

H. Völz

Dies ist eine stark verkürzte Version aus meinem Band 3 Handbuch der Speicherung

Der erste blaue Laser mit 405 nm wurde 1998 in Japan vorgestellt. Der Preis betrug aber noch etwa 2 000 Dollar. Er besteht aus etwa 120 Schichten von abwechselnd je 25 nm reinem und 2,5 nm leicht mit Al dotiertem GaN. Für Wellenlängen um 400 nm ist reines Polycarbonat nicht mehr hinreichend lichtdurchlässig. Doch seit 1953 steht hierfür das von der Bayer AG entwickelte Makrolon auf Polycarbonatbasis zur Verfügung. Es besitzt sehr hohe Transparenz, gute Festigkeit, Zähigkeit, Schlag- und Bruchfestigkeit sowie herragende Wärmeform- und Witterungsbeständigkeit. Ab ca. 2003 waren die wichtigsten Grundlagen für blaue Speichermedien vorhanden. Es entstehen zumindest zwei hart konkurrierende Techniken: BD und HD-DVD. Außerdem scheiterte die technische Realisierung von entsprechenden Video-Speichern bis jetzt (Mitte 2006) daran, dass der neue Kopierschutz **AACS** (advanced access content system) noch nicht fertig ist. Auch die Kopplung des Systems an HDTV (high definition television) könnte Probleme ergeben. Doch bereits im Herbst 2005 stellte Sony wieder die Produktion der bereits eingeführten PDD ein. Doch Plasmons UDO hatte sich bereits seit 2003 auf diesem Markt etabliert und beherrscht nun faktisch allein – unter Mitwirkung von Hewlett Packard – diese Technik mit sehr gutem Erfolg. Für die Anwendungen der „blauen Medien“ im Konsum-Bereich werden vorwiegend die beiden Varianten BD und HD-DVD diskutiert. In alphabetischer Reihenfolge sind unten die bekannt gewordenen Systeme aufgezählt. Einige verfügbare Daten fasst die **Tabelle** im Vergleich zur CD und DVD zusammen.

AOD	advanced optical disc, <i>jetzt</i> HD-DVD
AO-DVD	articulated optical DVD, Iomega, Spiegelflächen (Backup)
BD	Blu-ray-disc, Sony/Philips → Blu-ray-Forum
EVD	enhanced versatile disc, chinesische Alternative
FVD	finalized versatile disc, taiwanesishe Alternative
HD-DVD	high density DVD, Toshiba u.a. → Advanced Optical Disc-Consortium
HDV	high-definition digital video, chinesische Alternative, nur Name bekannt
HVD	high-definition versatile disc, chinesische Alternative, nur Name bekannt
HVD	holographic versatile disc, InPhase/(Bayer-Medium?)
MICA	information-multilayered imprinted card, holographisch, NTT (Backup)
MODS	multiplexed optical data storage, asymmetrische Pits, Spiegel, 332 Richtungen
PDB	professional disc for broadcast, Sony
PDD	professional disc for data, Sony, <i>Herbst 2005 beendet</i>
UDO	ultra density optical, Plasmon, Basis BD + Cartridge (Backup, s. Abschnitt 3.8.2.1)

