

VERSUCHSBERICHT ZU

RÄUMLICHER LC-MODULATOR UND
DIFFRAKTIVE OPTIK

Gruppe BA-C-04

Alexander Neuwirth (E-Mail: a_neuw01@wwu.de)
Leonhard Segger (E-Mail: l_segg03@uni-muenster.de)

durchgeführt am 27.05.2019
betreut von
Milena Merkel

2. Februar 2020

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung	3
2 Theorie	3
2.1 Gesetz von Malus	3
2.2 Flüssigkristallzellen	3
2.3 Doppelbrechung	5
2.4 Diffraktive Optische Elemente	5
2.5 Kohärenz	5
2.6 Fraunhofer-Beugung	6
3 Methoden	6
3.1 Überprüfung des Gesetzes von Malus	6
3.2 Einstellung der Eingangspolarisation	7
3.3 Bestimmung der Pixelgröße	7
3.4 Zusammenhang zwischen Grauwert und Polarisationszustand	7
3.5 Intensitätsverteilung in den Beugungsordnungen des unadressierten Displays	8
3.6 Beugungsbilder verschiedener DOEs	8
3.7 Brennweite eines Fresnel-Linsen-DOEs	8
3.8 Verschiedene DOEs als Hologramme	8
4 Ergebnisse und Diskussion	8
4.1 Überprüfung des Gesetzes von Malus	9
4.2 Einstellung der Eingangspolarisation	10
4.3 Bestimmung der Pixelgröße	12
4.4 Zusammenhang zwischen Grauwert und Polarisationszustand	13
4.5 Intensitätsverteilung in den Beugungsordnungen des unadressierten Displays	15
4.6 Beugungsbilder verschiedener DOEs	17
4.7 Brennweite eines Fresnel-Linsen-DOEs	20
4.8 Verschiedene DOEs als Hologramme	21
5 Schlussfolgerung	23

1 Kurzfassung

In diesem Versuch wird ein Modulator aus Flüssigkristallzellen verwendet, um dessen Eigenschaften zu untersuchen und seine Verwendbarkeit als verschiedene diffraktive optische Elemente zu zeigen. Zunächst kann dabei das Gesetz von Malus bestätigt werden und gezeigt und erklärt werden, dass bzw. warum der Kontrast des LC-Modulators von der Eingangspolarisation abhängt. Für den verwendeten LC-Modulator wird mit zwei verschiedenen Methoden der Pixelabstand bestimmt und der Füllfaktor der Zellen wird abgeschätzt. Außerdem wird die Abhängigkeit der Ausgangspolarisation des Modulators von dem eingestellten Grauwert untersucht und diskutiert.

Es werden Beugungsbilder des LC-Modulator als verschiedene diffraktive optische Elemente aufgenommen, um zu zeigen, dass der LC-Modulator als solche verwendet werden kann. Bei Verwendung des LC-Modulators als Fresnel-Linse wird gezeigt, dass er auch eine Linse variabler Brennweite darstellen kann.

Zuletzt werden Fouriertransformierte von simplen Bildern auf den LC-Modulator gegeben, um mit seiner Hilfe Hologramme auf dem Kamerasensor zu erzeugen.

2 Theorie

2.1 Gesetz von Malus

Nach dem Gesetz von Malus verhält sich die Intensität von linear polarisiertem Licht, nachdem es einen idealen Polarisationsfilter passiert hat, folgendermaßen in Abhängigkeit vom Winkel α zwischen Polarisationsfilterrichtung und Polarisationsrichtung der Welle:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha) \quad (1)$$

2.2 Flüssigkristallzellen

Flüssigkristalle zeichnen sich dadurch aus, dass sie mindestens unter bestimmten Bedingungen eine Orientierungsfernordnung, aber keine vollständige Positionsfernordnung, aufweisen, womit sie sich in letzterem Punkt von „gewöhnlichen“ Kristallen unterscheiden. Positionsfernordnung bezeichnet hierbei eine Anordnung im Raum, die sich durch das periodische Fortsetzen einer Einheitszelle beschreiben lässt. Eine unvollständige Positionsfernordnung meint eine Periodizität in nur einer oder nur zwei Dimensionen. Orientierungsfernordnung meint, dass eine Vorzugsrichtung der Längsachsen der Moleküle des Flüssigkristalls existiert. Diese ist periodisch ortsabhängig oder konstant. Der Grad der Ordnung lässt sich als die Größe der durchschnittlichen Abweichung von der Vorzugsrichtung verstehen.

Für die Herstellung von Flüssigkristallanzeigen wird ein Flüssigkristall in cholesterischer Phase verwendet. Dies meint, dass die Molekülachsen ebenenweise in die gleiche Richtung zeigen. Die Orientierung in den Ebenen ist dabei periodisch, da der Direktor

(die Vorzugsachse) sich, wenn in Laufrichtung senkrecht zur Ebene betrachtet, mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dreht und eine Helixstruktur bildet, wenn das Ende des Direktorvektors im Raum verfolgt wird.

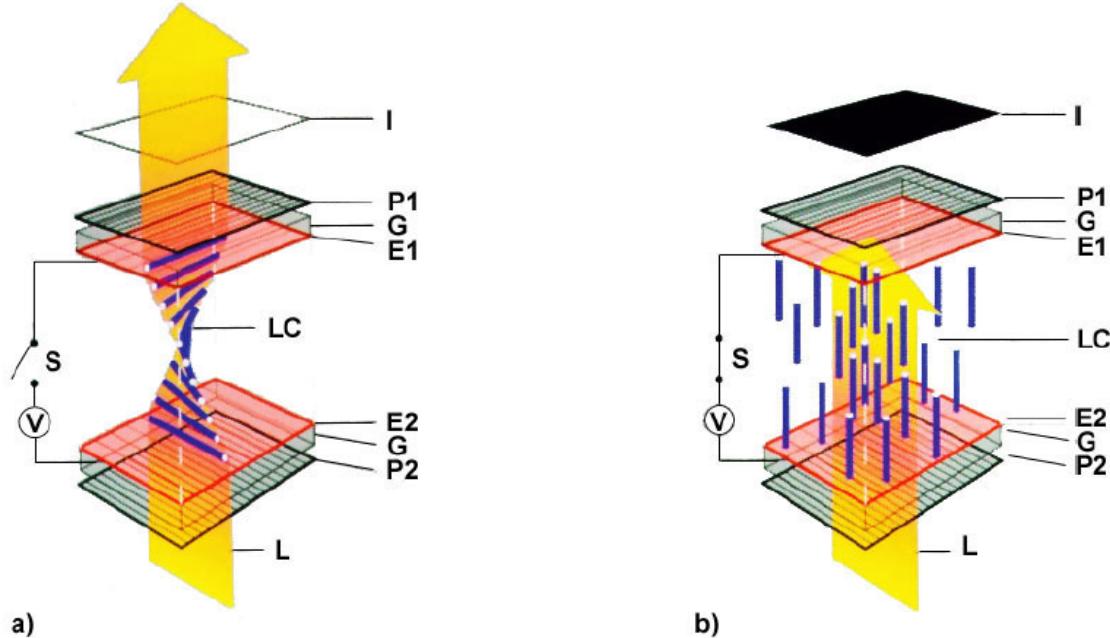


Abbildung 1: Polarisationsrichtung in der Flüssigkristallanzeige. a) ohne angelegte Spannung. b) bei angelegter Spannung. E1, E2: Elektroden (ITO); G: Glaspflatten; I: Lichtintensität; L: Lichtwelle; LC: Flüssigkristall; P1, P2: Polarisatoren; S: Schalter, V: Spannungsquelle. [1]

Dies erlaubt den Bau einer Flüssigkristallanzeige, da in einem Flüssigkristall in cholesterischer Mesophase die Polarisation des Lichtes, wenn es entlang besagter Laufrichtung einfällt, der Helixform des Direktors folgt. Wenn bekannt ist, mit welcher Ganghöhe (Länge der Helix bei einer Umdrehung des Direktors) der Kristall vorliegt, kann auf der Ausgangsseite des Displays linear polarisiertes Licht einen Polfilter passieren, wenn dieser zur Einfallsrichtung soweit gedreht ist, wie sich der Direktor über die Dicke des Flüssigkristalls im Display dreht. Häufig wird hierfür eine Vierteldrehung verwendet. Wie gleich deutlich wird, sind hier nur Drehungen um $\frac{\pi(2z+1)}{2}$ mit $z \in \mathbb{Z}$ praktikabel. Da für die lineare Polarisation des einfallenden Lichts ebenfalls ein Polfilter verwendet wird, ist eine solche Flüssigkristallanzeige bidirektional. Wenn jetzt im Flüssigkristall ein annähernd homogenes elektrisches Feld angelegt wird, richten sich die Molekülachsen statt nach der Helixstruktur mit zunehmender Feldstärke zunehmend eher nach dem Feld aus (vgl. Abb. 1). Dies verhindert, dass sich die Polarisation des Lichtes im Innern ändert, weshalb bei einer der oben genannten Drehungen zwischen den Durchlassrichtungen der Polarisationsfilter das Licht den zweiten Polarisationsfilter nicht passieren kann.

