

Volumenhologramme – Datenspeicher der Zukunft

Cornelia Denz

Die Datenflut durch Bits und Bytes digitaler Informationen wird im Multimediazeitalter weiter wachsen. Der Speicherbedarf der Nutzer läßt daher die Grenzen herkömmlicher Speichersysteme langsam sichtbar werden. Hologramme dagegen können in Medien von der Größe eines Zuckerwürfels bereits ein Terabyte Daten erfassen. Das Prinzip: Ein Laser speichert in einem geeigneten optischen Material – zur Zeit üblicherweise Kristalle – elektronische Muster als Seiten ab. Das von uns realisierte System verändert die Phasenverteilung der zur Speicherung benötigten Referenzwelle, um diese Speicherdichten zu erreichen. So kann man die Daten ohne Bewegung oder Wellenlängenänderung der Referenzwelle mit hohen Geschwindigkeiten abrufen. Das System ermöglicht neben der Speicherung auch die Bildverarbeitung der gespeicherten Daten.

Die Datenspeicherung ist eine der großen Herausforderungen des ständig expandierenden Multimediemarktes. Datenarchivierung in Bibliotheken, in der Medizin oder im Bereich der Kunst verlangen nach hochkapazitiven Speichern, die ganze Bildseiten auf einmal speichern können. Gleichzeitig explodiert der Speicherbedarf im digitalen Datenbereich. Videodatenbanken, Netzwerkdienste oder Satellitenkommunikation sind einige der Gebiete, in denen in Zukunft Terabytes von Daten gespeichert und in wenigen tausendstel Sekunden abrufbereit sein müssen. Compact Disks können die Datenflut derzeit gerade noch bewältigen – eine Standard-CD-ROM speichert 650 Mbyte Daten –, den künftigen Bedarf an Speicherkapazitäten werden sie trotz neuer Entwicklungen wie der Digital Versatile Disk (DVD) jedoch bei weitem nicht abdecken können.

Hologramme gelten durch ihre parallele Speicherung als die Datenspeicher der Zukunft. Der

Grundgedanke der Holographie besteht darin, das vollständige, von einem Objekt ausgehende Lichtwellenfeld – also Amplitude und Phase – zu speichern. Dazu werden zwei kohärente Lichtwellen im holographischen Speichermedium überlagert, eine die Information tragende Objekt- oder Datenwelle und eine Referenzwelle. In der Hologrammebene entsteht dadurch ein Interferenzmuster, das wie bei der fotografischen Belichtung helle und dunkle Bereiche formt und dadurch die Information aufzeichnet. Beleuchtet später nur die Referenzwelle das Hologramm, so entsteht durch Beugung die ursprüngliche Objektwelle – die Holographie ermöglicht daher die volle räumliche Rekonstruktion eines Objektes.

Während die planaren Hologramme jeweils nur eine Bild- oder Datenseite erfassen, können Volumenhologramme weitaus höhere Speicherdichten erzielen. Je dicker das Material ist, desto exakter muß die Referenzwelle beim Auslesen mit derjenigen des Einschreibens übereinstimmen. Kleinste Änderungen im Beleuchtungswinkel, der Wellenlänge oder in der Phasenverteilung der Welle verhindern die Rekonstruktion. Auf dieser als Bragg-Selektivität bekannten Bedingung beruht das enorme Potential der Datenspeicherung: Jede Änderung eines dieser drei Parameter, welche die Eigenschaften des Volumenhologramms festlegen, ermöglicht das Einschreiben und Speichern eines neuen Bildes. Durch dieses auf Y. N. Denisyuk zurückgehende Verfahren lassen sich Hologramme an einem Ort überlagern, ohne daß diese sich gegenseitig stören [1]. Angeregt durch Fortschritte in der Laserentwicklung, entwickelten Van Heerden und andere in den sechziger Jahren ein Konzept zur volumenholographischen Datenspeicherung [2]. Doch die mangelnde Verfügbarkeit der entsprechenden Peripherieelemente wie Dateneingabemodulatoren und flächigen Detektionskameras ließ das Interesse an einem

solchen System bald wieder erlöschen. Mit der Verfügbarkeit dieser Geräte ist das Interesse an solchen parallelen Massenspeichern in den letzten Jahren wieder kontinuierlich gestiegen, wie insbesondere Forschungsaktivitäten in Spitzeninstituten und der Industrie in den USA und Japan zeigen. Wegen ihrer relativ langsamen Schreibzeiten im



