

Materialien für dünne Displays

Heutige Displays basieren fast ausschließlich auf Flüssigkristallen oder OLEDs.

Michael Heckmeier, Udo Heider und Roman Maisch

Inzwischen haben Flüssigkristalle nahezu den gesamten Markt für Fernseher erobert und erlauben immer größere Displays bei extrem schmaler Bauweise sowie das Eintauchen in eine dreidimensionale Welt. Seit etwa 15 Jahren wächst auch der Marktanteil von Displays aus organischen Leuchtdioden.

Von der Entdeckung der Flüssigkristalle durch den Botaniker Friedrich Reinitzer 1888 an der Deutschen Technischen Hochschule Prag war es ein langer Weg bis zu Displayanwendungen [1]. Zunächst war die Beobachtung von zwei Schmelzpunkten bei Cholesterylbenzorat und von diversen Farberscheinungen im Polarisationsmikroskop der Start eines jahrzehntelangen Streits in der wissenschaftlichen Welt. Neben der Reinheit der Materialien bestand Zweifel an der grundsätzlichen Möglichkeit, dass „flüssige Kristalle“ existieren, zeitweise wurde gar über „lebende Kristalle“ spekuliert. Erst 50 Jahre nach Entdeckung der Flüssigkristalle (Abb. 1) war es gelungen, viele ihrer Eigenschaften zu beschreiben, eine vollständige theoretische Beschreibung oder konkrete Anwendungen waren jedoch noch weit entfernt.¹⁾

Erste Anwendungen auf der Grundlage der elektrooptischen Eigenschaften von Flüssigkristallen realisierte George Heilmeyer in den 1960er-Jahren [3]. Ein Durchbruch gelang 1970 mit der Entwicklung der TN-Zelle (Twisted Nematic, Abb. 2) durch Wolfgang Helfrich und Martin Schadt und fast zeitgleich durch James Ferguson. In der TN-Zelle sind die Flüssigkristalle schraubenförmig mit einer Verdrillung von 90° angeordnet. Ist dabei das Produkt aus Schichtdicke und Doppelbrechung der Flüssigkristalle auf einen festen Wert von etwa 500 nm eingestellt, so kann anschaulich gesprochen die Polarisationsrichtung des Lichts nach Eintritt in die Zelle der Flüssigkristallschraube folgen und einen zweiten, um 90° gedrehten Polarisator durchqueren. In dem Fall ist die Zelle transparent.

Liegt eine elektrische Spannung an, folgen die Flüssigkristalle dem elektrischen Feld, sodass sie senkrecht zur Polarisationsrichtung des Lichts stehen. Die effektive Doppelbrechung der Zelle sowie die Rotation der Polarisationsrichtung des Lichts nehmen dadurch ab. Mit zunehmender Spannung wird das Licht immer stärker am zweiten Polarisator absorbiert, wodurch die Lichttransmission sinkt. Dieser elektro-optische Effekt ist die Grundlage aller LC-Displays.



LG Electronics

Eines der ersten Produkte, das auf Flüssigkristallen basiert, war 1973 die Anzeige einer Quarzuhr von Seiko Epson. Zur gleichen Zeit gelang es dem späteren Nobelpreisträger Pierre Gilles de Gennes, die freie Energie von Flüssigkristallen vollständig zu beschreiben und damit auch die Phasenübergänge zu erklären [4].

Im Jahr 1988 hatte Sharp mit einem ersten TFT-Display (Thin Film Transistor) die Ansteuerungstechnologie vorgestellt [5], die heute in allen hochwertigen Flüssigkristallanzeigen zur Anwendung kommt. Dabei schaltet ein Dünnschichttransistor aktiv jedes Pixel der Anzeige (Aktiv-Matrix-Ansteuerung).

Durch ihre geringe Bautiefe verglichen mit den etablierten Kathodenstrahlröhren ermöglichten Flüssigkristallanzeigen in den 1990er-Jahren die ersten Note-

Neue Materialien ermöglichen extrem flache Displays wie diesen 77 Zoll großen, gebogenen OLED-Fernseher mit vierfacher HD-Auflösung.

¹⁾ Unser Artikel konzentriert sich auf physikalische Aspekte und Anwendungen, dem chemisch interessierten Leser sei der Artikel [2] empfohlen.

KOMPAKT

- In einem elektrischen Feld richten sich Flüssigkristalle aus und beeinflussen die Polarisationsrichtung einfallenden Lichtes. Basierend auf diesem Effekt lassen sich helle und dunkle Pixel für Displays realisieren.
- Displays für Fernseher haben besondere Anforderungen an Kontrast oder Blickwinkelunabhängigkeit und erfordern daher neue Schaltprinzipien.
- Organische Leuchtdioden haben noch einen eher kleinen Marktanteil, u. a. aufgrund der schwierigen Herstellung großer OLED-Displays. Daher werden Druckverfahren für große Displays diskutiert.

