

BELEUCHTUNG

Aus der Hand an die Wand

Anorganische Leuchtdioden ermöglichen kompakte Projektionssysteme.

Heidrun Jänchen

Digitale Kameras werden immer handlicher und leistungsfähiger, klassische Projektoren sind aber meist keine Technik für unterwegs. Doch mit Leuchtdioden sind Projektionssysteme möglich, die in die Hemdtasche passen und zumindest für mobile Zwecke ausreichende Leuchtkraft besitzen.

Wie wirft man ein Bild an die Wand? Immer noch nach dem gleichen Prinzip wie bei der Laterna Magica: Nötig sind eine Lampe, ein transparentes Bild und ein Objektiv. Natürlich verwendet man längst keine Kerzen mehr, und Bilder werden nicht mehr von Hand auf Transparentpapier gezeichnet. Kaum fünfzehn Jahre ist es her, dass Dia- und Overhead-Projektoren einen ernsthaften Konkurrenten bekamen – den Videoprojektor, der statt Filmspule, Dia oder Folie digitale Daten direkt in Bilder umwandelt. Die ersten Geräte waren lichtschwache, dafür aber zehn und mehr Kilo schwere Monstren. Schon des Preises wegen verbreiteten sie sich nur in Besprechungsräumen und Hörsälen, wo die Bilder vor allem eines sein müssen: hell.

Erst 2003 kamen die ersten Videoprojektoren auf den Markt, die weniger als ein Kilo wogen und in eine Aktentasche passten. Handlichkeit und Effizienz waren zunehmend gefragt. Bereits ein Jahr später überlegten Entwickler, ob man den gesamten Projektor vielleicht in die Laufwerksschublade eines Laptops quetschen könnte. Mit den herkömmlichen Quecksilberhochdrucklampen war das nicht zu schaffen. Der Vorschlag, wenige Millimeter große LEDs zu verwenden, stieß auf Kopfschütteln. Ihre Lichtleistung reichte gerade einmal, um Skalen zu beleuchten. Mehr hatte bis dahin niemand verlangt. Doch seither hat sich die Helligkeit der Halbleiterdioden mehr als verzehnfacht. Damit wurden ganz andere Projektoren möglich. Nano oder Pico heißen sie, wiegen kaum mehr als eine Tafel Schokolade und passen in jede Hemdtasche. Im Vergleich zu den großen Brüdern im Hörsaal sind die handlichen Geräte zwar nur Glühwürmchen, aber dafür kommen sie ohne Steckdose aus. Mit dem internen Akku laufen sie bis zu zwei Stunden. Integrierter Speicher und Mediaplayer machen sie zum mobilen Fotoalbum oder Kleinstkino ganz ohne den üblichen Kabelsalat, aber mit einem Bild, das viel größer ist als sie selbst.

Die Entwicklung eines Projektors beginnt mit der Auswahl eines geeigneten Mikrodisplays. Sie über-



Sypro Optics GmbH

nehmen die Aufgabe des Dias, können aber bis zu 360 Bilder pro Sekunde anzeigen – mehr als genug für flimmerfreie Filme. Die älteste Technologie beruht auf der Fähigkeit von Flüssigkristallen, unter Spannung die Polarisationssebene des Lichtes zu drehen. Linear polarisiertes Licht wird in weißen Bildbereichen um 90° gedreht, während es in schwarzen Bereichen unverändert bleibt. Ein Analysator lässt nur das gedrehte Licht durch und reflektiert das nicht gedrehte. Auf diese Art arbeiten transmissive LCD und reflektive LCoS (Liquid Crystal on Silicon). Letztere haben den Vorteil, dass sich die einzelnen Pixel von der Rückseite der optisch aktiven Fläche aus ansteuern lassen, sodass kein Licht durch Absorption an den Leiterbahnen verloren geht.

Sowohl Lampen als auch LEDs emittieren unpolarisiertes Licht, das anschließend linear zu polarisieren ist, wodurch grundsätzlich die Hälfte – die falsche Polarisationsrichtung – verloren gehen. Darüber hin-

LEDs machen Projektoren zu einer handlichen Sache.

