

Multimedia-Displays – von der Physik zur Technik

Karlheinz Blankenbach

Sichtbarster Ausdruck des elektronischen Zeitalters ist die nahezu allgegenwärtige digitale Anzeige von Daten und Bildern, angefangen bei einfachen Displays in Armbanduhren und Taschenrechnern bis hin zu den komplexen Bildschirmen multimedialer Notebooks. Bei den Display-Technologien kommen interessante Kombinationen physikalischer Grundlagen zur Anwendung, die bisher in der Standardliteratur kaum repräsentiert sind. In diesem Artikel wird die Funktionsweise etablierter und zukunfts-trächtiger, multimedialfähiger (Flach-)Display-Technologien vorgestellt. Für die immer häufiger gewünschten multimedialen Anwendungen benötigt man videotaugliche, farbige Anzeigen mit (mindestens) VGA-Auflösung. Eine optimale Display-Technologie für alle Zwecke existiert heute noch nicht. Flüssigkristallanzeigen kommen dem Ideal zwar schon recht nahe, doch im Bereich der PC-Monitore konnten sie sich aus Kostengründen bisher kaum durchsetzen.

Displays sind der wichtigste und auch mit der kostenträchtigste Teil der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine: Allein für Fernseh- und Computeranwendungen wurden 1998 weltweit ca. 250 Millionen Displays produziert, 90 % davon Kathodenstrahlröhren (CRT), auch Elektronenstrahlröhren genannt. Die Anzahl der im selben Zeitraum hergestellten Kleindisplays auf LCD- und LED-Basis liegt noch um Größenordnungen darüber (Abkürzungen s. Kasten). Alle modernen Displays beruhen auf der Umwandlung elektrischer in optische Signale. Für eine kommerzielle Nutzung müssen die elektrooptischen Eigenschaften einer Anzeige mit den anwendungsspezifischen (z. B. Leistungsaufnahme, Temperaturbereich, Preis) optimal kombiniert werden. Displays teilt man nach ihren physikalischen Eigenschaften in aktive und passive ein (für Einführung und Überblick s. [1, 2]). Aktive Anzeigen erzeugen das emittierte Licht selbst; Beispiele sind CRT, LED, VFD und Plasmaanzeigen. Passive Displays, zum Beispiel LCD, erzeugen selbst kein Licht, sondern nutzen das Umgebungslicht aus.¹⁾

Verglichen mit den passiven Displays haben die aktiven einen relativ geringen Wirkungsgrad und somit auch einen deutlich höheren Stromverbrauch. Dies spricht gegen ihren Einsatz in batteriebetriebenen

Geräten wie Laptops oder Handys. Trotz unterschiedlicher Funktionsweisen haben die im folgenden vorgestellten Display-Technologien überraschend viele Gemeinsamkeiten: Aktive Displays nutzen Phosphore zur Erzeugung von sichtbarem Licht, sei es durch Anregung mit Elektronen (CRT, VFD, FED), UV-Strahlung (Plasma) oder schnellen Ladungsträgern (EL). Die dem Betrachter zugewandte Seite des Displays (bei LCD beide Seiten) besteht aus Glas. Um die Anzeige elektrisch ansteuern zu können, muß das Glas bei Matrix-Flachbildschirmen (s. u.) auf seiner Innenseite mit leitfähigem, durchsichtigem Material beschichtet sein. In nahezu allen Fällen wird hierfür eine bis zu 100 nm dicke Schicht aus Indium-Zinnoxid benutzt (ITO), deren Strukturierung die Matrix- bzw. Pixelform ergibt. Glas dient auch zur mechanischen Stabilisierung. Es muß bei den evakuierten Displays (CRT, Plasma, FED, VFD) hinreichend dick sein. Dies wirkt sich nachteilig auf Baugröße und Gewicht der Anzeige aus. Bei LCD

Abkürzungen

AMLCD: Active Matrix LCD, LCD mit eigener Pixelansteuerung durch Dünnschichttransistor (Thin Film Transistor)
AMEL: Active Matrix EL-Display
CAD: Computer aided Design
CRT: Cathode Ray Tube, Elektronenstrahl-, Braunsche Röhre
DMD: Digital Mirror Device, digital verstellbare Mikrospiegel, welche das einfallende Licht reflektieren, Projektionsprinzip
EL: Elektrolumineszenz
FED: Field Emission Display, kalte Feldemission von Elektronen
ITO: Indium Tin Oxyde, Indium-Zinnoxid
IPS: In Plane Switching, LCD mit beiden Pixelelektroden auf einer Seite (aufgeklappter Kondensator)
LCD: Liquid Crystal Display, Flüssigkristallanzeige
LED: Light Emitting Diode, Leuchtdiode
Pixel: kleinste darstellbare Informationseinheit, z. B. kleines Quadrat
PALC: Plasma addressed Liquid Crystal, plasmaangesteuertes LCD
STN: Super Twisted Nematic, Flüssigkristalle mit Verdrillwinkel 180° - 270°
TFT: Thin Film Transistor, Dünnschicht-Transistor, siehe AMLCD
TN: Twisted Nematic, Flüssigkristalle mit Verdrillwinkel 90°
VFD: Vacuum Fluorescence Display
VGA: Video Graphics Adapter, übliche Minimalauflösung im PC-Bereich 640 × 480 Pixel

