

# *Räumlicher LC-Lichtmodulator und diffraktive Optik FP06*

I. Rückmann, J. P. Richters, T. Voss, J. Borchardt

## *Motivation und Ziel des Versuches*

### *Diffraktiv optische Elemente*

Diffraktiv optische Elemente (DOE) werden immer häufiger in modernen optischen Instrumenten eingesetzt. Ihre Wirkung beruht im Gegensatz zu den klassischen brechenden optischen Komponenten auf der Beugung und Interferenz von Licht. Die Ausnutzung von Beugung und Interferenz verlangt Strukturen in der Größenordnung der Lichtwellenlänge, die im Rahmen moderner Verfahren der Nanotechnologie z. B. lithografisch hergestellt werden und danach durch Replikation auch als Massenware (Presslinge) realisierbar sind. Somit sind diffraktiv optische Elemente, die wie Linsen, Prismen oder Strahlteiler wirken und abzubildende Muster oder Schriftzüge als Beugungsbild erzeugen, leichter herstellbar und viel kompakter als entsprechende herkömmliche Elemente. Bekannt sind sicher bereits Beispiele diffraktiv optischer Elemente, die an einen Laserpointer angebracht werden können, um z. B. einen Pfeil, ein Kreuz o. Ä. zu erzeugen. So können z. B. auch mit diffraktiv optischen Strahlteilern viele Strahlen gleicher Intensität in einem geometrischen Raster erzeugt und damit z. B. Objektive und Teleskopspiegel viel einfacher, schneller und genauer vermessen werden, als dies mit nur einem Strahl und einer mechanischen Steuerung möglich wäre.

### *Flüssigkristalldisplays*

In diesem Praktikumsversuch wird zur Realisierung diffraktiv optischer Elemente und zur Untersuchung dynamischer Beugungsstrukturen ein Flüssigkristalldisplay als räumlicher Lichtmodulator verwendet, dessen Funktionsweise und physikalische Eigenschaften ebenfalls im Rahmen dieses Versuches untersucht und verstanden werden sollen. Flüssigkristalldisplays (liquid-crystal-display, LCD) mit Pixelgrößen unter  $100\ \mu\text{m}$  werden heutzutage standardmäßig in Digitaluhren, Digitalthermometern, Taschenrechnern und in Video- und Datenprojektoren verwendet. Durch ihre geringen Kosten, ihre Robustheit, Kompaktheit und elektrische Schaltbarkeit bei geringer Leistungsaufnahme sind sie in vielen Bereichen anderen Technologien überlegen. LCDs haben jedoch ein weit größeres Anwendungsspektrum als das genannte und bieten faszinierende Möglichkeiten im Rahmen der Photonik als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts.

### *Flüssigkristalle*

Flüssigkristalle sind eine Phase der Materie, deren Ordnung zwischen der einer Flüssigkeit und der eines Kristalls liegt. Sie haben wie Kristalle eine langreichweitige Ordnung ihrer Orientierung, was in der Regel eine Anisotropie bestimmter Eigenschaften zur Folge hat. Sie weisen aber gleichzeitig ein für Flüssigkeiten typisches Fließverhalten auf und haben keine stabile Positionierung ihrer einzelnen Moleküle. Flüssigkristalle, die in LCDs verwendet werden, lassen sich durch das Anlegen eines elektrischen Feldes reversibel bezüglich der Orientierung ihrer Moleküle beeinflussen (dielektrische Anisotropie). Durch die längliche Form dieser Moleküle und ihre geordnete Orientierung hat ein einzelnes LCD-Element doppelbrechende Eigenschaften, weist also unterschiedliche Brechungsindizes für bestimmte Polarisationsrichtungen eines einfallenden Lichtwellenfeldes auf (optische Anisotropie). Somit ist es mit einem LCD-Element möglich, durch das Anlegen einer definierten Spannung den Polarisationszustand eines solchen Wellenfeldes gezielt zu verändern.

