



Quantenpunkte für

Molekulare Lichtquellen für LCDs



Flüssigkristall-Farbd Displays sind in regelmäßig zeilen- und spaltenförmig angeordneten Pixeln organisiert, die sich jeweils aus drei Subpixeln in den Farben Rot, Grün und Blau zusammensetzen. Das von einem Subpixel in Richtung des Betrachters emittierte Licht stammt von einer flächigen, gleichmäßigen Hintergrundbeleuchtung, die von den Flüssigkristallzellen subpixelgenau mehr oder weniger abgeschwächt wird. Ein RGB-Filterarray separiert die dem Subpixel zugeordnete Farbe. Der Farbraum eines solchen Displays lässt sich durch eine Hintergrundbeleuchtung mit ausgeprägten spektralen RGB-Maxima deutlich erweitern. Eben das leisten Quantenpunkte, deren nanoskalige Dimensionen nur wenige diskrete Energiezustände zulassen, was bei Anregung durch Licht (Primärstrahlung) zu hoch farbreinen Fluoreszenzen (Sekundärstrahlung) führt.



natürlichere Farben

Seit Jahrzehnten hat sich das Flüssigkristalldisplay (LCD: Liquid Crystal Display) in Computermonitoren, TV-Geräten, Messgeräten, Tablets, Mobilfunkgeräten usw. in den verschiedensten konstruktiven Ausführungen bewährt. Das Grundprinzip blieb stets unverändert: Die Bildpunkte (Pixel) sind als Tripel aus kleinen roten, grünen und blauen Unterbildpunkten (Subpixeln) ausgeführt. Sie sind regelmäßig in einer rechteckförmigen Ebene, Zeilen und Spalten angeordnet. Eine großflächige, weiße Hintergrundbeleuchtung strahlt in eine Flüssigkristallzweischicht, deren Lichtdurchlässigkeit subpixelgenau gesteuert werden kann. Damit fällt in jedes Subpixel eine variable Menge weißen Lichts ein, aus dem ein zugeordnetes Farbfilter eines Farbfilterfelds (CFA: Color Filter Array) den jeweiligen Farbanteil (Rot, Grün oder Blau) separiert. In der Summe überlagern sich die Durchstrahlungen der zu einem Pixel gehörigen Subpixel zu einer resultierenden Farbe und Intensität des Pixels.

Die spektrale Reinheit der ausgefilterten Farben ist nicht besonders hoch (Bild 1). Für eine hohe Farbtreue sind aber nur die roten, grünen und blauen Spektralanteile erforderlich, alle anderen Farben im Licht der Subpixel tragen zu einer Entsättigung des Bilds bei. Wenn man also die Subpixelfarbfilter mit spektral unverfälschterem Licht (Bild 2) beleuchtet, ergeben sich kräftigere und reinere Farben. In Bild 3 ist der Unterschied deutlich zu sehen.

Mit der Einführung von UHD-TV (Ultra High Definition TV, 4K-UHD) werden Displays benötigt, die einen erweiterten Farbumfang nach dem Standard ITU-R BT.2020 aufweisen. Das zugehörige Dreieck (Gamut) im CIE-Chromatizitätsdiagramm (Bild 4) zeigt die erhöhten Anforderungen an geeignete Displays.

Quantenpunkte (QD: Quantum Dot) als spektral hochreine Lichtquellen für die Rückbeleuchtung herkömmlicher Flüssigkristalldisplays können deren Farbraum deutlich vergrößern. Neben OLED-Bildschirmen

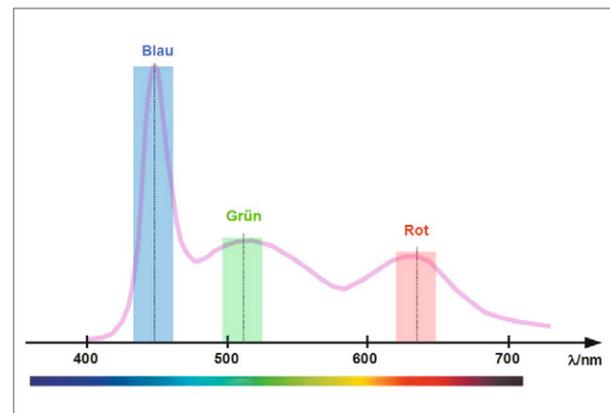


Bild 1: Typisches Spektrum eines mit Weißlicht hinterleuchteten LC-Displays. Es fällt auf, dass die Maxima bei den Grundfarben Rot, Grün und Blau nicht besonders ausgeprägt sind, was aber für eine gute Farbtreue des Displays erforderlich ist.