Jetzt wird auch klar, warum nur die oben genannten Drehungen praktikabel sind: Die Polarisationsfilter müssen senkrecht zueinander stehen, damit im Falle von angelegter Spannung die Transmission minimal wird (vgl. Gesetz von Malus).

Demnach ist eine spannungsgesteuerte Schaltung der Durchlässigkeit des Filters möglich und wenn hinter das Display eine Lichtquelle oder ein Spiegel gebracht wird, kann die Zelle als Pixel einer größeren Anzeige verwendet werden. Flüssigkristalldisplays werden mit Wechselspannung betrieben, da eine Gleichspannung die elektrolytische Zersetzung des Flüssigkristalls zufolge hätte.

Beim im folgenden verwendeten LC-Modulator sind keine Polfilter in das Gerät eingebaut, weshalb polarisiertes Licht aus einem Laser verwendet wird und nach dem Modulator ein externer Polarisationsfilter verwendet wird.

2.3 Doppelbrechung

Flüssigkristalle weisen einen polarisationsabhängigen Brechungsindex auf, da die Molekülelektronen je nach Orientierung der Moleküle und Schwingungsrichtung sich gegenseitig unterschiedlich stark zum Schwingen anregen. Dies führt bei einem Strahl, der nicht bereits entweder senkrecht oder parallel zur optischen Achse polarisiert ist, zum Phänomen der Doppelbrechung. Der Strahl spaltet in zwei senkrecht zueinander polarisierte Strahlen auf. Diese Aufspaltung wird maximal, wenn der einfallende Strahl senkrecht zum Direktor steht.

2.4 Diffraktive Optische Elemente

Mithilfe einer Matrix aus Flüssigkristallzellen lässt sich ein räumlicher Lichtmodulator realisieren. Polarisator, Mikrodisplay und Analysator sorgen in Kombination dafür, dass ein Phasenunterschied zwischen den Flüssigkristallzellen entsteht, der proportional zum eingestellten Grauwert ist. Dies ergibt sich aus der Betrachtung des Systems mittels des Jones-Formalismus. Durch einzelne Ansteuerung der Flüssigkristallzellen entsteht ein räumliche Lichtmodulation in Amplitude und Phase.

2.5 Kohärenz

Der signifikante Unterschied zwischen einem Laser und einer Glimmlampe besteht in der Fähigkeit zur Interferenz. Die Lichtwellen, die den Laser verlassen haben eine feste Phasenbeziehung, weshalb nach Trennung des Strahls Interferenz zwischen beiden Teilstrahlen zu beobachten ist.

Bei der qualitativen Beschreibung der Interferenzfähigkeit unterscheidet man zwischen räumlicher und zeitlicher Kohärenz. Zeitliche Kohärenz kann über Autokorrelation mittels des Michelson-Interferometers gemessen werden. Die Kohärenzlänge ist definiert durch den Abstand (optische Wegdifferenz), der die Länge eines Arms des Interferometers vom Interferenzmaximum wegbewegt werden kann, bevor die durch die Interferenz erzeugte Autokorrelationsfunktion nicht mehr über $1/e$ steigt. Die Kohärenzlänge ergibt sich aus der Monochromatizität des Lichts, da sich bei perfekt monochromatischem Licht

die Phasenbeziehung über keine Entfernung ändert. Die räumliche Kohärenz kann mittels eines Doppelspalteperiments (oder des Young-Interferometers) gemessen werden, da sie die Phasenbeziehung innerhalb einer Wellenfront beschreibt und der Doppelspalt Interferenz zwischen unterschiedlichen Teilen der Wellenfront realisiert.

2.6 Fraunhofer-Beugung

Was die Fraunhofer-Beugung angeht, reicht es sich hier darauf zu beschränken, dass durch die Beugung an diffraktiven optischen Elementen (DOEs) im Fernfeld eine Fouriertransformation des DOEs auftritt. Durch eine Linse kann diese Fouriertransformation rückgängig gemacht werden und das Bild wieder ins Nahfeld geholt werden.

Räumliche Frequenzen tauchen im Beugungsbild also als Punkte auf. Einzelspalte entsprechen Rechteckfunktionen, die transformiert Funktionen der Form $\sin x/x$ ergeben. Bei einem Doppelspalt tauchen zusätzlich Nebenmaxima auf und bei Gittern ergeben sich einzelne Hauptmaxima hoher Intensität.

3 Methoden

In Abb. 2 ist der Aufbau beispielhaft für einen der Versuchsschritte abgebildet.

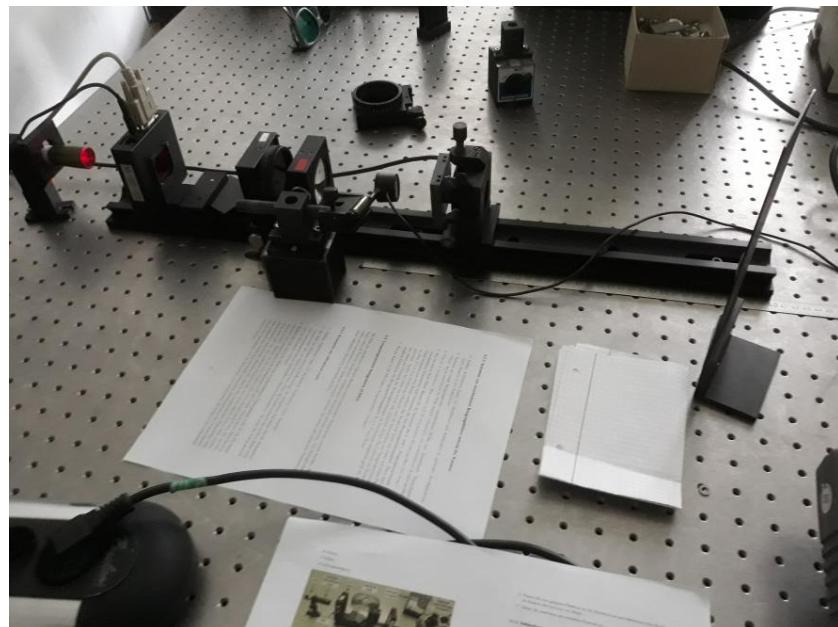


Abbildung 2: Fotografie des Aufbaus.

3.1 Überprüfung des Gesetzes von Malus

Um das Gesetz von Malus zu überprüfen, wird das Licht eines He-Ne-Lasers durch einen Analysator geschickt und dann mit einer Linse auf ein Intensitätsmessgerät geschickt.

Hierbei wird vermutet, dass der Laser bereits linear polarisiertes Licht erzeugt. Der Analysator wird in 10° -Schritten um 360° rotiert.

3.2 Einstellung der Eingangspolarisation

Der im Folgenden verwendete LC-Modulator weist einen von der Eingangspolarisation abhängigen Kontrast auf. Der maximale Kontrast soll bei einer Eingangspolarisation von -45° bzw. -135° liegen. Um diese Eingangspolarisation zu erreichen wird ein Analysator in den Strahlengang gebracht und auf -135° eingestellt. Dann wird der Laser rotiert, bis die gemessene Intensität maximal ist. Sobald diese Position gefunden ist, wird zwischen Laser und Analysator der LC-Modulator eingebaut, der Strahl kollimiert und mit einer Kamera das sich ergebende Bild aufgenommen. Auf dem LC-Modulator wird ein horizontal geteiltes Bild eingestellt (eine Hälfte Weiß, eine Schwarz). Dies wird im Folgenden als *Horizontally Divided Screen* bezeichnet. Dann wird der Analysator um je 90° gedreht und jeweils ein Kamerabild aufgenommen, um zu zeigen, dass bei der gewählten Eingangspolarisation der Kontrast tatsächlich maximal ist.

