

DLP™: Revolution der Displaytechnologie

Digital Light Processing (DLP™) heißt eine Technologie von Texas Instruments (TI), die völlig neue Wege geht und die Displaytechnik revolutionieren könnte. Millionen kleiner beweglicher Spiegel auf der Oberfläche eines Halbleiterchips reflektieren bei DLP™ farbiges Licht derart, dass ein hochwertiges Farbbild entsteht. Diese erstaunliche Technik findet schnell Eingang in den Projektorenmarkt. Gab es 2003 nur 18 DLP™-Projektormodelle weltweit zu kaufen, waren es 2004 ca. 75 und 2005 bereits 125. Seit 1996 sind über 500.000 DLP™-Einheiten von TI ausgeliefert worden. Im Segment Projektoren beträgt der DLP™-Anteil heute mehr als 50 %. Der folgende Artikel beschäftigt sich mit den Grundlagen dieser komplexen „Lichtmodulatoren“.

Digitale Lichtmodulation

Einen Lichtstrahl zu modulieren, heißt, ihm eine Information aufzuprägen. Im einfachsten Fall ist das der binäre Zustand „Hell“ oder „Dunkel“. Mit einem Spiegel ist das einfach möglich, indem man ihn so ausrichtet, dass er einen auf seine Oberfläche treffenden Lichtstrahl derart umlenkt, dass er auf die Netzhaut des Auges trifft oder nicht. Bei richtiger Grundorientierung des Spiegels ist das durch einfaches Kippen zu bewerkstelligen. Aber auch Grauwerte

zwischen Hell und Dunkel sind möglich. Dazu muss der Spiegel aus einer Ruheposition heraus mit hoher Frequenz hin- und hergekippt werden. Geschieht dies häufiger hin zur Hell- als zur Dunkelposition, ergibt sich ein hellgrauer Lichtpunkt, andernfalls ein dunkelgrauer. Wenn nun noch die Lichtquelle in der Farbe verändert wird, ist der Lichtpunkt sowohl in seiner Helligkeit (Luminanz) als auch Farbe (Chrominanz) steuerbar.

Digital Micromirror Device (DMD)

Dieses Grundprinzip hat Texas Instruments (Abbildung 1) auf eine regelmäßige Anordnung (Array) von bis zu zwei Millionen kleiner Spiegel auf einer Chipfläche von etwa einer halben Briefmarke übertragen. TI nennt dies „Digital Micromirror

Device (DMD)“, übersetzt „Digitale Mikrospegeleinheit“ (Abbildung 2). Das DMD wurde 1987 vom TI-Mitarbeiter Dr. Larry Hornbeck entwickelt.

Frühe Funktionsmuster sind seit 1995 mit einer Kippfrequenz von 5000 Hz ohne einen einzigen Spiegelfehler im ununter-



Bild 2: Über zwei Millionen einzeln beweglicher Spiegel sind auf diesem Chip angeordnet.



Bild 1: Wo dieses Logo drauf ist, ist ein Spiegelchip drin. (Quelle: TI)

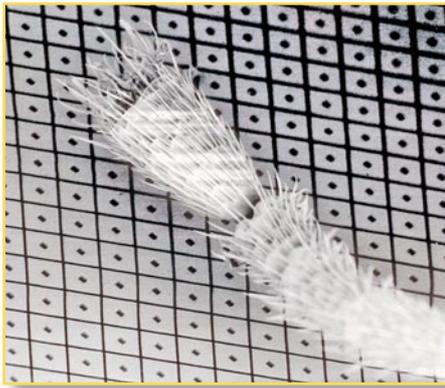


Bild 3: Ein Ameisenbein verdeutlicht die Dimensionen der Spiegel. (Quelle: TI)

brochenen Dauerbetrieb. Durch den relativ geringen Kippwinkel von max. $\pm 20^\circ$ sind keine Torsionsermüdungen an der Spiegelachse selbst nach 1 Billion (eine 1 mit 12 Nullen!) Kippbewegungen festzustellen. Das entspricht einer Betriebsdauer von 6,34 Jahren bei 5000 Hz Kippfrequenz. Lebensdauererwartungen von 100.000 Betriebsstunden, entsprechend 11,4 Jahre Dauerbetrieb, sind daher durchaus realistisch. Die Größe der Spiegel in Bezug auf ein Ameisenbein zeigt Abbildung 3. Man hat es hier mit einem erstaunlichen Hybriden aus Mikromechanik und -elektronik zu tun, der auf rein digitaler Basis arbeitet.

