

Flachdisplays auf Flüssigkristallbasis

K. Jungk, Straubenhardt

Bei Elektrotechnik und Elektronik sind Flüssigkristalldisplays (Liquid Crystal Displays – LCDs) nahezu allgegenwärtig. Da der Funktionsumfang bei vielen Geräten und Bauteilen immer mehr zunimmt, sind derartige Anzeigeeinheiten oftmals notwendig, um das Potential der Betriebsmittel vollständig nutzen zu können. Außerdem erlaubt ihre flache Bauweise, sie auch bei geringem Platzangebot einzusetzen. Aufgrund der großen Bedeutung der LCDs für technische Produkte aller Art empfiehlt es sich, die Arten und Varianten der Displays, deren Funktionsweisen sowie die Vor- und Nachteile zu kennen.

1 Grundlagen

1.1 Eigenschaften und Merkmale von Flüssigkristallen

Flüssigkristalle sind Substanzen, die sich teilweise wie ein Festkörper aber teilweise auch wie eine Flüssigkeit verhalten. Während sich feste Kristalle durch eine starre Position und Ausrichtung ihrer Moleküle auszeichnen, sind die Moleküle eines Flüssigkristalls nicht ortsfest (Flüssigkeitseigenschaft), aber in ihrer Ausrichtung beeinflussbar und damit in eine geordnete Struktur zu bringen (Kristalleigenschaft). Im oberen Teil von Bild 1 ist dargestellt, wie ein herkömmlicher Kristall beim Überschreiten des Schmelzpunktes von der anisotropen Kristallstruktur direkt in die isotrope Schmelzflüssigkeit übergeht. Aber es geht auch anders. Heute sind einige Tausend organische Verbindungen bekannt, die beim Erhitzen über eine oder mehrere anisotrope flüssigkristalline Phasen in eine isotrope flüssige Schmelze übergehen (Bild 1 unten).

Anisotropie. Unter Anisotropie versteht man die Richtungsabhängigkeit von physikalischen Eigenschaften wie z. B. Transparenz, Härte, Spaltbarkeit, elektrische Leitfähigkeit.

Isotropie beschreibt das gegensätzliche Verhalten, d. h. die Richtungsunabhängigkeit der Materialeigenschaften. Besonders interessant sind davon jene Verbindungen, die ihre flüssigkristallinen Merkmale im Bereich der Raumtemperatur, also in einem Temperaturbereich um 20° C aufweisen. Als Beispiele sind Methoxybenzylidenbutylanilin (MBBA) sowie Pentylcyanobiphenyl (5CB) zu nennen. Allen Verbindungen mit flüssigkristallinen Phasen ist gemeinsam, dass ihre Moleküle vier- bis sechsmal so lang wie dick sind (Formanisotropie). Damit lässt sich das richtungs-

abhängige (anisotrope) optische Verhalten bei regelmäßiger Ausrichtung der Flüssigkristalle erklären.

1.2 Polarisation

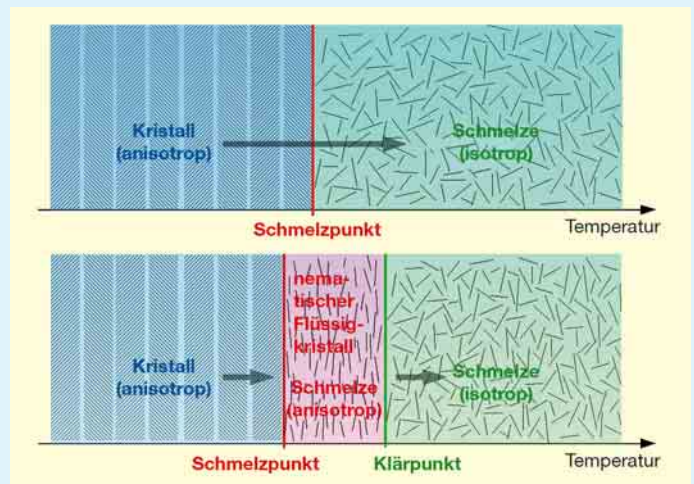
Licht besteht aus einem Gemisch elektromagnetischer Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen (Farbe) und Lagen im Raum (Schwingungsebene, Polarisation). Bekanntlich besteht eine einzelne elektromagnetische Schwingung aus einer elektrischen Komponente E und einer magnetischen Komponente H, die senkrecht aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung stehen. Das Kreuzprodukt aus E und H ist der Poyntingsche Vektor S

($S = E \times H$), der in Richtung der Ausbreitung der Welle zeigt und den mit ihr verbundenen Energiefluss beschreibt.