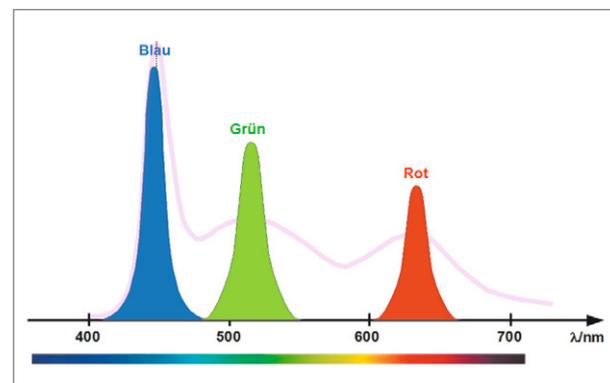


Bild 2: Derartig spektral begrenzte Farben als LC-Display-Hintergrundbeleuchtung steigern Farbigkeit und Kontrast des Bilds.



Bild 3: Derartig spektral begrenzte Farben als LC-Display-Hintergrundbeleuchtung steigern Farbigkeit und Kontrast des Bilds.

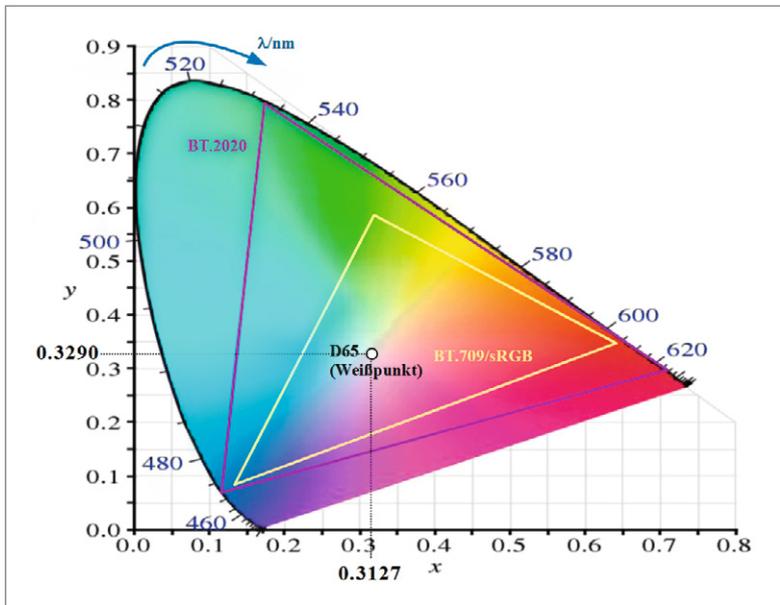


Bild 4: Das BT.2020-Gamut umfasst deutlich mehr darstellbare Farben. Es ist für die nächste Generation von HD-Bildschirmen maßgebend.

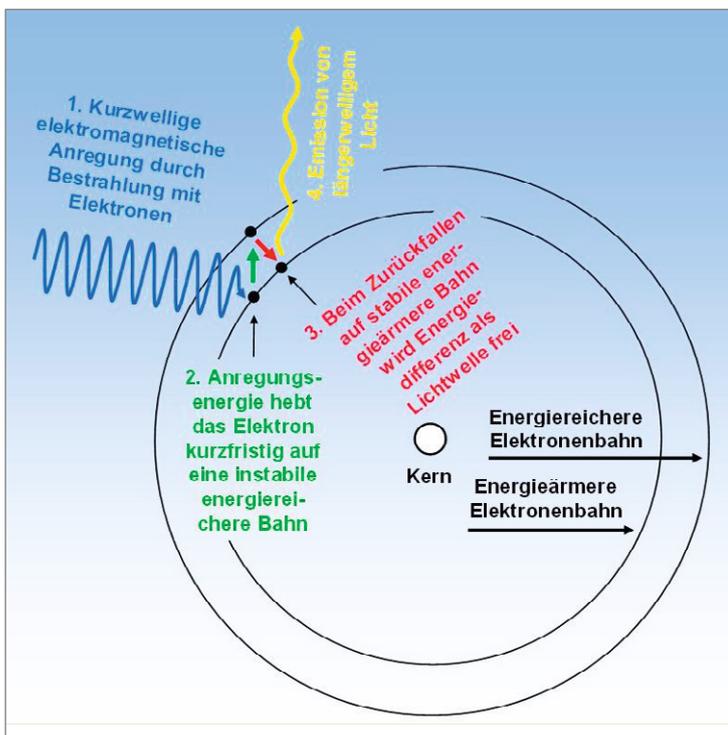


Bild 5: Wird ein Elektron durch externe Energie (Pump-Energie) auf eine energiereichere Bahn gebracht, gibt es beim Zurückfallen auf seine ursprüngliche, energieärmere Bahn ein Lichtquant ab.