Die Grundstruktur eines DMD-Chips besteht aus einem 3,3-V-CMOS-SRAM-Array (Complementary Metal Oxide Semi-

conductor Static Random Access Memory), über dessen Speicherzellen die Spiegel mit einer Kantenlänge von $2,8 \mu\text{m}$ angeordnet sind (Abbildung 4). Die Spiegelflächen entstehen durch hochglanzpoliertes Aluminium mit 93 % Reflexivität. Jeder Spiegel lagert mit seiner Drehachse auf zwei Ständern. Unter jeder Spiegelhälfte liegt eine Adresselektrode, welche die Kippinformation der adressierten Zelle an deren komplementären Ausgängen übernimmt. Sie bewirken die Bewegung über elektrostatische Anziehungskräfte. Eine weitere Elektrode unter der Spiegeljochplatte fixiert den Spiegel durch eine entsprechende Vorspannung (Bias) in seinen Ruhephasen.

Um den Spiegel in eine der beiden möglichen Lagen zu bringen, wird die SRAM-Zelle unter dem Spiegel mit dem gewünschten Bewegungszustand geladen und die Vorspannung abgeschaltet. Der Spiegel kann jetzt mit wenig Kraftaufwand entsprechend der Speicherzellenladung in eine neue Position kippen. Diese wird durch Wiedereinschalten der Vorspannung unter der niedrig liegenden Spiegelhälfte fixiert. Danach werden die Speicherzellen wieder mit einem neuen Bewegungsmuster geladen, und das Spiel beginnt von neuem. Die Vorspannungsmethode erlaubt es, die Spiegel mit niedrigeren Spannungen zu bewegen, so dass sie direkt von den SRAM-Zellen angesteuert werden können. Zudem bewegen sich, wenn die Vorspannung entfernt wird, alle Spiegel gleichzeitig, wo-

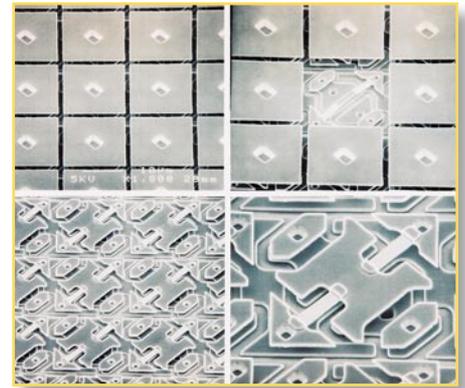


Bild 5: Spiegelzellen unter dem Elektronenmikroskop (Quelle: TI)

durch sich ein genaueres Timing und ein filmähnlicheres Bild ergeben. So ist jeder Spiegel eines DMDs individuell mehrere tausend Mal in einer Sekunde in die Hell- oder Dunkel-Position kippbar. Eine Rasterelektronenaufnahme (Abbildung 5) zeigt Details aus einem realen DMD-Chip.

In Verbindung mit einem mit 9000 U/min rotierenden Farbrad zwischen Lichtquelle und Spiegel-Array mit den Abschnitten Rot, Blau und Grün lassen sich Farbe und Helligkeit für jeden einzelnen Spiegel (= Bildpunkt) frei wählen. Im Prinzip entsteht eine zyklische Bildfolge aus den roten, grünen und blauen Auszügen aus den farbigen Vollbildern. Auf der Oberfläche des Spiegel-Arrays entsteht ein farbiges Bild, zu dem jeder Spiegel ein Pixel (picture element) mit definierter Farbe (Chrominanz) und Helligkeit (Luminanz) beiträgt. Es wird über ein Projektionsobjektiv auf eine Mattscheibe oder Leinwand gestrahlt (Abbildung 6). Mit der Zusatzfunktion BrilliantColor ermöglicht DLP™ den Einsatz von bis zu sieben Farben auf dem DLP™-Farbrad. Möglich sind Rot, Gelb,