Zusätzlich wird der Kontrast gemessen, indem ein komplett weißes bzw. schwarzes Bild (*Blanc Screen*) verwendet wird und mit einem Intensitätsmessgerät nach Fokussierung durch eine Linse die Intensität in der Fokusebene gemessen wird.

3.3 Bestimmung der Pixelgröße

Variante 1

Um die Pixelgröße des LC-Modulators zu bestimmen, wird ein weißes Bild mit einem 200x200 Pixel großen schwarzen Quadrat in der Mitte auf den Modulator gegeben. Der Laserstrahl wird kollimiert. In den Strahlengang wird der LC-Modulator und im Abstand der Brennweite eine Linse dahinter gestellt, hinter der wieder im Abstand der Brennweite ein Schirm aufgestellt wird. Auf dem Schirm wird die Größe des Quadrats mit einem Lineal gemessen.

Variante 2

Da die Pixel des LC-Modulators elektronische Strukturen zur Ansteuerung benötigen, bilden sie ein periodisches Gitter. Aufgrund dessen ergibt sich in der Fokusebene das Beugungsbild eines Gitters. Es wird der Abstand zweier höherer Ordnungen mit einem Lineal gemessen und hieraus Gitterkonstante und somit Pixelgröße bestimmt.

3.4 Zusammenhang zwischen Grauwert und Polarisationszustand

Es wird auf dem LC-Modulator ein einfärbiges Bild angezeigt. In der Fokusebene wird die Intensität gemessen und bei sechs verschiedenen Grauwerten des Bildes jeweils das Maximum der Intensität in Abhängigkeit vom Analysatorwinkel gesucht. Da für die Bestimmung der Exzentrizität des Lichts auch die Intensität bei einem dazu um 90°

gedrehten Analysators bekannt sein müsste, dies aber nicht gemessen wurde, werden hierfür im folgenden Daten aus [2] verwendet.

3.5 Intensitätsverteilung in den Beugungsordnungen des unadressierten Displays

Die Linse wird entfernt und stattdessen der Laser mittels der Linse am Laser auf einen Abstand von etwa 90 cm fokussiert. Es wird in horizontaler und vertikaler Richtung die Intensität der ersten elf Ordnungen gemessen.

3.6 Beugungsbilder verschiedener DOEs

Der Laser wird wieder kollimiert und eine Linse nach dem Analysator zur Fokussierung verwendet. Es wird nacheinander ein Einzelpunkt, zwei verschiedene Doppelpunkte und ein Gitter als DOE für den LC-Modulator eingestellt. Dann wird mit einer Kamera in der Fokusebene jeweils das Beugungsbild aufgenommen. Für ein Gitter wird der Strahl mit der Linse am Laser (unter Entfernung der anderen Linse) auf einen Abstand von etwa 1,23 m fokussiert und die Intensität des nullten und ersten Beugungsmaximums für verschiedene Grauwerte der Lücken des Gitters gemessen.

3.7 Brennweite eines Fresnel-Linsen-DOEs

Es wird als Bild eine Fresnel-Zonenplatte eingestellt. Dann wird für vier verschiedene Linsenphasen mithilfe der Kamera der Fokus des Laserstrahls gesucht, um die Abhängigkeit zu bestimmen.

3.8 Verschiedene DOEs als Hologramme

Es wird wieder der kollimierte Laserstrahl mit Fokussierung nach dem Analysator mit der Kamera in der Fokusebene verwendet. Es wird das fouriertransformierte Bild eines Schriftzugs und einiger geschachtelter Rechtecke am LC-Modulator eingestellt. Mit der Kamera wird jeweils ein Bild aufgenommen. Zuletzt wird auf der einen Hälfte des DOEs die Fouriertransformation von geschachtelten Rechtecken und auf der anderen Hälfte die von geschachtelten Kreisen dargestellt und ein Kamerabild aufgenommen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Unsicherheiten

Alle Unsicherheiten werden nach GUM bestimmt und berechnet. Für diese Berechnungen wurde die Python Bibliothek „uncertainties“ herangezogen, welche den Richtlinien des GUM folgt. Die Fits verwenden die Methode der kleinsten Quadrate, außer wenn anders angegeben. Folgende Unsicherheiten werden angenommen:

Analysatorwinkel: analog an Skala abgelesen, somit Dreiecksverteilung, $u(\phi) = \frac{2^\circ}{2\sqrt{6}} = 0,4^\circ$.

Intensität: digital, wobei die letzte Ziffer häufig schwankte, $u(I) = \frac{0,01 \text{ mW}}{2\sqrt{3}} = 0,003 \text{ mW} = 0,003 \text{ a.u.}$

Brennweite: Da keine Unsicherheit auf der Linse angegeben ist, wird einen Rechteckverteilung für die letzte Ziffer abgeschätzt $u(f) = \frac{1 \text{ cm}}{2\sqrt{3}} = 0,3 \text{ cm}$

Abstand: analog mit Lineal, somit Dreiecksverteilung $u(d) = \frac{0,1 \text{ cm}}{2\sqrt{6}} = 0,02 \text{ cm}$

4.1 Überprüfung des Gesetzes von Malus

In Abb. 3 wurden die gemessenen Intensitäten gegen den Winkel des Polarisators aufgetragen. Es wurde ein Fit nach dem Gesetz von Malus durchgeführt mit:

$$I = (I_{\max} - I_{\min}) \cos^2(\phi\omega - \theta) + I_{\min} \quad (2)$$

Der Kontrast lässt sich quantitativ mit Gleichung (3) beschreiben.

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = 0,9553 \pm 0,0035 \quad (3)$$

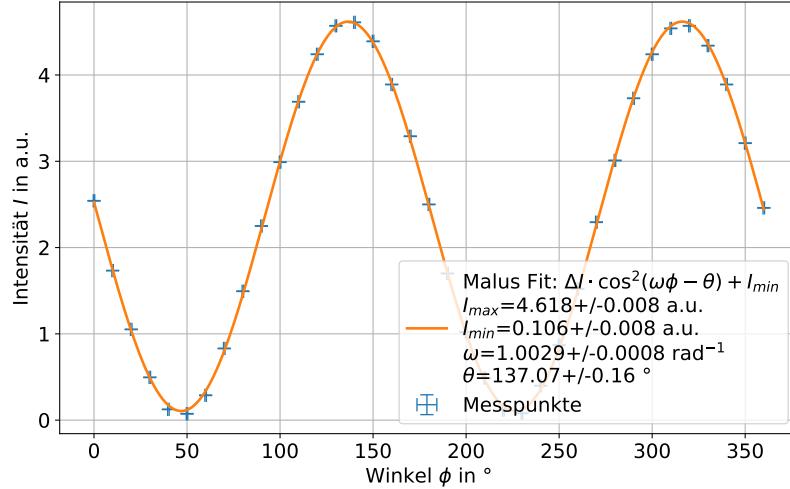


Abbildung 3: Messung der Intensität in Abhängigkeit vom Winkel des Polarisators. Die gelbe Funktion ist ein Fit nach dem Gesetz von Malus.

Diskussion

Wie in Abb. 3 zu erkennen ist, spiegeln die Messpunkte sehr gut die nach dem Gesetz von Malus erwartete \cos^2 -Funktion wieder. In den Fitparametern ist außerdem festzustellen, dass in Frequenz ω zwar nicht innerhalb der Messunsicherheiten, aber doch sehr nahe an 1 liegt, was ebenfalls dem Gesetz von Malus entspricht (Gleichung (4)).

$$I = I_0 \cos^2(\alpha) \quad (4)$$

Dass im Gegensatz zu obiger Gleichung eine Phase auftritt, liegt darin, dass das Licht aus dem Laser in einem Winkel von $(137,07 \pm 0,16)^\circ$ zu einem Analysatorwinkel von Null gedreht linear polarisiert austritt.

4.2 Einstellung der Eingangspolarisation

In Abb. 4 sind für vier Analysatorwinkel im Abstand von 45° die Kamerabilder aufgeführt. Hierbei wurde auf den LC-Modulator ein *Horizontally Divided Screen* gegeben.