KOMPAKT

- Klassische Projektoren mit Hochdruckdampflampen lassen sich nicht beliebig verkleinern. LEDs ermöglichen dank ihrer gestiegenen Lichtleistung handliche Projektoren für mobile Zwecke.
- Mit weißen LEDs lassen sich in Kombination mit einem LCD besonders kompakte Projektoren verwirklichen.
- Farbige LEDs haben ein sehr schmalbandiges Emissionsspektrum. Daher zeigen die projizierten Bilder sehr reine, gesättigte Farben.

Dr. Heidrun Jänchen,
Sypro Optics GmbH,
Carl-Zeiss-Promenade
10, 07745 Jena

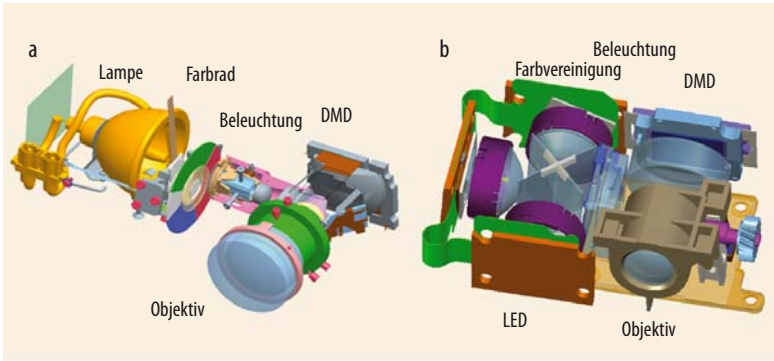


Abb. 1 Der grundsätzliche Aufbau von Projektoren mit Hochdrucklampe (a) und LED-Beleuchtung (b) gleicht sich. Das Lampenmodul passt jedoch in einen Milchkarton, das Optikmodul des LED-Projektors in eine Streichholzschachtel.

aus treten Verluste durch Absorption im Polarisator auf, die bei 10 bis 15 % liegen. Alternativ lässt sich das Bild durch eine Matrix von Mikrospiegeln erzeugen, die je nach Bildinhalt das Licht ins Abbildungssystem oder in eine Lichtfalle reflektieren. Dabei bestimmen die Reflektivität der Mikrospiegel und die ungenutzten Spiegelzwischenräume die Verluste beim Digital Mirror Device (DMD). Texas Instruments erreicht mit rund 32 % den Bestwert unter allen Mikrodisplays. Neben der höheren Effizienz liefert der DMD auch bessere Kontraste. Während LCoS durch Streueffekte im Flüssigkristall ein Schachbrettmuster nur mit einem Kontrast von 80:1 abbilden, erzielen DMD-Projektoren Werte von 600:1 und damit eine viel bessere Bildqualität.¹⁾

Von der Lampe zur LED

Die Abbildungssysteme für Projektoren mit Hochdrucklampe und LED-Beleuchtung sind grundsätzlich gleich (Abb. 1). Unterschiede bestehen nur im Beleuchtungssystem. Um den Platzbedarf und Kosten zu minimieren, verwenden kompakte Projektoren fast ausschließlich ein einziges Mikrodisplay, das nacheinander mit rotem, grünem und blauem Licht beleuchtet wird und ein entsprechendes Teilbild erzeugt. Die Trägheit des Auges überlagert diese zu einem Vollfarbbild.

1) Die oft viel höheren Kontrastwerte in Verkaufskatalogen beziehen sich auf rein weiße und schwarze Bilder ohne jeden Bildinhalt, die in der Praxis kaum vorkommen.

