

Back to the roots

Die gute alte Farbbildröhre kann sich trotz unbestreitbarer Vorteile bei den Abbildungseigenschaften dennoch nicht mehr im Massenmarkt behaupten. Die Flachbildschirme haben gerade bei großen Bildschirmformaten in puncto Gewicht und Volumen neue Maßstäbe gesetzt, die niemand mehr missen möchte. Mit der SED-Technik (surface-conduction electron-emitter display) ist es nun gelungen, die Vorzüge des Flachdisplays mit denen der Bildröhre zu vereinen. Dazu wird jedes Subpixel mit den Farben Rot, Grün und Blau von einer mikroskopisch kleinen „Minibildröhre“ mit kalter Elektronenquelle und einem farbigen Leuchtstoff-„Bildschirm“ erzeugt. Diese Meisterwerke der Miniaturisierung liefern mit 6,22 Millionen-Subpixel-Zellen brillante Bilder in der höchsten HDTV-Auflösung von 1080 Zeilen und 1920 Spalten.

Die SED-Technik

Herkömmliche Farbbildröhren beruhen auf der parallelen Ablenkung dreier durch Glühkathoden emittierte Elektronenstrahlen auf regelmäßig hinter einer Glasscheibe angeordnete fluoreszierende Farbtriple (Grundfarben Rot, Grün und Blau). Die Vorteile einer solchen selbstleuchtenden Anordnung liegen in hoher Bildhelligkeit, klaren und kräftigen Farben, weiten Be-

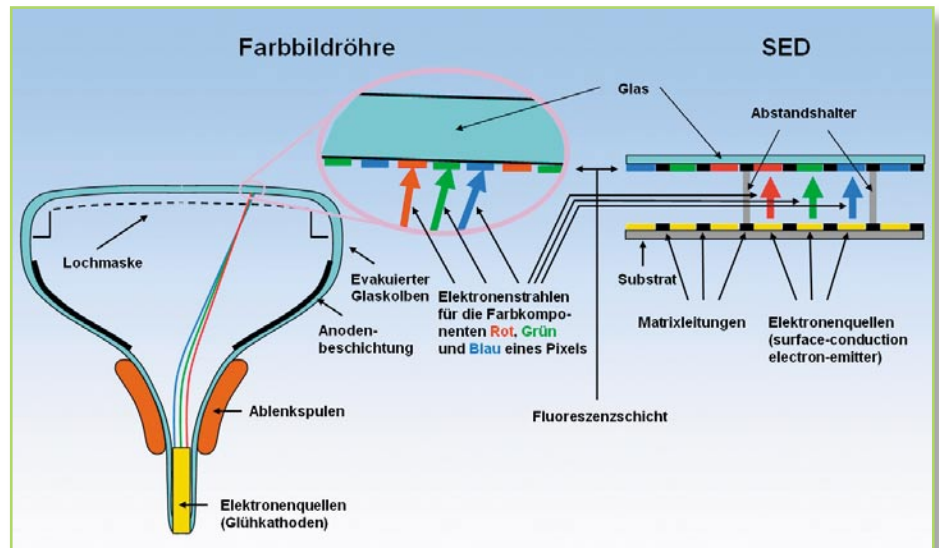
trachtungswinkeln und kurzen Reaktionszeiten. Nachteilig ist die prinzipbedingte voluminöse und schwere Konstruktion der Bildröhre, die große und flache Displays unmöglich macht. Das SED (surface-conduction electron-emitter display) verwendet ebenfalls das Grundprinzip „Elektron trifft auf fluoreszierendes Material“. Dazu wird ein Glassubstrat mit drei „kalten“ Elektronenquellen pro Bildpixel eingesetzt, deren Emissionen auf ein zweites, die fluoreszierenden Substanzen tragendes

Glassubstrat beschleunigt werden. Die Substrate werden in geringem Abstand zueinander angeordnet und der Zwischenraum evakuiert. So lassen sich sehr flache Displays mit allen Vorteilen der Farbbildröhre schaffen – und dies mit niedrigem Energieverbrauch.