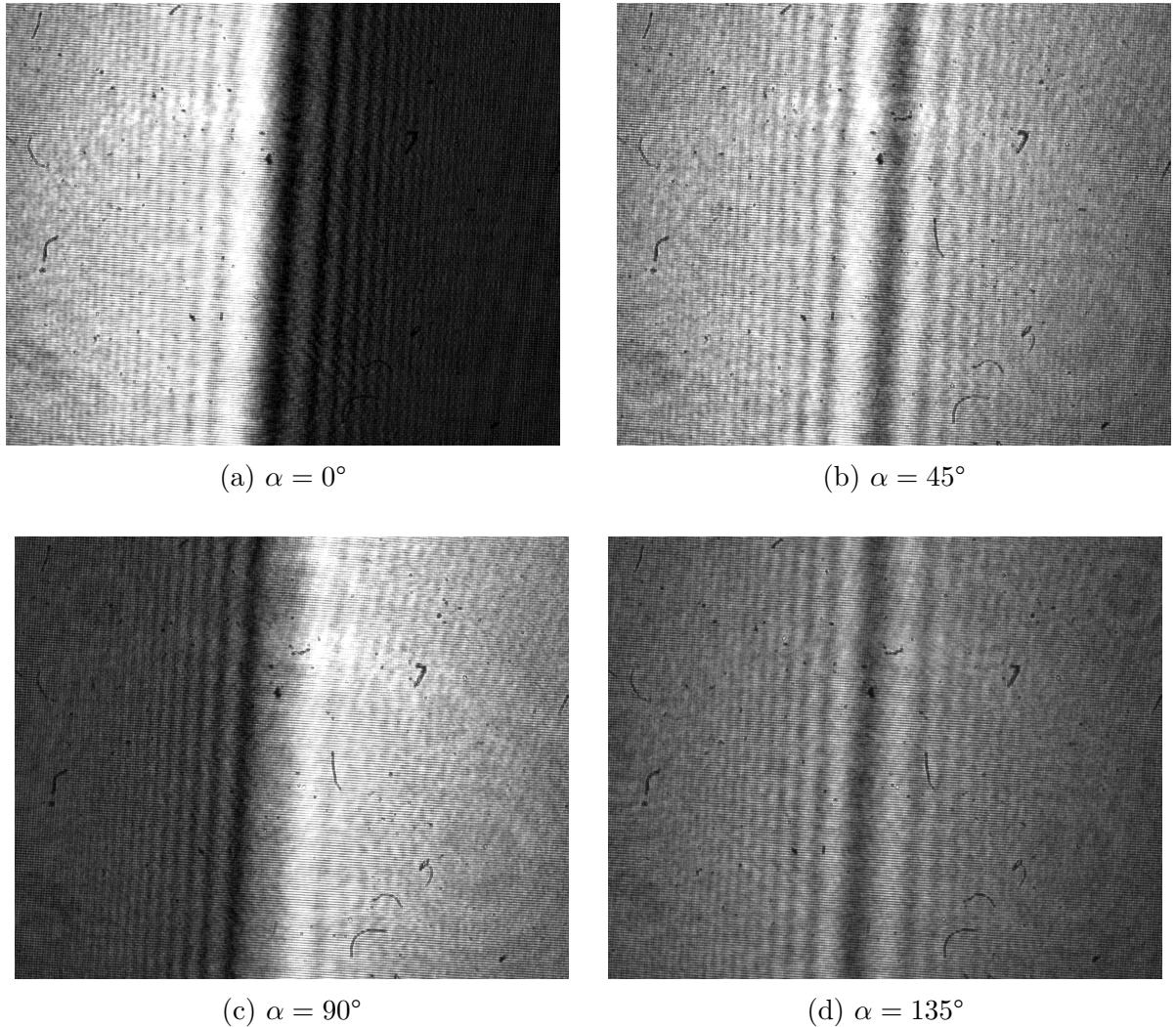


Abbildung 4: Kameraaufnahmen für verschiedene Analysatorwinkel α mit einem *Horizontally Divided Screen* auf dem LC-Modulator.

Die Bestimmung des Kontrast erfolgt analog zu Gleichung (3) in Abschnitt 4.1, jedoch mit den gemessenen Intensitäten $I_{\max} = (1,7350 \pm 0,0030)$ mW und $I_{\min} = (0,0640 \pm 0,0030)$ mW, respektive für einen weißen und schwarzen *Blank Screen*, sodass sich ein Kontrast von $C = 0,9288 \pm 0,0032$ ergibt.

Diskussion

Zunächst lässt sich mittels Abb. 4 die qualitativ die Erwartung bestätigen, dass bei der gewählten Eingangspolarisation von -135° . Der Kontrast zwischen den beiden Flächen ist deutlich größer bei einem Analysatorwinkel von 0° bzw. 90° als für die dazu um 45° gekippten Polarisatorstellungen. Die Tatsache, dass $I_{\min} = (0,0640 \pm 0,0030)$ mW sich deutlich von Null unterscheidet zeigt, dass der LC-Modulator deutlich schlechter linear polarisiertes Licht ausgibt, als der Laser. Der berechnete Kontrast ist geringer als Herstel-

lerangabe für den maximalen Kontrast von 0,99 (vgl.[3]). Dies kann an Verschmutzungen oder nicht vollständig optimierter Eingangspolarisation liegen.

Dass das Bild auf der Kamera überhaupt wieder auftritt, liegt daran, dass am LC-Modulator eine Fouriertransformation stattfindet, die durch die Linse wieder rückgängig gemacht wird. Zusätzlich ist zu erkennen, dass sich ein Wellenmuster parallel zur Teilung des Bildschirms ergibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Rücktransformation unvollständig ist, da nur der Teil rücktransformiert wird, der auf die Linse trifft. Außerdem treten bei hohen Abständen zu optischen Achse oder großen Strahlwinkeln zu optischen Achse Linsenfehler (sphärische Aberration und Astigmatismus) auf. Zusätzlich fallen kreisförmige Wellenmuster auf. Diese sind vermutlich Fouriertransformationen von punktförmigem Staub auf der Linse oder dem LC-Modulator. Nicht-fouriertransformierter Dreck auf der Kamera ist ebenfalls zu sehen. Theoretisch könnte der Dreck auch von der Laserlinse stammen und hin- und rücktransformiert sein, aber dann wären die gleichen Wellenstrukturen, wie beim *Horizontally Divided Screen* zu erwarten.

Dass ein eingangspolarisationsabhängiger Kontrast auftritt, liegt an der Rotation der Lichtpolarisation durch die Helixstruktur in den LC-Zellen. Wenn das Licht parallel zum Polarisationsfilter am Eingang der LC-Zelle ankommt, wird es zu einem hohen Anteil transmittiert, wenn keine Spannung anliegt und zu einem geringen transmittiert wenn Spannung anliegt. Der Kontrast ist also hoch.

4.3 Bestimmung der Pixelgröße

Die verwendete Linse hat eine Brennweite f von $(20,0 \pm 0,3)$ cm und die Wellenlänge λ des HeNe-Lasers beträgt 632,8 nm.

Variante 1

Die Größe G des 200x200 Pixel Quadrats auf dem LC-Display lässt sich aus Bildgröße B , Bildweite b und Brennweite f mit Gleichung (5) berechnen. Der Pixelabstand p ergibt sich aus dem Quotienten von G und Höhe des Quadrats in Pixeln. Für die Unsicherheit u der Höhe des Quadrats in Pixeln wird einen Rechteckverteilung von $u = \frac{10\text{ px}}{2\sqrt{3}} = 3\text{ px}$ verwendet, da Bilder von 800x600 Pixel auf den LC-Modulator mit 824x624 Pixel skaliert werden und auch der Rahmen des Bildprogramms mit an den LC-Modulator übertragen wird. Die Messungen sowie der resultierende Pixelabstand p sind in Tabelle 1 tabelliert.

$$G = \frac{B}{b/f - 1} \quad (5)$$

Tabelle 1: Gemessene Bildweite b , Bildgröße B und berechnete Größe G , Pixelgröße p .

Bildweite b/cm	Bildgröße B/cm	Größe G/cm	Pixelabstand $p/\mu\text{m}$
$30,30 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,02$	$0,58 \pm 0,05$	$29,1 \pm 2,4$
$50,00 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,02$	$0,63 \pm 0,02$	$31,7 \pm 1,1$

Variante 2

Für Beugung an einem Gitter mit der Gitterkonstanten g gilt für das m . Maximum:

$$g \cdot \sin \alpha = m\lambda \quad (6)$$

Für kleines α gilt $\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{d}{2f}$, wobei d der Abstand zweier Maxima gleicher Ordnung m zueinander ist und somit:

$$g = \frac{2m\lambda f}{d} \quad (7)$$

Tabelle 2: Gemessener Abstand d , Bildgröße B und berechnete Pixelgröße p .