### *Dynamische DOEs*

In Kombination mit Polarisatoren ist es nun einfach möglich, die durch das LCD-Element bewirkte Phasenmodulation in eine Amplitudenmodulation umzusetzen und somit optische Schalter zu bauen. Nach diesem Prinzip arbeiten die oben erwähnten aus dem Alltag bekannten Anwendungen der LCDs. In Verbindung mit kohärenten Lichtquellen (LASERn) lassen sich aber mit LCDs auch dynamische diffraktiv optische Elemente realisieren. Diese basieren auf den Prinzipien der Beugung und Interferenz, welche mit Hilfe des LCD-Elements gezielt zur Phasen- und/oder Amplitudenmodulation des Lichtfeldes genutzt werden. Auf diese Weise sind DOEs, wie Linsen, Gitter und Strahlteiler elektronisch steuerbar. Weiterführende Informationen finden sie im Handbuch (Bedienungsanleitung SLM + OptiXplorer).

### *Ziele*

Im Versuchsteil 1 werden grundlegende Eigenschaften des LC-Modulators untersucht. Im Versuchsteil 2 wird der LC-Modulator als diffraktives Element eingesetzt und die Phasenverschiebung des Displays bestimmt. Im Versuchsteil 3 wird der LC-Modulator verwendet, um Raumfrequenzfilterungen und computergenerierte Hologramme (CGH) zu untersuchen.

### *Erforderliche Vorkenntnisse*

- Flüssigkristalle
- Doppelbrechung
- Aufbau von LC-Displays
- Beugungseffekte
- Beugungsbilder
- Fouriertransformation und Raumfrequenzfilterung

- Hologramme
- Grundlagen Optik (Brennweite, Bildweite, Objektweite, paralleles Licht, Polarisierung)

Bitte bringen Sie eine Digital- oder Handykamera mit Makrofunktion mit bzw. fragen Sie die Praktikumsstechniker danach, um Hologramme aufzunehmen und erstellen Sie bereits vor der Versuchsdurchführung ein kleines Schwarz/Weiß Bild (.jpg), das als Hologramm dargestellt werden soll.

### *Literatur*

- Demtröder: Optik  
Grundlagen der Optik, Doppelbrechung, etc.
- Perez: Optik, Spektrum Verlag  
gute Erläuterung der Doppelbrechung und Einführung in die Holographie
- Holoeye, OptiXplorer Bedienungsanleitung  
Technische Spezifikationen des LC-Modulators, Theorie zu Fouriertransformation, Beugung, Brechung, Holographie
- Leybold, Gebrauchsanweisung VideoCom  
Bedienungsanleitung der verwendeten CCD-Zeile

### *Versuchsaufbau*

Der Versuch wird auf einen optischen Tisch montiert. Als Material für den Aufbau stehen eine Halogenlampe, ein Punktlaser, ein roter LASER (650 nm) mit Aufweitereoptik, diverse Linsen, Halter für Dias, und Blenden zur Verfügung. Der Versuchsaufbau variiert für die einzelnen Versuchsteile. Für die Messung von Intensitäten steht die CCD-Zeile zur Verfügung, welche an den PC angeschlossen wird. Die CCD hat eine Pixelgröße von  $13,7 \mu\text{m}$ . Die Auswertung erfolgt über die dazugehörige Software „VideoCom Intensitäten“. Dabei kann sowohl die Integrationszeit als auch die Anzahl ausgelesener Pixel verändert werden. Die Ansteuerung des LC-Modulators erfolgt über den selben PC: In dem Steuerprogramm „LC2002 Control Panel“ können Parameter des LC-Modulators eingestellt werden, wie Helligkeit, Kontrast und Position des Bildes auf dem LC-Modulator. Mit der Software "OptiXplorer" können kleine Hologramme berechnet werden, aber auch einfache Beugungsstrukturen dargestellt werden. Für die Ausgabe auf dem LC-Modulator wird dabei das Bild des rechten Monitors abgegriffen, d. h., dass alle Darstellungen auf dem rechten Monitor auch auf dem LC-Modulator dargestellt werden.