Dr. Michael Heckmeier, Dr. Udo Heider und Dr. Roman Maisch, Merck KGaA, Frankfurter Str. 250, 64293 Darmstadt

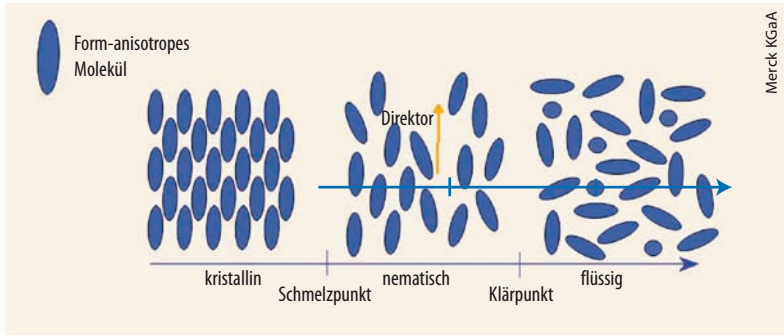


Abb. 1 Flüssigkristalle sind stäbchenförmige organische Moleküle, die unterschiedliche Phasen zwischen dem flüssigen und festen Zustand aufweisen können (Mesophasen). In Anzeigen liegen Flüssigkristalle meist in der nema-

tischen Phase vor, in der die Moleküle doppelbrechend sind und eine Vorzugsrichtung (Direktor) besitzen, während ihre Schwerpunkte wie in einer Flüssigkeit isotrop verteilt sind.

books. Der Siegeszug der Flüssigkristalle setzte sich bei Monitoren fort, und ab dem Jahr 2000 waren immer größere flüssigkristallbasierte Anzeigen in der Lage, mit Kathodenstrahlfernsehern zu konkurrieren und sie schließlich fast vollständig zu ersetzen.

Die Realisierung immer größerer Displayflächen sowie neuer Anwendungen erforderten neben der TN-Zelle neue Schaltprinzipien. Für den Fernseher sind beispielsweise Blickwinkelunabhängigkeit und Kontrast wichtig. Um dies zu erreichen, bieten sich zwei verschiedene Verfahren an: Die VA-Technologie (Vertical Aligned) nutzt Flüssigkristalle mit negativer dielektrischer Anisotropie $\Delta\epsilon < 0$, die sich senkrecht zum elektrischen Feld ausrichten. Das ermöglicht sehr schnelle Schaltzeiten und damit auch die Anzeige bewegter Bilder. Insbesondere die viskosen Eigenschaften der Flüssigkristalle beeinflussen die Schaltzeiten. Bei der IPS-Technologie (In Plane Switching) werden Flüssigkristalle mit $\Delta\epsilon > 0$, die parallel zur Substratober-

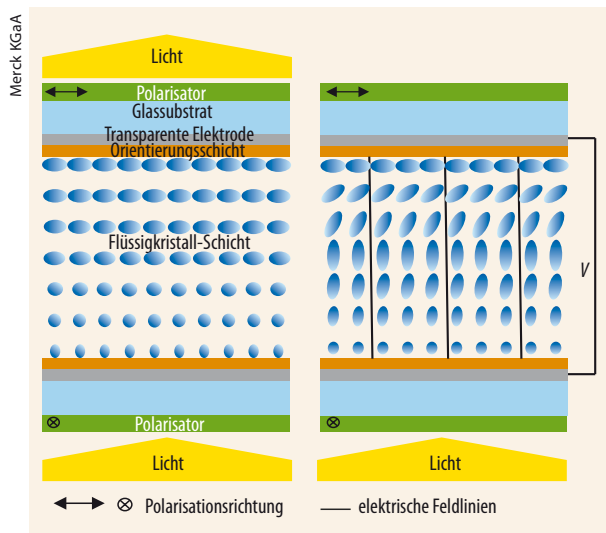


Abb. 2 Bei einer spannungsfreien Schadt-Helfrich-Zelle (links) dreht die Flüssigkristall-Schicht die Polarisations Ebene des Lichts kontinuierlich um 90° . Dadurch gelangt es durch den oberen Polarisator, der senkrecht zum unteren Polarisator steht. Liegt eine Spannung an (rechts), orientieren sich die Flüssigkristalle entlang des elektrischen Feldes und drehen die Polarisations Ebene des einfallenden Lichts nicht.

fläche orientiert sind, in der Ebene der Glassubstrate gedreht. Abhängig von den optischen Eigenschaften der Flüssigkristalle und der weiteren Schichten im Display führt dies dazu, dass das Bild für den Betrachter weniger vom Blickwinkel abhängt.

Während heute Anzeigen basierend auf VA und IPS quasi in allen kommerziellen Fernsehern vorkommen, eignet sich eine Weiterentwicklung von IPS, die sog. FFS-Technologie (Fringe Field Switching), ideal für mobile Anzeigen (Abb. 3). Das elektrische Feld in der Flüssigkristall-Schicht ist dabei inhomogen. Bildet man den Mittelwert über verschiedene Bereiche, verbessert sich der Blickwinkel bei nicht-senkrechter Betrachtung. Die Vorstellung einer Drehung der Polarisationsrichtung des Lichts greift hier nicht, vielmehr muss bei angelegter Spannung die optische Verzögerung lokal berechnet und über die Schichtdicke integriert werden. FFS-Anzeigen bieten eine beinahe ideale Blickwinkelunabhängigkeit und ermöglichen es damit, mobile Displays um 90° zu drehen, ohne dass sich die Anzeige sichtbar verschlechtert.