Energie E und Wellenlänge λ eines Photons sind über das Planck'sche Wirkungsquantum h verbunden:

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{mit } h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (\text{Plancksches Wirkungsquantum})$$

$$c = 299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{Lichtgeschwindigkeit})$$

umstellen nach λ .

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E}$$

Beispiel mit $E = 3,1 \text{ eV}$:

$$\lambda = \frac{4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3,1 \text{ eV}} = 400 \text{ nm}$$

Gleichung 1

(die sich in großen Formaten noch nicht wirtschaftlich herstellen lassen) erreichen nur QD-Displays die BT.2020-Anforderungen weitgehend.

Mit Quantenpunkten zu reineren Farben

Unter einem Quantenpunkt versteht man einen winzigen Halbleiterkristall, der nur noch 1000 bis 10.000 Atome in einem Cluster mit Abmessungen im Bereich von 100 nm enthält. Quantenpunkte gehören zu den mesoskopischen Systemen (meso: zwischen) an der Schwelle zwischen der klassisch beschreibbaren makroskopischen Welt und den den Gesetzen der Quantenmechanik unterworfenen nanoskaligen Strukturen. In Nanokristalliten werden die Elektronen in allen drei Raumrichtungen in ihrer Beweglichkeit so weit eingeschränkt, dass ihre Energie nicht mehr kontinuierliche, sondern nur noch diskrete Werte annehmen kann.

Die optischen Eigenschaften solcher Nanopartikel unterscheiden sich deutlich von denen eines großen Volumenhalbleiters. Der Übergang zwischen Volumenkristall und Quantenpunkt tritt bei einer geometrischen Ausdehnung auf, bei der die Quantenmechanik zur Erklärung der auftretenden elektronischen und optischen Effekte erforderlich wird. Kristalline Quantenpunkte lassen sich in ihren optischen Eigenschaften punktgenau einstellen. Als Quantenpunkt-moleküle bezeichnet man Aggregate von Quantenpunkten.

Zur Erinnerung: Gemäß dem Bohrschen Atommodell umrunden Elektronen den Atomkern auf diskreten Bahnen mit unterschiedlichen Radien (Orbitalen). Diskret bedeutet in diesem Zusammenhang, dass es nur eine begrenzte Anzahl von Bahnradien gibt, die ein bestimmtes Energieniveau des Elektrons kennzeichnen. Wird ein Elektron durch eine von außen eingebrachte Anregungsenergie dazu gebracht, von seiner stabilen Umlaufbahn auf eine energiereichere Bahn mit größerem Radius zu wechseln, so wird es sich dort nur kurze Zeit aufhalten und wieder auf seine ursprüngliche energieärmere Bahn zurückfallen (Bild 5). Die dabei frei werdende Energie E wird in Form eines Lichtquants mit einer entsprechenden charakteristischen Frequenz f bzw. Wellenlänge λ gemäß Gleichung 1 abgestrahlt. Dieser Vorgang wird als „spontane Emission“ bezeichnet.

Die Energieabstrahlung des Atoms nach einer Anregung ist also „gequantelt“, und somit wird nur Licht (oder allgemein elektromagnetische Strahlung) bestimmter diskreter Wellenlängen (Farben) abgegeben. Eben diese Diskretisierung der Energiezustände tritt auch bei Quantenpunkten auf. Deshalb werden Quantenpunkte oft auch als „Pseudo-Atome“ oder „künstliche Atome“ bezeichnet.

Um eine ungefähre Vorstellung von der Quantenpunktgröße zu gewinnen, mag die folgende Veranschaulichung helfen: Ein Quantenpunkt hat die gleiche Größenrelation mit einem Fußball wie dieser mit der Erdkugel.

Nasschemisch hergestellte Lösungen von Quantenpunkten nehmen je nach deren Größe und Materialbeschaffenheit bei Lichtanregung unterschiedliche Farben an (Bild 6).



Bild 6: Von kurzwelligem Licht bestrahlte Quantenpunkt-Lösungen leuchten in langwelligeren Farben. (Quelle: Wikipedia)

Spontane Emission tritt natürlich nicht nur im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung auf. Wie Bild 7 zeigt, lässt sich die spektrale Lage der spontanen Emission sehr flexibel über Größe, Form und Zusammensetzung der Quantenpunkte steuern. Es handelt sich hier um die Photolumineszenz-Spektren im Sub-Infrarotbereich von variierten In(Ga)As-Quantenpunkt-Ensembles, die jeweils in eine GaAs-Matrix eingebettet sind.

Der spektrale Reinheitsgrad von QD-RGB-Spektren wird über den FWHM-Wert (Full Width at Half Maximum) charakterisiert (Bild 8). Er beträgt bei QD-RGB-Spektren typ. 30 bis 35 nm.

