfehlern genutzt.

Die Überlagerung einer ebenen Wellenfront (paralleles Licht) mit einer Kugelwelle ergibt das in Abb. 1 gezeigte Interferenzbild. Die konstruktive und destruktive Interferenz beider Wellenfronten führt zu abwechselnd hellen und dunklen konzentrischen Ringen, deren Abstand nach außen hin geringer wird.¹ Berücksichtigt man nur die Helligkeitswerte Null und Eins spricht man von einem binären Hologramm bzw. von einem binären DOE (Abb. 2). Durchstrahlt man dieses binäre Hologramm mit parallelem Licht, so entsteht durch Beugung an den Strukturen und anschließender Interferenz das Bild eines Punktes (Prinzip der Umkehrung des Lichtweges). Durch das Vorhandensein mehrerer Beugungsordnungen entstehen mehrere Punkte (i. A. Bilder), deren Intensität jedoch mit wachsender Beugungsordnung stark abnimmt und die sich durch den zunehmenden Beugungswinkel immer

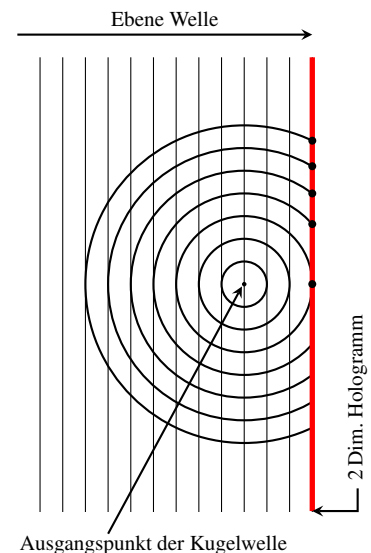


Abbildung 1: Hologramm eines Punktes

¹ Dies entspricht dem Hologramm eines Punktes.

näher am Hologramm befinden.

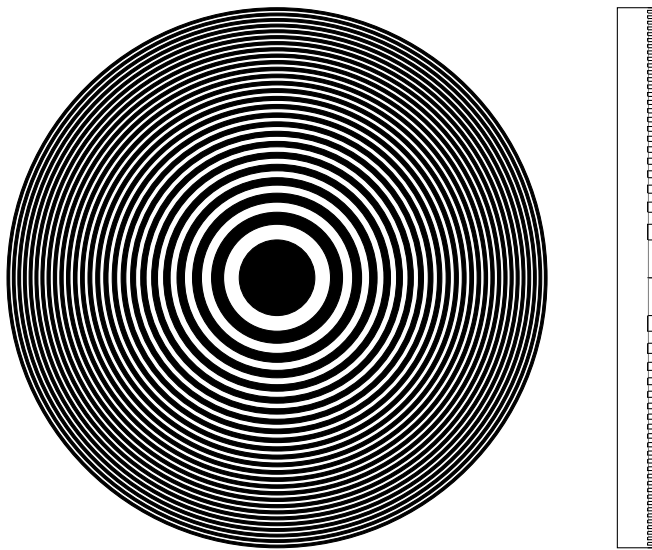


Abbildung 2: Binäre fresnelsche Zonenplatte und Seitenansicht einer gepressten Zonenplatte

Das in Abb. 2 dargestellte binäre Hologramm wird als fresnelsche Zonenplatte bezeichnet und erfüllt die Funktion einer Linse². Wie man sich leicht überlegen kann, wird sich die Brennweite für unterschiedliche Lichtwellenlängen deutlicher unterscheiden als bei einer klassischen dispersiven Linse.

Die in Abb. 3 von links einfallende ebene Wellenfront wird an den Strukturen der fresnelschen Zonenplatte gebeugt. Die dort entstehenden Kugelwellen überlagern sich konstruktiv zur dargestellten Wellenfront der 1. Beugungsordnung, die zur Lichtbündelung im Punkt F führt. Dazu muss der jeweilige Gangunterschied zwischen den Lichtstrahlen, die z. B. von den Oberkanten benachbarter nichttransparenter Fresnelzonen ausgehen, jeweils eine Wellenlänge λ betragen. Damit ergibt sich

$$r_m = f + m \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

wobei f die Brennweite der fresnelschen Zonenplatte in 1. Ordnung, m die Zonenzahl und r_m der Abstand zwischen Brennpunkt F und der m -ten Zone ist. Der Radius der m -ten Zone sei R_m . Dabei ist bei der Zählung zu beachten, dass die Radien der Kanten abgezählt werden und damit zwischen zwei Zonenradien immer ein transparenter oder ein nicht lichtdurchlässiger Bereich liegt. Aus rein geometrischen Überlegungen und Gleichung (1) ergibt sich, dass

$$R_m^2 = r_m^2 - f^2 = \left(f + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - f^2 = mf\lambda + \frac{m^2 \lambda^2}{4} \quad (2)$$

