

Günther Wernicke
Sven Krüger
Marcel Rogalla
Stephan Teiwes

Das digital-optische Lasersystem

Eine neue Generation optischer Komponenten

Exponat auf der Laser 2003

Zwei innovative Bereiche der Optik, die diffraktive Optik und die adaptive Optik, finden ihre gemeinsame Umsetzung in einer sehr jungen Technologie, den räumlichen Lichtmodulatoren. Mikrodisplays, die Lichtwellenfronten hochauflösend in Amplitude und/oder Phase beeinflussen können, fungieren als schaltbare optische Komponenten, die als digital-analoge Schnittstelle optische Transmissionsfunktionen direkt aus dem Optik-Design auf reale Wellenfronten anwenden können. Optische Komponenten also, die sowohl als Linsen, Prismen, Gitter oder auch Hologramme agieren können.

»Optische Technologien erobern die Welt ... Laser für Materialbearbeitung und Mikrostrukturierung, in der Grafik- und Druckindustrie etc. – Photonen sind überall im Spiel, meistens in Verbindung mit Elektronik.« Dieser kurze Ausschnitt ist entnommen aus der Einleitung zur »Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert«, dem Leitfaden der optischen Technologien für die nächsten Jahre, in dem sowohl die Bedeutung als auch die Entwicklung der optischen Technologien postuliert wird. Doch schon in dieser Einleitung ist einer der wichtigsten Parameter für die optischen Technologien ablesbar: die elektronische Steuerung bzw. die digitale Schnittstelle – die Dynamik.

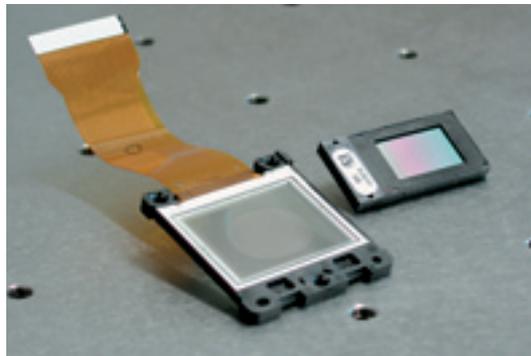


Abb. 2
Vergleich der Mikrodisplays des transmittiven LC 2002 (links) mit 800 x 600 Pixeln bei 32 µm Pixelgröße mit dem reflektiven LCOS Display mit 1920 x 1200 Pixeln bei einer Pixelgröße von 9,5 µm

In den letzten Jahren wurden an der Humboldt-Universität zu Berlin Untersuchungen an Mikrodisplay-Systemen für die Entwicklung von Lichtmodulator-Systemen (LMS) durchgeführt. Mit diesen Systemen ist es möglich, eine Vielzahl von Aufgaben auf dem Gebiet der Optischen Technologien zu bearbeiten. Ein solches Lichtmodulator-System kann als Objektiv mit variabler Brennweite, als Gitter mit schaltbarem Beugungswinkel, als Prisma und vor allem als diffraktiver Strahlteiler und Strahlformer eingesetzt werden. Dazu sind vor allem die Adressierungs- und Modulationseigenschaften, die sich mit neuen optischen Mikrodisplays auf der Basis von Flüssigkristallen auf Silizium (Liquid Crystal On Silicon, LCOS) realisieren lassen, für ihren Einsatz in der Steuerung von Laserlicht zu erforschen.