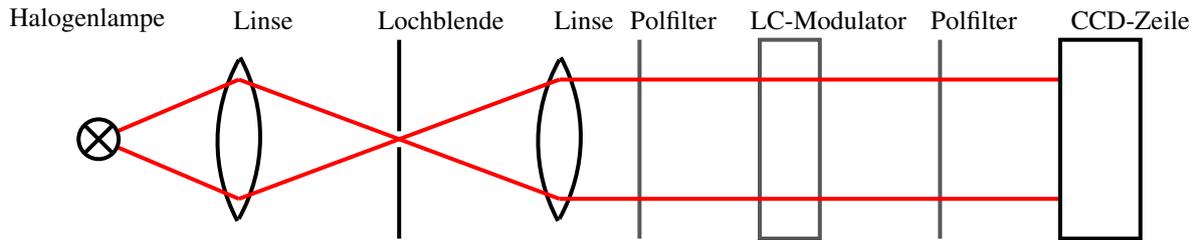


Abbildung 1: Aufbau für die Charakterisierung des LC-Modulators. Achten Sie darauf, dass der LC-Modulator möglichst vollständig ausgeleuchtet ist und kein Streulicht am Display vorbeigeht. Sollte die CCD in Sättigung gehen, können Sie mit Graufiltern die Intensität steuern.

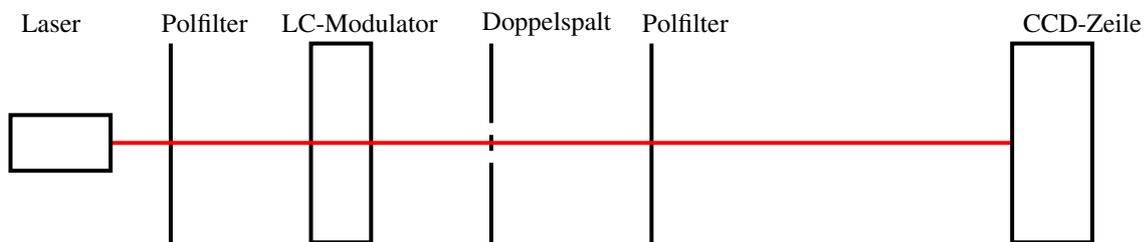


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Nutzung des LC-Modulators als beugendes Element. Der Doppelspalt ist zunächst für die Justage und dann für die Bestimmung des Phasenshifts einzubauen.

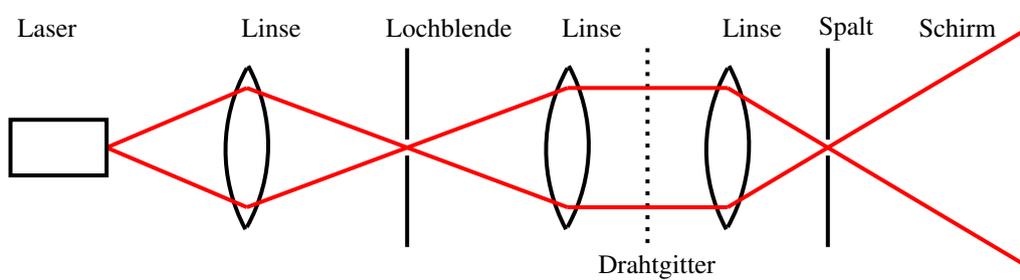


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Raumfrequenzfilterung.