Prof. Dr. Karlheinz Blankenbach, Hochschule für Gestaltung, Technik und Wirtschaft, Tiefenbronner Str. 65, 75175 Pforzheim

¹⁾ Über Displays aus Polymeren berichtete H. Sixl in Phys. Bl., März 1998, S. 225. In einem der nächsten Hefte erscheint darüber hinaus eine Zusammenfassung der Podiumsdiskussion „Leuchtende Polymere – Displays mit Zukunft“ von der DPG-Frühjahrstagung in Münster (Red.)

genügen hingegen schon 0,3 bis 1,1 mm dicke Gläser. Das wichtigste an einem Display ist eine gute Ablesbarkeit. Sie hängt vom Kontrast ab, der in der Meßtechnik als das Verhältnis der Leuchtdichten der Pixel (Luminanz) bei ein- und ausgeschaltetem Leuchtelement definiert ist: $C_R = L_{on}/L_{off}$. Die untere Ablesbarkeitsgrenze liegt bei einem Kontrastverhältnis von ca. 3:1, die obere, bei der Blendwirkung einsetzt, liegt bei etwa 500:1. Das subjektiv beste Kontrastverhältnis beträgt etwa 10:1, je nach Adaption des Beobachters.

Aktive Displays erzeugen Farben durch additive Farbmischung, passive Anzeigen hingegen durch subtraktive. Sie wirken wie Lichtfilter. In Anlehnung an die Physiologie des menschlichen Auges mit seinen drei verschiedenen Arten von Farbrezeptoren werden für Farbd Displays Farbtupel ausgewählt: für aktive Verfahren die Primärfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B), für passive die Farben Cyan (C), Magenta (M) und Gelb (Y). Die additive Farbmischung erzeugt aus der RGB-Überlagerung bei gleicher Leuchtdichte der Primärfarben Weiß. Alle anderen Farben werden durch Graustufen, d. h. Leuchtdichteunterschiede der Primärfarben erzeugt. Der Farbtintendruck basiert dagegen auf subtraktiver Farbmischung. Nachfolgend werden die wichtigsten Multimedia-Display-Technologien in der Reihenfolge ihrer Marktbedeutung erläutert. Tabelle 1 gibt einen Überblick.

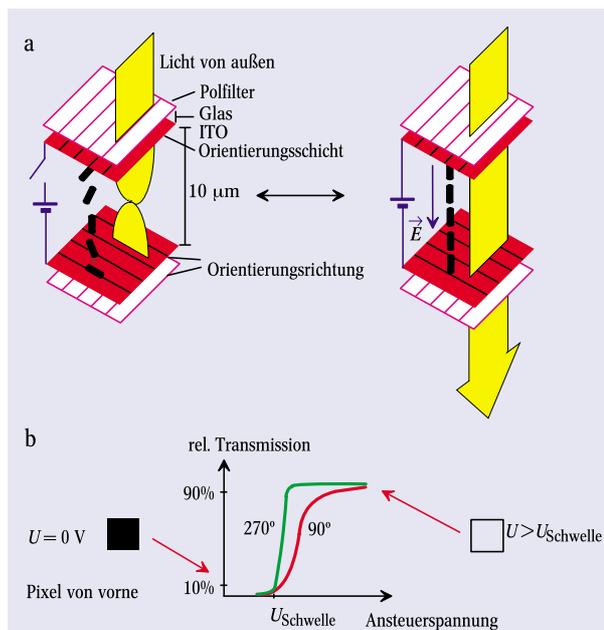


Abb. 1:
 ► a) Funktionsweise von LCD am Beispiel einer 90°-TN-Zelle (Twisted Nematic, Orientierungsschichten um 90° gedreht). Außen befinden sich Polarisationsfilter, die nur eine Schwingungsrichtung des Lichtes durchlassen. Sie sind auf Glasplatten befestigt, die zur mechanischen Stabilisierung und als Trägermaterial für die übrigen Schichten des Displays dienen. Eine dünne, durchsichtige Halbleiterschicht (ITO) steuert die Anzeige. An der Orientierungsschicht richten sich stäbchenförmige Flüssigkristalle aus. Die Polfilter sind parallel zueinander angeordnet, die Orientierungsschichten jedoch um 90° gegeneinander verdreht. Die Lichttransmission wird von der nur 10 µm dicken Flüssigkristallschicht gesteuert. Im spannungslosen Fall (links) wird die Polarisationsrichtung

durch die Helixstruktur der Flüssigkristalle so gedreht, daß der untere Polfilter den Lichtdurchlaß verhindert. Das entsprechende Pixel erscheint dunkel. Legt man an beide ITO-Schichten eine Spannung an, die größer ist als die Schwellenspannung im Bereich von 2 V, so richten sich die Flüssigkristalle parallel zum elektrischen Feld aus. Schon ca. 0,5 V über der Schwellenspannung ist die maximale Ausrichtung erreicht. Die Polarisationsrichtung des Lichtes wird dann nicht mehr gedreht und es kann den unteren Polfilter passieren: Das Pixel erscheint hell (rechts).