Dabei ist der zweite Term sehr klein gegen den ersten und kann meist vernachlässigt werden. Es gilt daher

$$R_m = \sqrt{mf\lambda} \quad (3)$$

Unter Verwendung der Abbildungsgleichung für dünne Linsen, ergibt sich für den Zonenradius schließlich

$$R_m = \sqrt{m\lambda \frac{bg}{b+g}} \quad (4)$$

wobei b die Bildweite und g die Gegenstandsweite sind.

² Die fresnelsche Zonenplatte ist nicht zu verwechseln mit der Fresnellinse. Die Fresnellinse besteht aus einzelnen Prismen mit unterschiedlichen Winkeln und arbeitet damit rein dispersiv. Man findet sie u.a. bei Leuchttürmen und Overheadprojektoren.

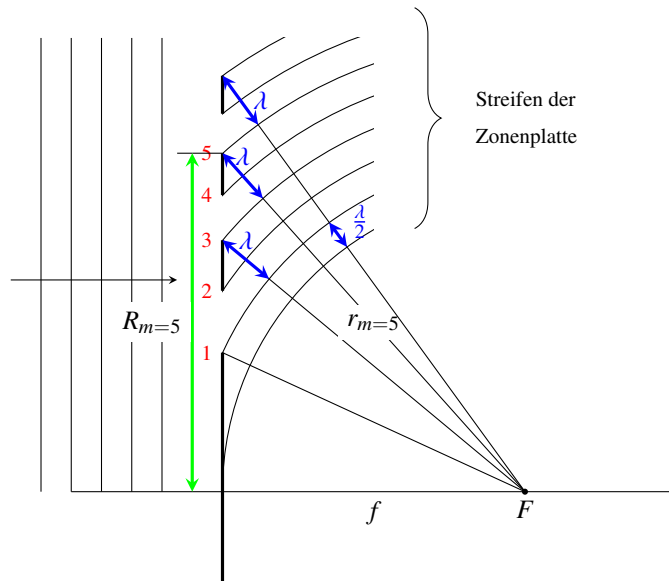


Abbildung 3: Konstruktive Interferenz der 1. Beugungsordnung

Versuchsaufbau und -durchführung

Da fresnelsche Zonenplatten mit großen geometrischen Abmaßen und hoher Zonenzahl kommerziell kaum verfügbar sind, wird im Versuch ein schmaler ringförmiger Bereich eines transparenten CD-Rohlings (Beschichtung wurde entfernt) als äußerer Bereich einer fresnelschen Zonenplatte verwendet. Dieses Vorgehen ist gerechtfertigt, da bei hinreichend großer Zonenzahl die Unterschiede der Breiten $\Delta R_m = R_{m+1} - R_m$ der abwechselnd undurchsichtigen und transparenten Bereiche bzw. Strukturen immer geringer werden. Somit kann ein schmaler, ringförmiger Bereich eines CD-Rohlings mit äquidistanter Rillenstruktur näherungsweise gut als äußerer Teil einer fresnelschen Zonenplatte genutzt werden.

Als fresnelsche Zonenplatte finden Sie am Versuchsplatz eine transparente CD und drei verschiedene kreisförmige Schlitzblenden und entsprechende Ringblenden. Die Schlitzblende (Schlitzbreite 3 mm) und die transparente CD sind auf der einen Seite des Halters zu montieren und mit den schrauben zu fixieren. Die zur Schlitzblende passende Ringblende (gleiche Farbe) ist auf der anderen Seite des Halters zu befestigen, sodass eine Anordnung Schlitzblende–CD–Ringblende entsteht. Die Ringblende dient zur Unterdrückung der nullten Beugungsordnung.

Damit stehen Ihnen insgesamt drei verschiedene fresnelsche Zonenplatten zur Verfügung. Diese so präparierten Zonenplatten unterscheiden sich in ihrer geometrischen Größe und haben in ihrem jeweiligen Randbereich eine Zone, die dem Rillenabstand der transparenten CD entspricht. Dadurch unterscheiden sich die Zonenplatten hinsichtlich ihrer Zonenzahl und Brennweiten deutlich.