Abb. 1: Photorefraktiver, eisendotierter LiNbO₃-Kristall zur Speicherung von Volumenhologrammen. Die bräunliche Färbung entsteht durch die Dotierung des Kristalls mit Eisenatomen, welche die für den photorefraktiven Effekt nötigen Ladungsträger zur Verfügung stellen.

Bereich von einigen hundert Millisekunden bis Sekunden pro Datenseite einerseits, den schnellen Zugriffszeiten und Datentransferraten andererseits, wird heute das Einsatzgebiet solcher Speicher insbesondere in umfangreichen Archivdatenbanken gesehen.

Photorefraktiver Effekt

Wie läßt sich nun eine solche Datenmenge in einem Volumematerial speichern? Dazu werden photorefraktive Materialien genutzt, die genau wie photographische Schichten oder Hologrammplatten auf helles Licht reagieren. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß sie einige wenige Fremdatome enthalten, die man entweder definiert beim Zuchtprozeß in das Material implantiert oder die durch Verunreinigungen entstehen. Bei Lichteinfall – z. B. durch ein Interferenzmuster, wie es bei der Überlagerung von Daten- und Referenzwelle in der Holographie vorliegt – können diese Defekte oder Störstellen sehr leicht Ladungen freisetzen. Das Licht transportiert dann diese Ladungen durch Diffusion oder Drift von den hellen, beleuchteten in dunkle Bereiche. Da jede bewegte Ladung eine unbewegliche Ladung mit entgegengesetztem Vorzei-

Dr. Cornelia Denz,
Institut für Angewandte Physik,
Technische Universität Darmstadt,
Hochschulstr. 6,
D-64289 Darmstadt

chen zurückläßt, wächst mit steigender Zahl der bewegten Ladungen integrativ ein statisches elektrisches Feld innerhalb des Kristalls, das schließlich imstande ist, das Kristallgitter leicht zu verschieben. Dadurch ändert sich der Brechungsindex im Material entsprechend der einfallenden Lichtverteilung.

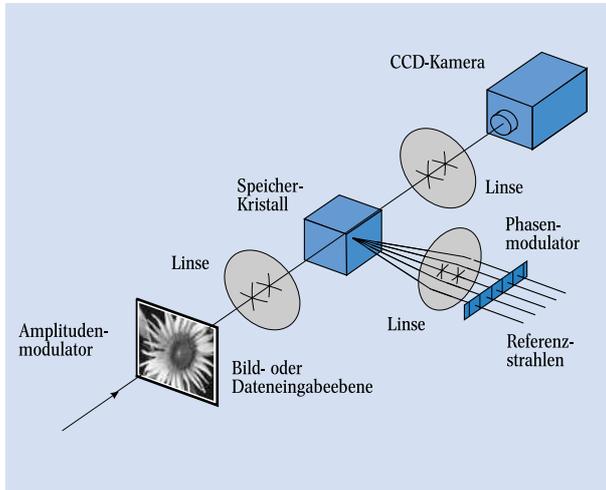


Abb. 2: Prinzip der volumenholographischen Speicherung durch Phasenkodierung: Im Speichermedium interferieren Daten- und Referenzwelle. Zur Unterscheidung der an einem Ort gespeicherten Datenseiten wird die Referenzwelle in Teilwellen unterteilt, in denen die Welle mit Hilfe eines Flüssigkristallmodulators jeweils im Vergleich zum Nachbargebiet eine definierte, binäre Phasenverschiebung erfährt. Jede Datenseite wird mit einem festen Set von N Referenzteilwellen gespeichert, der charakteristischen Phasenadresse.

lung, es bildet sich ein Brechungsindexgitter (siehe auch Phys. Bl., September 1996, S. 881). Dieses Brechungsindexgitter kann man als ein Miniaturhologramm im Kristallvolumen oder kurz als Volumenhologramm betrachten.