Die Weiterentwicklung UB-FFS (Ultra Bright FFS) erobert gerade den Markt und könnte in den kommenden Jahren die Technologie- und Marktführerschaft bei mobilen Anzeigen übernehmen. Bei UB-FFS werden Flüssigkristalle mit negativer dielektrischer Anisotropie und paralleler Orientierung auf den Substraten in einer FFS-Konfiguration geschaltet (Abb. 4). Im Vergleich zu FFS ist die Lichttransmission um bis zu 20 Prozent höher. Das ermöglicht Displays mit höherer Auflösung und verlängert die Akkulaufzeit bei Smartphones, da die Lichtquellen des Displays weniger Energie benötigen.

Vertikal ausgerichtet

Für die Entwicklung der VA-Technologie war das Multi-Domänen-Prinzip wichtig: Werden alle Flüssigkristalle aus der senkrechten Orientierung (VA) in dieselbe Richtung gedreht, so resultiert daraus eine starke Blickwinkelabhängigkeit. Ist die Zelle dagegen in unterschiedliche Bereiche unterteilt, verbessert dies den Blickwinkel erheblich (Abb. 5). Denn innerhalb der Bereiche drehen sich die Flüssigkristalle im elektrischen Feld in eine Richtung. Da diese im Nachbarbereich unterschiedlich ist, gleicht sich dieser Effekt aus.

Realisieren lassen sich solche Domänen über dreieckförmige mechanische Vorsprünge auf den Substraten. An den beiden Flanken der Dreiecksstruktur sind die Flüssigkristalle spiegelsymmetrisch zur Substratorthogonalen orientiert. Bei angelegter elektrischer Spannung drehen sich die Flüssigkristalle in der jeweiligen Domäne in entgegengesetzte Richtungen. Dass sich dadurch der Blickwinkel im Vergleich zum Ein-Domänenprinzip verbessert, ist offensichtlich, da der Betrachter unter einem Winkel α einen Mittelwert der beiden Domänen wahrnimmt (Abb. 5).

Solche Vorsprünge bringen aber auch Nachteile mit sich. Das Kippen der Flüssigkristalle in unter-

schiedliche Richtungen führt zu einer Unstetigkeit im Direktorprofil. In diesem Bereich kann keine Lichtmodulation stattfinden, sodass es erforderlich ist, diesen Bereich bei der Herstellung mit einer schwarzen Maske abzudecken. Dies reduziert die Lichttransmission des Displays. Zudem erhöhen sich durch das Strukturieren der Substratflächen die Produktionskosten.

Die PS-VA-Technologie überwindet diese beiden Nachteile. Sie ist seit etwa 2009 auf dem Markt und bis heute das dominierende LC-Schaltprinzip für Fernseher. Bei PS-VA werden nematische Flüssigkristalle mit negativer dielektrischer Anisotropie mit einer geringen Konzentration (ca. 0,5 %) polymerisierbarer Flüssigkristalle (sog. reaktive Mesogene) versetzt. Im Display wird eine Vorspannung angelegt, und unter UV-Bestrahlung polymerisieren diese reaktiven Flüssigkristalle zu einem Polymerfilm auf den Substraten.

Der über die Vorspannung eingestellte Neigungswinkel der Moleküle übernimmt nun die Rolle der Vorsprünge, d. h. ohne mechanische Strukturierung der Substrate und ohne entsprechenden Lichttransmissionsverlust liegt bei PS-VA die Schaltzeit der Moleküle fest. Die Schaltzeit von PS-VA ist noch kürzer als beim herkömmlichen VA-Prinzip. Grund dafür ist die Homogenität des Schaltvorganges. Während die Vorsprünge auf den Substraten dazu führen, dass sich der Schaltvorgang von ihnen ausgehend diffusionsartig ausbreitet, setzt bei PS-VA ein homogenes schnelles Schalten auf der gesamten Substratfläche ein.

Displays aus OLEDs

Neben den flüssigkristallinen Flachbildschirmen wird seit Ende der 1990er-Jahre auch über emittierende Systeme auf Basis von organischen Dioden (OLEDs) intensiv diskutiert. Nachdem die organische Elektrolumineszenz seit längerer Zeit bekannt war, haben 1987 Mitarbeiter von Kodak in den USA erstmals eine Diodenstruktur aus organischen Schichten hergestellt, die eine starke grüne Elektrolumineszenz bei einer niedrigen Betriebsspannung von 10 V zeigte [6].

Schnell war klar, dass sich OLEDs eignen, um daraus dünne Bildschirme aufzubauen. Extrem dünne (einige 100 nm) farbige Lichtpunkte lassen sich strukturiert herstellen und zeichnen sich durch gute Effizienz, geringen Materialeinsatz und gut einstellbare Farbkordinaten aus. Verglichen mit flüssigkristallinen Displays ist der Aufbau recht einfach, da keine zusätzliche Lichtquelle und Farbfilter notwendig sind, um RGB-Pixel (rot, grün, blau) zu erzeugen. Erste OLED-Produkte mit Passiv-Matrix-Ansteuerungen gab es innerhalb von zehn Jahren nach der erstmaligen Beschreibung. Aktiv-Matrix-Bildschirme werden seit 2007 in großen Serien gefertigt und verkauft.