Schaltbare Optische Elemente

Ziel der Arbeit des Labors für Kohärenzoptik ist es, die wissenschaftlich-technischen Voraussetzungen für eine neue Generation von schaltbaren optischen Kom-

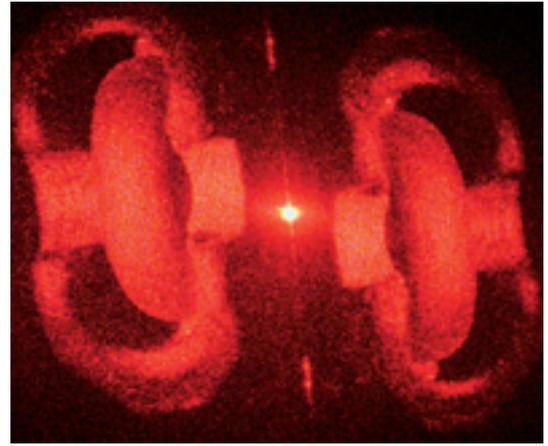


Abb. 1
Rekonstruktion eines digitalen Hologramms (Hologrammstruktur BIAS, Bremen)

ponenten zu schaffen. Ausgangspunkt ist die Ableitung eines Lichtmodulator-Systems unter optimaler Nutzung von bereits vorhandenen Kenntnissen der Display- bzw. Elektronikentwicklung. Dabei stehen hier sowohl Grundlagenuntersuchungen bzw. die industrielle Forschung als auch die vorwettbewerbliche Entwicklung des LCOS-LMS, d.h. die Umsetzung dieser Forschungsergebnisse in ein neues Produkt im Vordergrund. Hier gibt es seit einigen Jahren eine fruchtbare Zusammenarbeit mit der HoloEye Photonics AG, die sowohl Dienstleistungen auf dem Gebiet der diffraktiven Optik als auch Lichtmodulator-Systeme anbietet.

In gemeinsamen Projekten, die zum Teil vom BMBF gefördert werden, werden neue Anwendungen für solche Systeme untersucht und verschiedene Technologien verglichen. In Abb. 1 ist die Rekonstruktion eines digitalen Hologramms mit einem solchen Lichtmodulator-System zu sehen. Die Rekonstruktion von dreidimensionalen Wellenfronten erlaubt den Einsatz dieser Technologie für die interferometrische 3D-Formvermessung. Die Untersuchungen im Bereich Grundlagenforschung, die von der HoloEye Photonics AG durchgeführt werden, zielen vor allem auf eine exakte Charakterisierung der Displayadressierung und deren gezielte Manipulation. Das Know-How auf diesem Gebiet ist Basis für alle zukünftigen Anwendungen eines solchen Systems. Zusätzlich erweitern die Untersuchungen an der Humboldt-Universität und die Implementierung in die Testsysteme die Informationsmenge, aus der weiter potentielle Applikationen abgeleitet werden können.

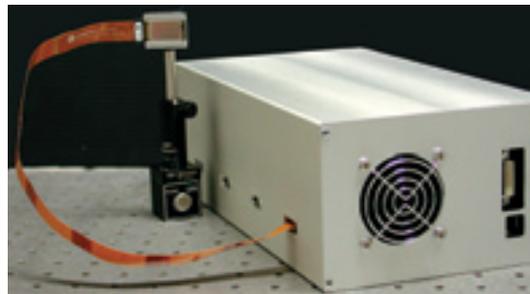
In den letzten Monaten wurde eine neue Generation von Mikro-Displays – die LCOS-Displays (Liquid-Crystal-On-Silicon) –, die ursprünglich für Anwendungen im Bereich der Unterhaltungselektronik konzipiert wurden, zu einer dynamisch adressierbaren optischen Komponente weiterentwickelt. Die bisherige Vermarktung des aktuellen Lichtmodulator-Systems der HoloEye Photonics AG LC 2002 hat gezeigt, dass ein steigender Bedarf an Lichtmodulatoren (LM) mit höherer Auflösung (kleinere Pixelstrukturen, größere Pixelanzahl) besteht.