Im Gegensatz zu photographischen Aufnahmen lassen sich die eingespeicherten Bilder durch gleichmäßige Lichtflutung wieder löschen – photorefraktive Materialien sind reversible Aufzeichnungsmedien. Für die Anwendung in der optischen Datenspeicherung ist es essentiell, daß photorefraktive Materialien diesen Effekt bereits bei wenigen Milliwatt Laserleistung zeigen. Überdies ist die Brechungsindexänderung semipermanent: Wenn man einen photorefraktiven Kristall im Dunkeln geschützt vor jeder weiteren Lichteinstrahlung aufbewahrt, behält er den veränderten Brechungsindex je nach Material für einige Millisekunden (z. B. in GaAs) bis zu über tausend Jahren (LiNbO_3) bei. Damit die gespeicherte Information beim Lesen nicht wieder teilweise gelöscht

wird, kann man das Ladungsträgermuster durch thermische Prozesse fixieren oder die Speichermaterialien derart dotieren, daß gegen Leseleucht unempfindliche Brechungsindexstrukturen entstehen (siehe auch Phys. Bl., Sept. 1998, S. 790).

Phasenkodierung

Um ganze Bilder oder Datenseiten zu speichern, werden diese über einen Flüssigkristallmodulator dem aufgeweiteten Datenstrahl aufgebracht. Dadurch lassen sich sowohl analoge Grauwertbilder als auch binäre Darstellungen digitaler Datenpunkte transportieren. Eine Linse fokussiert das modulierte Licht, so daß es im Kristall mit der Referenzwelle interferiert. Strahlt nach der Bildung des Brechungsindexgitters der Referenzstrahl alleine auf das Material ein, so rekonstruiert er die vollständige Information des Datenstrahls.

Entscheidend bei der Realisierung eines volumenholographischen Datenspeichers ist das Verfahren zur Kodierung der Referenzwelle. Es muß garantieren, daß alle an einem Ort überlagerten Datenseiten unabhängig und ohne Übersprechen rekonstruiert werden können. Ein solches auch als „Multiplexing“ bekanntes Verfahren läßt sich aufgrund der oben erwähnten Bragg-Bedingung über die Änderung des Referenzwellenwinkels oder der Referenzwellenlänge realisieren [3].

Die Zahl der Bilder oder Datenseiten, die mit diesen Verfahren an einem einzigen Ort im Speicherkristall untergebracht werden können, hängt nur von der Zahl der Ladungsträger ab, die zur Erzeugung des Brechungsindexmusters zur Verfügung stehen. Je mehr Hologramme sich diese Ladungsträger teilen müssen, desto schwächer wird jedes einzelne. Der Prozentsatz des von jedem Hologramm abgelenkten und zur Rekonstruktion des Bildes zur Verfügung stehenden Lichtes – gekennzeichnet durch den Beugungswirkungsgrad η – ist umgekehrt proportional zum Quadrat der Anzahl der gespeicherten Hologramme N : $\eta_N = \eta_0 / N^2$. Kann ein Kristall z. B. 80 % des Lichtes mit einem Brechungsindexgitter umlenken, stehen für jedes von 1000 Hologrammen ca. $8 \cdot 10^{-5}$ % Beugungseffizienz zur Verfügung. Solange die Detektionskamera diese Intensität noch ohne Störungen vom Hintergrund rauschen unterscheidet, kann

sie ein Bild mit dieser Beugungseffizienz speichern und auslesen.