Ultrahochdrucklampen liefern ein durch den Druck von 1 MPa verbreitertes Linienspektrum (Abb. 2). Ein rotierendes Filtrerrad erzeugt die farbselektive Beleuchtung für die Teilbilder. Allein dadurch gehen mehr als zwei Drittel des eingestrahlichten Lichtes für die Projektion verloren, da immer zwei der drei Farben geblockt sind. Hinzu kommt eine starke gelbe Spektrallinie bei 578 nm, die aus allen drei Farben auszublenden ist. Insgesamt ergibt sich für den Projektor eine Effizienz zwischen 12 und 18 %. Der höhere Wert lässt sich dadurch erreichen, dass bei vielen Geräten zwischen den Farbsegmenten des Filtrerrades ein Weißsegment eingefügt ist, das für größere Helligkeit sorgt, aber gleichzeitig die Farbsättigung verringert. LED-Projektoren realisieren die farbselektive Beleuchtung des Mikrodisplays dadurch, dass die jeweils nicht benötigten LEDs ausgeschaltet werden. Die optische Effizienz beträgt ohne ein Weißsegment 25 %. Statt des Filtrerrades zur Farbtrennung sind Farbfilter zur Vereinigung der drei Einzelfarben nötig.

Auch bei der Lebensdauer haben LEDs Vorteile. Nach 50 000 Stunden – das entspricht fast sechs Jahren ununterbrochenen Betriebs – ist ihre Helligkeit auf die Hälfte gesunken. Aber sie funktionieren noch immer, während eine Hochdrucklampe nach 10 000 Stunden kaputt geht, oft auch früher. Wo vor allem Helligkeit wichtig ist, werden Hochdrucklampen trotzdem auch in Zukunft dominieren – etwa bei Kinoprojektoren.

Mit weißen LEDs sind besonders kompakte Projektorarchitekturen möglich. Sie werden mit einem LCD kombiniert, das bienenwabenhörmig angeordnete Farbfilter in Pixelgröße enthält. Ähnlich wie bei einem Fernseher setzt sich jeder Bildpunkt entsprechend aus drei farbigen Subpixeln zusammen. Allerdings kommt es zwischen diesen zu einer Wechselwirkung der elektrischen Felder, welche die Hell-Dunkel-Steuerung bewirken. Ein von dunklen Pixeln umgebenes helles Pixel erscheint dadurch um bis zu 58 % dunkler als in einem rein weißen Bild. Während schwarze Schrift auf weißem Grund hell und kontrastreich darstellbar ist, wirken farbige Bilder düster, da z. B. in einem satt roten Bildbereich zwei Drittel aller Pixel, nämlich die blauen und grünen, dunkel geschaltet sind.

Alternativ lassen sich drei verschiedene farbige LEDs verwenden. Mit je einer roten, einer grünen und

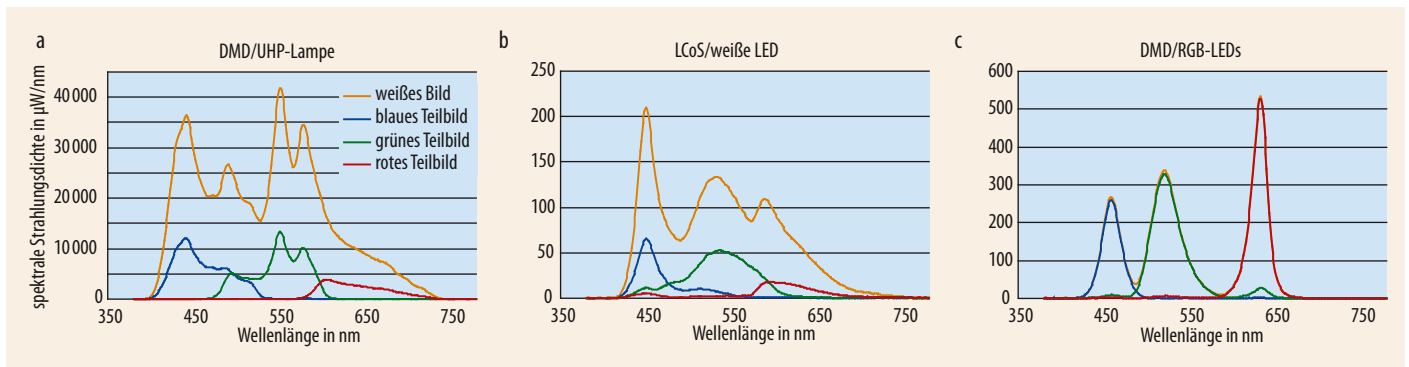


Abb. 2 Spektren der projizierten Bilder für verschiedene Beleuchtungstechnologien.