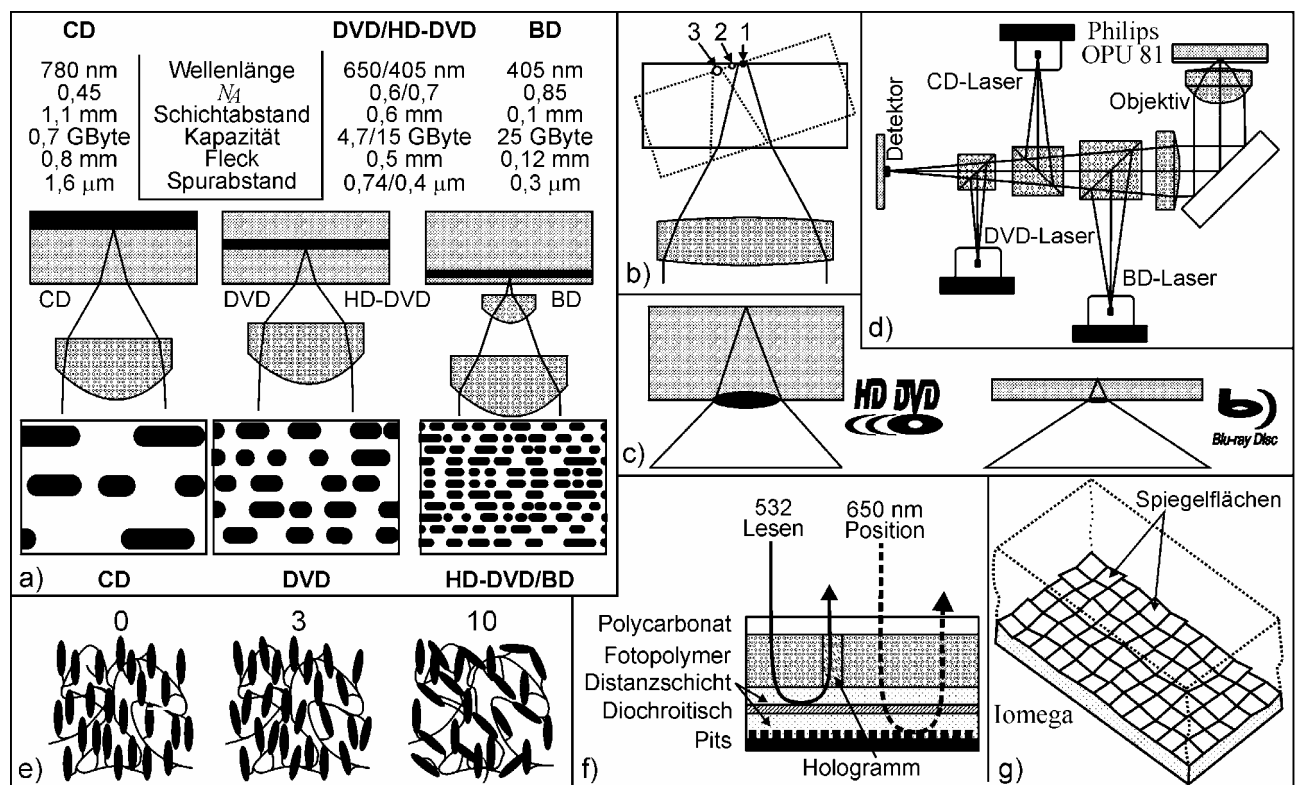
Blu-ray-disc

Die Blu-ray-disc¹ (BD) wird hier aus mehreren Gründen zuerst besprochen. Damit soll keine besondere Hervorhebung, insbesondere gegenüber der HD-DVD, erfolgen. Ihre Spezifikationen wurden am 19.2.02 bekannt gegeben, und bereits 2003 stellte Sony den ersten Speicher vor. Ihre spezielle Auslegung erfordert zudem die höchsten technischen Anforderungen. Außerdem weist sie einige Besonderheiten auf. Dadurch fällt die anschließende Beschreibung der anderen Varianten erheblich einfacher aus. Dies gilt jedoch nicht für die völlig anders funktionierenden Varianten AO-DVD, HVD, MICA und MODS (s.u. sowie Abschnitte 4.6.2 und 4.8).
Tabelle. Verfügbare, wichtige Daten zu ausgewählten blauen Medien im Vergleich zur CD und DVD. Ø betrifft den wirksamen Durchmesser des Laser-Flecks. Statt $\lambda = 405$ nm wird seit einiger Zeit 401 nm benutzt.

	CD	DVD	EVD/FVD	HD-DVD	BD	HVD
Kapazität in GByte	0,68	4,7	15/10	15	25	200/1000
Deckschicht in mm	1,2	0,6		0,6	0,1	
Spurabstand in μm	1,6	0,74		0,40	0,32	
min. Pit-Länge in μm	0,83	0,41		0,204	0,149	
Laser λ in nm	780	650	650	405	405	532 + 650
N_A	0,45	0,6	0,6	0,7	0,85	
$\varnothing_{\text{Oberfläche}}$ in mm	0,8	0,5		0,5	0,12	Hologramm
$\varnothing_{\text{Schicht}}$ in μm	2,1	1,32		0,6	0,58	
v_{linear} in m/s	1,3	3,49		5,60	7,36	
Modulation	EFM	8 : 16		ETM	17PP	
Transfer in MBit/s		11,1		36	54	1000

¹ Die Bezeichnung **Blu-ray-disc** ist von der blauen Farbe des Lasers (englisch blue) abgeleitet, da sich aber eine Farbe nicht als Warenzeichen eintragen lässt, wurde das „e“ einfach weggelassen.