Bei einem nur 10 mm dicken Kristall kann man in einem Bereich von zehn Grad oder zehn Nanometern Wellenlänge 1000 Datenseiten unabhängig überlagern. Faßt ein Bild ca. 1000×1000 Bildpunkte, sind damit in einem Volumen von einigen Kubikmillimetern bei binären Daten 10^9 Bits oder bei Graustufen von z. B. 16 Graustufen oder 4 Bits schon fast 500 Mbyte speicherbar. Verteilt man zahlreiche solcher Speicherorte räumlich über das Speichermedium, sind bisher nicht erreichte Speicherkapazitäten möglich. Während bei der Wellenlängenveränderung die mangelnde Verfügbarkeit einer Laserlichtquelle mit fein und gleichzeitig breitbandig abstimmbarer Wellenlänge eine Realisierung zur Zeit schwierig macht, sind mit Hilfe des Winkelmultiplexing insbesondere in den USA bereits einige Demonstrationssysteme entstanden. Dabei erfährt die Referenzwelle allerdings entweder eine Bewegung oder eine Frequenzänderung.

Als weitere Möglichkeit läßt sich auch die transversale Verteilung der Referenzwellenphase ausnutzen, um bei jeder Speicherung die an einem Ort überlagerten Datenseiten zu unterscheiden. Bei dieser Phasenkodierung [4] unterteilt ein Hologramm die Referenzwelle in verschiedene Teilgebiete, in denen die Welle mit Hilfe eines Flüssigkristallmodulators jeweils im Vergleich zum Nachbargebiet eine definierte, binäre Phasenverschiebung erfährt (siehe Abb. 2). Jedes Bild oder jede Datenseite wird daher mit einem festen Set von N Referenzteilwellen gespeichert – der charakteristischen Phasenadresse.

Da alle Referenzteilwellen mit einem diskreten Winkelspektrum auf den Speicherkristall auftreffen, wird genau wie bei der Winkelkodierung die Bragg-Bedingung für die einzelnen Referenzteilwellen eingehalten. Im Gegensatz zur Winkelkodierung wechselwirken hier jedoch alle Referenzwellen gleichzeitig mit der Datenwelle – es ist nicht die Richtung der Referenzwellen, die von Bild zu Bild verändert wird, sondern deren relative Phasenlage. Die maximale Zahl von Datenseiten, die in einem Wechselwirkungsvolumen gespeichert werden kann, ist dabei nur durch die Zahl der Referenzwellen festgelegt. Jede gespeicherte Datenseite wird

unabhängig von einer anderen mit dem entsprechenden Phasencode rekonstruiert. Während des Auslesevorgangs interferieren unerwünschte Bildteile destruktiv, so daß sie sich gegenseitig auslöschen. Nur die entsprechenden, mit dem Lesekode geschriebenen Bildanteile interferieren konstruktiv und ergeben die vollständige Rekonstruktion des Bildes. Dieses zugrundeliegende Prinzip der destruktiven Interferenz als ein Mittel der selektiven Auslese ist der Grund für das signifikant höhere Signal-zu-Rausch-Verhältnis dieser Methode verglichen mit der Winkel- oder Wellenlängenkodierung [5].

Die Phasenkodierung ermöglicht es als einziges der drei Speicherverfahren, auch optische arithmetische Operationen der gespeicherten Bilder in Echtzeit zu realisieren. In dem lediglich eine Untermenge der zur Speicherung genutzten Referenzteilwellen beim Auslesen ausgenutzt und damit die Selektivität der Phasenkodes herabgesetzt wird, können mehrere Datenseiten den gleichen oder gerade um 180° phasenverschobenen Phasencode erhalten, so daß gleichzeitig diese Datenseiten rekonstruiert und dadurch die Daten addiert bzw. subtrahiert werden [6]. Außerdem erlaubt das Konzept der Phasenmodulation die einfache Realisierung von Datenverschlüsselungstechniken, die gerade bei der Archivierung vertraulicher Daten von essentieller Bedeutung sind.