Üblicherweise wird die Ebene, die von der Ausbreitungsrichtung und dem elektrischen Feldvektor aufgespannt wird, als Polarisations-ebene der Welle bezeichnet. Senkrecht dazu steht die Schwingungsebene. Gelegentlich sind die beiden Begriffe in der Literatur auch vertauscht zu finden. Das Licht der Sonne oder einer Glühlampe besteht nun aus einer Vielzahl von Polarisations-ebenen. Lässt man sie durch eine transparente Schicht fallen, die nur eine Polarisations-ebene herausfiltert (Polarisationsfilter), trifft man nach dem Durchtreten des Lichts nur noch Schwingungen mit einer Polarisationsrichtung an – eine Voraussetzung für das Funktionsprinzip des LCDs. Dieses Licht wird als linear polarisiert bezeichnet und seine Schwingungen als transversal.

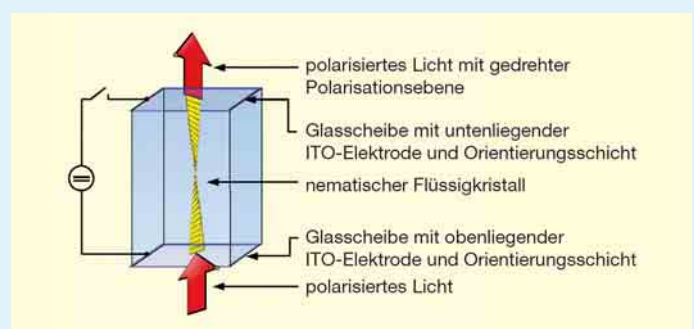
Als Polarisationsfilter kommen heute meist Kunststofffolien zum Einsatz. Sie bestehen aus transparenten Materialien, in die lange und parallel ausgerichtete Moleküle eingearbeitet sind. Dazu kann man z. B. dichroitische Kristalle in flüssiger Gelatine auf einen elastischen Träger aufbringen und unter einem mechanischen Zug erstarren lassen. Dadurch richten sich die Kristalle mehr oder weniger in Zugrichtung aus und die resultierende Folie zeigt die gewünschten Filtereigenschaften. Als dichroitisch bezeichnet man die Eigenschaft eines anisotropen Kristalls, parallel

1 Verhalten von Flüssigkristallen bei Erwärmung



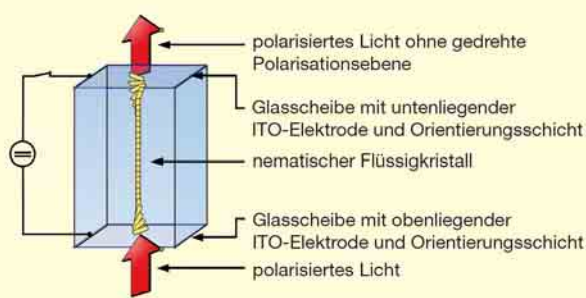
2 Die Urform aller LCDs ist die Schadt-Helfrich-Zelle

Im spannungslosen Zustand sind die Flüssigkristalle schraubenförmig zwischen ihren Vorzugslagen an den Orientierungsschichten ausgerichtet



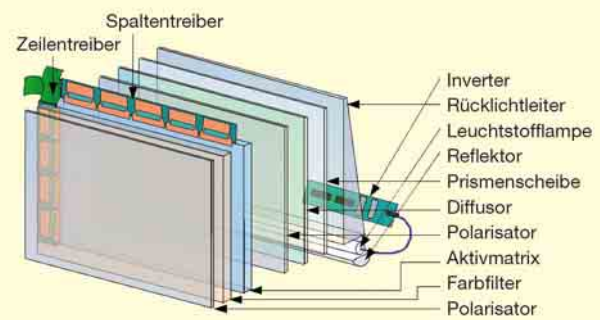
Autor

Karsten Jungk, Straubenhardt, ist freier Fachjournalist und Mitglied der internationalen Vereinigung für Elektronik-Fachjournalisten UIPRE.



③ Schadt-Helfrich-Zelle unter Spannung

Die Kristalle orientieren sich in Richtung des durch die Spannung hervorgerufenen elektrischen Feldes



④ Der Schichtenaufbau eines LCDs

Eine enorme Herausforderung für die Fertigungstechnik

Quelle: Thomson

oder senkrecht zur Kristallachse einfallendes Licht mehr oder weniger stark zu absorbieren. Modellhaft kann man sich einen Polarisator als feines Gitter vorstellen, das nur Lichtanteile durchlässt, deren Schwingungsebene mit der Gitterorientierung übereinstimmt.