Die optische Auflösung ist proportional zu λ/N_A^2 . Neben der kurzen Wellenlänge λ ist daher auch eine möglichst große Numerische Apertur N_A verlangt. Bei der BD wurde sie durch zwei asphärische Linsen auf 0,85 erhöht. Solche Objektive verlangen eine erhebliche Korrektur der sphärischen Aberration und sind nicht mehr exakt zu berechnen. Außerdem ist ihre Schärfentiefe recht gering. Daher muss das Objektiv besonders nahe an die Speicherschicht herangebracht werden. Deshalb wurde in der Anfangszeit der Begriff „near-field-recording-techniques“ benutzt und das Objektiv als SIL (solid immersion lens) bezeichnet. Während bei der DVD noch 1,7 mm Abstand benutzt wird, beträgt er bei der BD nur noch 0,3 mm. Dann ist für die Deckschicht oberhalb der Speicherschicht nur ein Wert von 0,1 mm verfügbar, der zu alledem höchstens um 3 μm schwanken darf. Der unsymmetrische Aufbau der Platte bewirkt, dass sich Temperaturschwankungen stärker störend auswirken. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass der Lichtfleck auf der Oberfläche der Platte sehr klein wird. Er sinkt von der CD mit 0,8 über die DVD mit 0,5 auf nur 0,12 mm (vgl. Bild 20c). Hierdurch wirken sich bereits Kratzer, Fingerabdrücke usw. erheblich störend aus. Deshalb besaßen die ersten BDs eine Cartridge aus sehr haltbarem Kunststoff in angenehmem Blau (s.u. Bild 24h). Eine ähnliche Cartridge wird beim UDO weiterhin konsequent benutzt. Es musste eine äußerst kratzefeste, harte, schmutzabweisende und extrem dünne Schutzschicht – spezieller 2 μm dicker Lack – entwickelt. Diese Schicht konnte zunächst nur manuell hergestellt werden und könnte in der Zukunft den Preis der Disc deutlich erhöhen. 2004 kostete die Herstellung einer Disc 2,8 € soll aber in wenigen



Jahren auf 0,30 € fallen.

Bild. Strahlengang bei den blauen Medien (a - c), eines Objektivs für CD, DVD und BD (d) sowie Schema der HVD (holographic versatile disc) (e, f) und des Vielfachspiegel-Prinzips von Iomega (g).

HD-DVD und weitere Varianten

Die HD-DVD wurde am 19.11.03 vom DVD-Forum zunächst als AOD (advanced optical disc) spezifiziert und später als „HD-DVD-specification for read only discs“ verabschiedet. Auch als Next-generation DVD wurde sie präsentiert. Sie wurde in Konkurrenz der BD entwickelt. Aus dem DVD-Forum ging für sie die HD-DVD Promotion Group hervor, der über hundert Mitglieder angehören, darunter NEC, Microsoft, Toshiba, Intel und IBM. Wichtig für die Verbreitung der HD-DVD ist es, dass Time Warner dem Gremium angehört und von jeder Disc Lizenzgebühren erhält. Vorrangig ist die HD-DVD für das HDTV mit MPEG-2, Windows Media 9, MPEG-4 und AVC (H.264) vorgesehen. Als Kopierschutz wird AASC benutzt. Sie verwendet ebenfalls die Laser-Wellenlänge 405 nm. Im Gegensatz zur BD ist sie jedoch weitgehend abwärtskompatibel zur DVD, denn ihre Speicherschicht liegt weiterhin in der Mitte der 1,2 mm dicken Scheibe. Daher ist nur $N_A = 0,7$ erreichbar. Auch Schräglagen der Disc wirken sich stärker aus. Der Lichtfleck auf der Oberfläche mit 0,5 mm ist so groß, dass sich kaum Kratzer und Fingerabdrücke störend auswirken können. Sie benötigt daher weder eine Cartridge noch eine besonders harte Oberflächenschicht. Weiterhin vorteilhaft ist es, dass sie mit nur geringen Änderungen auf den Anlagen der DVD herstellbar ist. 2005 existierte die erste dreilagige Disc. 2006 gab es erste Laufwerke, die für CD, DVD und HD-DVD nur ein Objektiv benötigen. Bei der BD ist dies wesentlich schwerer zu erreichen.

Allerdings befindet sich bei Philips bereits ein entsprechendes Objektiv in der Entwicklung. Die drei Laser werden hier über dichroitische Prismen eingeblendet.