Die technischen Vorteile liegen auf der Hand: LCOS-Systeme erreichen Pixelgrößen $<10\mu\text{m}$, Füllfaktoren von 92% und haben bis zu 3 Megapixel. Die Anordnung der LC-Moleküle erlaubt eine fast reine Phasenmodulation und die reflektiven Systeme haben auch eine wesentlich höhere Zerstörschwelle. Vorteile des Systems auf LCOS-Basis im Vergleich zum LC 2002 sind u.a. die Verringerung der Pixelgröße auf ein Drittel, der hohe Füllfaktor (92%), wesentlich höhere Zerstörschwelle durch das reflektive Display, die 4,8-fache Pixelanzahl, die kleinere optische Apertur, die hohe Licht- und Beugungseffizienz und die reine Phasenmodulation. Abb. 2 zeigt einen Vergleich der beiden Displays. Damit können so gut wie alle Anwendungen mit dem neuen System mit weitaus besseren Parametern bedient werden. An vielen Stellen, bei denen Vorgängermodelle als »Demonstratoren« einer möglichen innovativen Applikation dienen konnten, kann das neue System schon industriellen Parametern und Randbedingungen wie z.B. Lichteffizienz und Auflösung genügen. In Abb. 3 ist das LCOS-System im Prototypenstadium dargestellt. Hier können an eine Steuerlektronik drei Kanäle mit jeweils einem LCOS-Display angeschlossen werden.

Drei Haupteinsatzgebiete werden bereits in das Forschungsstadium integriert. Diese sind die optische Bildverarbeitung, die Lasermedizin bzw. verwandte Gebiete aus der Biophysik und die Lasermaterialbearbeitung. Wichtige Untersuchungen und Tests werden während der Forschungs- und Entwicklungsphase an drei Testsystemen in Zusammenarbeit mit potentiellen Nutzern durchgeführt:

1. Modulation eines Diodenlasers zur Generation komplexer Lichtmuster (Lichtschnitte, Linien, geometrische Rasterstrukturen, Punktklinien u.ä.)

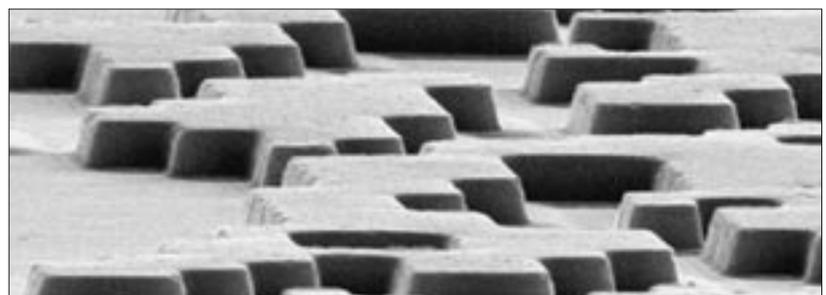
Bisher werden verschiedene optische Komponenten refraktiv wie diffraktiv zur Modulation des Diodenlasers genutzt. Hier zeigen diffraktive Elemente die Möglichkeit, nahezu beliebige Punktmuster zu generieren. Die Mikrostrukturierungstechnologie und die Möglichkeiten der Vervielfältigung dieser optischen Mikrostrukturen durch Replikation haben dieser Technologie zu vielen Einsatzmöglichkeiten verholfen. Auf diesem Gebiet wurden auch am Labor diverse Arbeiten durchgeführt. Aktuell wird die Möglichkeit der Vervielfältigung diffraktiver Strukturen durch Ausnutzung der CD-Herstellungstechnologie untersucht. In Abb. 4 ist die Rasterelektronenmikroskopaufnahme eines Nickel-shims dargestellt. Dies ist die galvanische Abformung von einer diffraktiven Masterstruktur, die als Werkzeug (Prägematrize) für die CD-Herstellung benutzt wird.