1.3 Schadt-Helfrich-Zelle

Die Schadt-Helfrich-Zelle besteht aus zwei parallelen, an der Innenseite mit transparenten, leitfähigen Elektroden aus Indium-Zinn-Oxid (ITO – Indium Tin Oxide) beschichteten Glasplatten (Bild ②). Der Raum zwischen den Elektroden ist mit einer nematischen flüssigkristallinen Substanz gefüllt (nematisch: die stäbchenförmigen Moleküle lagern sich mit ihren Längsachsen im Wesentlichen parallel zueinander an). Durch spezielle Oberflächenbehandlung der ITO-Elektroden (Beschichten mit Polyvinylalkohol und Bürsten mit 90° versetzten Vorzugsrichtungen ergibt zwei Orientierungsschichten) lagern sich die Flüssigkristalle an den Oberflächen mit 90° Richtungsunterschied an (homogene Orientierung). Dazwischen verändert sich die Kristallorientierung stufenlos. Die Kristalle sind also entsprechend einer 90°-Schraube zwischen den Elektroden parallel zu ihnen ausgerichtet. Wenn man dann die Außenseiten der Glasplatten mit Polarisatoren in den Vorzugsrichtungen beschichtet, tritt polarisiertes Licht, d. h. Licht einer einzigen Schwingungsebene, in die Schadt-Helfrich-Zelle ein. Es wird beim Durchlaufen der Zelle kontinuierlich um 90° gedreht. Das in seiner Orientierung gegen das Eingangsfilter rechtwinklig verdrehte Ausgangsfilter lässt das Licht deshalb ungeschwächt durch (normally white mode). Beim Anlegen einer Spannung an die ITO-Elektroden orientieren sich die inneren Flüssigkristallmoleküle an den elektrischen Feldlinien – umso mehr, je größer die Spannung ist (Bild ③). Die Moleküle unmittelbar an der Orientierungsschicht behalten auch bei höheren Spannungen ihre Lage unverändert bei. Somit verliert die Schadt-Helfrich-Zelle mit einer zunehmenden Spannung ihre Transparenz. Man kann die Polarisatoren auf den Innenseiten der Glasscheiben auch gleich orientieren und

hat so im spannungslosen Zustand eine lichtundurchlässige Zelle (normally black mode). Doch wegen des schlechteren Kontrasts wird letztere Anordnung kaum verwendet.

2 Aufbau eines LCDs

2.1 Grundsätzlicher Aufbau

Den typischen Schichtenaufbau eines vollständigen LC-Displays zeigt Bild ④. Noch nicht besprochen wurde die Funktion des Rückbeleuchtungssystems, das aus einer Kombination von Weißlicht-Leuchtstofflampe und Reflektor besteht. Diese strahlt ihr Licht in die Unterkante eines prismatischen Rücklichtleiters (backlight guide) ein. Der Rücklichtleiter beleuchtet dann flächenhaft eine Prismenscheibe, die im Zusammenwirken mit einer Diffusorscheibe eine homogene Helligkeitsverteilung bei der Bestrahlung der Aktivmatrixzellen garantiert. Als Lichtquelle wird bei manchen High-End-Displays ein flächenhaftes Leuchtdiodenpaneel verwendet. Zwar ist die Lebensdauer sowie auch die Konstanz der Beleuchtungseigenschaften dieser Leuchtdiodenpaneele bei geringerem Verbrauch höher, aber der Preis allerdings auch. Doch eine Reihe von Anbietern hat diese LED-Backlight-Technik bereits im Portfolio.

2.2 Technische Merkmale

Schaltzeiten. Wird ein LCD-Pixel von Weiß auf Schwarz (oder umgekehrt) umgeschaltet, so dauert dies aufgrund der Trägheit der Kristalle bei der Umorientierung in der nematischen Flüssigkeit eine gewisse Zeit. Nach der Norm ISO 13406-2 als Qualitäts- und Ergonomiestandard für TFT-LCDs ist die Schaltzeit die Zeit zur Änderung der Helligkeit eines Bildpixels von 10% bis 90%, wobei 0% und 100% die Farben Schwarz respektive Weiß kennzeichnen. Die Reaktionszeit moderner LCDs wird immer kürzer, weniger als 10 ms sind hier schon gute Werte. Um Bewegungsunschärfen ganz zu vermeiden, sind Schaltzeiten unter 3 ms notwendig. Die ISO 13406-2 klassifiziert