► b) relative Transmission in Abhängigkeit von der Ansteuerspannung. Der Drehwinkel der Flüssigkristalle beträgt 90° (rote Kurve) oder 270° (grüne Kurve).

Kathodenstrahlröhren

Die Kathodenstrahlröhre mit ihrer 100jährigen Geschichte und ihrer weiten Verbreitung ist allgemein bekannt. Ihre Funktionsweise beruht darauf, daß ein Elektronenstrahl Phosphor zur Lichtemission anregt. Im Gegensatz zu den anderen Display-Verfahren werden nicht einzelne Pixel in einer Matrix elektrisch angesteuert, sondern für jede Farbe wird der Strahl einer Elektronenkanone durch Magnetspulen und Lochmasken auf die entsprechenden Pixel gelenkt. Das so erzeugte Licht muß auf dem Weg zum Betrachter die Phosphorschicht durchqueren. Dadurch wird seine Intensität deutlich vermindert. Dem Vorteil einer relativ einfachen Ansteuerung steht eine Reihe von Nachteilen gegenüber. Aufgrund ihrer Baugröße sind CRT sehr schwer; ihr hoher Stromverbrauch verhindert einen mobilen Einsatz; hohe Spannungen bis ca. 25 kV und hochfrequente Wechselströme beeinträchtigen die elektromagnetische Verträglichkeit; geometrische Nichtlinearitäten sind nachteilig für die CAD-Nutzung; langangezeigte Bildinhalte werden eingebrannt. Unschlagbar sind die Röhren hingegen in ihrem niedrigen Preis und ihrer Marktpräsenz.

Flüssigkristallanzeigen (LCD)

Flüssigkristallanzeigen sind passive Displays. Sie wirken wie ein Ventil, das Licht passieren läßt oder es zurückhält. Dies beruht auf den anisotropen Materialeigenschaften der Flüssigkristalle (Dielektrizitätskonstante, Brechungsindex, Elastizitätsmodul). Deren flüssigkristalliner Aggregatzustand vereint die Ausrichtung der Moleküle in der festen, kristallinen Phase mit der Beweglichkeit des flüssigen Zustandes. Das Prinzip der LC-Anzeigen geht auf Arbeiten von Ferguson, Schadt und Helfrich Anfang der siebziger Jahre zurück [3].

LCD sind symmetrisch aufgebaut (Abb. 1). Eine ca. 10 µm dicke Flüssigkristallschicht steuert die Lichttransmission. Als elektrisches Bauelement entspricht ein LCD-Pixel einem Kondensator, seine Ansteuerung ist demzufolge ein RC-Glied. Da sich Flüssigkristalle unter Gleichspannung chemisch zersetzen, müssen sie mit einer symmetrischen Wechselspannung ohne Gleichspannungsanteil gesteuert werden. Ein LCD-Pixel läßt sich voll durchsteuern, so daß ein maximaler Kontrast erzielt werden kann.

Die Farberzeugung geschieht bei LCD mit Hilfe von RGB-Filtern, die vor den Pixeln liegen. Dies hat jedoch den Nachteil, daß Farbfilter und Polarisatoren nur ca. 10% des zur Verfügung stehenden Lichtes passieren lassen. Grautöne werden durch ein abgestuftes Ansteuersignal erzeugt. Der größte Vorteil der LCD-Technologie liegt in der relativ geringen Baugröße der Displays und ihrem niedrigen Leistungsverbrauch. Ohne sie wären Laptops nicht realisierbar.

Plasmaanzeigen

Die derzeit einzige kommerziell verfügbare Flachbildtechnologie mit großer Bilddiagonale (42", Auflösung 16:9 VGA) basiert auf dem Plasmaprincip. Ihre Funktionsweise verbindet die Lichterzeugung durch den Plasmaeffekt, wie er von Neonröhren her bekannt ist, mit der Farberzeugung durch Phosphore (Abb. 2). Die Effizienz der Plasmadisplays liegt aber um etwa zwei Größenordnungen unter der von Leuchtstoffröhren.

Das in Plasmaanzeigen benutzte Xenon hat ein Ionisierungspotential von ca. 10–20 eV. Bei einem