Je schmalere die Spektren der Einzelfarben sind, umso gesättigter wirken die Grundfarben und

umso mehr Farbtöne sind darstellbar.

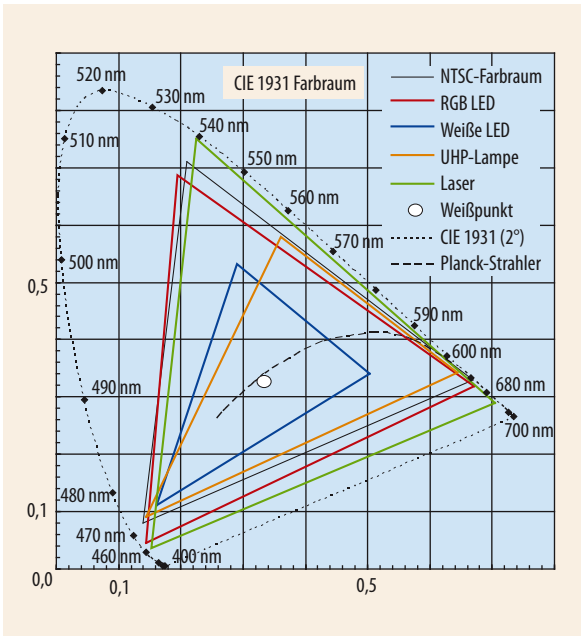


Abb. 3 Mit dem CIE-Farbraum lässt sich die Farbwiedergabe verschiedener Projektoren (z. B. mit Lampe, weißer LED oder farbigen LEDs) charakterisieren und mit dem NTSC-Farbraum vergleichen, der als Standard für (Röhren)-Fernseher dient. Je schmalbandiger die Emission einer Lichtquelle ist, umso weiter liegt der Farbort am Rand des Farbraums und umso größer ist der Bereich darstellbarer Farben.

einer blauen LED, die alle kommerziell verfügbar sind, ist es möglich, den benötigten Farbraum abzudecken. Der optische Aufbau ist etwas komplizierter, weil die drei Lichtquellen vereinigt und zueinander justiert werden müssen. Da die farbigen Einzelbilder nacheinander projiziert werden, gibt es elektronische Wechselwirkungen bei Flüssigkristall-Displays nur entlang der Kanten zwischen verschiedenen hellen Flächen im Bild. DMD-Projektoren, die das Bild durch Kippung von

etwa 10 µm großen Mikrosiegeln erzeugen, sind völlig frei von derartigen Effekten.

Wie bunt ist bunt?

Der Bildeindruck eines Projektors ergibt sich nicht nur aus der Helligkeit, sondern auch durch die darstellbaren Farben. Zur Bewertung dient meist der CIE-Farbraum, der die Gesamtheit der vom Menschen wahrnehmbaren Farben umfasst und biologisch auf den Augenempfindlichkeitskurven basiert. Jedem Farbton ist dabei ein Punkt (x, y) im Farbraum zugewiesen, Farbort genannt. Die Farborte der drei Farben Rot, Grün und Blau spannen den Farbraum eines Projektors auf, d. h. die Gesamtmenge darstellbarer Farben (Abb. 3).

Einfarbige LEDs haben ein annähernd gaußförmiges Emissionsspektrum mit Halbwertsbreiten von etwa 30 nm. Dadurch erzeugen sie sehr reine, gesättigte Farben. Der hohe Farbkontrast führt dazu, dass besonders farbige Bilder subjektiv heller wirken, als sie objektiv sind, weil Details besser zu erkennen sind. Bei Hochdrucklampen bestimmen vor allem die Filter des Farbrads die Größe des Farbraums, da das Lampenspektrum selbst annähernd weißem Licht entspricht. Sie stellen immer einen Kompromiss zwischen Helligkeit (möglichst breitbandige Filter) und Farbreinheit (möglichst schmalbandige Filter) dar. Meist haben diese Projektoren deutliche Schwächen besonders bei der Darstellung von Pastellfarben.