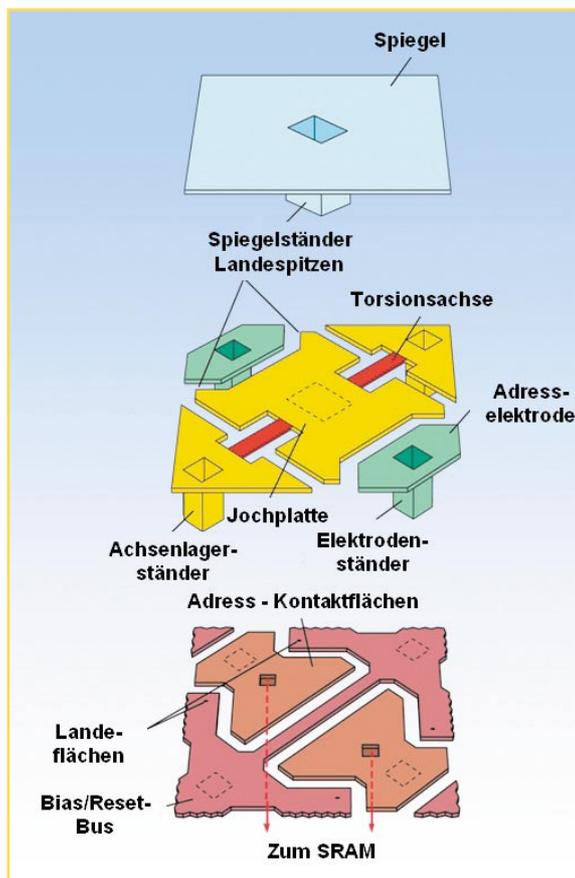


Bild 4: Aufbau einer Spiegelzelle (Quelle: TI)

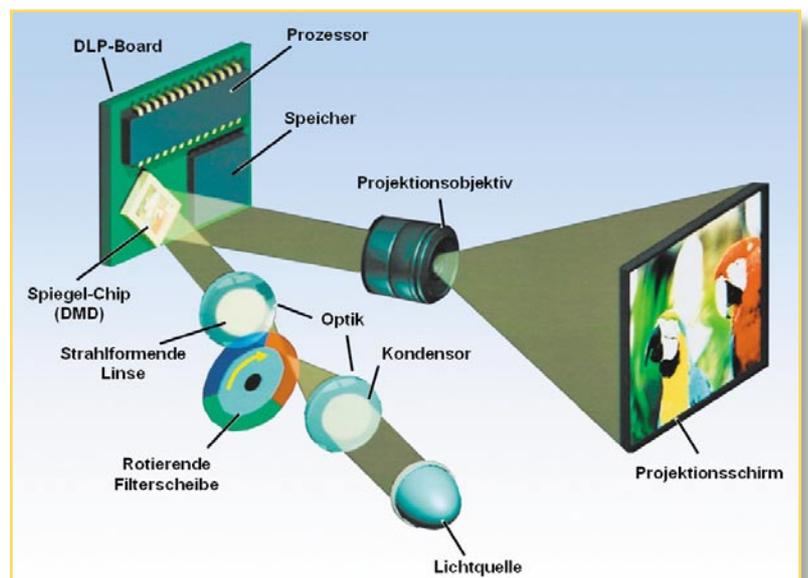


Bild 6: Das Funktionsprinzip eines DLP™-Projektors (Quelle: TI)

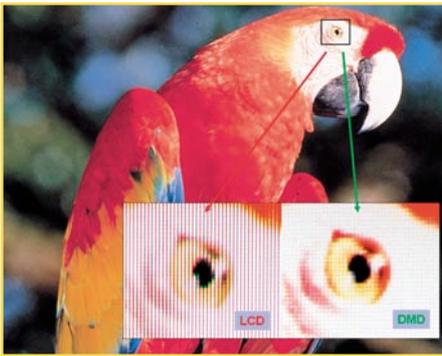


Bild 7: An der Ausschnittsvergrößerung wird die schwache Pixelstruktur des DMDs im Vergleich mit einem LCD deutlich. (Quelle: TI)

Grün, Cyan, Magenta, Blau und Weiß. Diese Segmente lassen sich für eine optimale Farbtreue frei kombinieren.

Der menschliche Gesichtssinn (human visual system) integriert die sequenzielle Bildfolge zu einem farbigen Gesamtbild. Weil die Lichtenergie sich auf die Bildfläche verteilt, sind die Größe des projizierten Bildes und seine Helligkeit invers zueinander. Je größer das Bild, umso lichtschwächer ist es, und umgekehrt. Um große, lichtstarke Projektionsbilder zu realisieren, ist ein Lichtstrom von bis zu 10.000 Lumen pro Spiegel erforderlich.