Zwei Betriebsarten von Quantenpunkten

Bezüglich der Art der Anregung eines Quantenpunkts unterscheidet man die Betriebsarten Elektrolumineszenz (EL-Modus) und Photolumineszenz (PL-Modus).

Im EL-Modus emittieren Quantenpunkte durch Anlegen eines elektrischen Felds bzw. einer elektrischen Spannung direkt elektromagnetische Strahlung, z. B. in Form von Licht. Die Anregungsenergie (Pump Energy) ist also elektrischer Natur. In Leuchtmitteln der Zukunft werden Quantenpunkte in Gestalt von QD-LEDs deshalb eine wesentliche Rolle spielen. Sie sind zuverlässige, energieeffiziente, in der Farbe abstimmbare Lichtquellen für Display- und Beleuchtungsanwendungen. Sie senken die Herstellungskosten und verwenden extrem dünne, transparente oder flexible Materialien.

Im PL-Modus wird das QD-Material optisch angeregt. Bestrahlt mit energiereichem blauem bis ultraviolett Licht beginnt es in einer vorgegebenen langwelligeren Farbe zu strahlen. Es wandelt also die Lichtfarbe mit sehr hoher Effizienz (Bild 9). Eben diese Eigenschaft wird beim Einsatz von Quantenpunktmaterial zur Rückbeleuchtung von LC-Displays genutzt.

Aufbau eines Quantenpunkts

Den prinzipiellen Aufbau eines Quantenpunkts in einer Lösung zeigt Bild 10. Ein Kern aus anorganischem hocheffizientem kristallinem Phosphor wird von einer schützenden transparenten Schale umgeben. An der Oberfläche angedockt sind Moleküle, die mit ihrem freien Ende in die Lösung ragen (Liganden) und für einen Mindestabstand der Quantenpunkte sorgen, sie bedecken und damit Reaktionen mit der Lösung verlangsamen (passivieren).

Quantenpunkte in Flüssigkristalldisplays

Traditionell wird für die Hintergrundbeleuchtung des LCDs weißes Licht verwendet. Dies kann von Kaltkathodenröhren (CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp)

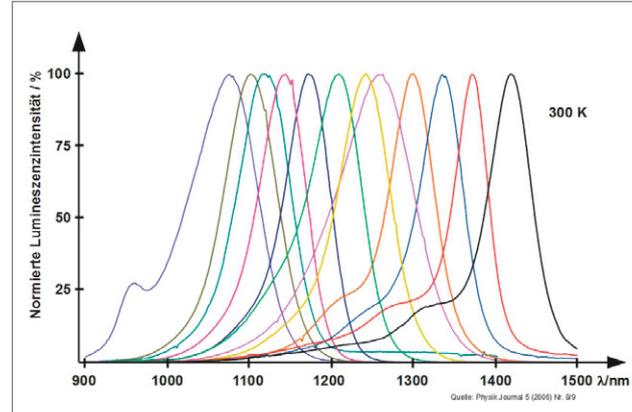


Bild 7: Die spektrale Lage der bei der spontanen Emission abgestrahlten elektromagnetischen Wellen lässt sich sehr flexibel über Größe, Form und Zusammensetzung der Quantenpunkte steuern.

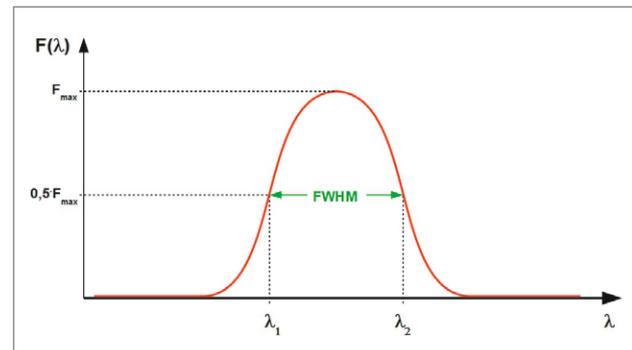


Bild 8: Die Halbwertsbreite (FWHM) ist ein Maß für die spektrale Schärfe eines Farbspektrums.