Struktureller Vergleich zwischen Katodenstrahlröhre und SED

Die äußere Form der Katodenstrahl-

Bild 1:
Strukturvergleich zwischen CRT und SED: Während bei einer Bildröhre alle Bildpunkte (Pixel) vom gleichen Elektronenstrahltripel gezeichnet werden, ist jedem Subpixel des SEDs eine eigene Elektronenquelle zugeordnet. Die Miniaturisierung und Ausnutzung quantenmechanischer Effekte machen dies möglich.



röhre (CRT: Cathode Ray Tube) ist durch einen luftleeren Glaskolben gegeben (Abbildung 1 links). Er ist zum Betrachter hin als rechteckige Fläche ausgebildet, die auf der Innenseite mit regelmäßig angeordneten Leuchtsubstanzen beschichtet ist (Bildschirm). Beim Auftreffen eines Elektronenstrahls wird Licht in einer der Grundfarben Rot, Grün oder Blau mit einer gewissen Intensität ausgesendet. Die Beiträge dreier benachbarter „Subpixel“ überlagern sich im Auge zu einem Pixel (picture element) resultierender Farbe und Helligkeit. Wird der Strahl schnell genug zeilenweise über den Schirm abgelenkt, ergibt sich ein bewegtes Farbbild.

Die Elektronenstrahlen entstehen aus dem Zusammenwirken einer Elektronenquelle (Katode) und einer absaugenden Elektrode mit hoher Beschleunigungsspannung (Anode). Als Quelle dient eine glühende Drahtwendel, aus der die Elektronen wegen ihrer hohen kinetischen Energie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ins Vakuum austreten. Die Anode saugt die ausgetretenen Elektronen ab und beschleunigt sie in Richtung Bildschirm.

Auf dem Wege dorthin werden sie durch eine Hilfsanode fokussiert und beim Passieren des magnetischen Felds der Ablenkspulen (je eine für vertikal und horizontal) in der Richtung beeinflusst. Bei entsprechender Gestaltung der Spannungen an den Ablenkspulen überstreicht der Elektronenstrahl die Leuchtsubstanzen auf der Innenseite des Bildschirms in schneller Folge zeilenförmig. Eine Schattenmaske sorgt für die punktgenaue Landung jedes Strahls auf „seinem“ Subpixel.

Weil der Ablenkwinkel nicht beliebig groß sein kann (90° bis 110°), wächst die Tiefe einer Bildröhre mit zunehmender Bildschirmdiagonale.

Große Bilder bedürfen daher wahrer Röhrenungetüme – sowohl im Volumen als auch im Gewicht.

Spezialisierung: drei Minibildröhren pro Pixel

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten dezentrale, zu einem SED (surface-conduction electron-emitter display) angeordnete Elektronenquellen – eine für jedes Subpixel (Abbildung 1 rechts). Damit lassen sich die Ablenk- und Fokussiereinrichtungen einsparen, da jeder Strahl ja nur auf das ihm zugeordnete Fluoreszenzelement beschleunigt werden muss. Aus der detaillierten Darstellung einer SED-Zelle (Abbildung 2) wird deutlich, dass die Elektronen nicht wie bei der CRT einer glühenden Katode entstammen, sondern durch den quantenmechanischen Tunneleffekt zwischen zwei extrem angenäherten Elektroden aus Palladiumoxid (PdO) freigesetzt werden (Elektronenemitter).

Kalte Elektronenemission im Nanoschlitz

Im extrem schmalen Spalt, dem Nano-

spalt oder Nanoschlitz (nano gap, nano slit) von wenigen Nanometern Dicke ($\text{nm}: 10^{-9} \text{ m}$), entstehen bereits durch kleine Spannungen V_f (field voltage) – beim SED typ. $V_f = 10 \text{ V}$ – sehr große Feldstärken. Angenommen die Spannung an einem 3 nm breiten Spalt beträgt 10 V , dann ergibt sich $E = U/d = 10 \text{ V} / 3 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 3,3 \cdot 10^9 \text{ V/m} = 33$ Millionen Volt pro cm. Unter dem Einfluss dieses extrem starken elektrischen Feldes können Elektronen aus der einen Elektrode den Potentialwall zwischen den Elektroden überwinden. Sie „tunneln“ gewissermaßen durch ihn hindurch. Mit den Mitteln der klassischen Physik ist dies nicht zu erklären. Dazu bedarf es der Quantenphysik (Physik der kleinsten Teilchen, Heisenberg'sche Unschärferelation, Schrödinger-Gleichung). Von Richard Feynman, einem der größten Physiker des 20. Jahrhunderts (1918–1988), ist der Satz überliefert: „In der Quantenwelt ist es möglich, sich durch eine energetisch verbotene Zone schnell hindurchzumogeln.“