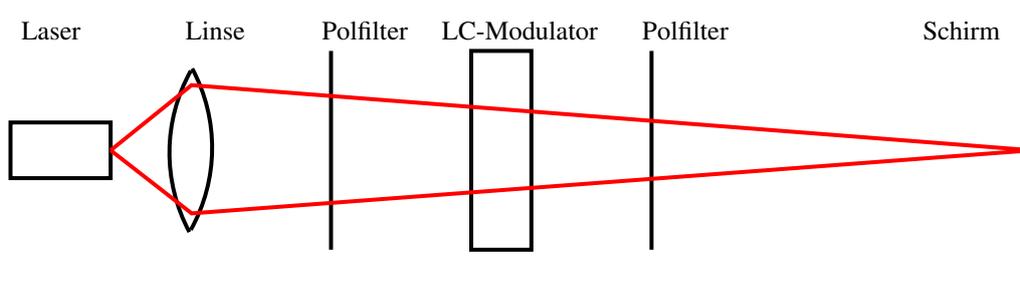


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Rekonstruktion von Hologrammen. Der LC-Modulator und die Polfilter können durch ein Hologramm-Dia ersetzt werden. Entfernt man den zweiten Polfilter, so können Phasenhologramme rekonstruiert werden.

## *Versuchsdurchführung*

### *Grundlegende Einstellung des LC-Modulators*

Verwendung von LC-Modulator, zwei Polfiltern und aufgeweiteten LASER

1. Stellen Sie ein Bild auf dem LC-Modulator dar und beobachten Sie die Ausrichtung des dargestellten Bildes.
2. Setzen Sie den Kontrast auf (149) und die Helligkeit auf (216)

### *Charakterisierung des LC-Modulators*

#### *Polarisationscharakteristiken von Halogenlampe und LC-Modulator*

Stellen Sie sicher, dass bei maximaler Intensität die CCD-Zeile nicht in Sättigung geht. Dämmen Sie das Licht im Zweifelsfall mit Graufiltern. Verändern Sie die Graufilter während einer Messreihe nicht!

1. Messen Sie die Polarisation der Halogenlampe mittels eines Analysators und der CCD-Zeile. (Auftragung der Messergebnisse in Polarkoordinaten)
2. Messen Sie die Intensitätsverteilung der Polarisation von Halogenlampe und Polarisator mit einem Analysator. (Auftragung der Messergebnisse in Polarkoordinaten)
3. Bestimmen Sie die Vorzugsrichtung des LC-Modulators. Stellen Sie dazu ein weißes Bild (Grauwert: 255) auf dem LC-Modulator dar und messen Sie dann die Intensität auf der CCD bei verschiedenen Polarisatorstellungen (kein Analysator im Strahlengang, Auftragung in Polarkoordinaten)

#### *Bestimmung des Drehwinkels von linear polarisiertem Licht und der Exzentrizität des Lichtes bei verschiedenen Grauwerten des Lichtmodulators*

1. Stellen Sie verschiedene Grauwerte auf dem Display dar, und suchen Sie mit Analysator und CCD-Zeile jeweils den Winkel der maximalen Intensität (Polarisator auf Vorzugsrichtung des LC-Modulators eingestellt im Strahlengang)
2. Vermessen Sie bei 4 Grauwerten zusätzlich die Intensitätswerte der beiden Halbachsen des elliptisch polarisierten Lichtes. Messen Sie dazu die maximale und minimale Intensität bei entsprechender Analysatoreinstellung.
3. Erklären Sie den Zusammenhang zw. Grauwert und Drehwinkel. Wie ist die Ausrichtung der Flüssigkristalle im LC-Modulator ohne angelegte Spannung?
4. Berechnen Sie aus den in 2 zusätzlich ermittelten Intensitäten die Exzentrizität des Lichtes nach  $E = \frac{\sqrt{a^2+b^2}}{a}$  mit  $a =$  maximaler Intensität und  $b =$  minimaler Intensität.

### Bestimmung der Pixelgröße

1. Stellen Sie ein Quadrat mit 200 Pixel Kantenlänge auf dem LC-Modulator dar und bilden Sie es mit einer Vergrößerungsoptik auf einem Schirm ab. Bestimmen sie die Pixelgröße aus der Bildgröße des Quadrats.<sup>1</sup>
2. Bestimmen Sie zusätzlich die Pixelgröße aus direkter Messung der Displaygröße.
3. Vergleichen Sie beide Methoden (Fehlerbereiche!)