⑤ Beispiel für Bewegungsunschärfe

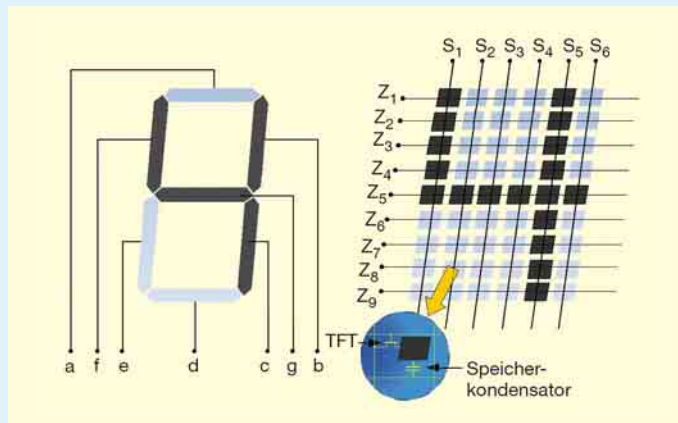
Foto: www.biologie.de

noch viele weitere Kriterien wie Betrachtungswinkel, Pixelfehler, Leuchtdichte und Helligkeitsverteilung, Kontraste, Flimmern, Fontseignung sowie das Reflexionsverhalten der Displayfront und ermöglicht dadurch die objektive Qualitätseinstufung eines Displays.

Bewegungsunschärfe (Motion Blur). Bei TFT-LCDs steht ein Pixel für die Dauer eines Frames bedingt durch die Ladespannung des Speicherkondensators auf einem konstanten Wert. Bei Vollbildabtastung (progressiv) und 80 Hz Bildwiederholrate wird es also frühestens nach etwa 12 ms in Farbe und Helligkeit verändert. Weil das Auge die Helligkeitswerte der Pixelzustände aufintegriert, erscheinen diese zu hell und zudem „verwischt“ – umso mehr, je bewegter die dargestellte Szene ist (Bild ⑤). Im Amerikanischen nennt man diesen Effekt „Motion Blur“, auf Deutsch spricht man von Bewegungsunschärfe. Sie lässt sich am einfachsten durch eine Verkürzung der Schaltzeiten des Displays und den damit möglichen höheren Bildwiederholraten verringern. Dazu gibt es einige Ansätze, wie z. B. die Verringerung der Viskosität (Zähigkeit) des LC-Materials, eine kurzzeitige Überspannung am Beginn der Ansteuerungsphase, um die Umorientierung der Flüssigkristalle zu beschleunigen oder die mathematische Kompensation

⑥ Gegenüberstellung zweier Anzeigemethoden

links: statische 7-Segment-Anzeige
rechts: dynamisches Punkttarray



des sehbedingten Integrationseffekts. Hier hat jeder Hersteller ein Arsenal von sorgfältig gehüteten Verfahren, die auf umfangreichen Forschungen über die Materialien, den strukturellen Aufbau des Displays sowie über den Gesichtssinn beruhen.

3 Arten von LC-Displays

3.1 Einfache LC-Displays

Frühe LCDs dienten der Anzeige von Dezimalzahlen mit 7 Segmenten (Bild ⑥ links), z. B. in Taschenrechnern. Das notwendige Licht für das Sichtbarmachen der Helligkeitsunterschiede wurde dabei von einem reflektierenden Displayhintergrund geliefert. Ohne Umgebungslicht funktionierten diese Displays also nicht. Im einfachsten Fall wurde jedes Segment einzeln verdrahtet, was bei umfangreicheren Displays schnell eine sehr komplexe Leitungsführung zur Folge hatte. Man bezeichnet diese Methode der Ansteuerung als statisch.

Für universellere LCDs eignet sich die Punktmatrixanordnung besonders (Bild ⑥ rechts). Mit ihr lassen sich alphanumerische Zeichen und einfache Grafiken darstellen. Die Matrixpunkte werden über Zeilen- und Spaltenelektroden angesteuert. Die Anzeige wird besonders schnell und kontrastreich, wenn man in jedem Kreuzungspunkt einen Speicherkondensator integriert. Die Kondensatoren werden zeilenweise über Dünnschichttransistoren (TFT – Thin Film Transistor) einem Spannungsmuster an den Spaltenelektroden entsprechend aufgeladen und halten diesen Zustand dann bis zu einem neuen Zeilendurchlauf. Man sagt, derartige Displays werden dynamisch angesteuert oder gemultiplext und spricht von Aktivmatrix- oder TFT-Flüssigkristalldisplays.