Ordnung m	Abstand d/cm	Pixelabstand $p/\mu\text{m}$
3	$2,50 \pm 0,02$	$30,4 \pm 0,5$
4	$3,30 \pm 0,02$	$30,7 \pm 0,5$

Diskussion

Wenn man die gemessenen Pixelabstände in Tabelle 1 und Tabelle 2 mit der Herstellerangabe gemäß [3] von $32\mu\text{m}$, die auf $\pm 3\mu\text{m}$ genau bestimmt werden können soll, vergleicht, stellt man fest, dass dies innerhalb der Messunsicherheiten der Fall ist.

4.4 Zusammenhang zwischen Grauwert und Polarisationszustand

In Abb. 5 ist die Exzentrizität des Lichts in Polarkoordinaten dargestellt. Die maximal gemessene Intensität I_{\max} unter Variation des Analysatorwinkels bei einem *Blank Screen* mit einem gewissen Grauwert wird als Länge der großen Halbachse einer Ellipse aufgefasst. Die kleine Halbachse ergibt sich aus der minimalen Intensität I_{\min} , also unter einer Analysatorwinkeländerung von 90° . Zusätzlich wird die Hauptachse der Ellipse um den Analysatorwinkel gegenüber der x-Achse rotiert.

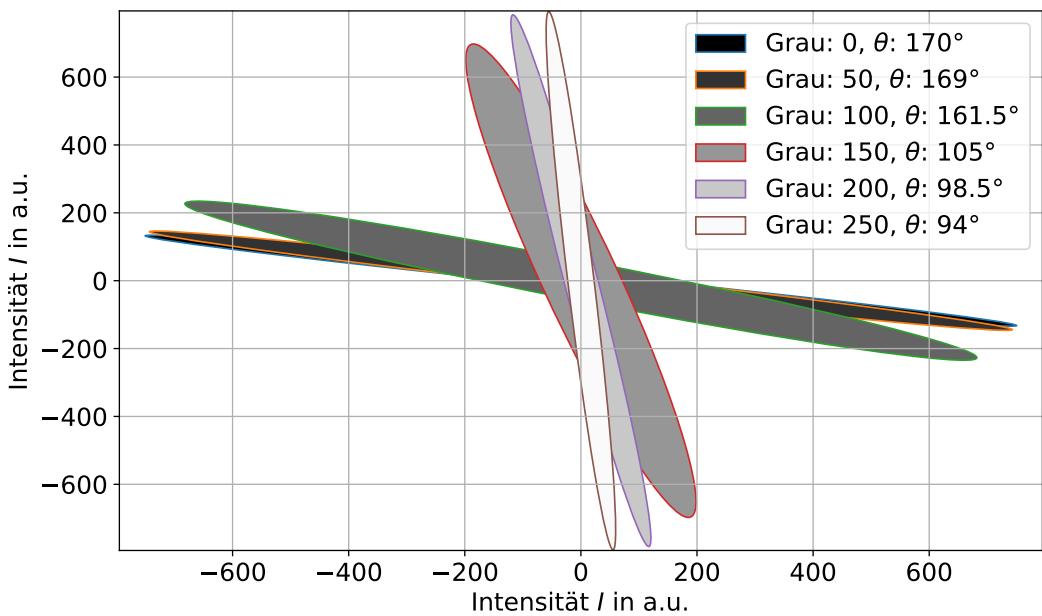


Abbildung 5: Exzentrizität des Lichts. Die maximale Intensität I_{\max} entspricht der großen Halbachse, welche um den Analysatorwinkel θ zur x-Achse rotiert ist. Die kleine Halbachse ist die Intensität I_{\min} . Die Daten stammen aus [2].

Diskussion

Die Polarisation dreht sich mit dem Grauwert und die Exzentrizität wird bei einem mittleren Grauwert minimal. Ersteres liegt daran, dass bei einem *Blanc Screen* der gesamte LC-Modulator näherungsweise als eine LC-Zelle aufgefasst werden kann. Diese dreht ohne angelegte Spannung die Polarisation des Lichtes um 90° . Bei maximaler Spannung dreht sie die Polarisation nicht mehr. Da der eingestellte Grauwert invers der angelegten Spannung entspricht (hoher Grauwert bedeutet hohe Durchlässigkeit der Zellen), wird hierdurch die Grauwertabhängigkeit der Ausgangspolarisation erklärt. Eine geringe Exzentrizität entspricht einer starken durchschnittlichen Abweichung von der Vorzugs-polarisationsrichtung. Hier ist das Licht also weniger einheitlich polarisiert. Dass dies bei einem mittleren Grauwert der Fall ist, zeigt, dass bei mittlerer angelegter Spannung nicht bei allen LC-Zellen die Polarisation gleich weit gedreht wird, während dies bei komplett fehlender oder maximaler Spannung eher der Fall ist.

4.5 Intensitätsverteilung in den Beugungsordnungen des unadressierten Displays

Der Tastgrad c ist definiert als das Verhältnis einer Impulsdauer τ zur Periodendauer T , also $c = \tau/T$. Übertragen auf die Transparenz der Pixel ist $c = t/g = 1 - i/g$. Wobei t die Ausdehnung des transparenten, i des intransparenten und $g = i + t$ des gesamten Pixels beschreibt.

Für Gitter gilt, dass das Produkt aus Periodizität im Realraum r und reziproken Raum P konstant ist, $rP = \text{const.}$ Im Experiment sind zwei Gitter simultan vorhanden, welche beide eine Fouriertransformation zur Folge haben. Ein Gitter definiert die Pixelgröße und eines entstammt der Steuerelektronik, die als ebenfalls periodisch, also als für jeden Pixel gleich aussehend, angenommen wird. Somit kann angenommen werden, dass:

$$gG = iI = \text{const.} \quad (8)$$

Wobei G und I die respektiven Periodizitäten im reziproken Raum sind und es folgt, dass sich das Transparenzverhältnis $c = 1 - i/g = 1 - G/I$ im reziproken Raum als Verhältnis der Frequenzen widerspiegelt.

In Abb. 6 sind die Intensitäten der vertikalen Maxima aufgetragen. Maxima sind deutlich bei $m = \{0, 4, 7, 9\}$ und Minima bei $m = \{3, 6, 8\}$. Der geringe Abstand zwischen den Maxima $\{7, 9\}$ und dem Minimum $\{8\}$, lässt darauf folgern, dass im Bereich nahe der 0. Ordnung ein weiteres Minimum existiert, aber nicht aufgelöst werden konnte. Und es lässt sich das Verhältnis der Frequenzen durch das Verhältnis der Maxima beschreiben $c_v = 1 - 4/9$. Da in Abb. 7 lediglich die ersten 6 Maxima aufgelöst werden konnten ist eine weitere Auswertung damit nicht möglich, jedoch mit Abb. 8, welche sich in dem Bereich von 0. bis 6. Maximum sehr ähnlich verhält. Somit stellt man analog in Abb. 8 fest, dass $c_h = 1 - 2/9$ beträgt und ebenfalls das erste Minimum nicht aufgelöst werden konnte. Mit einer Betrachtung der Unsicherheit, welche durch eine Rechteckverteilung der Breite 1 am Punkt $m = 9$ abgeschätzt wird, folgen mit $m = 9,0 \pm 0,3$ Tastgrade von $c_v = 0,556 \pm 0,015$ und $c_h = 0,778 \pm 0,007$. Die Rechteckverteilung wird angenommen, da wenn das Maximum sich irgendwo zwischen 8,5 oder 9,5 befindet, es dazu führt, dass man es beim Punkt 9 sieht, da zwischen den Maxima des Pixelgitters nicht gemessen werden kann.