In einer weißen LED erzeugt der Phosphor eine sehr breitbandige Emission. Um die Effizienz nicht weiter zu verschlechtern, verzichtet man auf eine gute Farbfilterung, sodass eigentlich rote Bildinhalte orange und grüne gelbgrün erscheinen. Unproblematisch ist lediglich die blaue Farbe, da der Mensch blaue Farb-

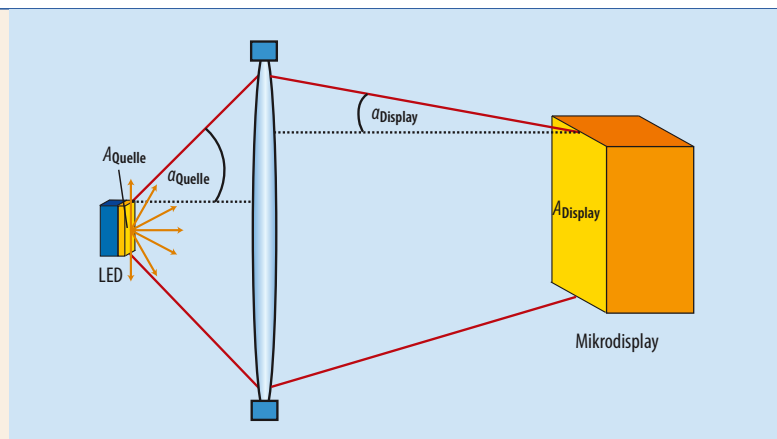
ÉTENDUE

Die **Étendue** (frz.: Ausdehnung) ist eine wenig bekannte physikalische Erhaltungsgröße. Sie entspricht einem Raumsektor, in den eine Lichtquelle abstrahlt bzw. aus dem ein Mikrodisplay Licht verarbeiten kann, und berechnet sich nach (Abb.):

$$E = \pi A n^2 \sin^2 \alpha.$$

Dabei ist A die Fläche der Lichtquelle bzw. des Mikrodisplays, n die Brechzahl des umgebenden Mediums und α der Abstrahl- bzw. Akzeptanzwinkel. Aufgrund des Erhaltungscharakters der Étendue führt eine Fokussierung der LED (Verkleinerung der Fläche) zwangsläufig zu einer Vergrößerung des Divergenzwinkels. LEDs strahlen herstellerunabhängig fast ideal unter 180° Licht ab, nur die Fläche variiert.

Mikrodisplays für besonders kompakte Projektoren, z. B. für Handys oder Webbooks, haben eine Fläche zwischen 8,6 und 36 mm². Der Mikrospiegel-Kipp-



winkel von 12° bestimmt den Akzeptanzwinkel beim DMD. Bei LCD und LCoS nimmt bei Winkeln über 15° die polarisationsdrehende Wirkung deutlich ab. Damit begrenzt das Display die Étendue. Man kann deshalb direkt die optimale LED-Fläche berechnen, bei der ein Maximum an Helligkeit erreicht,

aber der Lichtstrom am Mikrodisplay nicht beschnitten wird.

Für höchste Effizienz des Projektors sind LEDs erforderlich, die nicht nur in der Größe, sondern auch mit ihrem Seitenverhältnis an das Display angepasst sind.

schattierungen nur schlecht unterscheiden kann. Im Ergebnis wirkt die Projektion blass und verwaschen, ungefähr wie gedruckte Bilder, die zu lange der Sonne ausgesetzt waren. Bezüglich der Farbdarstellung haben Projektoren mit drei farbigen LEDs eindeutige Vorteile. Selbst bei Lasern als Lichtquelle lässt sich der Farbraum nur noch geringfügig vergrößern.