Der ultimative Lichtmodulator

Ein DMD hat eine Reihe herausragender Eigenschaften, die es zu einem Lichtmodulator mit bisher nicht gekannten Qualitätsparametern macht:

- Die spektrale und räumliche Gleichförmigkeit eines DMDs sichert auch die Gleichförmigkeit der Bildqualität über das gesamte Bild.
- Durch die kurzen Schaltzeiten eines Spie-

Bild 9: Fast so flach wie ein LCD-Schirm und doch ein DMD-Rückprojektions-TV. Wegen der LED-Beleuchtung des DMDs ist er besonders energiesparend. (Quelle: Samsung)



gels ist eine hohe Bildwiederholfrequenz möglich.

- Der hohe Kippwinkelunterschied eines Spiegels von bis zu 40° zwischen „Ein“ und „Aus“ sichert ein exzellentes Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) im Bild. Die Bilder sind deshalb sehr kontrastreich und rauscharm.
- Der geringe Abstand der Spiegel zueinander und der hohe Reflektionsgrad ihrer Oberfläche resultieren in einem extrem hohen Wirkungsgrad von 65 % und kaum wahrnehmbaren Pixelstrukturen (pixelization) (Abbildung 7).
- Ein DMD weist eine Temperaturstabilität auf, die von keinem anderen Lichtmodulator erzielt wird.
- Ein DMD ist mechanisch robust und langzeitstabil. Daraus folgt eine hohe Lebensdauer, während der die Abbildungseigenschaften konstant bleiben.

Aufbau eines DMD-Projektors

Den Strahlengang eines praktisch ausgeführten DMD-Projektors zeigt Abbildung 8. Das Licht zur Beleuchtung des Spiegel-Arrays im DMD (unten links) wird über das Farbrad, einen Kollimator, zwei Zwischenoptiken und einen Umlenkspiegel auf das TIR-Prisma geleitet (TIR: Total Internal Reflection). Es besteht aus zwei Teilprismen, deren Aufgabe es ist, den Beleuchtungspfad des DMD-Arrays (einfallendes Licht) vom Projektionspfad (reflektiertes Licht) zu trennen.

Um ein randscharfes Bild mit gleichmäßiger Helligkeitsverteilung zu erhalten, ist die Projektionsoptik „telezentrisch“ berechnet. Das bedeutet, dass jeder Arrayspiegel (nicht nur die in der Mitte) von ihr gleich scharf abgebildet wird. Durch die

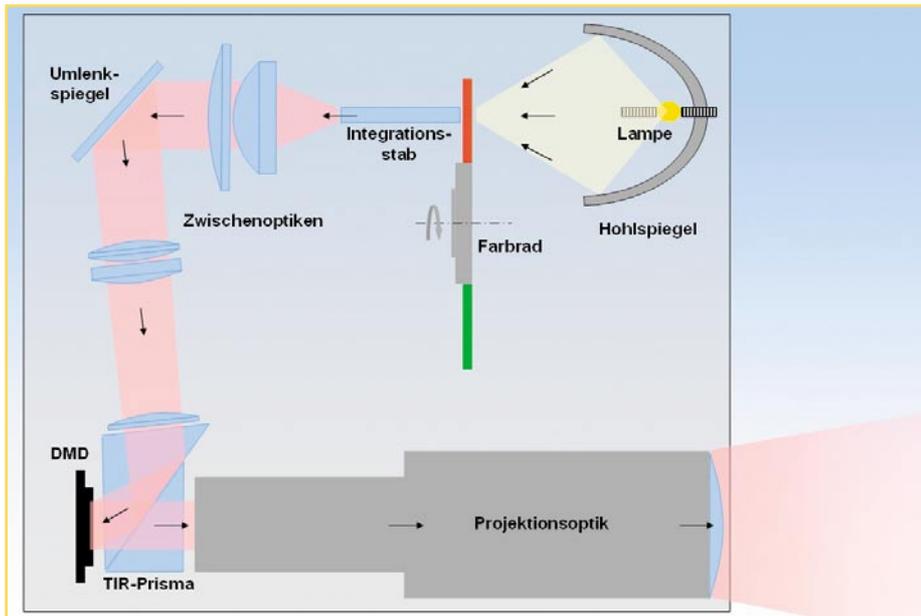


Bild 8: Praktischer Aufbau eines DMD-Projektors (Quelle: TI)



Bild 10: Wolfram Gauglitz, TI-Development-Manager für DLP™-Produkte, mit einem Toshiba-LED-Projektor TDP-FF1. Die Bilddaten werden drahtlos über den USB-Stick rechts zugespielt.