Als grobe Abschätzung ergibt sich der Füllfaktor aus dem Produkt der Tastgrade:

$$\text{FF} \approx c_v c_h = (43,2 \pm 1,2) \% \quad (9)$$

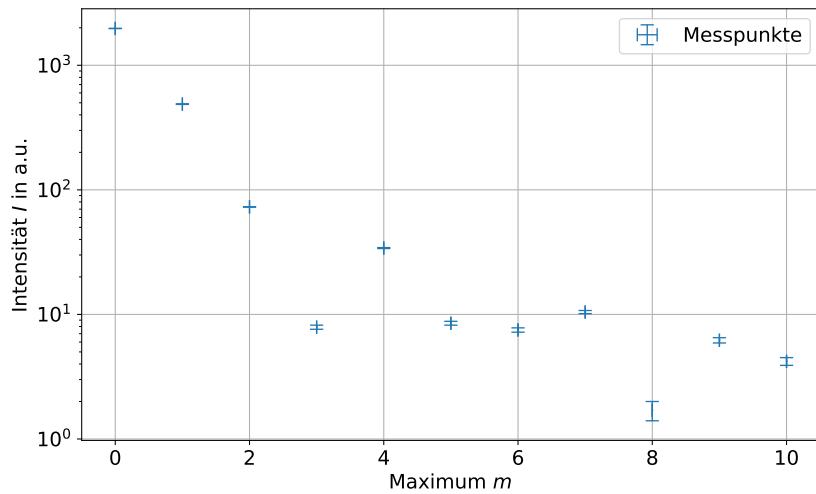


Abbildung 6: Messung der Intensität in Maxima der Gitterbeugung (durch das Pixelgitter) in vertikaler Richtung.

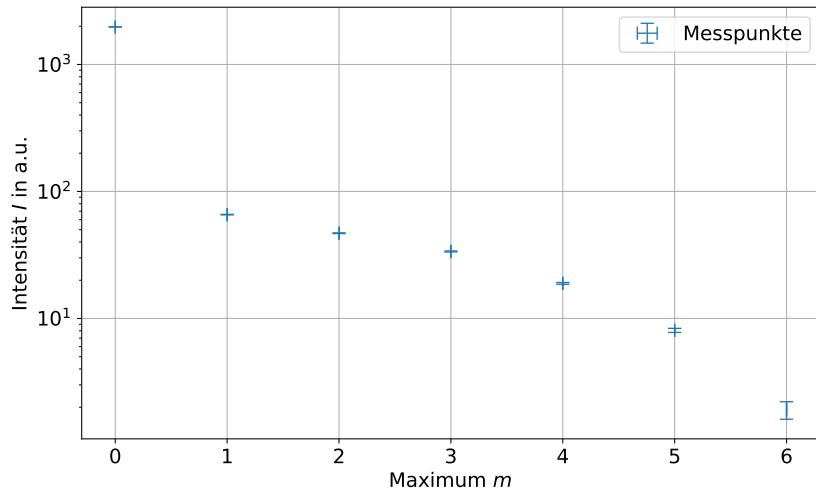


Abbildung 7: Messung der Intensität in Maxima der Gitterbeugung (durch das Pixelgitter) in horizontaler Richtung.

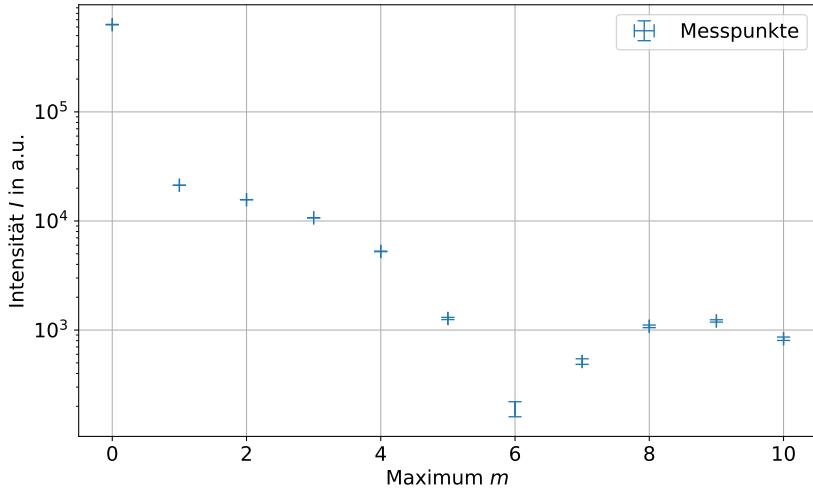


Abbildung 8: Messung der Intensität in Maxima der Gitterbeugung (durch das Pixelgitter) in horizontaler Richtung. Die Daten stammen aus [2].

Diskussion

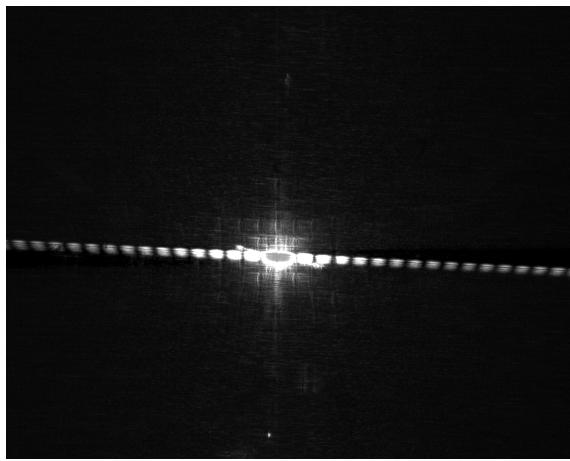
Horizontale Strukturen sind durch ihre Höhe definiert und vertikale durch ihre Breite. Außerdem verursacht ein Gitter mit vertikalen Spalten ein horizontales Beugungsbild und umgekehrt. Dementsprechend entspricht der vertikale Tastgrad horizontalen Strukturen und umgekehrt.

Der abgeschätzte Füllfaktor von $(43,2 \pm 1,2)\%$ ist um mehr als die Messunsicherheit geringer als der in [3] angegebene von etwa 55%.

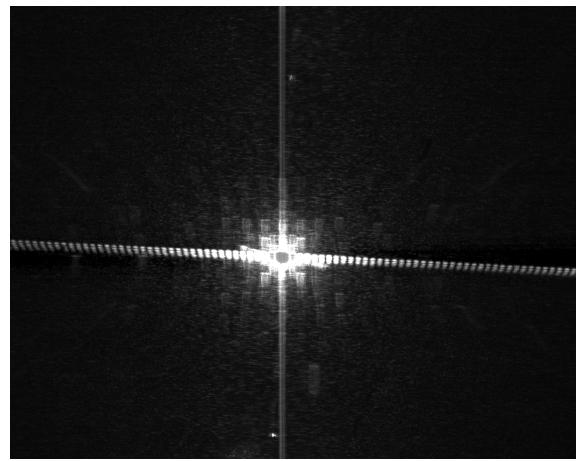
Jedoch ist die Messung durch die Ordnungen des Pixelgitters eingeschränkt: Wenn man die Untermodulation durch elektrische Ansteuerungselemente als periodisches Signal mit einer räumlichen Frequenz f_{Signal} in vertikaler oder horizontaler Richtung auffasst und die Messabstände durch das Pixelgitter als eine räumliche Abtastrate f_{Abtast} interpretiert, muss gemäß der Signaltheorie $f_{\text{Abtast}} > 2f_{\text{Signal}}$ (vgl. Nyquistfrequenz). Ansonsten treten Aliasing-Effekte auf. Dies kann bei dem gegebenen Aufbau allerdings nicht sichergestellt werden.

4.6 Beugungsbilder verschiedener DOEs

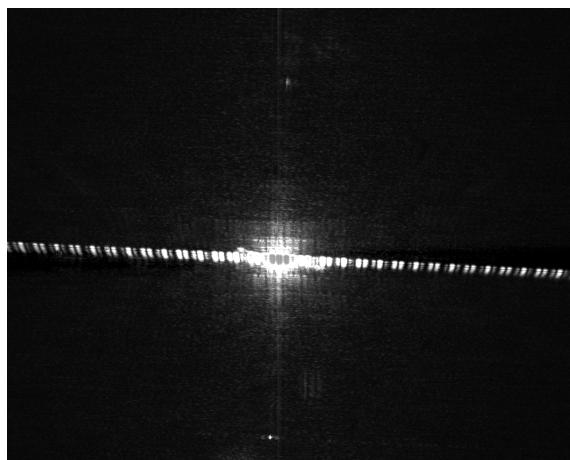
Abb. 9 zeigt jeweils 2 Beugungsbilder von einem Einzelspalt, Doppelspalt und Gitter.