Was heute möglich ist

Bei Projektoren geben Hersteller den Lichtstrom (in Lumen) an, die Gesamtmenge des abgestrahlten sichtbaren Lichts. Die Helligkeitsempfindung des Menschen hängt jedoch nicht vom Lichtstrom eines Projektors ab, sondern von der Beleuchtungsstärke („Helligkeit“), also dem Lichtstrom pro beleuchteter Fläche (in Lux). Je größer die Projektionsfläche umso geringer ist die Beleuchtungsstärke. Ein Mini-Projektor mit 10 lm scheint gegenüber den in Besprechungsräumen normalen 1500-lm-Projektoren unglaublich dunkel zu sein. Wenn man jedoch bedenkt, dass die Projektionsfläche im Konferenzraum oft um die 4 m² groß ist, während für das Anschauen von Fotos oder Videos mit Freunden schon DIN A3-Größe akzeptabel erscheint, kommt man zu Lichtintensitäten von 375 Lux (bei 1500 lm auf 4 m²) bzw. 83 Lux (bei 10 lm auf A3). Eine weitere Randbedingung ist die Umgebungshelligkeit. In einem gut ausgeleuchteten Arbeitsraum werden die Wände mit 100 bis 150 Lux beleuchtet. Bei mäßiger Abdunklung reduziert sich dieser Wert auf etwa fünf Lux. Bei dieser Helligkeit kann man noch ohne große Mühe lesen. Für den Projektor in einem hellen Besprechungsraum resultiert dadurch nur ein Verhältnis von 3:1 zwischen Bild- und Umgebungshelligkeit, während man mit dem 10 lm-LED-Projektor in einer leicht abgedunkelten Umgebung bereits auf ein Verhältnis von 16:1 kommt. Wie hell das Bild erscheint, hängt also sehr stark von den Einsatzbedingungen ab.

Mit einem LKW kann man zwar viel mehr transportieren als auf dem Gepäckträger des Fahrrads, aber

im Feierabendstau ist das Fahrrad schneller, verbraucht weniger Energie und bereitet keine Probleme bei der Parkplatzsuche. Nicht anders verhält es sich mit Projektoren – die Photonenkanone ist das Richtige für den Hörsaal, der Winzling punktet, wenn man ohne Steckdose und ohne Laptop als Datenquelle im kleineren Kreis bunte Bilder zeigen möchte.

Die Effizienz der LEDs für Projektoren hat sich in den letzten Jahren rasant erhöht. Durch spezielle LED-Formate kann man die Étendue der Beleuchtung exakt an die verfügbaren Mikrodisplays anpassen und so das gesamte Projektormodul optimieren (vgl. **Infokasten**). Da die Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist, wird man in nächster Zeit auch preiswerte Kleinstprojektoren mit bis zu 50 lm Lichtstrom auf dem Markt finden, die sich dank hoher Energieeffizienz mit Batterie betreiben lassen. Durch ein virtuelles Weißsegment – ein Bild, bei dem alle LEDs angeschaltet sind – lässt sich für Powerpoint-Präsentationen mit viel Text eine größere Helligkeit erzeugen, durch einen Energiesparmodus eine längere Betriebszeit.

LED-Projektoren mit höheren Leistungen kommen derzeit vor allem als Rückprojektionsmodule für Bildwände zum Einsatz, die als Anzeigen für Kraftwerke und Verkehrsplanung oder als großformatige Werbeflächen dienen. Auch da kommt es vor allem auf satte, gut erkennbare Farben und lange Lebensdauer an. Unter Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten sind heute bereits LED-Projektoren mit bis zu 1000 Lumen Lichtleistung denkbar; sie wären jedoch noch deutlich teurer als vergleichbare Geräte mit Hochdrucklampen.

DIE AUTORIN

Heidrun Jänchen studierte Physik an der Universität Jena und promovierte am Fraunhofer-Institut für angewandte Optik und Feinmechanik Jena auf dem Gebiet der Dünnschichtoptik. Seit 2000 ist sie als Entwicklerin im Bereich Digitale Projektion von Carl Zeiss beschäftigt, der 2005 als Sypro Optics GmbH ausgegründet wurde.