<sup>1</sup> Dafür müssen sie den LC-Modulator als LC-Display betreiben, d. h. mit 90° Unterschied in den Polarisationsrichtungen von Analysator und Polarisator.

### LC-Modulator als diffraktiv optisches Element

Bauen Sie den Punkt-LASER (nicht aufweitbar) in den Versuchsaufbau ein (beachten sie dabei die Vorzugsrichtung des LC-Modulators!). In diesem Versuchsteil soll der LC-Modulator als beugendes Element betrachtet werden.<sup>2</sup> Richten Sie dazu den Versuchsaufbau gemäß Abb. 2 her. Für die Ausrichtung der CCD-Zeile stellen Sie einen Doppelspalt hinter den (einheitlich hellen) LC-Modulator und justieren die CCD-Zeile so, dass die Intensitäten des 1. und -1. Maximums gleichgroß sind. Verwenden Sie passende Graufilter. ACHTUNG: Alle Interferenzmuster sind Überlagerungen einerseits des gewünschten Spaltes/Gitters etc. und dem Gitter des LC-Displays. Daher ist sicherzustellen, dass tatsächlich das Interferenzmuster des Doppelspaltes und nicht des LC-Gitters beobachtet wird! Hierfür lohnt es sich, den Abstand der CCD vom LC-Modulator zu maximieren. Außerdem sollten Sie vorher berechnen, auf welchen Pixeln Sie das 1. bzw. -1. Beugungsmaximum des Doppelspaltes sehen sollten.

<sup>2</sup> Verschiedene Gitter lassen sich in OptiXplorer unter „elementary functions“ → „binary beam splitter“ einstellen.

### Aufnahme von verschiedenen Beugungsbildern mittels der CCD-Zeile

1. Nehmen Sie einige Beugungsbilder verschiedener Spalte, Doppelspalte und Gitter auf. Diese werden auf dem LC-Display dargestellt. Verwendung von Grauwerten (0, 255) (mindestens 1 Einzelspalt, 1 Doppelspalt, 2 verschiedene Gitter). Es ist darauf zu achten, dass man tatsächlich die Beugungsbilder des optischen Elements beobachtet!<sup>3</sup>
2. Warum kann ein LC-Modulator Beugungsbilder erzeugen?

<sup>3</sup> Was sieht man zusätzlich?

### Bestimmung der Beugungseffizienz

1. Messen Sie die Intensität des 0. und 1. Beugungsmaximums eines Doppelspaltes bei verschiedenen Grauwerten (z. B. 0, 255 ; 0, 192 ; 0, 128).<sup>4</sup> Nutzen Sie für die Auswertung folgende Formel<sup>5</sup>:

$$\text{Beugungseffizienz } \eta_1 = \frac{I_{1.\text{Max}}}{I_{0.\text{Max}}}$$

2. Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Beugungseffizienz eines realen Doppelspaltes.

<sup>4</sup> Dieser Versuchsteil kann schwierig auszuwerten sein (i. d. R. geringer Kontrast bei Verwendung des LC-Modulators), daher sollten nur 3 oder 4 möglichst verschiedene Grauwerte verwendet werden.

<sup>5</sup> Dies ist nur eine mögliche Definition der Beugungseffizienz. Bei unterschiedlichen Intensitäten des 1. und -1. Maximums soll der Mittelwert gebildet werden.

### Bestimmung des Phasenshifts des LC-Modulators

Stellen Sie auf dem LC-Modulator ein zweigeteiltes Bild dar (horizontally divided screen, Grauwerte: (0 und 255)) und stellen Sie den realen Doppelspalt hinter den LC-Modulator.<sup>6</sup> Dabei wird das Beugungsbild mit der

<sup>6</sup> Kein Analysator!