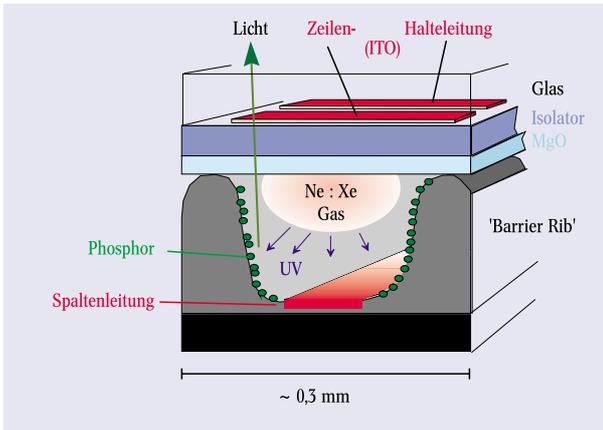


Abb. 2 :
Pixel eines Plasmaschirms. Zur Ansteuerung von Großdisplays wird eine Wechselspannung von etwa 500 V und 50 kHz verwendet: Zwischen Zeilen- und Halbleitung liegt ständig eine subkritische Spannung. Um das Plasma zu zünden, steuert man zusätzlich die Spaltenleitung mit einem Spannungspuls an (Matrixprinzip s. u.). Die subkritische Spannung an der Halbleitung reicht aus, das Plasma aufrecht zu erhalten. Die UV-Strahlung des Plasmas bringt eine Phosphorschicht zum Leuchten. Um das Pixel wieder auszuschalten, wird ein entgegengerichteter Spannungspuls angelegt, der das Plasma zusammenbrechen läßt.

Druck von etwa 50 kPa erzeugt das Xenon-Plasma eine ultraviolette Vakuumstrahlung mit Peaks bei 148 nm und 172 nm. Die UV-Strahlung dringt ca. 1 μm tief in die Phosphorschicht ein – im Gegensatz zu ca. 5 μm für Elektronen (CRT). Im Phosphor regt die UV-Strahlung geeignete Aktivatoratome im Kristallgitter an, die daraufhin sichtbares Licht abgeben, wobei die typischen Abklingzeiten zwischen 1 und 10 ms liegen. Durch passende Materialwahl lassen sich RGB-Farben erzeugen.

Anders als bei der CRT muß das Licht der Plasmaanzeige die Phosphorschicht nicht durchdringen, da es auf der Betrachterseite erzeugt wird. Die einzelnen Pixelpalten sind durch Trennwände abgeteilt, um ein Übersprechen zu vermeiden. Verglichen mit LCD besitzen Plasmabildschirme einen größeren Betrachtungswinkel. Zudem sind sie videotauglich, da sie eine höhere Schaltgeschwindigkeit haben. Nachteilig bei Plasmaschirmen sind ihr großes Gewicht und ihr hoher

Stromverbrauch sowie eine RGB-Pixelgröße, die mit etwa 1 mm rund dreimal so groß ist wie die der LCD und CRT. Für Anwendungen mit großem Betrachtungsabstand und geringer Pixelzahl, wie etwa beim Fernseher, spielt dies nur eine untergeordnete Rolle. Für hochauflösende CAD-Anwendungen sind Plasmaschirme indes ungeeignet.

Elektrolumineszenz-Displays

EL-Displays sind flache, selbstemittierende Festkörperbauelemente. Ihr Aufbau ist relativ einfach: Zwischen zwei leitfähigen Platten mit Isolationsschichten befindet sich eine Elektrolumineszenz-Schicht, meist aus dotiertem ZnS. Wegen der geringen Dicke der EL-Schicht von ca. 100 μm ist das EL-Display nahezu durchsichtig. Somit kann ein Auto-Kombiinstrument mit einem EL-Matrix-Display vor Zeigerinstrumenten aufgebaut werden: Im Normalzustand sind die Rundinstrumente sichtbar, bei Bedarf können aktuell relevante Informationen (z. B. Navigationsdaten) mit der EL-Anzeige eingeblendet werden. Weitere Anwendungen beruhen darauf, mit EL-Folien LCD und großflächige Symbole zu hinterleuchten. Diese Folien lassen sich durch Siebdruckverfahren herstellen.

Die elektrooptische Funktionsweise der EL-Displays basiert auf der Anregung leuchtfähiger Zentren des EL-Materials durch sehr energiereiche Ladungsträger, die von elektrischen Feldern in der Größenordnung 10^5 V/cm erzeugt werden. Bei der Rückkehr in den Grundzustand wird Strahlung emittiert. Diese Lichterzeugung ähnelt derjenigen in den LED und gehorcht vergleichbaren Gesetzmäßigkeiten: Oberhalb einer Schwellenspannung nimmt die Leuchtdichte stark zu. Als Ansteuerung wird für Matrixdisplays und EL-Folien eine Wechselspannung von ca. 200 V und 10 kHz gewählt.

Experimentell erhält man für die Leuchtdichte folgende Abhängigkeit von der Ansteuerspannung V [6]:

$$L \propto e^{-\frac{C}{\sqrt{V}}}$$

mit $[L] = \text{cd/m}^2$ und C als Konstante.

Zwar lassen sich durch höhere Ansteuerspannungen größere Leuchtdichten erzielen, doch dies erfordert teurere Treiberbausteine und erhöht das Risiko von Kurzschlüssen. Das effektivste Produktionsverfahren für großflächige Matrixanzeigen ist das Aufdampfen in

Tabelle 1: Vergleich verschiedener multimediafähiger Direktsicht-Technologien (Stand 12/98).