Das Speichersystem

Das kompakte und vollständig durch einen Rechner gesteuerte Speicher- und Bildverarbeitungssystem ist in Abb. 3 gezeigt (siehe auch [7]). Dabei wird ein grüner Laserstrahl eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers in einen Referenz- und einen Datenarm aufgespalten. Beide Teilstrahlen von jeweils nur wenigen Milliwatt Leistung werden in ebene Wellen aufgeweitet und räumlich moduliert. Ein als räumlicher Lichtmodulator eingesetztes Flüssigkristalldisplay prägt die analogen Bilddaten oder das digitale Muster dem Lichtstrahl auf. Anschließend wird der Bildstrahl im LiNbO_3 -Kristall mit dem Strahl des Referenzarmes überlagert. Dieser ist durch ein im Referenzstrahl eingebrachtes computergeneriertes Phasenhologramm in 480 Teilstrahlen aufgespalten. Beim Durchgang durch einen nachfolgenden zeilenförmigen Flüssigkristall-Phasenmodulator – er besitzt ebenfalls 480 Streifen mit einer Streifenbreite von $60 \mu\text{m}$ – werden diese Teilstrahlen dann binär in der Phase verändert – sie erhalten also entweder den Phasenwert 0 oder π . Für jede Datenseite erhält die Referenzwelle durch den Steuercomputer den charakteristischen Phasencode zugewiesen.

Unser System speichert an einem Ort mit dem zur Zeit verfügbaren Phasenmodulator 480 Datenseiten mit einer Seitengröße von 480×640 Bildpunkten (37,5 Kbyte) in einem nur wenige Kubikmillimeter kleinen Volumen. Damit enthält ein Spei-

cherort eine Speicherkapazität von 17 Mbyte, die sich beim Einsatz von 16 Graustufen auf 70 Mbyte erhöhen würde. Durch Verwendung höchstauflösender Phasenmodulatoren ließe sich diese Kapazität mindestens um einen Faktor zwei verbessern, so daß ein solches Speichersystem einige zehn Gigabyte pro Kubikzentimeter erfassen könnte. Die Auslesezeit unseres Systems ist physikalisch nur durch die Zugriffszeit des Phasenmodulators begrenzt. Das von uns verwendete Streifendisplay erlaubt die Schaltung einer Datenseite in 10 ms, so daß eine Auslesezeit von 100 Hz möglich wird. Damit kann man eine Ausleserate von 30 Mbits/s bei binären Daten erreichen. Zur Zeit ist die Datenferrate jedoch hauptsächlich durch die genutzte CCD-Kamera sowie den Steuercomputer limitiert.

Mit unserem Demonstrationssystem haben wir sowohl analoge als auch digitale Bilddaten gespeichert. Abbildung 4 zeigt Beispiele für die Speicherung analoger Daten mit mehreren Graustufen, wie sie z. B. für Anwendungen in der Medizintechnik sowie für die Archivierung von medizinischen Aufnahmen, Kunstsammlungen, archäologischen Funden und Bibliotheksbeständen benötigt werden. Viele zukünftige Anwendungen des Speichers liegen außerdem im Bereich der digitalen Datenarchivierung. Um das System den Anforderungen der digitalen Speicherung anzupassen, wurden jeweils Felder von 5×5 Bildpunkten des Daten-Amplitudenmodula-

Abb. 3:

In dem Datenspeichersystem wird das Licht eines frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers (links) in einen Datenarm und einen Referenzarm aufgeteilt. Im Datenarm prägt ein Flüssigkristallmodulator (links, vorne) die Bilder dem Signalstrahl auf. Im Referenzarm wird ein zeilenförmiger Lichtmodulator (rechts, Mitte) dazu genutzt, dem Referenzstrahl ein bestimmtes, charakteristisches Phasemuster aufzuprägen. Beide Strahlarme überlagern sich im photorefraktiven LiNbO_3 -Kristall (siehe Ausschnitt), der aus dem entstehenden Lichtmuster ein Volumen hologramm erzeugt und im Material speichert. Das nächste Bild wird dann durch Änderung des Phasemusters aufgezeichnet. Durch Beleuchten des Kristalls mit dem jeweiligen Phasemuster werden die entsprechenden Datenseiten rekonstruiert und können mit der CCD-Kamera (rechts, vorne) aufgenommen werden.