Die Herausforderungen sind jedoch vielfältig und betreffen drei Bereiche, die in der Anwendung nicht komplett unabhängig zu betrachten sind: den Diodenaufbau als solchen, die Herstellung der Pixelstrukturen und ihre Verkapselung sowie die elektronische Ansteuerung.

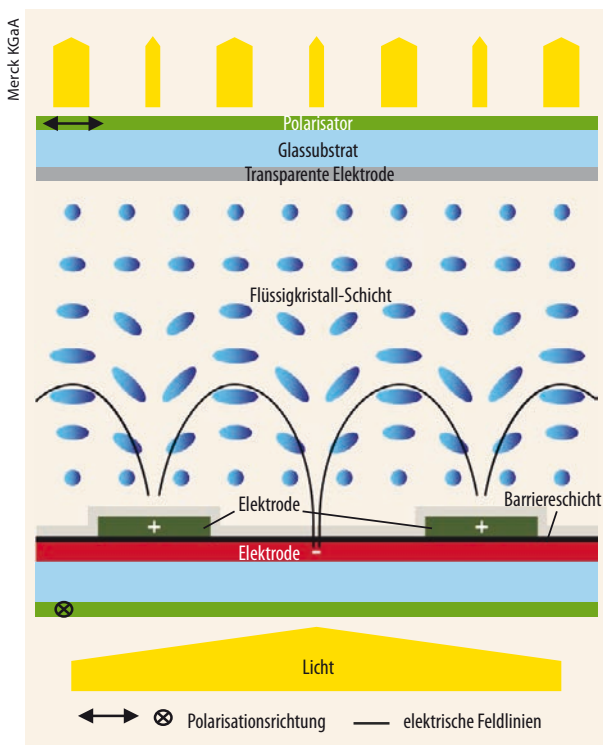


Abb. 3 Bei der FFS-Technologie befinden sich nur auf einer Seite Elektrodenstrukturen, das Feld ist dadurch inhomogen. Unter den strukturierten Elektroden befindet sich – abgetrennt durch eine Barrierschicht – eine flächige Elektrode. In Bereichen mit parallelem elektrischen Feld zum Substrat ist die elektro-optische Modulation am stärksten.

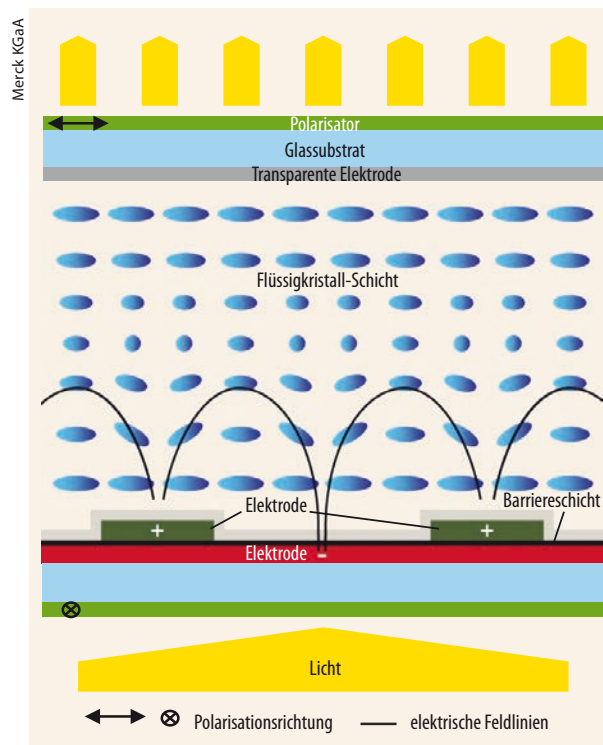


Abb. 4 Die Elektrodenkonfiguration bei UB-FFS ist identisch wie bei FFS. Die Flüssigkristalle sind parallel zu den Substraten orientiert und richten sich im Schaltvorgang senkrecht zu den elektrischen Feldlinien aus. Dies führt insbesondere in Bereichen, in denen die elektrischen Feldlinien senkrecht zu den Substraten stehen, zu höherer Lichttransmission als bei FFS.

erung. Wir wollen uns hier auf die Diodenstruktur und die Herstellung beschränken.

Die organische Diode bildet das Kernelement und bestimmt zu weiten Teilen die Leistungscharakteristik des Bildschirms (Abb. 6). Wichtigste Aspekte in der Entwicklung sind die Energieeffizienz, die Lebensdauer und die Farbcharakteristik. Diese drei Leistungsdaten hängen in hohem Maße voneinander ab und lassen sich nur bedingt isoliert optimieren.