Gegenüber einer kompletten Zonenplatte geht bei diesem Verfahren natürlich ein Großteil des Lichts verloren. Deshalb wird für das Experiment eine moderne intensive Lichtquelle auf LED-Basis als leuchtender Gegenstand genutzt. Jeder Leuchtpunkt dieser Lichtquelle enthält drei LEDs mit den Farben blau (460 nm), grün (515 nm) und rot (630 nm), die einzeln oder

auch gemeinsam zur Erzeugung von weißem Licht ansteuerbar sind. Die Ansteuerung erfolgt mit einem Arduino, der so programmiert ist, dass mit Hilfe des Tasters nacheinander sowohl verschiedenen Farben (blau, grün, rot, weiß) als auch die Anordnung der Lichtquelle (Punktlichtquelle oder leuchtender Ring mit Öffnung) ausgewählt bzw. angesteuert werden können.

Für Aufgabe 1 müssen Sie paralleles Licht erzeugen, was am besten mit einer Punktlichtquelle und einer klassischen (dispersiven) Linse gelingt. Die Punktlichtquelle muss sich im Brennpunkt der dispersiven Linse befinden.

Für die weiteren Aufgaben benötigen Sie ein gut leuchtendes Objekt (LED-Ring mit Öffnung), die CD mit Schlitz- und Ringblende sowie einen Schirm für das entstehende reelle Bild. Jede der verwendeten LEDs besitzt eine spektrale Halbwertsbreite von ca. 15 bis 20 nm, was zu einer gewissen Unschärfe der Abbildung führt. Da durch die Schlitzblende relativ viel Licht verloren geht, bietet es sich für die Messungen von Gegenstands- und Bildweiten an, verkleinerte Abbildungen zu realisieren.³

Ist b die Bildweite und g die Gegenstandsweite⁴, so gilt die Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad .$$

Nach Umstellung erhält man den Zusammenhang

$$g = f \left(\frac{g+b}{b} \right) = f \left(\frac{g}{b} + 1 \right) \quad . \quad (5)$$

Das Verhältnis von Bildgröße B zu Gegenstandsgröße G bezeichnet man als Abbildungsmaßstab M . Für den Abbildungsmaßstab gilt wegen des Strahlensatzes auch:

$$M = \frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad . \quad (6)$$

In Formel (5) eingesetzt ergibt sich

$$g = f \left(1 + \frac{1}{M} \right) \quad . \quad (7)$$

Aufgabenstellung

1. Lassen Sie paralleles weißes Licht durch eine geeignete fresnelsche Zonenplatten fallen und bilden Sie die Beugungsbilder auf dem Schirm ab. Skizzieren Sie die Beugungsbilder für unterschiedliche Abstände zwischen Zonenplatte und Schirm und interpretieren Sie diese.
2. Nutzen Sie paralleles Licht und bestimmen Sie für alle fresnelschen Zonenplatten die Brennpunkte der reinen Spektralfarben.
3. Ermitteln Sie den Brennpunkt 1. und 2. Ordnung für grünes Licht mit einer geeigneten fresnelschen Zonenplatte.
4. Nutzen Sie eine fresnelsche Zonenplatte als diffraktive Linse zur Erzeugung von verkleinerten Abbildungen des leuchtenden LED-Rings. Erzeugen Sie bei jeder Spektralfarbe für jeweils mindestens fünf Gegenstandsweiten g eine verkleinerte Abbildung und bestimmen Sie jeweils den Abbildungsmaßstab M sowohl aus B und G als auch aus b und g .

³ Dies ist für $g > 2f$ der Fall (Warum?)

⁴ Beide Weiten werden als positive Größen gezählt.

5. Tragen Sie für jede Spektralfarbe die Gegenstandsweite g über $\left(1 + \frac{1}{M}\right)$ auf und bestimmen Sie aus dem Anstieg die entsprechende Brennweite f gemäß Gl. (7).
Vergleichen Sie die Ergebnisse mit denen aus Aufgabe 2.
6. Berechnen Sie die Zonenzahlen von zwei fresnelschen Zonenplatten.
7. Berechnen Sie für beide fresnelsche Zonenplatten den Abstand zwischen den Rillen bzw. Stegen $\Delta R = R_{m+1} - R_m$. Dies entspricht der Hälfte des Wertes, der in der Literatur als Rillenabstand einer CD angegeben ist.
8. Schätzen Sie rechnerisch ab, welchen Einfluss der zweite Term in Gleichung (2) tatsächlich auf Ihr Ergebnis hat und vergleichen Sie den Unterschied beider Berechnungen mit dem Größtfehler Ihrer Ergebnisse.