Bild 11: Video und TV überall, der DLP™-Pocket-Projektor mit LED-Lichtquelle macht's möglich. (Quelle: TI)

Konstruktion der Optiken kann man Projektoren mit geringen Abmessungen bauen, die bei kleinem Abstand zur Projektionsfläche dennoch große, verzerrungsarme Bilder ermöglichen.

Natürlich lässt sich ein DMD-Projektor auch in einen TV-Apparat integrieren, wo er den Bildschirm als Mattscheibe von hinten bestrahlt. Solche Geräte können sehr flach gestaltet werden und sind deshalb durchaus auch eine Konkurrenz zum LCD- oder Plasma-Fernseher (Abbildung 9).

Die hohe Energieeffizienz eines DMD-Projektors mit LED-Lichtquelle erlaubt den Bau kleiner, batteriebetriebener „Pocket-Projektoren“ (Abbildung 10) mit beachtlichen Eigenschaften: SVGA-Auflösung (800 x 600 Pixel). Gewicht ca. 0,5 kg, LED-Lebensdauer > 20.000 Stunden, Kontrastverhältnis 2000:1, Helligkeit bis zu 50 Lumen ... Bei hellem Umgebungslicht sind Bilder mit Diagonalen von 15", im abgedunkelten Raum bis zu 50" möglich. Es ist durchaus möglich, dass DMDs in die Handys der Zukunft integriert werden. Dann kann man statt des „Mäusekinos“ auf dem kleinen Handybildschirm mobiles Fernsehen in respektablen Projektionsabmessungen genießen. Im Zuge der stetigen Miniaturisierung kann neben dem DVB-T-Empfänger auch ein Videorecorder in dem Pocket-Projektor Platz finden, wodurch dieser zum idealen mobilen Entertainer wird (Abbildung 11).

DLP™-Fernseher der Zukunft mit Laser-Licht?

Mitsubishi hat ein DLPT™-TV-Gerät angekündigt, das einen höheren Farbumfang mit einem vereinfachten DLP™-Aggregat vereint. Dabei wird das DMD sequenziell mit Laser-Licht in den Grundfarben Rot, Grün und Blau bestrahlt und die Spiegel entsprechend den zugehörigen Farbauszügen in Position gebracht. Weil die Laser-Dioden praktisch verzögerungsfrei ein- und ausgeschaltet werden können, ist das Farbfilterrad

zur Erzeugung der sequenziellen Farbauszüge aus dem ununterbrochen strahlenden weißen Licht einer Glühwendel oder von LEDs überflüssig.

Damit ist an der Erzeugung des DLP™-Bildes keine bewegte Mechanik mehr beteiligt (bis auf die Mikrospiegel) und die mit dem Farbrad verbundenen „Regenbogeneffekte“ an bewegten Hell-Dunkel-Grenzen treten auch nicht mehr auf. Die Verwendung dreier RGB-Halbleiter-Laser verbessert die Farbreinheit, vermeidet mit der Alterung der Projektionsbirne verbundene Probleme der Lichtausbeute und Zuverlässigkeit und erlaubt die Konstruktion leichter, flacher und energieeffizienter Displays in allen Größen. Dem durch die Verwendung schmalbandigen, kohärenten Laser-Lichts (alle Schwingungen sind gleichphasig) verursachten „Speckle“-Effekt (auch als Salz-und-Pfeffer-Effekt bekannte „Körnigkeit“ des von rauen Oberflächen reflektierten Lichts) kann man durch Erhöhen der Bandbreite des Lasers begegnen. Ab Ende nächsten Jahres will Mitsubishi seine Innovation in den Markt bringen. Dann werden wir sehen, ob die Praxis hält, was die Theorie verspricht.