Technologie	Video	Kontrast	weitere Vorteile	Nachteile	Potential	Kosten pro Zoll ca. / DM
CRT	++	+	Preis, großes Format, Blickwinkel, Lebensdauer	hohe Leistungsaufnahme, hohe Spannungen, Bautiefe, EMV, Einbrennen	gering	25
Passiv-LCD	0	-	billig, reflektiv für outdoor, Leistungsaufnahme	Blickwinkel, Temperaturbereich	active addressing, anti-ferroelektrische LCD	50
AMLCD	++	++	Blickwinkel, Leistungsaufnahme	doppelt so teuer wie Passiv-LCD, Lichtverlust durch Apertur	Integrierte Treiber, poly-Si, IPS, reflective TFT	100
Plasma	+	++	großes Format, Blickwinkel	teuer, hohe Leistungsaufnahme	PALC	200
EL	--	++	mittleres Leistungsvermögen	keine Videofarben, Einbrennen	Videofarben	150
VFD	-	++	Blickwinkel, Lebensdauer	hohe Spannungen, Bautiefe, Gewicht	gering	300
FED	-	+	einfacher Aufbau	hohe Spannungen	Diamant FED	200

Atomlagenepitaxie (Dünnschichttechnik). Der Schwerpunkt der EL-Forschung liegt gegenwärtig darin, echte Farbfähigkeit zu erreichen. Die EL-Technologie hat Vorteile bei rauen Umgebungsbedingungen, doch hat sie derzeit, verglichen mit anderen Display-Technologien, nur ein mittleres Leistungsvermögen.

Vakuum-Fluoreszenz-Displays

Vom Prinzip her sind Vakuum-Fluoreszenz-Displays flache Elektronenstrahlröhren. Sie wurden in die

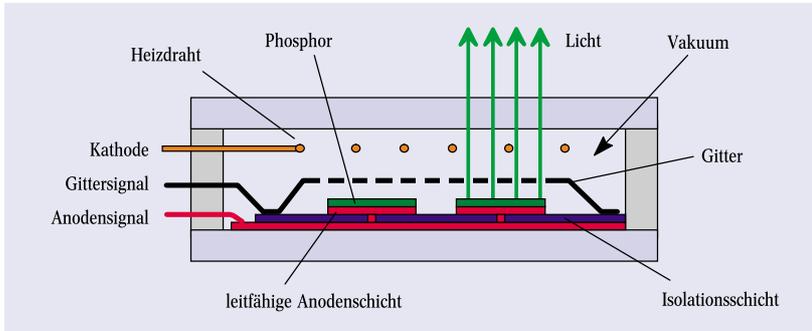


Abb. 3: Seitenansicht eines VFD. Von der Kathode „heiß“ emittierte Elektronen werden vom Gittersignal selektiert und beschleunigt. Sie treffen auf eine Phosphorschicht und regen diese zum Leuchten an.

ersten Taschenrechner eingebaut, sind jedoch später von den LCD verdrängt worden, weil deren Stromverbrauch geringer ist. Heute sind VFD in Haushalts- und HiFi-Geräten aus Gründen des Designs weit verbreitet. Die VFD-Technologie basiert auf dem Triodenprinzip der Elektronenröhre (Abb. 3): Von der Kathode, einem Heizfaden mit einem Durchmesser von ca. 10 μm , werden Elektronen „verdampft“ und durch eine Gitterspannung von ca. 50 V beschleunigt. Das Gitter besitzt eine leicht erkennbare charakteristische Wabenstruktur, die durch Ätzen einer sehr dünnen Stahlfolie erzeugt wird. Wenn die Elektronen in die phosphorbeschichtete Anode eindringen, die auf ca. 100 V liegt, wird Licht emittiert. Die Fluoreszenzanregung weist Abklingzeiten im μs -Bereich auf. Matrixanzeigen baut man aus segmentierten Anoden und Mehrfachgitterstrukturen. Wie bei den Plasmaanzeigen wird das Licht bei den VFD auf der dem Betrachter zugewandten Seite erzeugt. Auf diese Weise erzielt man Leuchtdichten von bis zu 10 000 cd/m^2 , die diejenigen aller anderen Multimedia-Displaytechnologien um ein Vielfaches übertreffen.

VFD zeichnen sich durch einen großen Betrachtungswinkel und einen hohen Kontrast aus. Sie sind robust und zuverlässig und besitzen eine hohe Lebensdauer. Nachteilig ist jedoch ihr im Vergleich zu anderen Flachdisplays schlechtes Verhältnis von aktiver Displayfläche zu mechanischer Größe und ihre bislang eingeschränkte Farbtauglichkeit.

Feldemissions-Displays

Starke elektrische Felder von ca. $10^9 \text{ V}/\text{cm}$ können aufgrund des Tunneleffekts aus „kalten“ Metallen Elektronen herauslösen. Für diese Feldemission benötigt man keine energieaufwendige Heizung wie im Falle der Elektronenstrahlröhren und Vakuum-Fluoreszenz-Displays. Dieses Prinzip wird bei microtip-FED (Abb. 4 und 5) angewandt und ermöglicht flache Displays mit geringem Stromverbrauch und den optischen Vorteilen einer Röhre, nämlich großem Betrachtungswinkel, leuchtenden Farben und Videotauglichkeit. Die Elektronenemission beginnt bei einer Spannung von etwa 50 V zwischen Kathode und Gitter. Die Anodenspan-

nung liegt in einem weiten Bereich von 1 – 10 kV, doch erst bei hohen Spannungen können die von der CRT her bekannten Phosphore zur Farberzeugung eingesetzt werden.