Die Betriebsspannung und die Quanteneffizienz bei der Strahlungsemission nach der Rekombination des Elektronen-Loch-Paars bestimmen ganz wesentlich die Effizienz des Bauteils. Ziel ist es, die Energieniveaus der Elektronen- und Lochleiter optimal anzupassen und die Betriebsspannung zu minimieren. Zudem sind hocheffiziente Emittiermoleküle gefragt, welche die Strahlungsemission bestimmen. Zunächst wurden dafür fluoreszierende organische Moleküle verwendet. Phosphoreszierende metallorganische Systeme, bei denen die Quantenausbeute durch erlaubte, strahlende Triplet-Übergänge deutlich höher ist, erlauben jedoch höhere Emissionsausbeuten [7]. In heutigen OLED-Bauteilen werden für die rote und grüne Emission überwiegend phosphoreszierende Emittier verwendet, für die blauen Pixel aber fluoreszierende Emittier. Denn entsprechende blaue Triplet-Emittier besitzen noch keine ausreichende Lebensdauer bei den benötigten Farbkoordinaten.

Die Lebensdauer von OLEDs ist noch nicht vollständig verstanden. Wesentliche Einflussfaktoren sind die chemische Stabilität der Materialien und Halbleiterdefekte. Hierbei spielen Verunreinigungen, die Lage der Energieniveaus und intrinsische Stabilitäten der energetischen Anregungen beim Betrieb der Diode eine große Rolle und bieten vielfaches Optimierungspotenzial. Darüber hinaus ist die Verkapselung der Bauteile zum Schutz vor Sauerstoff und Wasser entscheidend.

Diese materialbedingten Leistungsmerkmale von OLEDs sind heute auf einem Niveau, auf dem renommierte Display-Hersteller millionenfach Massenpro-

dukte in den Markt bringen, dies gilt vor allem für kleine und mittlere Displays bei Smartphones und Tablet-PCs.

Neben dem Diodenaufbau gilt es, auch die Herstellung der Diode zu optimieren. Dazu ist ein hocheffizienter Produktionsprozess nötig, bei dem die organischen Materialschichten mit großer Präzision in Bezug auf Schichtdicke, Grenzflächendefinition und räumlicher Adressierung pixeliert aufgebracht werden. Dies geschieht über eine thermische Verdampfung im Vakuum, die eine Genauigkeit der Schichtdicken von etwa 10^{-10} m bietet. Bei der räumlichen Definition von roten, grünen und blauen Pixeln, die zumindest in der Emissionszone unterschiedliche Materialien verlangt, treten je nach Auflösung Schwierigkeiten auf. Typischerweise dienen bei kleinen Displays Metallmasken zur Strukturierung. Bei sehr großen Flächen sind ihnen allerdings Grenzen gesetzt. Durch die thermische Belastung treten selbst bei stark mechanisch vorgespannten hochauflösenden Masken für große Flächen überproportional viele Fehler auf. Das ist ein Grund, warum OLED-Bildschirme für Fernseher und andere großflächige Anwendungen heute noch überwiegend indirekt betrieben werden. Anstelle der direkten Pixelierung der Emissionszone der Diode (RGB) wird also eine durchgehend weiße Diode verwendet, die über externe Farbfilter die RGB-Matrix für die Farbbildschirme erhält.

Gedruckte Displays

Wie bereits erwähnt, ist die Herstellung von direkt strukturierten RGB-OLEDs bislang nicht optimal gelöst. Bei großen Displays kommt es mit der Metallmaskentechnik (Abb. 7a) zu großen Verlusten bei der Produktionsausbeute. Der Grund dafür ist insbesondere, dass sich große Bildschirme nur auf großen Glassubstraten wettbewerbsfähig herstellen lassen. Um die Produktivität zu erhöhen, werden hierbei möglichst viele Einzeldisplays auf einem Glassubstrat