CCD-Zeile beobachtet. Verschieben Sie zunächst am Computer den horizontal split, bis Sie einen Effekt auf der CCD-Zeile beobachten. Schiebt man den split weiter, verschwindet der Effekt wieder. Sollten Sie die Kante des horizontally divided screens um mehr als 25 Pixel verschoben haben, sollten Sie den split in die Mitte rücken und den Doppelspalt langsam hin- und herschieben, bis Sie den zuvor beobachteten Effekt wieder beobachten. Anschließend können Sie eine Feinausrichtung wieder über das Verschieben des splits am Computer vornehmen.

1. Stellen Sie auf beiden Seiten des LC-Modulators den Grauwert (128) ein und bestimmen Sie die Positionen des 0. und des 1. Maximums des Beugungsbildes auf der CCD-Zeile, bzw. des Abstands des 1. Maximums vom Nullpunkt ( $D_1$  in °) <sup>7</sup>
2. Variieren Sie den Grauwert einer Seite des LC-Modulators in fester Schrittweite von 0 bis 255. Messen Sie dabei wiederum den Abstand des 1. Maximums ( $D'_1$ ) zum (im vorhergehenden Punkt gesetzten) Nullpunkt.
3. Bestimmen Sie den Phasenshift gemäß:  $\theta = 2 \cdot \pi \cdot \frac{(D_1 - D'_1)}{D_1}$ . <sup>8</sup>
4. Wiederholen Sie die Messung bei zwei anderen Helligkeitswerten des LC-Modulators, sowie bei zwei anderen Kontrastwerten (je einen höheren und einen tieferen). Vergleichen Sie die Ergebnisse, wie wirken sich die Veränderungen aus? Stellen Sie die zugehörigen Messkurven für den Vergleich in einem Diagramm dar und erklären sie den Effekt.

<sup>7</sup> Hierfür kann in den Optionen der Software der CCD-Zeile eine Brennweite (bei Verwendung keiner Linse: Abstand Doppelspalt - LC-Modulator) angegeben werden, sodass das Programm die x-Achse in Grad (°) angibt. Dann lässt sich in der Software die Position maximaler Intensität auf 0° setzen. Dies gestaltet die folgenden Messungen übersichtlicher.

<sup>8</sup> Es ist sinnvoll den Phasenshift in Einheiten von  $\pi$  anzugeben. Da es nur um Positionen geht, kann der Graufilter je nach Bedarf angepasst werden.

## *Raumfrequenzfilterung und Holographie*

### *Raumfrequenzfilterung*

Bauen Sie den Versuchsaufbau zur Raumfrequenzfilterung nach Abb. 3 auf. Hierfür muss der aufweitbare LASER verwendet werden. Es stehen verschiedene Drahtgitter zur Verfügung.

1. Untersuchen Sie das Beugungsbild des Gitters sowie die Abbildung des Gitters selbst.
2. Montieren Sie den Spalt in der Fourierebene in den Strahlengang und blenden Sie mit dem Spalt die horizontalen Beugungsordnungen des Gitters aus. Vergleichen Sie die Abbildung des Spalts mit der vorhergehenden Messung. Warum verändert sich die Abbildung? Dokumentieren Sie die Beugungsbilder und die realen Abbildungen des Gitters für beide Fälle (Digitalkamera mit Makrofunktion).
3. Montieren Sie den LC-Modulator inkl. beider Polfilter in den Versuchsaufbau und stellen sie auf dem Display einen Spalt dar (weißer Streifen auf schwarzem Grund oder entsprechend invertiert). Vergleichen sie die Ergebnisse.<sup>9</sup>

### *Hologramm-Kachelung*

Bauen Sie den Versuchsaufbau gemäß Abb. 4 um. Um ein möglichst großes Bild zu erhalten, ist es sinnvoll, die Strecke zwischen LC-Modulator und Schirm möglichst groß zu wählen. Über die Funktion Prisma lassen sich die

<sup>9</sup> Bedenken Sie, dass der LC-Modulator selbst als Gitter wirkt und der Spalt bei zu geringer Spaltbreite ebenfalls als optisches Element wirkt!