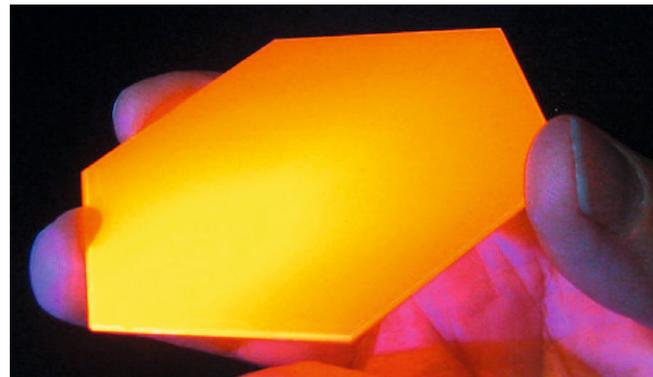


Bild 9: Quantenpunkte in einer Glasplatte beginnen bei Bestrahlung mit UV-Licht gelb zu fluoreszieren. (Quelle: QD-Vision)

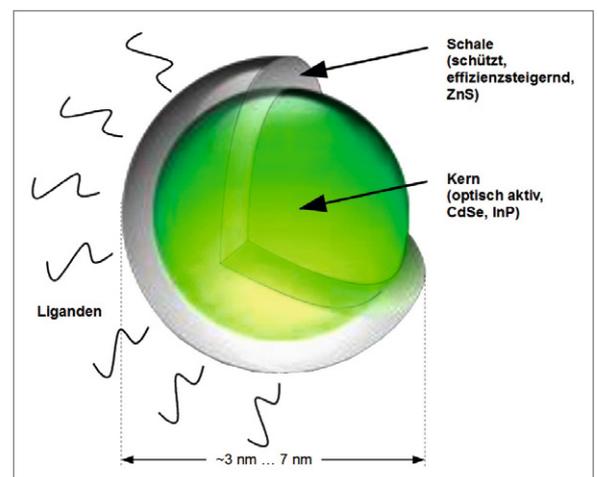


Bild 10: Ein Quantenpunkt in Lösung besteht aus dem optisch aktiven Kern, einer transparenten Hülle und umgebenden Liganden.

oder weiß strahlenden Leuchtdioden stammen. Es wird über seitlich angebrachte Lichtleisten in einen Diffusor eingebracht, der es möglichst gleichmäßig auf die Display-Rückseite verteilt. Man kann aber auch das Display direkt flächig von hinten durch Lichtquellen-Arrays beleuchten. Weil das CCFL den Farbraum des Displays einengt, hat wurde es durch weiße LEDs oder noch besser durch Arrays aus dreifarbig LEDs ersetzt. Letztere haben den Vorteil, dass die schmalbandigen Spektren der farbigen LEDs hinter den Farbfiltern nochmals von spektralen Randanteilen

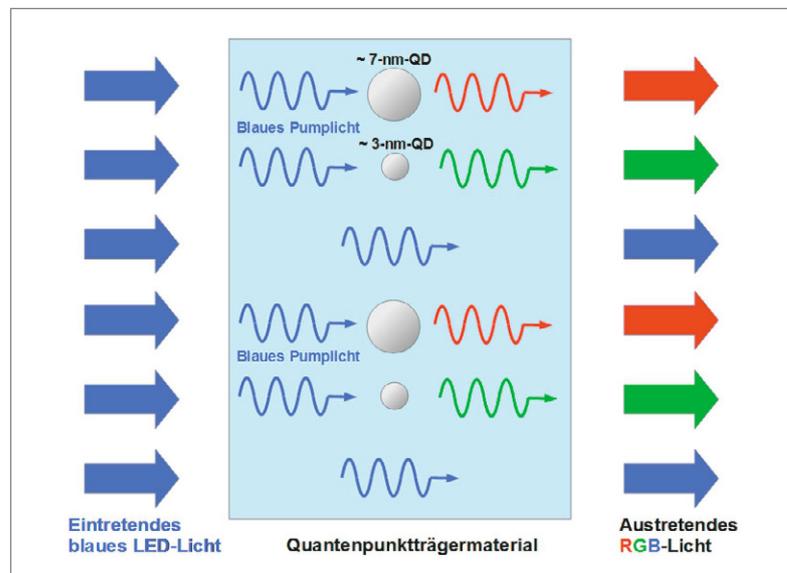


Bild 11: Wird ein Trägermaterial, das 3-nm- und 7-nm-Quantenpunkte enthält, mit blauem LED-Licht bestrahlt, treten die Grundfarben Rot, Grün und Blau in hoher Reinheit aus.