Die Leuchtdichte von FED in cd/m^2 kann man gemäß folgender Formel berechnen [5]:

$$L = \frac{V_A I_a \eta D}{\pi A},$$

wobei V_A die Anodenspannung, I_a den Strom in das aktive Pixel, η die Phosphoreffizienz, D den duty cycle und A die gesamte Pixelfläche einschließlich nicht aktiver Teile bezeichnen.

Der größte Vorteil der FED liegt in ihrer relativ einfachen lithografischen Herstellung: Es werden nur noch fünf Schichten (für TFT-LCD: 22) und ein „kritischer“ Maskenprozeß von hoher Präzision (TFT-LCD: 10) benötigt. Die Massenproduktion von microtip-FED läuft gegenwärtig an. Ein sehr großes Entwicklungspotential haben Diamant-FED mit drei Schichten, deren Herstellung gänzlich ohne kritischen Maskenprozeß auskommt. Die Kapitalkosten für eine FED-Fabrik betragen voraussichtlich nur 1/5 der für eine TFT-Fertigungsanlage benötigten Mittel von ca. 1 Mrd. DM. Dies wird sich beim Preis der FED niederschlagen.

Matrixsteuerung

Um Buchstaben, Grafiken und Bilder aus vielen Pixeln sinnvoll darstellen zu können, benutzen alle Flachbildschirmtechnologien das Matrixprinzip (Abb. 6): Eine Matrix besteht aus Zeilen (rows) und Spalten (columns). Das Scansignal aktiviert nacheinander jede Bildzeile. Die Spaltenleitungen enthalten

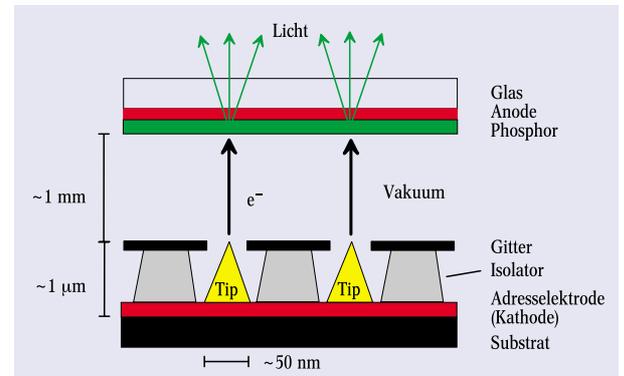


Abb. 4: Aufbau einer Microtip-FED. Durch hohe Feldstärken werden Elektronen „kalt“ emittiert und treffen auf eine Phosphorschicht, die sie zum Leuchten anregen.

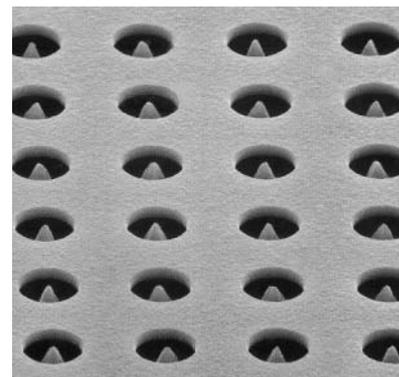


Abb. 5: Ultrafeine Kunst: Microtips eines Feldemissions-Displays. Die Gitterlöcher haben einen Durchmesser von ca. 50 μm . Mehrere tausend Tips bilden ein Pixel. (SEM-Aufnahme mit freundlicher Genehmigung der FUTUBA GmbH, Düsseldorf)

die darzustellenden Daten als parallel anliegende Signale, so daß man jedes Pixel einzeln ansteuern kann. Die Matrixtechnik soll am Beispiel einer Passivmatrix – STN LCD – erläutert werden: Auf beiden Glasscheiben sind streifenförmige ITO-Leitungen aufgebracht. Jeder Kreuzungspunkt ist ein Pixel. Bei geeigneter Wahl der Spannungen ergibt sich aus der in Abb. 1 dargestellten elektrooptischen Kennlinie folgender Effekt: An der oberen Zeile (scan row) und der linken Datenleitung (Spalte, data) liegt keine Spannung an. An der unteren Zeile und der rechten Spalte liegt eine Spannung unterhalb der Schwellenspannung an. Daraus resultiert z. B. für das linke obere Pixel eine Gesamtspannung von 0 V und es bleibt dunkel; beim rechten unteren Pixel addieren sich die anliegenden Spannungen, und das Pixel wird lichtdurchlässig. Bei den zwei anderen Pixeln liegt die resultierende Spannung jeweils unterhalb der Schwellenspannung. Sie lassen deshalb nahezu kein Licht passieren.