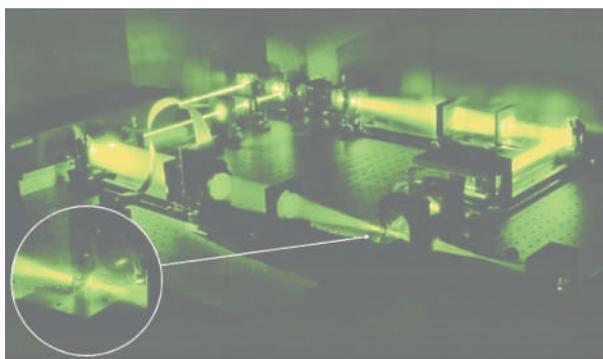


Abb. 4:

Rekonstruierte Grauwertbilder des phasenkodierten Speichers. Mögliche Anwendungsgebiete sind die Archivierung von Daten in der Medizin, z. B. als Röntgen- oder Tomographiebilder, aber auch die Kunst und Kunstgeschichte, Archäologie, Kartographie und das Bibliothekswesen.

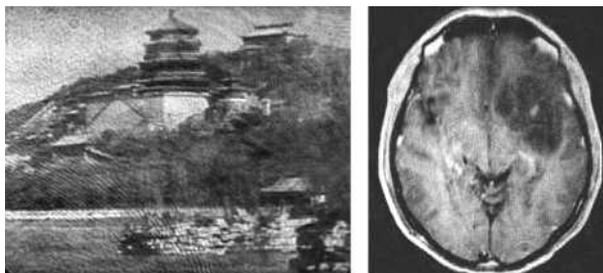
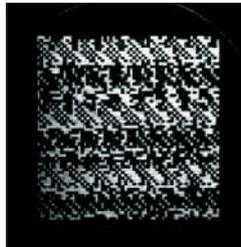


Abb. 5:
Speicherung von digitalen Daten. Die Abbildung zeigt exemplarisch eine ausgelesene Datenseite sowie die Rekonstruktion des digitalen Bildes.



tors zu einem binären Bit zusammengefaßt. Diese Methode des *Oversamplings* erlaubt es, die Bitfehlerübertragungsrate, die hauptsächlich durch Abbildungsfehler der verwendeten Optiken entsteht, drastisch zu reduzieren. Wegen der reduzierten Speicherkapazität pro Datenseite wird das zu speichernde digitale Bild auf mehrere Datenseiten verteilt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die Rekonstruktion einer Datenseite sowie die vollständige Rekonstruktion des 256-Farben Bildes. Die resultierende, rein optische Bitfehlerrate beträgt $6 \cdot 10^{-3}$ – ein für Anforderungen in der Datenspeicherung zwar recht hoher, doch bei volumenholographischen Speichersystemen üblicher Wert. Untersuchungen von verschiedenen Autoren zeigen jedoch, daß man diesen Wert durch Anwendung von Modulations- und Fehlerkorrekturcodes bei der Datenspeicherung um bis zu zehn Zehnerpotenzen verringern kann [8].