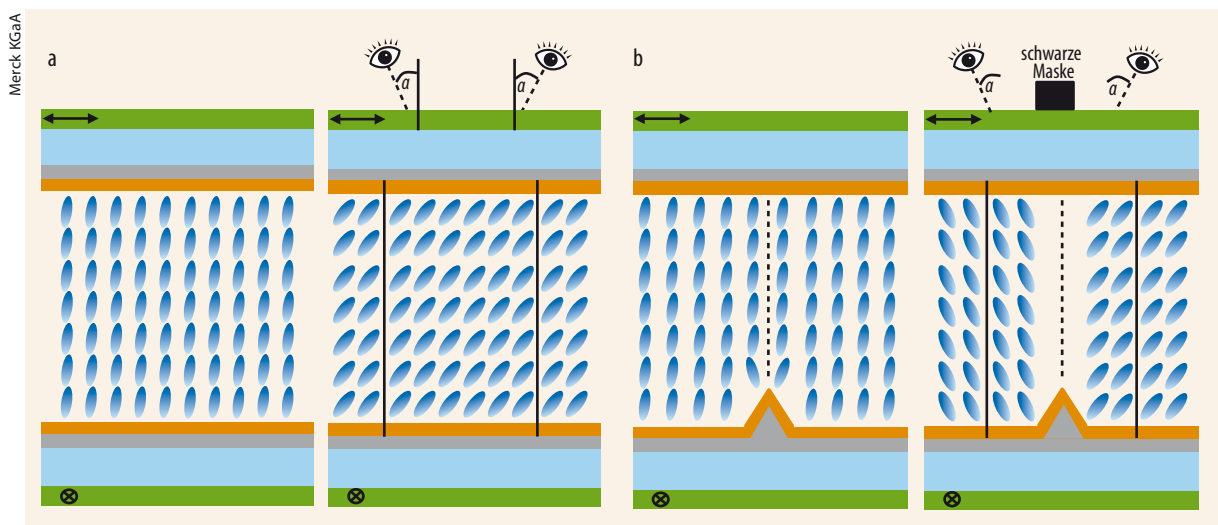


Abb. 5 Bei nur einer Domäne drehen im elektrischen Feld alle Flüssigkristalle in eine Richtung (a). Bei zwei Domänen geben

kleine Vorsprünge auf dem Substrat (b) eine Vorzugsrichtung für den Schaltvorgang vor.

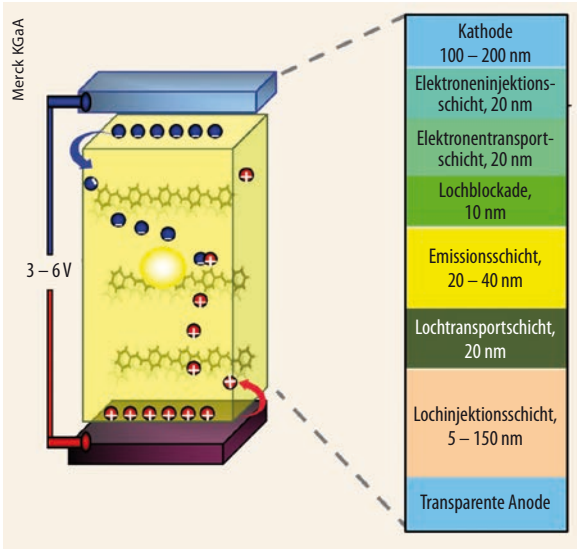


Abb. 6 Eine organische lichtemittierende Diode besteht aus mindestens drei, in der Praxis aber bis zu 20 organischen Schichten. Alle Funktionsschichten bestehen aus unterschiedlichen organischen Materialien.

untergebracht. Die Bildschirmdiagonale für Fernseher beträgt im Premiumbereich 55 Zoll und mehr. Dafür sind Glassubstrate der Generation 8 (Gen 8) mit einer Größe von 2160 mm × 2460 mm erforderlich. Die Metallmasken-Technologie ist allerdings derzeit auf eine Substratgröße von 1500 mm × 1850 mm (Gen 6) begrenzt. Hier könnte möglicherweise die Drucktechnologie Abhilfe schaffen.

Seit mehr als 15 Jahren gibt es visionäre Ansätze, OLED-Bildschirme mittels Ink-Jet-Druckverfahren zu produzieren (Abb. 7b). Der Druck von OLED-Strukturen bringt allerdings auch Schwierigkeiten mit sich. So müssen natürlich die gewählten Materialsysteme für alle Funktionsschichten als druckbare Tinten vorliegen. Bei den Funktionsschichten handelt es sich um organische Halbleiter, deren Funktion maßgeblich durch Verunreinigungen leidet. Somit lassen sich den Tinten nur sehr begrenzt sonst übliche Additive zusetzen, was die Filmbildung erschwert. Zudem ist es notwendig, für die Diode mehrere Schichten definiert übereinander zu drucken. Da Grenzflächen zwischen den Halbleiterschichten großen Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften haben, ist eine reproduzierbar definierte Grenzfläche notwendig. Teilweises An- oder Auflösen muss ausgeschlossen oder aber gut definiert und reproduzierbar sein.

Um diese Probleme in den Griff zu bekommen, wurden in den Anfängen der Druckversuche überwiegend polymere Materialien untersucht. Diese erlauben es, rheologische Eigenschaften der Tinten und der Filmbildung gut einzustellen. Die damit einhergehende aufwändige Reinigung von Polymeren ist nur eine der Schattenseiten dieses Ansatzes. Eine Alternative sind Moleküle, die in-situ vernetzen und damit erst nach dem Druckprozess polymerisieren. Auch der Versuch, mit kleinen Molekülen in Lösungsmitteln zu arbeiten und durch orthogonale Lösungsmittel Mehrschichtdruck zu realisieren, scheint vielversprechend. Dabei

werden Schichten, die mit dem einen Lösungsmittel prozessiert werden, durch die darauffolgende lösungsbasierte Schicht nicht angelöst, wenn die Lösungsmittel orthogonal sind (z. B. polar ↔ unpolar).

Allen Materialvarianten beim Druck von OLEDs ist der Trend gemein, die Zahl der Funktionsschichten zu minimieren. Dabei wird versucht, durch Mischungen in den Tinten eine Vielzahl der benötigten Eigenschaften in einer Schicht zu vereinen. Der Druckprozess an sich bietet viele Herausforderungen. So beträgt die Auflösung bei großen Fernsehern 50 pixel per inch (ppi) und bei Tablet-PCs über 500 ppi. Zudem spielen bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen Verunreinigungen und Partikel aus der Umgebung eine negative Rolle. Da der Druckprozess mechanisch bewegte Teile beinhaltet, sind besondere Anstrengungen notwendig, um einen halbleitertauglichen Herstellungsprozess zu gewährleisten.