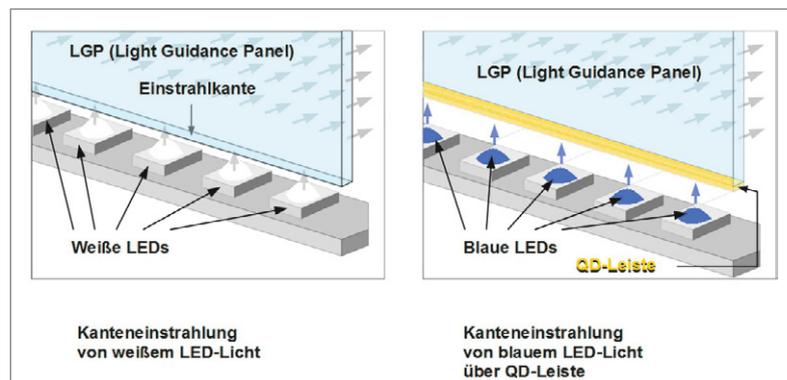


Bild 12: Bei herkömmlichen LC-Displays wird weißes LED-Licht in die Kante eines Lichtleiters eingestrahlt (links). Werden die LEDs gegen blaue ausgetauscht und eine Quantenpunktleiste zwischen Dioden und Lichteintrittskante eingefügt (rechts), steigt die Farbqualität des Displays signifikant.

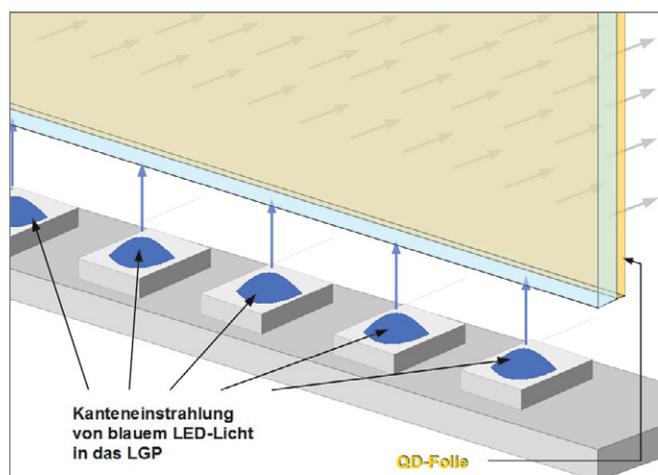


Bild 13: Eine andere Möglichkeit, reine Quantenpunktfarben zu erzeugen, bietet die QD-Folie zwischen Lichtleiter und Flüssigkristallzellschicht.

befreit sind, was den Farbraum des Displays erhöht und einen brillanteren Farbeindruck verschafft. Durch Reduzieren der Array-Helligkeit in Abhängigkeit vom Inhalt der Bildpartie (Local Dimming) kann man zudem den Kontrast zwischen hellen und dunklen Bildbereichen steigern.

Eine nochmals gesteigerte Reinheit der RGB-Farbspektren der Hintergrundbeleuchtung ergibt sich bei der Verwendung von Quantenpunktlicht. Es wird erzeugt durch die Bestrahlung von Quantenpunkten mit blauem LED-Licht. Bild 11 abstrahiert dies: Eine transparente Trägersubstanz (Folie oder Lösung) mit eingelagerten Quantenpunkten (QD) der Größenordnung 3 nm und 7 nm wird mit blauem Licht bestrahlt. Beim Aufprall auf einen 3-nm-QD wird es in grünes Licht umgewandelt, die Kollision mit einem 7-nm-QD führt zur Emission von rotem Licht. Das einfallende Licht erfüllt hierbei die Rolle einer Pump-Energie. Ein Teil des blauen Lichts durchläuft die Trägersubstanz unverändert. Damit steht spektral hochwertiges Licht der Farben Rot, Grün und Blau zur Beleuchtung des LCDs zur Verfügung.

Kanteneinstrahlung (Edge-LED)

Hier ist die Idee, Licht von LEDs in eine Kante (oder mehrere) eines Lichtleiterelements einzustrahlen (Edge-LED), damit es flächenhaft verteilt, möglichst homogen aus der Breitseite des Lichtleiterelements austritt und als Hintergrundbeleuchtung für ein LCD dient. Das führt zu sehr dünnen Bauweisen, weil die Beleuchtung nicht hinter dem LCD angeordnet werden muss. Traditionell wurde dazu das Licht weißer Leuchtdioden verwendet (Bild 12 links), was zu einem eingeschränkten Farbraum des Displays führte. Montiert man eine Leiste aus Quantenpunktmaterial vor die Einstrahlkante (Bild 12 rechts), verteilt das Lichtleiterelement die spektral reineren Farben Rot, Grün und Blau. Das Ergebnis ist ein erweiterter Farbraum gemäß Bild 4.

Ein anderer Ansatz besteht darin, blaues LED-Licht direkt seitlich in das Lichtleiterelement einzustrahlen und es bei dessen flächenhaftem Austritt durch eine nachgeschaltete Quantenpunktfolie zu leiten (Bild 13). Idealerweise sollte die Quantenpunktschicht direkt in die blauen LEDs integriert werden (Bild 14), was aber heute noch auf Schwierigkeiten stößt. Das Hauptproblem liegt darin, dass die Quantenpunktschicht einem extremen Lichtfluss und den hohen Chiptemperaturen ausgesetzt ist, was ihre Langzeitstabilität und Lebensdauer unakzeptabel verringert.