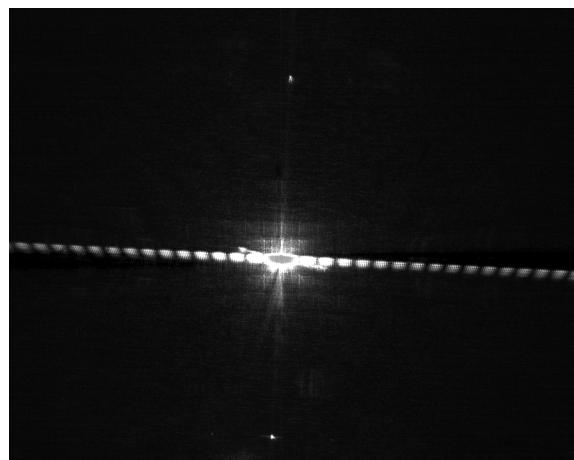
(a) Einzelspalt: Breite 20 px



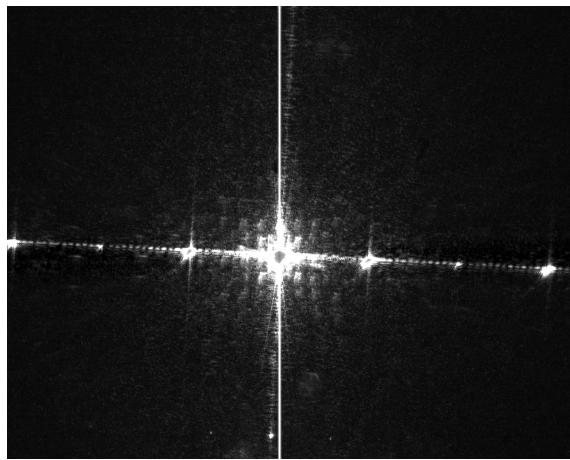
(b) Einzelspalt: Breite 50 px



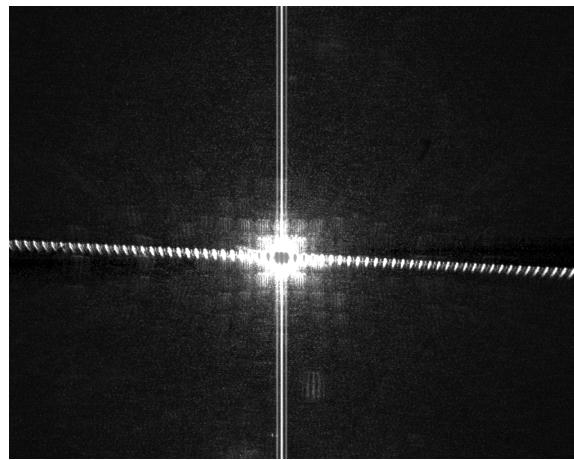
(c) Doppelspalt: Breite: 20 px, Abstand: 50 px



(d) Doppelspalt: Breite 20 px, Abstand: 200 px



(e) Gitter: Lücke: 2 px, Steg: 2 px



(f) Gitter: Lücke: 40 px, Steg: 40 px

Abbildung 9: Kameraaufnahmen verschiedener Beugungsbilder

Über Gleichung (10) ist der Beugungswirkungsgrad η definiert.

$$\eta = \frac{I_{1,\max}}{I_{0,\max}} \quad (10)$$

Es wurde ein Gitter mit Lücke und Steg von jeweils 20 px verwendet. In Tabelle 3 und Abb. 10 sind die Messwerte und resultierende Beugungswirkungsgrade angegeben.

Tabelle 3: Gemessene Intensitäten der 0. und 1. Hauptmaxima eines Gitters bei verschiedenen Grauwerten. Der Beugungswirkungsgrad ergibt sich aus dem Quotienten der Intensitäten nach Gleichung (10).

Grauwert	$I_{0,\max}$ /a.u.	$I_{1,\max}$ /a.u.	Beugungswirkungsgrad η
255	$541,0 \pm 3,0$	$16,26 \pm 0,30$	$0,0301 \pm 0,0006$
200	$514,0 \pm 3,0$	$15,90 \pm 0,30$	$0,0309 \pm 0,0006$
150	$394,0 \pm 3,0$	$12,00 \pm 0,30$	$0,0305 \pm 0,0008$
100	$142,0 \pm 3,0$	$5,40 \pm 0,30$	$0,0380 \pm 0,0023$
50	$59,0 \pm 3,0$	$2,85 \pm 0,30$	$0,048 \pm 0,006$
0	$37,0 \pm 3,0$	$1,62 \pm 0,30$	$0,044 \pm 0,009$

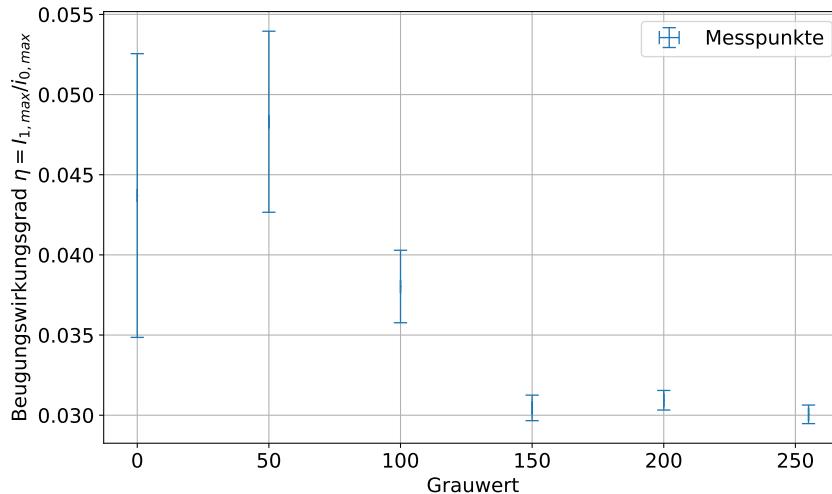


Abbildung 10: Messung der Intensität in Maxima der Gitterbeugung in horizontaler Richtung.

Diskussion

Die Intensität der Maxima nimmt, wie in Tabelle 3 zu erkennen ist, mit dem Grauwert zu. Dies entspricht der trivialen Erwartung, dass ein höherer Grauwert einer hohen Durchlässigkeit der LC-Zellen entspricht.

Bei der Betrachtung von Abb. 10 sieht es so aus, als würde der Beugungswirkungsgrad mit zunehmendem Grauwert abnehmen, aber aufgrund der hohen Messunsicherheiten ist diese Feststellung nicht signifikant. Das nicht signifikante Ergebnis widerspricht der Erwartung, da der Beugungswirkungsgrad das Verhältnis zwischen gebeugter Intensität und am LC-Modulator eintreffender Intensität darstellt und bei einem vollständig schwarzen Bild, also einem LC-Modulator mit minimaler Durchlässigkeit dieses Verhältnis minimal werden sollte.

Ein LC-Modulator kann Beugungsbilder erzeugen, da er kleine periodische Strukturen darstellen kann und somit ein Gitter simulieren kann.

Die qualitative Betrachtung von Abb. 9 zeigt, dass bei größeren Gitterabständen die Beugungsmaxima enger zusammenrücken, was der Erwartung auf Basis der Fouriertransformation entspricht. In Abb. 9c sieht man, dass beim Doppelspalt im Vergleich zum Einzelpunkt Nebenmaxima auftauchen. Im Vergleich der beiden Einzelpunkt lässt sich gut sehen, dass eine größere Spaltbreite zu geringeren Abständen der Beugungsordnungen führt, was ebenfalls mit der Fouriertransformation erklärt werden kann. Außerdem lassen sich für das Gitter in Abb. 9e erwartungsgemäß viele Nebenmaxima zwischen den deutlichen Hauptmaxima erkennen.

4.7 Brennweite eines Fresnel-Linsen-DOEs

Es werden Fresnel-Zonenplatten verschiedener Linsenphasen auf den LC-Modulator gegeben. In Abb. 11 sind die Brennweiten, gegen die eingestellten Linsenphasen aufgetragen. Da sowohl Anfang als auch Ende der Abstandsmessung zur Bestimmung der Brennweite nicht genau bekannt sind, wird eine höhere Unsicherheit von $u(f) = 0,2 \text{ cm}$ verwendet.