Nachteilig ist der relativ niedrige Kontrast der Passivmatrix: Das Ansteuersignal liegt nicht mehr permanent an einem Pixel an, sondern nur noch zu $1/N$ der Zeit (duty cycle), wobei N die Anzahl der Zeilen ist. Da sich das Pixel aufgrund der Leitfähigkeit des Flüssigkristalls zwischen zwei Ansteuerperioden „entlädt“, sinkt die Pixelspannung und somit auch der Kontrast. Bei den Passivmatrix-Displays mit N Zeilen liegen die Spannungspegel $V_{on/off}$ eines angesteuerten bzw. nicht angesteuerten Pixels nach Alt & Pleshko (siehe [4]) sehr eng beieinander:

$$\frac{V_{on}}{V_{off}} = \sqrt{\frac{\sqrt{N} + 1}{\sqrt{N} - 1}}$$

Mit steigender Zeilenzahl, wie sie für Multimedia-displays erforderlich ist, fällt das Verhältnis der beiden Spannungspegel stark ab. So ergibt sich z. B. für ein VGA-Display mit zwei Zeilentreibern (Dual Scan, $N=240$) ein Spannungsverhältnis von 1,07, d. h. bei 2,0 V für den ausgeschalteten Zustand liegt der eingeschaltete bereits bei 2,13 V. Mit der 90°-TN-Technik läßt sich aufgrund der vorliegenden elektrooptischen Kennlinie (s. Abb. 1, unten) kein ausreichender Kontrast mehr erzielen. Man geht deshalb zu höheren Verdrehwinkeln von bis zu 270° (Super Twisted Nematic) über, bei denen die Kennlinie einen deutlich steileren Anstieg aufweist. Doch selbst dann weisen Pixel, die eigentlich nicht angesteuert werden sollten, eine gewisse Leuchtdichte auf. Das Kontrastverhältnis ist deshalb im Gegensatz zur direkten Ansteuerung deutlich geringer [6]:

$$C_R = \frac{L_{on}}{N \cdot L_{off}} + 1$$

Weitere Nachteile der STN-Technik bestehen in den unvermeidlichen Farbverschiebungen aufgrund der Doppelbrechung im Flüssigkristall, der schwierigen Realisierung von Graustufen bei steilerer elektrooptischer Kennlinie und einem relativ geringen Betrachtungswinkel. Ähnliche Probleme der Matrixansteuerung treten auch bei den anderen Technologien auf und müssen gelöst werden (z. B. durch Halteelektroden bei Plasmaanzeigen).

Sowohl der Kontrast als auch die Schaltgeschwindigkeit von Matrix-LCD können mit Hilfe eines Transistors und eines Haltekondensators an jedem Pixel

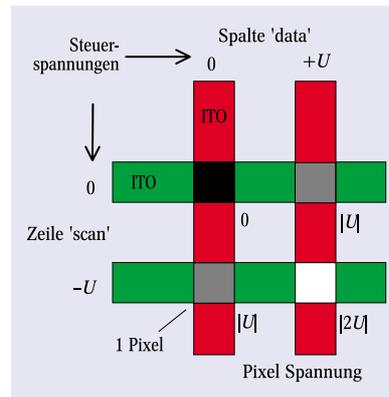


Abb. 6: Matrixprinzip am Beispiel einer Passivmatrix-LCD mit vier Bildpunkten. Durch ITO-Leiterbahnen wird eine Pixelmatrix gebildet. Jeder Kreuzungspunkt entspricht einem Pixel in Draufsicht (vgl. Abb. 1, oben).

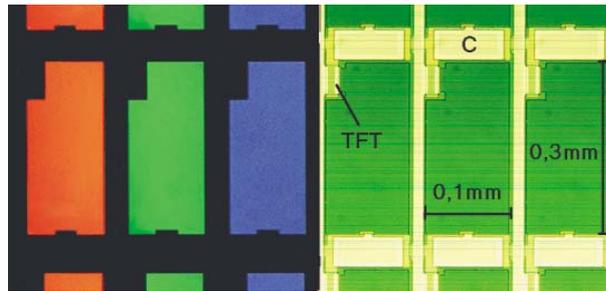


Abb. 7: Vergrößerte Ansicht eines Aktiv-Matrix Displays: links die Farbfilter – die Zwischenräume sind zur Kontrasterhöhung schwarz ausgeführt; rechts die unverdeckte Pixelstruktur – horizontal verlaufen die Gate- bzw. Zeilenleitungen, vertikal die Spaltenleitungen. TFT: Thin Film Transistor als nichtlineares Schaltelement. C: Speicherkondensator, der beim Multiplexen den Spannungspegel hält. (Bild mit freundlicher Genehmigung des Labors für Bildschirmtechnik an der Universität Stuttgart)

(Aktivmatrix, AMLCD, TFT LCD, Zeilen- und Spaltenleitung auf einer Seite, s. Abb. 7) um ca. eine Größenordnung erhöht werden [8]. Es steht dann, wie bei der direkten Ansteuerung, der volle Spannungshub zur Verfügung. In diesem Fall läßt sich auch die 90°-Technik einsetzen – jedoch zu doppelt so hohen Kosten verglichen mit der Passivmatrix. Dies gilt sinngemäß auch für EL-Displays (AMEL). Grautöne werden durch ein abgestuftes analoges Spaltensignal erzeugt bzw. bei Plasmadisplays durch die Unterteilung eines Bildes in acht Unterbilder (subframes) und durch Variation der Haltepulse.