In den letzten drei Jahren haben verschiedene Hersteller gedruckte Fernseher von 30 bis 65 Zoll als Pilotgeräte gezeigt. Diese Einzelgeräte basieren meist auf einem Hybridprozess. Dabei werden Funktionsschichten, die für alle Farben gleich sind, durch einen maskenfremen Gasphasenprozess abgeschieden und nur die zu strukturierenden Emissionsschichten gedruckt. Mehrere Hersteller haben angekündigt, diese Technologie in den nächsten Jahren in die Serienreife zu überführen, allerdings schwanken die Aussagen zum genauen Start erheblich. Für großflächige Displays scheint sich der Trend zur Drucktechnologie durchzusetzen.

Ein Wachstumsmarkt

Nach Aussagen von Marktforschungsunternehmen wie DisplaySearch wächst die gesamte Fläche aller produzierten Flachbildschirme von 160 km² im Jahr 2014 auf 200 km² bis 2019 – 200 Quadratkilometer entsprechen etwa der Fläche von Wiesbaden. Das Wachstum beträgt also durchschnittlich rund fünf Prozent pro Jahr [8]. Bildschirme auf Basis von Flüssigkristallen werden 2019 etwa 94 Prozent der gesamten Fläche ausmachen, der Rest entfällt auf OLED-Displays (Abb. 8). Der Grund für diesen recht geringen Anteil liegt wahrscheinlich darin begründet, dass bis heute die Angaben

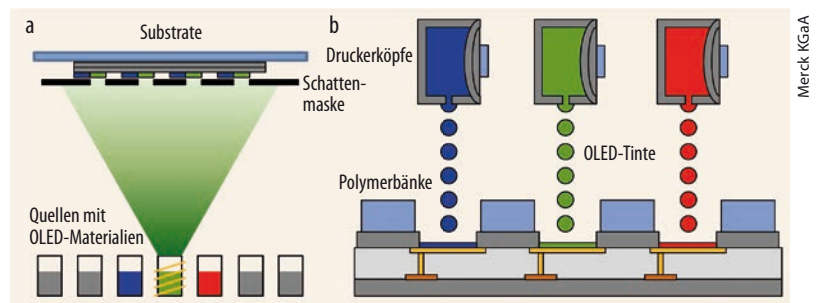


Abb. 7 Kleine Displays werden meist mit Metallmasken gefertigt (a). Diese stoßen allerdings bei Displaygrößen heutiger Fernseher im Premiumbereich an Grenzen, sodass sich die Herstellung mit Druckverfahren durchsetzt (b).

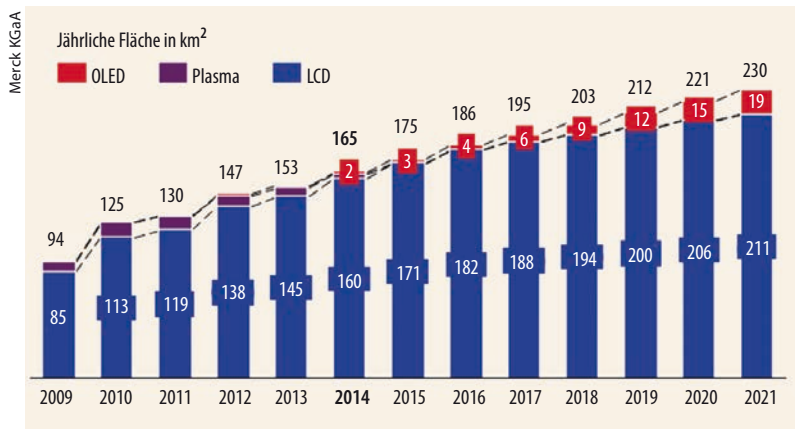


Abb. 8 Die Fläche aller weltweit hergestellten Flachbildschirme wächst jährlich etwa um fünf Prozent. Fernseher machen mit Abstand den größten Anteil dieser Fläche aus.

über den genauen Zeitpunkt der Serienreife für großflächige OLED-Displays noch erheblich schwanken.

Displays für Fernseher machen heute rund 68 Prozent der Gesamtfläche für Flachbildschirme aus, zwölf Prozent entfallen auf Monitore, sieben Prozent auf Laptops und vier Prozent auf Tablet-Displays. Kleinere und mittelgroße Displays (insbesondere für Smartphones) machen heute etwa zehn Prozent der Displayfläche aus. Mit mehr als einer Milliarde Smartphones sind diese jedoch die am meisten hergestellten Displays. Zum Vergleich: 2013 wurden ca. 208 Millionen LCD-TV verkauft. Im Segment der kleinen und mittelgroßen Displays haben OLED-Displays einen Marktanteil von etwa neun Prozent.