Lebenslange Farbstabilität

Die Bildwiedergabe mit DMDs erfolgt ohne jede Nutzung elektrochemischer Effekte, rein auf der Grundlage mechanischer Kippbewegungen der Mikrospiegel. Unter



Bild 12: LCD nach dreihundert Stunden Laufzeit: Noch sind die Farben in Ordnung. (Quelle: TI)



Bild 14: Nach 3376 Stunden hat das LCD einen deutlichen Farbstich. (Quelle: TI)

der Voraussetzung, dass das Licht der Lampe, die das Spiegel-Array beleuchtet, seine spektrale Zusammensetzung nicht ändert, ist keine Möglichkeit zum Wegdriften der Farbeigenschaften über die gesamte Lebensdauer des DMD-Projektors gegeben. Im Gegensatz dazu stehen Displays auf der Grundlage von Flüssigkristallen (LCD: Liquid Crystal Display) oder Gasentladungen (PD: Plasma Displays).

Eine von Texas Instruments in Auftrag gegebene Langzeitstudie von Videoprojektoren mit den Technologien DLP™/DMD und LCD des unabhängigen Testinstituts Intertek sollte den Beweis erbringen. Dazu erwarb Intertek je drei DLP™- und LCD-Testmodelle auf dem Markt (jeweils 10 Stück) und unterwarf je 9 davon (insgesamt 54 Stück) drei Testzyklen: Dauerbetrieb, 5,5 Stunden an – 2,5 Stunden aus, 1,5 Stunden an – 2,5 Stunden aus. Das verbleibende Testgerät eines jeden Modells diente Temperaturmessungen. Außer der Einstellung von Helligkeit und Kontrast für die Kalibrierung wurden keine Veränderungen am ursprünglichen Zustand vorgenommen.

Die Kalibrierung der Testgeräte erfolgte gemäß IEC 61947-1:2002, „Electronic projection measurement and documentation of key performance criteria, Part 1: Fixed resolution projectors (IEC)“. An den Auströmöffnungen der Lüfter erfassten Temperaturfühler die Lufttemperatur, um die kontinuierliche Überwachung der Um-

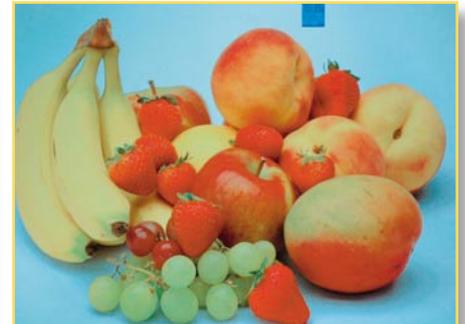


Bild 13: DLP™ nach dreihundert Stunden Laufzeit (Quelle: TI)



Bild 15: Das DLP™-Bild ist auch nach 3376 Stunden noch so farbecht wie am Anfang des Tests. (Quelle: TI)

3 Chip DLP™ Projection

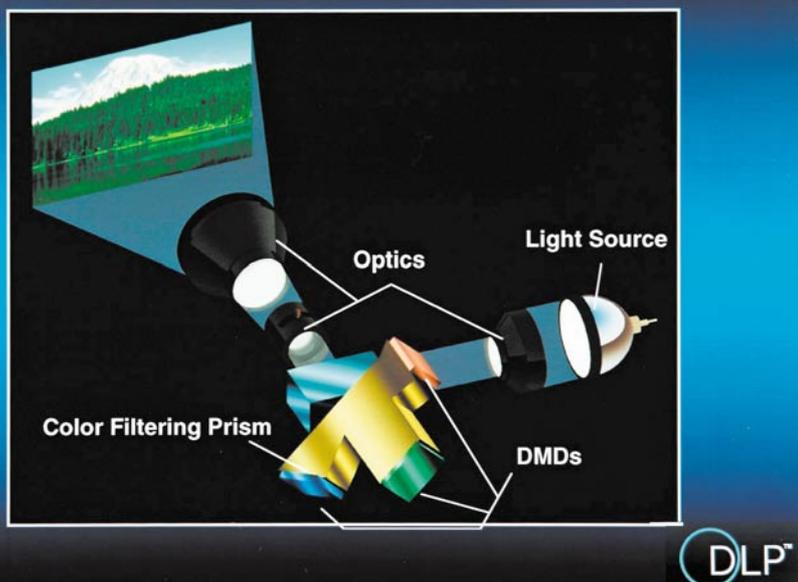


Bild 16: Für höchste Anforderungen an die Brillanz des Bildes erzeugen 3 Spiegelchips die Farbauszüge Rot, Grün und Blau. (Quelle: TI)

gebungstemperatur und des ordnungsgemäßen Betriebs auch nachts und an Wochenenden sicherzustellen. Die Geräte wurden über einen PC zeitgesteuert ein- und ausgeschaltet. Alle 1000 Betriebsstunden erfolgte ein Austausch der Projektorlampen. Eine Fotokamera hielt die jeweilige Geräteleistung unmittelbar vor und nach dem Wechsel fest.