*Abb. 3
Lichtmodulatorsystem auf Basis eines WUXGA-LCOS Displays (1920 x 1200 Pixel, 9,5 μm Pixelgröße, 92% Füllfaktor)*

2. Modulation eines Nd:YAG-Lasers zur Generation von Mikromustern: Strahlteiler-elemente, die Punktmuster im Mikrometerbereich erzeugen und optische Pinzetten

Hier sind natürlich vor allem Anwendungen in den Bereichen Biotechnologie (Biochips) und Medizintechnik relevant. Wir konnten schon bisher mit diffraktiven Elementen Mikromuster erzeugen, die als »optische Pinzetten« bzw. als »optische Fallen« Einzelmoleküle



*Abb. 4
REM-Aufnahme (Rasterelektronenmikroskop) einer diffraktiven Struktur in Nickel (min. Strukturgröße lateral 1 μm , Tiefe 680 nm), Aufnahme: Dr. Rogaschewski Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin*

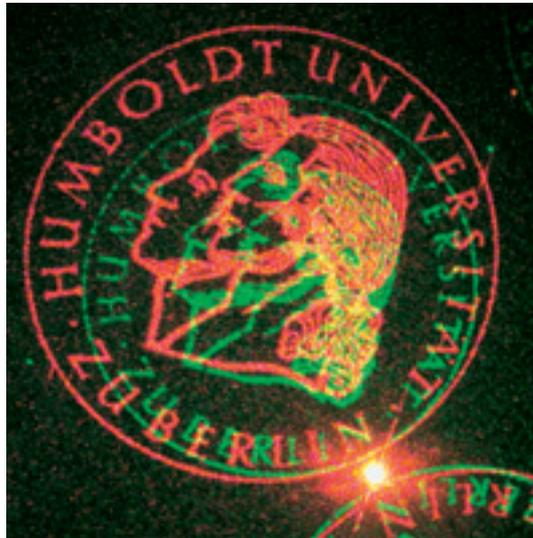
»fangen« bzw. bewegen konnten. Auch die simultane Anregung von einem Array von Molekülen auf den so genannten Biochips ist eine interessante Anwendung. Hier eröffnet das dynamische System neue Möglichkeiten. Die Darstellung eines nichtsymmetrischen Beu-



*Abb. 5
Rekonstruktion eines 256-stufigen Phasen-Fourierhologramms (adressiert auf einen LCOS-Lichtmodulator) mit einem grünen Festkörperlaser (Nd:YAG, 532 nm)*

Abb. 6

Simultane Rekonstruktion eines binären Fourierhologramms (adressiert auf einen LCOS-Lichtmodulator) mit einem roten HE-NE Laser (633 nm) und einem grünen Festkörperlaser (Nd:YAG, 532 nm)



gungsmusters ist in Abb. 5 gegeben. Je nach optischen Randparametern können die Punktabstände Millimeter aber auch nur wenige Mikrometer betragen, die dann ein mikroskopisch kleines Beugungsmuster bilden.

3. Modulation kurzer Laserpulse zur Materialbearbeitung (Beschriftungslaser): Strahlformung und Strahlteilung

Die Modulation von kurzen Laserpulsen für die Materialbearbeitung ist sicherlich eine grosse Herausforderung für das System, da hier vor allem periphere Parameter wie Zerstörschwellen und Schaltzeiten wichtig werden. Bisher konnten schon 30 mJ Pulse bei 5 ns moduliert werden. Aber in diesem Bereich ist der

Erfahrungsschatz noch sehr gering, Untersuchungen zu diversen Randbedingungen stehen noch aus. Nicht nur die modulierbaren Energien, sondern auch der Wellenlängenbereich ist hier von grossem Interesse. Die Abb. 6 zeigt die simultane Rekonstruktion eines Fourierhologramms, welches das »alte« HUB-Logo zeigt, mit zwei Laserwellenlängen.