Für den Objektvergleich, die Datenreduktion oder die Extraktion charakteristischer Merkmale von Bildern können mit Hilfe der Phasenkodierung vollständige Daten-seiten beliebig parallel addiert, subtrahiert oder invertiert werden. Dieses Verfahren ist besonders interessant für den Vergleich von Daten untereinander, z. B. den Vergleich gespeicherter Fingerabdrücke, verschiedener Röntgenbilder oder von Kunstwerken und deren Reproduktionen bzw. Fälschungen. Ebenso lassen sich durch Addition wenig intensive Bilder in ihren Kontrasten verstärken oder durch Überlagerung verschiedene Bildelemente kombinieren. Abbildung 6 zeigt drei gespeicherte Bilder des Systems, deren optische Addition (konstruktive Interferenz) und ihre Subtraktion (destruktive Interferenz). Letztere liegt durch die Intensitätsmessung mit der CCD-Kamera nur als absoluter Betrag vor, obwohl der Subtraktionsprozeß an sich das Vorzeichen der Operation aufgrund seiner kohärenten Natur beibehält und daher

dieses auch für weitere Verarbeitungsschritte zur Verfügung steht. Die Bildinversion entsteht durch die Subtraktion einer im Speicher abgelegten ebenen Welle vom zu invertierenden Bild (Abb. 6c). Werden diese Operationen auf binäre Daten angewandt, können die logischen Operationen XOR (Subtraktion), OR (Addition) oder NOT (Inversion) mit den gespeicherten Daten-seiten direkt bei der Rekonstruktion realisiert werden.

Schlußbemerkungen

Unser erstmals mit Hilfe der Phasenkodierung realisiertes Speichersystem zeigt, daß die Manipulation der Phase bei der Wechselwirkung von Laserstrahlen in photorefraktiven Materialien sowohl für die hochkapazitive Bild- und Datenspeicherung als auch für die optische Informationsverarbeitung neue, attraktive Perspektiven eröffnet. Wesentliche Impulse für die weitere Entwicklung solcher Systeme kommen zur Zeit aus der wachsenden optoelektronischen Industrie. Die Entwicklung hochauflösender Flüssigkristallmodulatoren wird die Menge der auf einer Datenseite speicherbaren und verar-

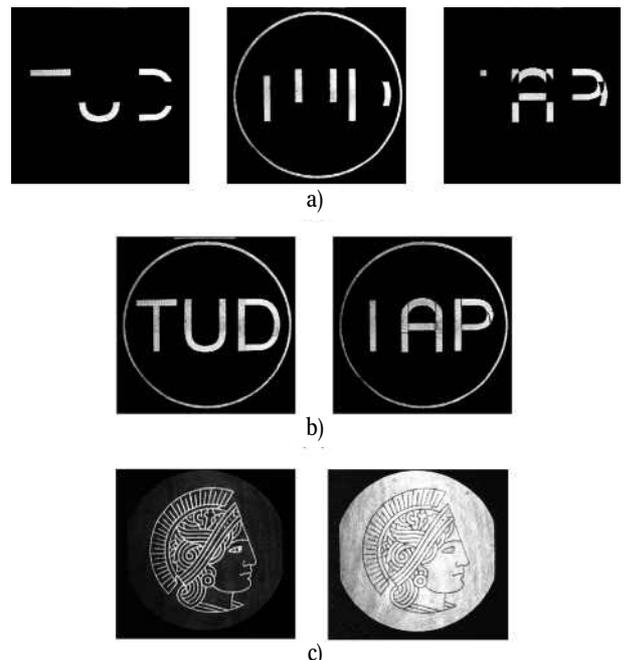
beitbaren Daten in den nächsten Jahren dramatisch erhöhen. Gleichzeitig kommen für Video- und Fotokameras entwickelte CCD-Detektorchips auf den Markt, die diese hohen Eingabedichten auch auflösen und durch parallele Strukturen schnell weiterverarbeiten können. Schließlich treibt die Entwicklung kompakterer, stabilerer Halbleiteler Laser die Realisierung von technisch anspruchsvollen, miniaturisierten Geräten voran.