Doch neben den 12- und 8-cm-Platten sind auch bereits deutlich kleine Varianten vorbereitet. So existiert von Philips eine Portable Blue **SFFO** (small form factor optical) mit nur 3 cm Durchmesser und 0,1 mm Dicke, die etwa 1 GByte speichert. Das Mini-Laufwerk mit $5,6 \times 3,4 \times 0,75 \text{ cm}^3$ und blauem Laser (405 nm) soll für Kameras, Mobiltelefone usw. eingesetzt werden. Es besitzt eine extrem kleine Linse. Auch der Aktuator ist stark verkleinert. Weiter sei noch erwähnt, dass für eine Vielzahl von Informationsschichten u.a. in ersten Laborversuchen zur **Fluoreszenz** einzeln angeregte Schichten erprobt wurden. Durch sie könnten die komplizierten teilreflektierenden Schichten und deren Abgleich entfallen (s. Abschnitt 4.91).

Künftige und holographische Platten

Die blauen Medien sind noch nicht fest etabliert, da gibt es schon vielfältige Untersuchungen für die nächste Generation. 2005 stellte Sharp eine spezielle optische Methode vor, mit der auf einer Disk eine Speicherung unterhalb der Beugungsgrenze möglich ist. Es werden Prinzipien benutzt, die bereits in der Halbleiter-Lithographie existieren (s. Abschnitt 2.4). Besonders nahe bei den Discs liegt eine – vorerst nur als Patentanmeldung vorhandene – Lösung mit vielen Spiegelflächen von Iomega (AO-DVD). Ähnlich dürften die MODS funktionieren. Weitere auf Seite 570 aufgezählte Techniken – u.a. AHVD und MICA – nutzen das holographische Prinzip. Der typische digitale holographische Speicher verwendet jedoch Volumen-Kristalle und ist im Abschnitt 4.8 behandelt. Die kontinuierlich arbeitende Holographie betrifft dreidimensionale Bilder und ist im Band 2 behandelt. Ohne weitere Verweise darauf werden hier nur spezielle Ansätze für Platten bzw. Karten berücksichtigt. Dabei sind allein durch die Speicherung im Volumen sehr hohe Fälschungssicherheit und so gut wie keine Kopierbarkeit vorhanden. Für viele Anwendungen sind diese Fakten besonders wichtig.

MODS (multiplexed optical data storage) wurde am 27.9.04 von britischen Forschern vorgestellt und erreicht 250 GByte pro Informationsschicht. Dabei werden asymmetrische Pits und Lands benutzt, die den Laser-Strahl in 332 unterschiedliche Richtungen reflektieren können. Sehr wahrscheinlich ist dies eine Vorstufe zum **AO-DVD** (articulated optical) von Iomega, der 450 GByte erreichen soll und mit der herkömmlichen Produktionstechnik (Presstechnik mit Stamper) herstellbar sein dürfte. Statt Pits werden je vier quadratische Spiegel-Flächen benutzt. Sie speichern über ihre unterschiedliche Ausrichtung die Information (vgl. Bild 20g). Dadurch wird der Laser-Strahl in verschiedene Richtungen reflektiert und über ein spezielles Sensorfeld (CCD-Matrix) ausgelesen. Die Neigungsabstufung soll 1,5 Grad betragen. In x - und y -Richtung werden so 885 Strahlwinkel erreicht. Ein Speicherelement aus vier Spiegelflächen könnte $6 \cdot 10^{11} \approx 2^{39}$ verschiedene Zustände repräsentieren. Statt 1 Bit/Pit ergeben sich dann annähernd 40 Bit/Pit. So wird auch die Datenrate enorm vergrößert, jedoch nicht die Zugriffszeit verkürzt. Im gewissen Umfang besteht sogar Abwärtskompatibilität zur CD, DVD usw. Denn wirklich neu müsste nur der Sensor sein. Das Verfahren ist nur für vorbespielte Discs geeignet. Zunächst sind jedoch neue Methoden für das Herstellen des Masters zu entwickeln. Die heute übliche Laser-Belichtung ist hierzu nicht geeignet. Bei der Holographie ist ein Speichermedium notwendig, das eine extrem hohe Auflösung und hohe Stabilität besitzt. Für eine Disc sollte es als fast 1 mm dicke Schicht im Sinne der Volumenholographie nutzbar sein. Den ersten hierfür geeigneten polymeren Kunststoff stellte die Bayer-Material-Science AG bereits Ende der 90er Jahre her. Er besteht aus zigarren-artigen Molekülen, die durch „Bänder“ verbunden sind. Wenn dieses Medium gelöscht ist, sind alle „Zigarren“ exakt gleich ausgerichtet. Durch Erwärmung (mittels Laser-Strahl) können sie verschieden verdreht werden. Auch diese neuen Zustände sind stabil (s. Bild 20e). Je nach dem Zustand der gegenseitigen Verdrehung wird linear polarisiertes Licht unterschiedlich absorbiert. So sind mindestens 64 Graustufen erreichbar. Dieses Material benutzt die Firma **InPhase** Technologies, welche 2000 aus Lucent Technologies und Bell Labs hervorgegangen ist, für eine Holographie-Speicherung. Die Technik wurde zunächst *Tapestry* genannt. Ende 2005 gab es ein 300-Gigabyte-Laufwerk mit einer Übertragungsrate von 160 MByte/s. Die dünne durchsichtige Polymer-Schicht liegt zwischen zwei klaren Kunststoffscheiben und bildet gleichzeitig den Leim, der die Scheibe von 1,5 mm Dicke und 13 cm Durchmesser zusammenhält. Die Medien kosten etwa so viel wie ein DVD-Rohling und werden von Hitachi, Maxell hergestellt. Es wird mit Lasern von 407 nm gearbeitet. Im gleichen Volumen – das als Datenseite bezeichnet wird – werden mehrere Informationen durch Drehung der Polarisationssebene um jeweils 0,067 Grad gespeichert. Die Belichtungszeit für jede Datenseite liegt bei knapp 3 ms. Die Laufwerke sollen ca. 1500 US-Dollar kosten. Im Labor wurden bereits Speicherdichten von 10 GByte/cm^2 erreicht. Magnetisch wurden zur selben Zeit nur knapp 6 GByte/cm^2 erreicht.