Die Theorie des Tunneleffekts wurde 1928 von Gamov, Condon und Henry

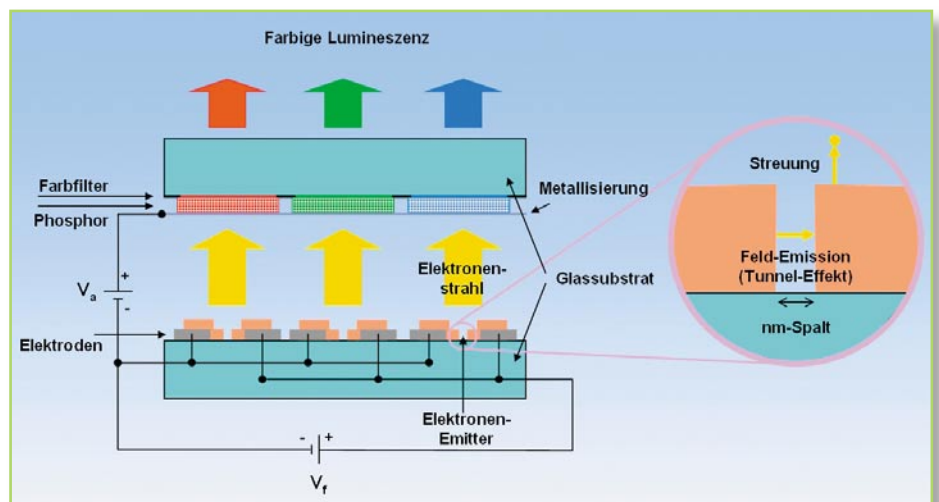


Bild 2: Kernstück der SED-Technologie ist eine „kalte“ Elektronenquelle, die auf dem quantenmechanischen Tunneleffekt am engen Spalt beruht.

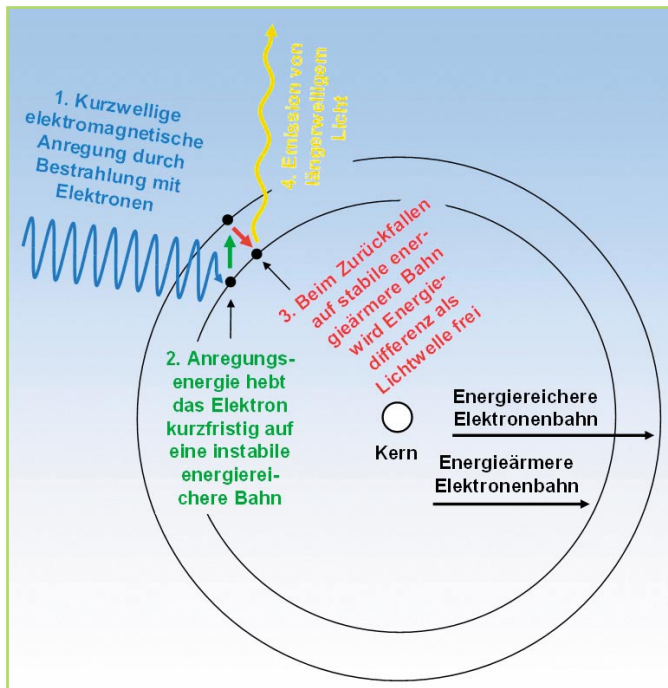


Bild 3: Fluoreszenz beruht darauf, dass Elektronen auf stabilen Bahnen um den Kern mit niedrigerer Energie durch eine äußere Anregung kurzfristig auf instabile Bahnen mit höherer Energie „gehoben“ werden. Beim Zurückfallen auf die alte Bahn wird die Energiedifferenz als Lichtblitz frei.