Ein Lichtfarbmessgerät für Lichttechnik und zur Einstellung von Videoprojektoren CL-200 von Konica/Minolta (http://www.konicaminolta.eu/de/products/industrielle_produkte/ueberblick/lichtmessung/lichtfarbmessgeraete/cl_200/) wurde fernsteuerbar auf einem linearen Steller mit Schrittmotoren und Stellgebern angebracht. Damit war seine exakt reproduzierbare Positionierung vor den einzelnen Messflächen garantiert. Die Messungen erfolgten an den Bildern einer PowerPoint-Bildfolge, die den Projektoren außerhalb der Messzyklen über einen Bildverteiler zugespielt wurde.

Damit sollte das Einbrennen eines einzelnen Testbildes und eine ungleiche Belastung der Prüflinge verhindert werden.

Im Ergebnis wiesen alle LCD-Probanden beginnend mit einem Gelbstich eine erhebliche Minderung der Farbqualität nach 2000 bis 4000 Stunden Dauerbetrieb bzw. bereits ab etwa 1700 Stunden im Intervallbetrieb (Abbildungen 12 bis 15) auf. Im Gegensatz dazu waren die Farbverfälschungen der DLP™-Projektoren vernachlässigbar.

In die gleiche Richtung gehen die Ergebnisse einer Langzeitstudie vom RIT/Munsell Color Science Laboratory, die man unter http://www.mediastar.de/fileadmin/156_Picture_Reliability_Study_Phase_II_White_Paper.pdf nachlesen kann.

DLP™-Kinos – der große Trend in Amerika

Für kommerzielle Anwendungen lässt sich die Wiedergabequalität von DLP™-

Projektoren noch erheblich steigern (Abbildung 16). Dazu wird das Licht der Lichtquelle durch ein Prisma in die drei Farben Rot, Grün und Blau zerlegt und auf jeweils einen DLP™-Chip geleitet. Die Projektionslinse vereinigt die drei Farbauszüge wieder zu einem gemeinsamen Bild. Diese 3-Chip-Technik wird wegen ihrer hohen Leuchtkraft und Farbauflösung vor allem im digitalen Kino (DLP™ Cinema), in großen Vorführräumen und für Großvideoleinwände eingesetzt.

Die sieben großen Hollywood-Studios haben inzwischen über 150 Filme im DLP™-Cinema-Format herausgebracht, so zum Beispiel Star Wars: Episode I–III, Harry Potter IV und The Day after Tomorrow. Diese Filme wurden von 17 Millionen Kinobesuchern in den mehr als 250 DLP™-Kinos weltweit gesehen. In Deutschland gibt es heute schon über zehn DLP™-Kinos.

Für die Kinobranche eröffnet DLP™ Cinema (Abbildung 17) (http://www.christiedigital.co.uk/products/cp2000/images/cp2000hr_frontRight2.jpg) gegenüber dem herkömmlichen 35-mm-Film zahlreiche Vorteile: kein Nachlassen der Bildqualität mit der Anzahl der Vorführungen, keine Kopierverluste, Anlieferung neuer Filme via Satellit, geringere Geräusentwicklung im Projektorraum, gleichförmigere Bewegungsabläufe, Vorführung von HDTV-Material ...

Allerdings wollen die Kosten eines DLP™-Cinema-Projektors in der Größenordnung von 70.000 bis 100.000 Euro erst einmal wieder eingespielt werden.

Darin liegt für kleinere Kinos ein beträchtliches Risiko. Deshalb ist mit einer breiten Umstellung erst mit gefallenem Projektorpreisen zu rechnen. **ELV**



Bild 17: So sieht der digitale Nachfolger vom guten alten Kino-Filmprojektor aus. (Quelle: Christie)