einzelnen Maxima des Hologramms gegeneinander verschieben, sodass diese deutlich sichtbarer werden. Wenn das gleiche Hologramm mehrfach nebeneinander gelegt wird, nennt man dies eine Kachelung des Hologramms. Nun soll die Rekonstruktion eines Hologramms in verschiedenen Kachelungen untersucht werden, die Hologramme liegen auf dem Rechner vor (unilogo\\_kachel1.bmp; unilogo\\_kachel2.bmp; unilogo\\_kachel4.bmp; unilogo\\_kachel6.bmp).

1. Stellen Sie die Hologramme auf dem LC-Modulator dar. Nehmen Sie die rekonstruierten Bilder mit einer Kamera auf. Beschreiben und erklären Sie die Unterschiede.<sup>10</sup>
2. Liefert die Analysatorstellung mit maximalem Phasenshift auch die beste Bildqualität? Funktioniert die Bildrekonstruktion auch ohne Analysator? Warum?
3. Warum tauchen die rekonstruierten Bilder auch „auf dem Kopf stehend“ auf und warum erscheint das rekonstruierte Bild mehrfach?

<sup>10</sup> Fangen Sie am besten mit \_kachel6.bmp an. Warum?

#### *Vergleich Phasenhologramm - Amplitudenhologramm*

Für diesen Versuchsteil steht ein Intensitätshologramm auf einem Foto-Negativ und das gleiche Hologramm als Datei (*unilogo.bmp*) zur Darstellung auf dem LC-Modulator zur Verfügung (Phasenhologramm).

1. Bilden Sie die Rekombination des Phasenhologramms und des Amplitudenhologramms ab und vergleichen Sie die beiden Bilder. Wo ist der Unterschied in der Erzeugungsmethode? Warum funktionieren beide Methoden?<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Für die Berechnung des hier genutzten Hologramms wurde das Programm cghMaker verwendet.

#### *Erzeugung und Darstellung eigener Hologramme*

1. Erzeugen Sie mit der Software OptiXplorer mindestens ein eigenes Hologramm und dokumentieren Sie dieses.

Hinweise:

- Das Programm nimmt nur Bitmap-Bilder mit 200x200 Pixel an.
- Aufgrund der Punktspiegelung bei der Berechnung der Hologramme ist es sinnvoll die darzustellenden Elemente auf die Hälfte des Bildes zu beschränken (100x200 Pixel).
- Die darzustellenden Bilder sollten weiß auf schwarzem Grund sein, da sich dann die Hologramme am besten erkennen lassen.
- Die Darstellungsqualität der Hologramme ist nicht besonders gut, daher beschränken Sie sich auf Buchstaben oder einfache Grafiken mit gutem Kontrast.

#### *Hinweise zur Durchführung*

Folgende Hinweise helfen Ihnen bei der Durchführung:

- Graufilter sollten immer mit der weißen Seite zur Lichtquelle gedreht werden (warum?)

- Graufilter sollten so weit vorne im Strahlengang wie möglich platziert werden und so schwach wie möglich gewählt werden.
- Die CCD-Zeile kann zwischen hochauflösend (2048 Pixel) und niedrigauflösend (256 Pixel) umgestellt werden, um bei Justagen die Auslesegeschwindigkeit bzw. bei Messungen die Genauigkeit zu erhöhen.
- Bei der CCD kann die Integrationszeit verändert werden, um die Intensität ohne Eingriff in den Strahlengang zu verändern.
- Bei Verwendung des LC-Displays ist es hilfreich, regelmäßig zu überprüfen, dass in der LC2002-Software „Connected“ angezeigt wird. Im Zweifelsfall hilft „neu verbinden“.
- Die Brennweite der Halogenlampe kann durch Verschieben der hinteren Stange verändert werden.
- Die Brennweite des aufgeweiteten LASER kann durch Drehen der Kappe verändert werden.