Die Flüssigkristall-Technologie entwickelt sich hinsichtlich der Schaltzeiten, des Kontrasts, der Bildauflösung, der Farbgenauigkeit, des Farbraums und der Energieeffizienz rasant weiter. Gepaart mit Kosteneinsparungen bei der Herstellung ist die Flüssigkristall-Technologie auf einem hohen Niveau wettbewerbsfähig. Andere Display-Technologien, wie die Plasma-Technologie, spielen heute praktisch keine Rolle mehr. Elektrophoretische oder LED-Displays besetzen Nischen, z. B. elektronische Bücher oder sehr großflächige Displays für Medienfassaden.

Zukunft der Flüssigkristalle

Dem Bedürfnis der Konsumenten, zum Beispiel ein Fußballspiel im Fernsehen noch realitätsnäher zu erfahren, kommen 3D-Displays nach. Dafür gibt es zwei verschiedene Technologien. Bei der Shutter-Glass-Technologie sind Brillen mit Flüssigkristallgläsern erforderlich. Die zweite Möglichkeit ist die Film-Patterned-Retarder-Technologie, für die reaktive Flüssigkristalle (reaktive Mesogene) zu einem optischen Film verarbeitet werden.

Ein Ansatz, der ein noch stärkeres Eintauchen in eine dreidimensionale Welt ermöglicht und zwar ohne Brille, sind holografische Displays. Ein recht erfolgversprechender Ansatz nutzt Flüssigkristalle als Phasenmodulator für Lichtwellen, um Objekte und Situationen möglichst realitätsnah zu visualisieren [9].

Heutzutage kommen Flüssigkristalle überwiegend in Displays zum Einsatz. Denkbar sind jedoch auch an-

dere Anwendungen. Ein Ansatz, der bereits erfolgversprechende kleinere Pilotanwendungen und Demonstratoren hervorgebracht hat, sind Flüssigkristalle in Fenstern. Hier geht es darum, das Licht- und Energiemanagement zu verbessern. Speziell entwickelte Flüssigkristallmischungen werden dafür vereinfacht ausgedrückt zwischen zwei Glasscheiben eingebracht. Wie beim Display ordnen sich die Flüssigkristalle durch Anlegen einer Spannung unterschiedlich an, sodass mehr oder weniger Licht durch die Flüssigkristallschicht und damit durch das Fenster geht. Dies steuert den Energieeintrag durch das Sonnenlicht. In Kombination mit einer Solarzelle, die genug Strom liefert, lässt sich das Fenster auch autonom, also unabhängig vom Stromnetz des Gebäudes, schalten. Das Konzept ist besonders bei Architekten auf großes Interesse gestoßen.

Weitere Anwendungen nutzen die Möglichkeit, auch andere elektromagnetische Wellen wie Mikrowellen durch Flüssigkristalle zu beeinflussen, um dadurch anfällige mechanische Bauteile (z. B. Antennen) zu ersetzen und Instandhaltungskosten zu reduzieren [10].

Literatur

- [1] F. Reinitzer, *Monatsh. Chem.* 7, 597 (1886)
- [2] T. Geelhaar et al., *Angew. Chem.* 125, 8960 (2013)
- [3] G. H. Heilmeyer et al., *Proc. IEEE* 56, 1162 (1968)
- [4] P. G. de Gennes, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 12, 193 (1971)
- [5] T. Nagayasu et al., *Proc. Int. Display Res. Conf.* 56 (1988)
- [6] C. W. Tang und S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.* 51, 913 (1987)
- [7] M. A. Baldo et al., *Nature* 395, 151 (1998)
- [8] *Display Search Q3/2014*
- [9] S. Reichelt et al., in: *Advances in Lasers and Electro-Optics, InTech* (2010), S. 838; ISBN 9789533070899
- [10] A. Gaebler et al., *Investigation of high performance transmission line phase shifters based on liquid crystal* (2009) *European Microwave Week 2009, Science, Progress and Quality at Radio-frequencies, Microwave Conference*, 5295928, 594

DIE AUTOREN

Michael Heckmeier (kein FV) studierte Physik in Freiburg und promovierte 1998 nach zweijährigem Aufenthalt am CNRS in Frankreich in Konstanz. Im gleichen Jahr begann er seine berufliche Laufbahn bei Merck in Darmstadt als Laborleiter in der Forschung Flüssigkristalle. Seit Januar 2015 leitet er die Geschäftseinheit Pigmente & Funktionale Materialien.



Udo Heider (FV Dielektrische Festkörper) ist Vice President der Performance Materials-Sparte bei Merck und Leiter des Businessfelds OLED. Er besitzt mehr als 20 Jahre Erfahrung in der High-Tech-Materialbranche und vertrat verschiedene Rollen im Management von Forschung und Entwicklung bis hin zu Marketing und Business Development.

Roman Maisch studierte Chemie in Würzburg und promovierte dort 1984. Seit 1985 ist er bei der Merck KGaA in Darmstadt tätig – zuletzt als Senior Vice President Marketing & Sales, global verantwortlich für Flüssigkristall- und Photoresistmaterialien für die Displayindustrie.