3.2 Farb-LC-Displays

Man kann die zuvor besprochenen gemultiplexten Punktmatrix-LCDs als Vorstufe zu den heute erhältlichen hochauflösenden TFT-Farbdarstellungen für Computermonitore und Fernsehgeräte betrachten. Dabei hat die Technik so

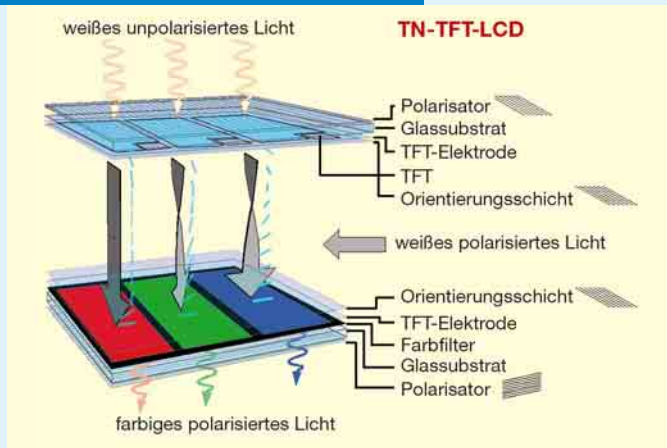
große Fortschritte gemacht, dass Displays mit einer Bildschirmdiagonale von 56" (entspricht 142 cm), vierfacher Full-HD-Auflösung ($2160 \cdot 3840 = 8,2944$ Millionen Farbpixel), 8 ms Reaktionszeit, 1:1000 Kontrastverhältnis und Millionen von Farben möglich sind, wie z. B. ein amerikanischer Hersteller auf der Consumer Electronics Show Anfang 2006 in Las Vegas demonstrierte. Doch ob, wann und zu welchem Preis solche Geräte für Endverbraucher verfügbar sein werden, ist ungewiss. Zudem müssen Nutzen und Sinn für den Einsatz im privaten Bereich bezweifelt werden.

3.3 Varianten

Nach der Art und Weise, in der die Kristalle einer wenige Mikrometer starken Flüssigkristallschicht unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes ausgerichtet werden, unterscheidet man im Wesentlichen die drei LCD-Varianten TN (Twisted Nematic), VA (Vertically Aligned) und IPS (In Plane Switching).

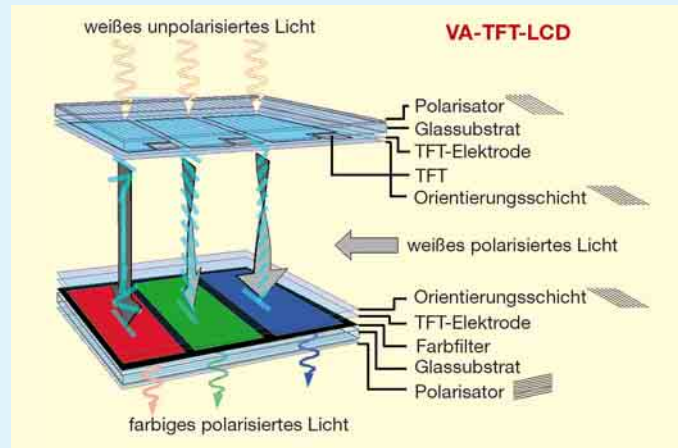
TN-LCD. Zum Einsatz kommen bei diesem LCD-Typ Flüssigkristalle mit positiv dielektrischer Anisotropie. Das bedeutet, dass sich die Kristalle in Richtung elektrischer Felder ausrichten. In der noch spannungsfreien Zelle drehen sie sich parallel zu den Glasflächen schraubenförmig von einer Vorzugsrichtung in die andere (Bild ⑦). Wenn mit zunehmender Spannung die Feldstärke ansteigt, orientieren sich die Flüssigkristalle immer stärker an der Feldrichtung, also senkrecht zu den Glasplatten. In dieser Lage drehen sie die Polarisationsrichtung des Lichtes nicht, was wegen der gekreuzten Polarisatoren an Eingang und Ausgang zu einer lichtundurchlässigen Zelle führt. Weiterentwickelte Display-Varianten mit höheren Kontrastverhältnissen sind das STN-LCD (Super Twisted Nematic), das DSTN-LCD (Double Super Twisted Nematic) und das TSTN-LCD (Triple Super Twisted Nematic).