Als verbleibende Herausforderung steht zur Zeit die Realisierung kostengünstiger, leicht und reproduzierbar herstellbarer photorefraktiver Materialien im Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses. Die hier vorgestellten photorefraktiven Einkristalle müssen nach einem langwierigen und durch die Auswirkungen kleinster Mengen von Stör- oder Dotierstoffen oft wenig kalkulierbaren Zuchtprozeß gepolt und poliert werden, so daß sie in der Herstellung extrem aufwendig und teuer sind. Neuartige Polymere eröffnen inzwischen jedoch Perspektiven für alternative Volumenmaterialien, die sowohl die Datenspeicherung als auch die Informationsverarbeitung erlauben.

Danksagung

Die Realisierung des hier vorgestellten Speichersystems ist nur durch enge Teamarbeit möglich. Zu den beteiligten Diplomanden und Doktoranden gehören Dipl.-Phys. K.-O. Müller, Dr. T. Rauch und cand.-phys. T. Heimann, aber auch die ehemaligen Diplomanden

Abb. 6:
Realisierung von Bildverarbeitungs-funktionen wie Addition, Subtraktion und Inversion. Bei der selektiven Reduzierung der Phaseninformation werden gespeicherte Bilder (a) gleichzeitig ausgelesen (b). Je nachdem, wie ihre Wellenphase zueinander im Verhältnis steht, kann man so die Addition (b, links) oder Subtraktion der Bilder (b, rechts) erreichen. Durch gleichzeitige Speicherung einer ebenen Welle kann man die Bildinformation invertieren (c).



J. Lembcke, T. Dellwig und J. Trumfheller. Unser besonderer Dank gilt Prof. T. Tschudi für die fortwährende Unterstützung des Projektes. Unseren Kooperationspartnern, Dr. N. Frühauf, Prof. E. Lüder, Institut für Netzwerk- und Systemtheorie, Universität Stuttgart, sowie Dr. S. Sinzinger, Prof. J. Jahns, Institut für optische Nachrichtentechnik, Fernuniversität Hagen, danken wir für die Erstellung des Phasenmodulators bzw. des computergenerierten Hologrammes. Die Realisierung des Projektes wurde möglich durch die Unterstützung der Deutschen Telekom und der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie in Teilen durch Förderung im Rahmen eines ESPRIT-Programmes der Europäischen Gemeinschaft.

Literatur

- [1] Y. H. Denisyuk, siehe Hecht „Optik“, S. 641
- [2] P. van Heerden, Appl. Opt. **2**, 393 (1963)
- [3] siehe z. B. C. Denz, „Optical Neural Networks – an Introduction with Special Emphasis on Photorefractive Optics“, Vieweg-Verlag, Januar 1998
- [4] C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, T. Tschudi, Opt. Comm. **85**, 171 (1991); C. Denz, G. Pauliat, G. Roosen, T. Tschudi, Appl. Opt. **31**, 5700 (1992); J. Lembcke, C. Denz, T. Tschudi, Opt. Mat. **4**, 428 (1995); Y. Taketomi, J. E. Ford, H. Sasaki, J. Ma, Y. Fainman, S. H. Lee, Opt. Lett. **16**, 1774 (1991)
- [5] K. Curtis, D. Psaltis, J. Opt. Soc. Am. A **10**, 2547 (1993); M. C. Bashaw, A. Aharoni, J. F. Walkup, L. Hesselink, J. Opt. Soc. Am. B **11**, 1820 (1994)
- [6] J. F. Heanue, M. C. Bashaw, L. Hesselink, Opt. Lett. **19**, 1079 (1994); C. Denz, T. Dellwig, J. Lembcke, T. Tschudi, Opt. Lett. **21**, 278 (1996)
- [7] C. Denz, Dossier Laser, Spektrum der Wissenschaft **1**, 65 (1998); K.-O. Müller, C. Denz, T. Rauch, T. Heimann, T. Tschudi, Optic. Mem. & Neural Netw. **4**, 1 (1998)
- [8] G. W. Burr, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, Opt. Lett. **23**, 289 (1998)