An diesen Testsystemen, die beispielhaft für drei große avisierte Anwendungsbereiche stehen, werden die Leistungsparameter dieser Technologie verifiziert. Hier besteht durch den direkten Kontakt zu einem der führenden Displayhersteller die Möglichkeit, ein Lichtmodulatorgerät zu entwickeln und zu vermarkten, welches in seinen Parametern sehr nah an der aktuellen Mikrodisplayentwicklung liegt. Der Hersteller der Displays kann in dieser Entwicklung nicht als strategischer Partner, sondern nur als Lieferant dienen, da dessen Kundenspektrum eindeutig aus dem »Unterhaltungselektronik«-Bereich stammt, wo der Verkauf großer Stückzahlen von Displays im Vordergrund steht. Dennoch konnte der Kontakt so gefestigt werden, dass hinsichtlich der Verfügbarkeit der Displays selbst und den speziell entwickelten Treiberschaltkreisen eine feste Hardwarebasis besteht. Damit ist eine Grundlage für eigene Forschung und Entwicklung geschaffen.

Komplexe Modulation von Lichtmodulatoren

Die notwendigen Untersuchungen zur Charakterisierung eines Mikrodisplays hinsichtlich seiner Eignung als schaltbare diffraktive Struktur lassen sich grob in Untersuchungen zu kohärent-optischen und Adressierungseigenschaften einteilen. Die pixelweise Adressie-

Übersicht über die auf dem Markt verfügbaren Display-Technologien:

- *LC – Mikro-displays (transmission, TN-twisted nematic LC Zellen)*
 Hersteller: Sony, Epson, Sharp, Kopin, ...
 Die Auflösung dieser Displays geht bis zum UXGA-Format (1600 x 1200 Pixel) und die Pixelgröße konnte bis auf 15 µm reduziert werden. Der daraus resultierende schlechte Füllfaktor von 40% (Füllfaktor: Verhältnis von optisch nutzbarer zu lichtundurchlässiger Fläche) und eine Phasenmodulation, die nur gekoppelt mit einer Amplitudenmodulation realisiert werden kann, sind die offensichtlichen Nachteile dieser Technologie.
- *LC – Mikro-displays (reflektiv, ferroelektrisch – bistabil)*
 Hersteller: Displaytech, CRL-Opto, BNS

- Ferroelektrische Displays werden z.T. auch mit der LCOS-Technologie hergestellt, sie sind aber physikalisch meist bistabil und lassen somit nur eine binäre Modulation zu. In Auflösung und Pixelgrösse reichen sie an die LCOS-Technologie heran, hinsichtlich der Adressierungsfrequenz übertreffen sie sie um ein Vielfaches (bis 10 kHz).
- *DMD – reflective micro-mirror devices*
 Hersteller: Texas-Instruments
 Diese sind nur für Amplitudenmodulation, nicht für Phasenmodulation geeignet.
- *LCOS – Mikro-displays (reflektiv, nematisch, TN-twisted nematic oder vertically aligned)*
 Hersteller: TFS, JVC (D-ILA), Microdisplay, Hitachi.
 Hier ist die Erforschung und Nutzbarmachung für unsere Anwendungsfelder erforderlich.

rung der Mikrodisplays, die Adressierungsgenauigkeit und deren Modifikation werden in einem gekoppelten Abbildungs- und Diffraktionssystem untersucht. Dies ermöglicht die parallele Verifizierung von Adressierungseigenschaften und den optischen Eigenschaften als beugende Struktur.

Mikrodisplays – Stand der Technik und Marktsituation

Die Industrie der Mikrodisplays boomt durch die Entwicklung von Projektoren, Rückprojektions-TV-Geräten und dem »Digitalen Kino«, welches Projektorsysteme immer höherer Auflösungen verlangt. In den letzten Jahren ist mit der Entwicklung der LCOS-Technologie und der D-ILA Technologie (JVC) ein gewaltiger Sprung hinsichtlich Auflösungsvermögen und Displayparametern gelungen. Bisher haben verschiedene Firmen Mikrodisplays auf Basis der LCOS-Technologie entwickelt. Als wichtigste Unternehmen sind hier JVC, ThreeFive Systems, Hitachi, CRL-Opto, MicroDisplay und Displaytech zu nennen.