VA-LCD. Hier ist es genau umgekehrt wie bei den TN-LCDs. Die an die Orientierungsschichten angelagerten Flüssigkristalle sind zwar auch zu den Elektroden parallel orientiert, im Raum dazwischen richten sie sich aber im spannungsfreien Zustand senkrecht zu ihnen aus (Bild ⑧). Dabei wird die Polarisations-



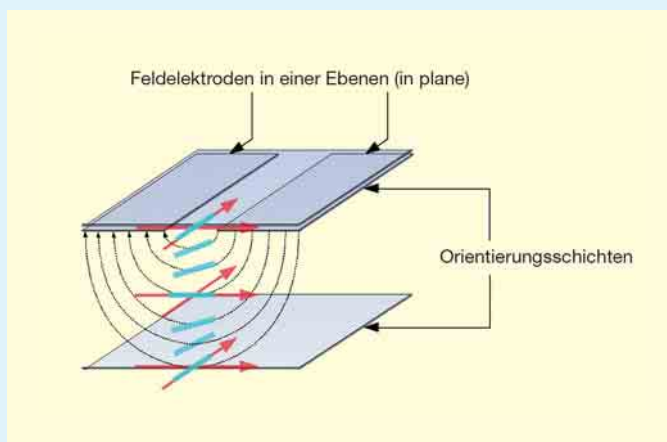
7 Schema eines TN-LCD-Pixels

Schraubenförmig verdrehte nematische Flüssigkristalle werden unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes umorientiert. Im Zusammenwirken mit gekreuzten Polarisatoren und Farbfiltern entsteht so ein Pixel, das alle Farb- sowie Helligkeitswerte annehmen kann.



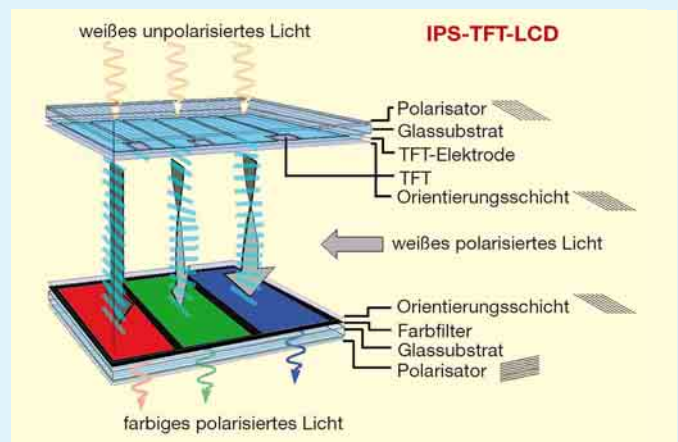
8 Schema eines VA-LCD-Pixels

Flüssigkristalle zwischen den spannungslosen Elektroden sind senkrecht zu ihnen ausgerichtet.



9 Prinzip des IPS-LCDs

Da die Elektroden auf einer Seite jeder Zelle angeordnet sind, werden die Flüssigkristalle parallel zu den Substratplatten ausgerichtet.



10 Schema eines IPS-LCD-Pixels

Drei IPS-Zellen für die Grundfarben RGB bilden ein Farbpixel und ermöglichen größere Betrachtungswinkel.

Quellen: Merck

ebene des Lichts nicht verändert. Je nach der Orientierung der Polarisatoren (gleich oder gekreuzt) hat man eine transparente oder sperrende (häufiger) Zelle. Mit zunehmender Elektrodenspannung gehen die Flüssigkristalle immer stärker in eine horizontale Lage und stehen damit mehr oder weniger quer zu den Feldlinien. Dieses Verhalten zeigen negativ dielektrische anisotrope Flüssigkristalle.

IPS-LCD. Die IPS-Technik beruht auf einem Patent des Fraunhofer Instituts IAP aus dem Jahr 1990. Ihre Vorteile sind kurze Schaltzeiten und hoher Kontrast bei geringer Blickwinkelabhängigkeit. Bei IPS-LCDs sind die Elektroden nicht gegenüberliegend auf beiden Seiten der Zelle, sondern nebeneinander auf der Lichteinfallseite angeordnet. Dieses IPS-Prinzip verdeutlicht Bild 9. Es zeigt, dass in dem nematischen Flüssigkristall ein horizontales elektrisches Feld in der Mitte zwischen den Elektroden entsteht.

Die praktische Ausführung eines IPS-LCD-Farbpixels zeigt Bild 10. Im spannungslosen Zustand wird die Polarisationsrichtung des durchtretenden Lichtes hier nicht verändert. Wegen der versetzten Polarisatoren an Ein- und Ausgang der Zelle ist diese dabei lichtun-

durchlässig (normally black). Durch das Anlegen einer kleinen Spannung drehen sich die Flüssigkristalle in der Ebene (in plane) zwischen den Glasplatten in Richtung des elektrischen Feldes. Mit wachsender Spannung orientieren sich immer mehr Kristalle an den Feldlinien zwischen den Elektroden und drehen die Polarisationssebene des Lichtes zunehmend. Dabei nimmt die Lichtdurchlässigkeit der Zelle stetig zu.