Flächenhafte Rückbeleuchtungen (Direct LED)

Der Einsatz vieler zu Arrays verschalteter LEDs als Hintergrundbeleuchtung und deren Anordnung hinter dem LCD wird als Direct LED oder Full LED bezeichnet. Diese Arrays lassen sich gezielt in der Helligkeit absenken (Local Dimming), wodurch dunklere Bildbereiche noch dunkler erscheinen, das Gesamtbild also kontrastreicher wirkt. Nachteilig ist, dass in den lokal gedimmten Bildbereichen vorhandene Helligkeitsspitzen (z. B. Glanzeffekte) ebenfalls abgedunkelt werden. Hierbei haben wir es mit einem grundsätzlichen Problem zu tun, das man zwar durch



eine immer größere Zahl von LEDs zur Hintergrundbeleuchtung entschärfen kann, damit aber wegen der aufwendigeren Ansteuerungselektronik den Gerätepreis hochtreibt. All diese Limitationen kennt der OLED-Bildschirm nicht, denn jedes Subpixel ist selbst eine LED aus organischem Material, die völlig unabhängig von den anderen seine eigene Farbe in der notwendigen Helligkeit selbst erzeugt. So lässt sich tiefstes Schwarz durch Abschalten von Pixeln und hellstes Weiß durch volle Leistung der Subpixel-LEDs erzeugen. Wenn die Industrie die Ausbeuteprobleme bei größeren Bildschirmformaten im Griff hat, werden OLED-Displays im Preis sinken und in den Wettbewerb mit QD-LCDs treten.

Den prinzipiellen Schichtenaufbau eines Direct-LED-QD-LCDs zeigt Bild 15. Die Ausstrahlung flächenhaft angeordneter blauer Leuchtdioden wird von einer Diffusorplatte vergleichmäßig, durch die Quantenpunktplatte in spektral reines rotes, grünes und blaues Licht gewandelt, um durch die von Dünnschichttransistoren (TFT: Thin Film Transistor) angesteuerten Flüssigkristallzellen in der Helligkeit moduliert zu werden und schließlich nach dem Durchlaufen des Filterarrays das Auge des Betrachters zu erreichen.

Ökonomische Gesichtspunkte

Der sich deutlich abzeichnende Übergang von den TV-Auflösungen Full HD (1920 x 1080 Pixel) zu Ultra HD (3840 x 2160 Pixel) mit erweitertem Farbraum erfordert OLED-Displays oder LC-Displays mit QD-Hintergrundbeleuchtung. Die Produktion großer OLED-Displays durch hohe Ausschussquoten kann noch nicht im Wettbewerb mit herkömmlichen LC-Displays mit durch Quantenpunkttechnologie optimierter Hintergrundbeleuchtung bestehen. Wie vorstehend beschrieben ist der technische Aufwand für das Umgestalten eines LC-Displays zum QD-LC-Display gering und damit auch – unabhängig von der Displaygröße – kaum kostensteigernd. Schließlich beschränkt er sich auf die Integration eines QD-Streifens bei Edge-LEDs und einer QD-Folie bei Direct LEDs.

Ökologische Gesichtspunkte

QD-Technologie in der Beleuchtungstechnik erfordert keine seltenen Erden, steigert den Wirkungsgrad und verbessert die Farbqualität von LEDs signifikant. Der Verzicht auf kritische Materialien und die Energieeinsparung haben sowohl Nachhaltigkeits- als auch Wirtschaftlichkeitsaspekte.

Bild 16 zeigt diverse Lichtquellen im Koordinatensystem Farbqualität/Energieeffizienz. Glühlampenlicht hat eine gute Farbqualität, jedoch einen schlechten Wirkungsgrad. Kaltweiße LEDs sind hoch-effizient, emittieren aber Licht von mäßiger Farbqualität. Das gilt natürlich besonders für blaue LEDs, deren Farbqualität für allgemeine Beleuchtungszwecke völlig unzureichend ist. Mithilfe einer abgestimmten Mischung von Quantenpunkten entsteht aus dem kaltweißen oder dem blauen „Pumplicht“ nunmehr weißes Licht hoher Farbqualität. Im Ergebnis hat man ein Lichtprodukt, das sowohl stark in der Energieausbeute als auch hochwertiges, tageslichtähnliches Licht produziert.