Eine deutlich andere Variante hat die japanische Firma Optware zusammen mit Fuji Photo and CMC Magnetics entwickelt. Diese **HVD** (holographic versatile disc) benutzt einen blau-grünen Schreib-Lese-Laser (532 nm) und einen roten Positionierungs-Adressierungs-Laser (650 nm). Der blau-grüne Laser liest/schreibt die holographisch codierten Daten der Polymer-Schicht im oberen Bereich der Disc (Bild 20f). Im Gegensatz zu anderen holographischen Speichern kommen hier der Referenz- und Informations-Strahl aus der gleichen Richtung. Das vereinfacht den Aufbau. Die dichroitische Schicht ist für das blau-grüne Licht gut reflektierend und für den roten Laser mit $\lambda = 650 \text{ nm}$ weitgehend durchlässig. So gelangt das rote Licht bis zu den Pits, die ihn mittels der dahinter befindlichen Aluminium-Schicht reflektieren. Hier sind Hilfsinformationen gespeichert, die u.a. mit den Sektor-, Kopf- und Segment-Informationen einer normalen Festplatte vergleichbar sind. So wird eine schnellere Adressierung als bei der CD oder DVD erreicht. Denn dort sind diese Informationen zwischen den Daten

eingefügt. Die Aufteilung der Aufgaben zwischen dem roten und blau-grünen Laser-Strahl verbessert außerdem die Fehlerfreiheit der Holographie-Daten. Zur Umsetzung dieser Methode haben die Firmen Nippon Paint, Pulstec Industrial und Toagosei eine „HVD Allianz“ gebildet. Die ersten Spezifikationen erfolgten 2004. 2005 schlossen sich weitere Firmen zur Realisierung des Speichers an. Es ist eine Kapazität von 1 TByte und eine Transferrate von 1 GBit/s vorgesehen. In computergenerierten Hologrammen wird das Interferenzmuster des Hologramms z.T. auch berechnet.

Eine dritte holographische Variante stammt von der Firma NTT (Japan). Sie benutzt WORM-Platten von $25 \times 25 \text{ mm}^2$ aus Kunststoff, die etwa 1 GByte speichern. Sie werden Info-MICA (**m**ultilayered **i**mprinted **c**ard) genannt. Mittelfristig sollen die Karten in über 100 Schichten 10 GByte Daten aufnehmen können. Weil Schichten mit alternierendem Brechungsindex benutzt werden, wirken sie als Wellenleiter. Hervorgehoben wird, dass diese Medien biologisch vollständig abbaubar sind und daher sehr umweltverträglich sind.

Auf Grund der vielen holographischen Aktivitäten hat die Industrievereinigung **ECMA** International 2004 ein technisches Komitee gegründet, das die Standardisierung eines holographischen Speichers vorantreiben soll. Hierbei wird u.a. über eine HVC (**h**olographic **v**ersatile **c**ard) und eine read-only HVD (**h**olographic **v**ersatile **d**isc) diskutiert.