Vergleich der Technologien

Die große Marktbedeutung der Displays führt dazu, daß die physikalische und werkstoffkundliche Forschung und Entwicklung der Displaytechnologie stürmisch voranschreitet. Für Physiker eröffnet sich hier ein ideales Arbeitsgebiet. Aus Tabelle 1 wird deutlich, daß ein universell einsetzbares, multimediafähiges Display, wie etwa das Active Matrix LCD, hauptsächlich aus Kostengründen nicht verfügbar ist. Plasma-, VFD-, FED- und CRT-Anzeigen sind zudem relativ schwer, da sie evakuiert sind und durch dicke Glasscheiben mechanisch stabilisiert werden müssen. LED haben aufgrund neuer Technologien wie der Lichterzeugung durch Polymere bzw. organische Materialien das Potential zum Marktdurchbruch bei den flachen Matrixanzeigen.

Die aktiven Technologien haben den Nachteil, daß konstante Bildinhalte eingebrannt werden. Ein vergleichbarer, allerdings reversibler Effekt, das *image*

sticking, wird bei LCD durch Gleichspannungsanteile im Ansteuersignal verursacht. Mit den vorgestellten Technologien lassen sich Bilddiagonalen bis zu 1 m realisieren, für größere Diagonalen verwendet man das Projektionsprinzip (LCD, CRT, DMD, Laser).

Die elektronische Ansteuerung der Displays stellt höchste Anforderungen an die Treiberelektronik bezüglich der Datenrate (> 100 MB/s) und der Spannungssignale (LCD: Graustufensignal; Phosphortechniken: hohe Spannungen). Im Gegensatz zum Fernsehen existiert für Flachdisplays bisher keine einheitliche Digitalschnittstelle. Man „behilft“ sich derzeit oft mit der kostentreibenden Methode, digitale Anzeigemodule mit einem (Video- bzw. VGA-) Analogeingang zu versehen, um CRT-Displays ohne Entwicklungsaufwand durch Flachbilddisplays ersetzen zu können.

Schlußbemerkung

Ohne Elektronenstrahlröhren hat die Displaytechnik in Europa im vergangenen Jahr einen Umsatz von ca. 2 Mrd. DM erzielt. Die Forschung ist auf einem hohen Stand, wie z. B. das Labor für Bildschirmtechnologie der Universität Stuttgart zeigt. Außer bei Philips findet jedoch in Europa keine Massenfertigung statt. Man ist hier, wie auch in den USA, auf die Massenproduktion in Fernost angewiesen.

Der Markterfolg einer Technologie hängt aber nicht nur von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen ab, sondern ist an deren rasche Umsetzung zum Massenprodukt gekoppelt: Das Prinzip der Flüssigkristallanzeigen wurde 1971 in Europa von Schadt und Helfrich (DPG-Preisträger 1996, [3]) erfunden. 1972 ent-

wickelte Alfred Leiter die erste europäische LCD-Uhr in Pforzheim [7]. Der technologische Vorsprung betrug damals eineinhalb Jahre. Doch den Schritt zur Massenproduktion hat man nicht gewagt – und den Markt anderen überlassen.

Literatur

- [1] *J. I. Pankove*, Topics in Applied Physics: Display Devices, Springer, Berlin
 - [2] *P. M. Knoll*, Displays, Hüthig, Heidelberg
 - [3] *M. Schadt, W. Helfrich*, Appl. Phys. Lett. **18**, 127 (1971); Robert-Wichard-Pohl-Preis 1996, Phys. Bl., Juli/August 1996, S. 695
 - [4] *D. Bosman*, Display Engineering, North-Holland, Amsterdam
 - [5] *S. Itoh, T. Watanabe et al.*, Asia Display **95**, 627 (1995)
 - [6] *S. Sherr*, Electronic Displays, Wiley, New York
 - [7] *J. Baldenhofer*, Badische Tüftler und Erfinder, DRW Verlag, Stuttgart
 - [8] *S. Morozumi*, Active-Matrix Thin-Film Liquid-Crystal Displays, Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, Vol. 77
- Eine gute Einführung und weitere Literatur findet man in den Publikationen der Society for Information Display (www.sid.org/pub.html):
- H. Steemers*, Fundamentals of Liquid-Crystal Displays, SID SC S-1, 1995
- C. N. King*, Electroluminescent Displays, SID SLN, 1994
- L. Weber*, Color Plasma Displays, SID, SN Vol. 1, 1996
- K. Morimoto et al.*, Vacuum Fluorescent Displays, SID, SLN, 1986
- E. Yamazaki*, CRT Displays, SID SLN, 1993