Fazit

Quantenpunktmaterialien erlauben die Erzeugung von hochwertigem Licht zur Hintergrundbeleuchtung von LC-Displays der nächsten Generation mit höherer Auflösung, Helligkeit und Farbtreue. QD-LCDs sind erheblich kostengünstiger und einfacher herzustellen als die aktiv leuchtenden OLED-Displays. Möglicherweise gehört einer Aktivmatrix aus selbstleuchtenden RGB-Quantenpunkten im EL-Modus die Zukunft. **ELV**

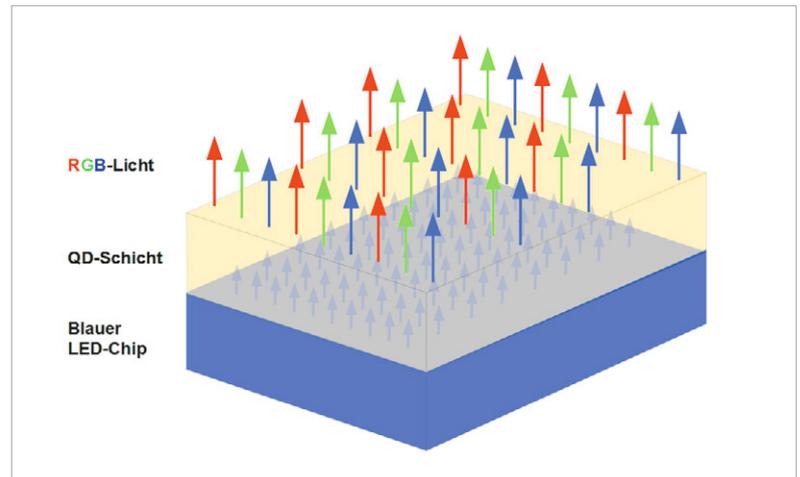


Bild 14: Prinzipieller Aufbau einer QD-LED

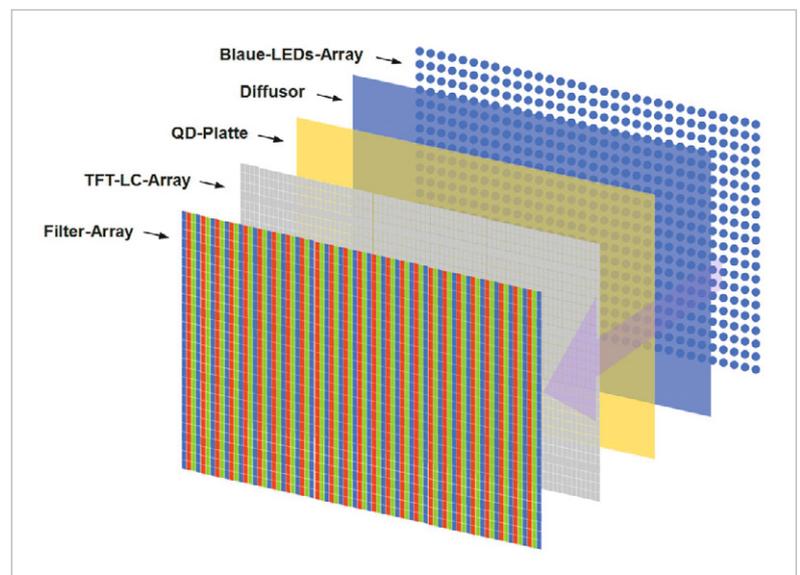


Bild 15: Schichtenaufbau eines Direct-LED-QD-LC-Displays

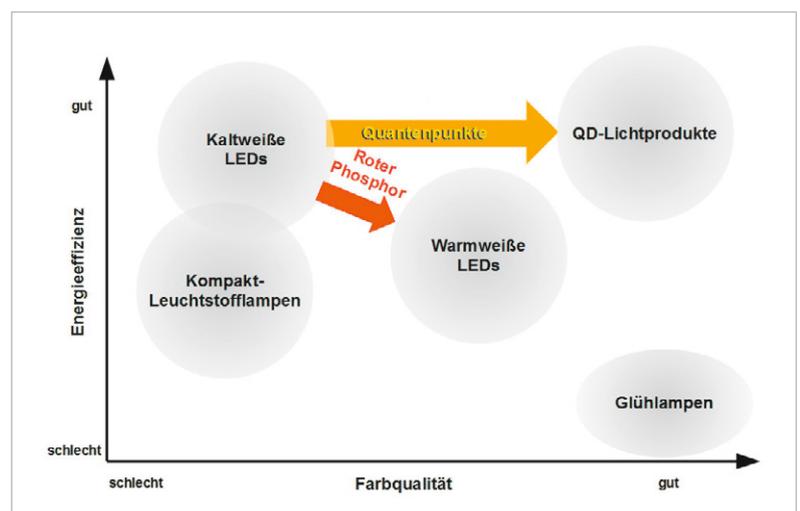


Bild 16: QD-Lichtprodukte verbinden hohe Energieeffizienz mit guter Farbqualität.