Alle diese Displays wurden ausschließlich für Projektionsanwendungen entwickelt. Eine eigenständige LCOS-Displayentwicklung für kohärent-optische Anwendungen existiert nicht. Es sind weltweit nicht einmal Systeme für die kohärente Optik, die technische Optik bzw. die Lasertechnik auf Basis der Projektionsdisplays zu erhalten.

Zum einen ist diese Technologie sehr jung und noch kaum etabliert, aber wichtige Gründe liegen auch in der Struktur der Mikrodisplay-Industrie. Die Displayhersteller wie Sony, JVC u.ä. sind nicht bereit, geringe Stückzahlen für spezielle Kundenanwendungen zu liefern.

In der Vergangenheit wurden Mikrodisplays vorrangig für die Anwendung in der Unterhaltungselektronik entwickelt. Deshalb wurde die Ableitung und die Herstellung von Geräten zur Modulation von Licht bei kohärenten Anwendungen eher für einen Nischenmarkt durchgeführt. Neben der HoloEye Photonics AG hat sich seit 1998 allein das Unternehmen »BNS, Boulder Nonlinear Systems, Inc.« in Lafayette, Colorado, USA mit Lichtmodulatoren für kohärente Anwendungen beschäftigt und Kompetenz auf diesem Sektor erworben. Weiterhin gibt es hier noch Unternehmen wie »CRL-Opto Ltd.«, Dunfermline, Scotland, »Displaytech, Inc.«, Longmont, Colorado, USA, sowie »The MicroDisplay Corporation«, San Pablo, CA, USA.

Alle Unternehmen dieser Gruppe bieten auf dem Markt, ähnlich wie »BNS« Entwickler-Kits an, die jeweils für Projektionsanwendungen vorgesehen sind.



PD Dr. Günther Wernicke

Jg. 1942. Studium der Angewandten Mechanik an der Universität Rostock, von 1969–83 an der Akademie der Wissenschaften, Promotion 1976 in Rostock, seit 1983 an der Humboldt-Universität, Habilitation 1991 an der TU Dresden.

Seit 1990 arbeitet er am Labor für Kohärenzoptik des Instituts für Physik und leitet seit 1993 verschiedene DFG- und BMBF-Projekte. Forschungsschwerpunkte: Anwendung der Kohärenzoptik in der Messtechnik und Informationsverarbeitung.

Kontakt

Humboldt-Universität zu Berlin
 Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I
 Institut für Physik (Photobiophysik)
 Newtonstr. 15
 D-12489 Berlin
 Tel.: (030) 2093-7897
 Fax: (030) 2093-7666
 E-Mail: guenther.wernicke@physik.hu-berlin.de



Sven Krüger

Jg. 1970. Studium der Physik in Berlin, Doktorant am Labor für Kohärenzoptik. Forschungsschwerpunkte: Optische Bildverarbeitung und Diffraktive Optik.

Kontakt

Humboldt-Universität zu Berlin
 Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I
 Institut für Physik (Photobiophysik)
 Newtonstr. 15
 D-12489 Berlin
 Tel.: (030) 2093-7916
 Fax: (030) 2093-7666
 E-Mail: skrueger@physik.hu-berlin.de

Marcell Rogalla

Jg. 1972. Studium der Betriebswirtschaft in Hamburg, seit 1999 Geschäftsführer von HoloEye Photonics AG.

Dr. Stephan Teiwes

Jg. 1964, Studium der Informatik an der Universität Karlsruhe, 1991–94 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Karlsruhe; 1994–97 am Berliner Institut für Optik, seit 1999 bei der HoloEye Photonics AG.

Kontakt

HoloEye Photonics AG
 Einsteinstrasse 14
 D-12489 Berlin
 Tel.: (030) 6392-3660
 Fax: (030) 6392-3662
 E-Mail: contact@holoeye.de