4 Sonderformen von LCDs

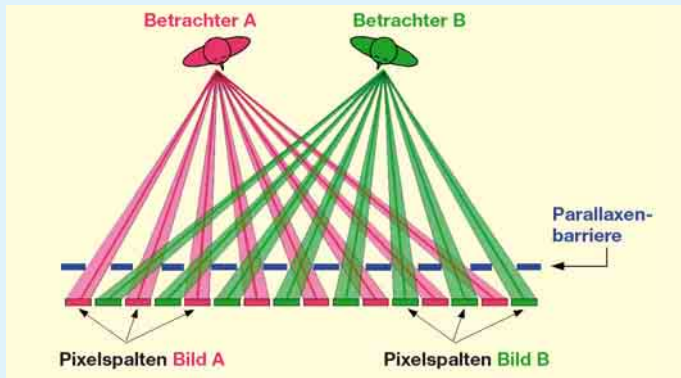
4.1 Multi-View-Displays

Dual-View-Displays können je nach Blickwinkel (Parallaxe) zwei unterschiedliche visuelle Informationen abgeben. Dieses Prinzip lässt sich zur Darstellung dreidimensionaler Bilder verwenden. Eine realistischere Anwendung ist zum Beispiel der Monitor im Armaturenbrett eines Automobils, der den Fahrer mit Navigations- und Verkehrsmeldungen versorgt und den Beifahrer einen Videofilm betrachten lässt. Oder man denke an den Monitor für die Kinder auf den Rücksitzen. Er kann von einem

Kind für ein Computerspiel und vom anderen zur Wiedergabe des neuesten Harry-Potter-Abenteuers genutzt werden.

Auch Anwendungen in Geldautomaten, bei denen das Mitlesen von der Seite unerwünscht ist, profitieren von dieser neuen Technik. Sie basiert auf einer zweiten LC-Schicht, die über dem normalen, bildgebenden TFT-LCD liegt. Dabei fungiert diese zweite LC-Schicht als Parallaxenbarriere (Bild 11), die das Licht der Hintergrundbeleuchtung nach links und rechts steuert, so dass bei verschiedenen Sichtwinkeln unterschiedliche visuelle Informationen auf dem selben Bildschirm angezeigt werden können.

Das hinter der Parallaxenbarriere liegende TFT-LCD wird spaltenweise in Anteile für das linke und rechte Bild aufgeteilt. Beim Blick von links werden alle Anteile für das rechte Bild abgeschirmt und umgekehrt. Je nach Betrachtungswinkel erscheinen somit unterschiedliche Bildinformationen. Wird beim Dual-View-LCD für beide Betrachtungswinkel derselbe Bildinhalt bereitgestellt, ist das Display als ganz normaler Bildschirm nutzbar. Auch die alternierende Darstellung der Vollbilder aus zwei Quellen und die zugeordnete



① Prinzip einer Parallaxenbarriere

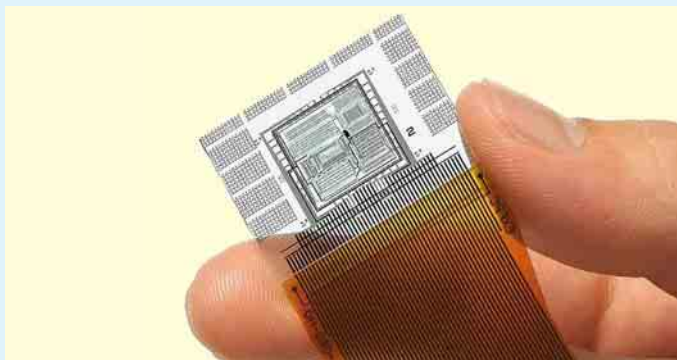
Sie gibt blickwinkelabhängige Ansichten auf die Displayoberfläche frei



② Triple View TFT-LCD

Ein Display – drei Bilder

Quelle: Sharp



③ Vollständiger 8-Bit-Prozessor auf einem Glassubstrat

Foto: Sharp

Richtungsauswahl durch eine getaktete Parallaxenbarriere ist möglich. Nach diesem Prinzip lassen sich sogar Triple-View-Displays realisieren (Bild ②).

Doch die Anwendung des neuen Displaytyps ist bei Weitem nicht auf Navigationssysteme in Fahrzeugen beschränkt. Der Home-Entertainment-Bereich erhält eine neue Dimension, in der Menschen zwei völlig unterschiedliche Programme verfolgen können und trotzdem vor ein und dem selben Fernseher sitzen. Viele Multiplayer-Games gewinnen dadurch an Spannung, weil der Gegner einem nicht mehr in die Karten schauen kann, wie sonst beim Split-Screen.