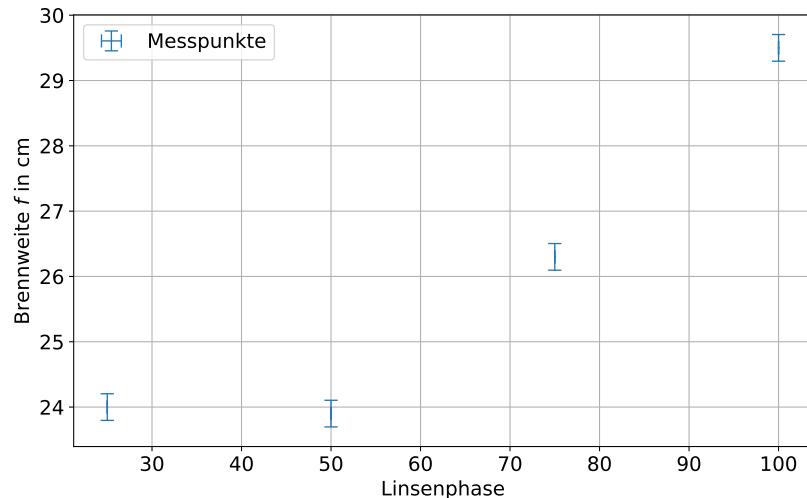


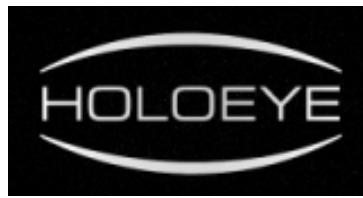
Abbildung 11: Die Brennweite f ist gegen die Linsenphase aufgetragen.

Diskussion

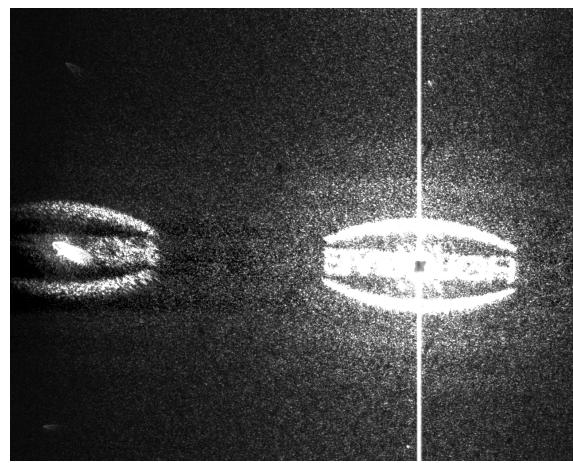
Wie in Abb. 11 zu erkennen ist, nimmt die Brennweite mit der Linsenphase zu. In den letzten drei Messpunkten sieht der Zusammenhang linear aus, aber um über die Art der Proportionalität eine Aussage treffen zu können, wären zusätzliche Messpunkte nötig. Computergesteuerte Hologramme können also als Linse variabler Brennweite verwendet werden.

4.8 Verschiedene DOEs als Hologramme

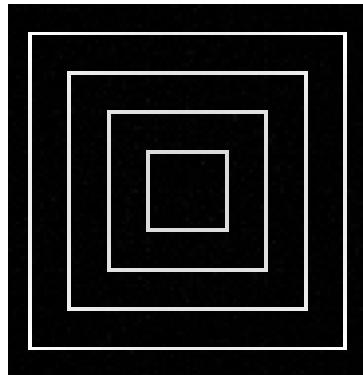
Abb. 12 zeigt einige mit der Kamera aufgenommene Beugungsbilder mit zugehörigen Originalen.



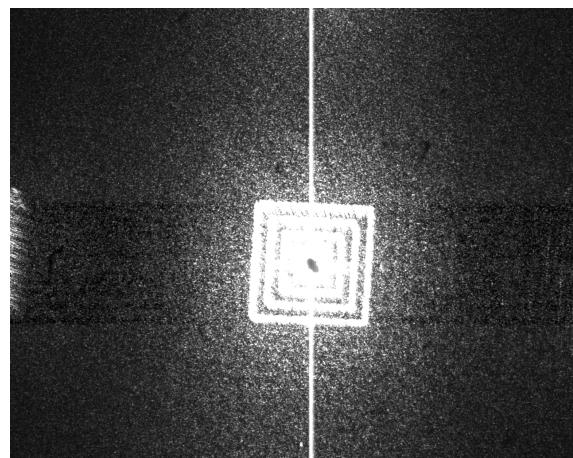
(a) Original



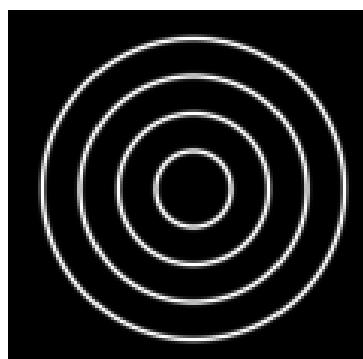
(b) Beugungsbild



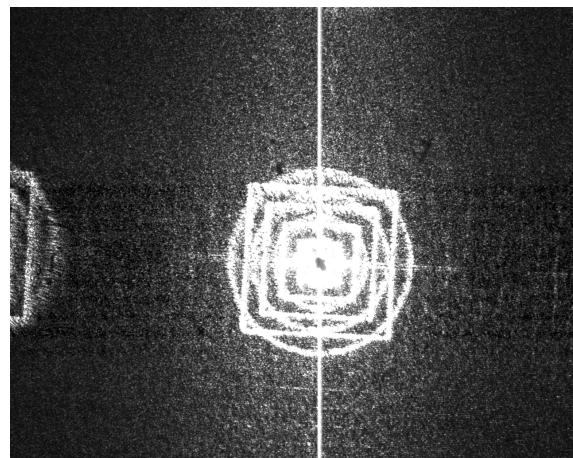
(c) Original



(d) Beugungsbild



(e) Orginal



(f) Überlagerung von Abb. 12c und Abb. 12e

Abbildung 12: Kameraaufnahmen verschiedener Beugungsbilder im Vergleich zum Original, dass an den LC-Modulator übermittelt wird.

Diskussion

In Abb. 12 ist gut zu erkennen, dass durch den LC-Modulator eine Fouriertransformation stattfindet, weshalb auf dem Kamerasensor wieder das ursprüngliche Bild abgebildet wird. Dabei tritt aufgrund des Strahlendurchgangs durch die Modulator eine Spiegelung auf (wie durch eine Fokussierlinse). Das in zwei Teile getrennte Hologramm führt in Abb. 12f zu einer Überlagerung der beiden Strukturen. Dies lässt sich auffassen als positive Frequenzen des einen Bildes und negative Frequenzen des anderen. Im Ortsraum entsteht dadurch die Überlagerung der beiden Bilder, da nicht zwischen positiven und negativen Frequenzen unterschieden wird. Anders gesagt beugt die eine Hälfte des LC-Modulators die Lichtstrahlen so auf den Sensor, dass Ringe entstehen und die andere so, dass Rechtecke entstehen.

Analog dazu würde sich bei einem statisch auf eine dünne Glasplatte aufgeprägten Hologramms bei Verwendung nur einer Hälfte der Glasplatte immer noch das volle Beugungsbild ergeben und nur die Intensität verringert werden.

5 Schlussfolgerung

Insgesamt gesehen lässt sich sagen, dass der verwendete LC-Modulator charakterisiert werden konnte und gezeigt werden konnte, dass er als variables DOE verwendet werden kann. Das Gesetz von Malus konnte bestätigt werden und die Eingangspolarisation des Modulators eingestellt werden. Die Pixelgröße wurde innerhalb der Messunsicherheiten in Übereinstimmung mit den Herstellerangaben bestimmt. Die Abhängigkeit der Ausgangspolarisation vom eingestellten Grauwert wurde untersucht und erklärt. Es wurden Beugungsbilder verschiedener DOEs aufgenommen und verglichen und der Modulator wurde als variable Fresnel-Linse verwendet sowie deren Brennweite in Abhängigkeit von der Linsenphase gemessen. Die Bestimmung der Proportionalität des Beugungswirkungsgrades zum Grauwert der Stege konnte nicht erfolgreich durchgeführt werden. Um hier zu einem Ergebnis zu kommen, könnte der Versuchsteil mit verschiedenen Gitterperiodizitäten durchgeführt werden. Zuletzt wurde der LC-Modulator verwendet, um Hologramme zu erzeugen, indem fouriertransformierte DOEs verwendet wurden.

Literatur

- [1] Universität Münster. *Experimentelle Übungen für Fortgeschrittene; Aufgaben im Institut für Materialphysik; Orientierungsordnung in Flüssigkristallschichten*. 19. Apr. 2017. URL: https://sso.uni-muenster.de/LearnWeb/learnweb2/pluginfile.php/1624127/mod_folder/content/0/MP5/MP5_Anleitung-de.pdf?forcedownload=1 (besucht am 06.01.2019).
- [2] Jannik Tim Zarnitz und Chris Lippe. *Laborbuch: Spatial Light Modulator*. 26. Nov. 2018.
- [3] Holoeye. *Optixplorer Handbuch v2.8*.