Auch im Business-Umfeld, im Bereich der elektronischen Plakate (electronic signage), bietet die Technologie der Dual-View-TFT-LCDs neue Möglichkeiten. Zum Beispiel werben Bildschirme in Geschäften für unterschiedliche Angebote, je nach dem aus welcher Richtung die Kunden an dem Display vorbei gehen. Benutzern von Laufbändern z. B. auf Flughäfen und Messen können beim Vorbeifahren an einem Dual- oder Triple-View-Display zwei oder drei Botschaften übermittelt werden.

4.2 SOP-Ansatz

Der SOP-Ansatz (SOP – System on Panel) wurde von Sharp bereits im Jahre 1994 mit visionärer Weitsicht vorgestellt. Ein SOP soll idealerweise als ein vollständiges elektronisches Produkt in seiner ganzen Funktionalität (Speicher, LC-Controller, Multiformat-Display-Treiber, Video-Prozessor usw.), Konnektivität (Internet, IEEE 802.11b, Digital-TV, GPS, NFC (Near Field Communication), Bluetooth usw.) und Interaktivität (Sensoren, Touch-Screen, Audio, Ultra-High-Resolution-Display usw.) auf einem Substrat, die umfassende Kommunikation mit dem Menschen ermöglichen. Durch die Integration der meisten peripheren Funktionen kann die Displaystärke erheblich verringert werden. Dabei wurde bereits ein ganz beträchtlicher Teil des Weges zum Ziel beschritten. So zeigt Bild ③ einen auf einem Glassubstrat integrierten vollständigen 8-Bit-Prozessor. Auf der Internationalen Funkausstellung 2007 stellte Sharp den Prototypen eines nahezu randlosen, nur knapp 20 mm starken 52“-LC-Bildschirms vor, dessen Leistungsaufnahme weniger als die Hälfte entsprechend großer konventioneller LC-Displays betragen soll.

Auch die Funktion des Lautsprechers für A/V-Anwendungen ist schon in das Display integriert worden, indem ein Piezo-Aktuator das Display zum Schwingen bringt und seine Oberfläche somit als Membrane fungiert. In Mobiltelefonen könnte das Display dann also die Aufgabe des Hörers mit übernehmen. Ein weiteres Beispiel ist die Integration von Bildsensoren unter den LC-Zellen. Bei genanntem Hersteller sind dies Photodioden in der auf dem Substrat für Displayzwecke ohnehin verwendeten CG-Si-Technologie (CG-Si – Continuous Grain Silicon). Damit lassen sich Fingerabdrücke lesen, Touch-Screen-Funktionen mit erheblich gesteigertem Funktionsumfang realisieren, handgeschriebene Eingaben erzeugen oder eine auf das Display gelegte Bildvorlage einscannen. Weitere integrierte Sensoren könnten Informationen liefern, um die Farbtemperatur und Helligkeit des Displays in Abhängigkeit von Typ und Intensität des Umgebungslichts automatisch einzustellen oder seiner nachlassenden Ansprechgeschwindigkeit bei fallenden Temperaturen entgegen zu wirken.

5 Vor- und Nachteile der LCDs

Zu den Vorteilen von LCDs zählen der (relativ) geringe Energieverbrauch, das flimmer- und verzerrungsfreie, scharfe Bild, die flache Bauform und das geringe Gewicht. Nachteilig sind die nicht restlos auszuschließenden Pixelfehler, die unveränderliche Auflösung, eine kostenintensive Produktion sowie die relativ kurze Lebensdauer der Hintergrundbeleuchtung. Probleme mit geringem Kontrast, unechten Farben, langen Schaltzeiten (zumindest bei Raumtemperatur) und starker Blickwinkelabhängigkeit gehören inzwischen der Vergangenheit an. Ein Kritikpunkt, der auch für viele andere industrielle Produktionen besonders vor dem Hintergrund einer verhältnismäßig kurzen Produktlebensdauer gilt: Die Vielzahl von umweltgefährdenden Stoffen bei der Produktion von LCDs, verbunden mit einer hohen Ausschussquote, hat häufig zu einer Produktionsverlagerung in Länder mit niedrigen Umweltschutzstandards geführt.

6 Ausblick

Moderne LCDs haben einen hohen technischen Stand erreicht. Aber sie stehen in hartem Wettbewerb zu alternativen Technologien wie z. B. OLED, SED, Plasma, DLP und auch Electrowetting. Auf welchem Platz sie sich behaupten werden, hängt wohl nicht nur von der Bildqualität und zusätzlichen Funktionen ab, sondern auch von der Umweltfreundlichkeit, sowohl bei der Fertigung als auch beim Energieverbrauch.