aufgestellt, um einen bis dahin bestehenden Widerspruch beim Zerfall von Atomkernen zu α -Teilchen zu erklären. Weil nur an der Oberfläche (surface) der Elektroden die hohe Feldstärke besteht, wird entsprechend auch nur ein Teil der dort vorhandenen Elektronen (surface-conduction) dank Tunneleffekt zur durch den Nanospalt getrennten positiv vorgespannten Nachbarelektrode emittiert. Die Menge der getunnelten Elektronen ist von der Höhe der Feldspannung V_f abhängig. Auf der Nachbarelektrode angekommen, schlagen sie dort Sekundärelektronen heraus (scattering), die unter dem Einfluss einer Beschleunigungsspannung V_a (acceleration voltage) von etwa 10.000 V in Richtung Phosphor beschleunigt werden. Beim Auftreffen lösen sie Lichtblitze aus. Die Beschleunigungselektrode besteht aus einer hauchdünnen Metallschicht unter den Phosphoren. Sie lässt einerseits die

Licht erzeugenden Elektronen durch und verhindert andererseits die Rückstrahlung zur Emissionselektrode. Damit steht das ganze erzeugte Licht dem Betrachter zur Verfügung.

Der Lumineszenzmechanismus

Die Elektronenstrahlung, die auf dem Phosphor auftrifft, hebt ein Elektron von einer energieärmeren inneren stabilen Bahn kurzfristig auf eine energiereichere äußere instabile Bahn (Abbildung 3). Dort verweilt das Elektron nur äußerst kurz und fällt wieder auf seine stabile Bahn zurück. Dabei wird wieder Energie frei, diesmal in Form von Lichtstrahlung.

Tunneleffekt im Detail

Mit den Gesetzen der klassischen Physik ist es nicht zu erklären, dass Teilchen mit

einer Bewegungsenergie, die kleiner ist als eine gegebene Potentialhürde, diese überwinden können. Wenn in Abbildung 4 die rote Kugel links in das Tal rollt, so besagt der Energieerhaltungssatz, dass sie nach dem Durchqueren des Tiefpunkts die ansteigende Flanke des Tals nicht über die Höhe ihrer Ausgangslage hinauffrollen kann. Die Kugel als quantenmechanisches Objekt, im Folgenden als Elektron angenommen, vermag jedoch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Potentialbarriere dennoch zu überwinden, obwohl ihr die Energie dazu fehlt. Sie gelangt dann gewissermaßen durch einen Tunnel auf die andere Seite des Potentialwalls. Erklären kann man das nur, wenn man akzeptiert, dass die Materie des Elektrons sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften besitzt.

Die Dualität der Beschreibung der Elektronenmaterie wurde 1924 von Louis Victor de Broglie (1892–1987) in seiner Dissertation „Recherches sur la théorie des Quanta“ postuliert und zum allgemeingültigen Prinzip der Physik erweitert (Materiewellen). De Broglie leitete aus dem bereits bekannten und akzeptierten Dualismus des Lichts (Welle und Photon) die Hypothese ab, auch ein Elektron müsse einer Welle entsprechen. Den experimentellen Beweis dafür fanden Davisson und Germer 1927.

1926 entwickelte Erwin Schrödinger (1887–1961) im Rahmen der Quantentheorie seine berühmte Schrödingergleichung, eine partielle Differentialgleichung vom Typus einer Wellengleichung. Die darin enthaltene Wellenfunktion $\Psi(x,t)$ beschreibt den Zustand eines Teilchens (hier ein Elektron) in einem Potentialfeld $V(x,t)$ als Funktion von Ort und Zeit. Innerhalb eines Potentialwalls klingt die Wellenfunktion exponentiell ab, wodurch eine Wahrscheinlichkeit $P(x,t) > 0$ für die Existenz des Elektrons im Gebiet hinter dem Potentialwall verbleibt.

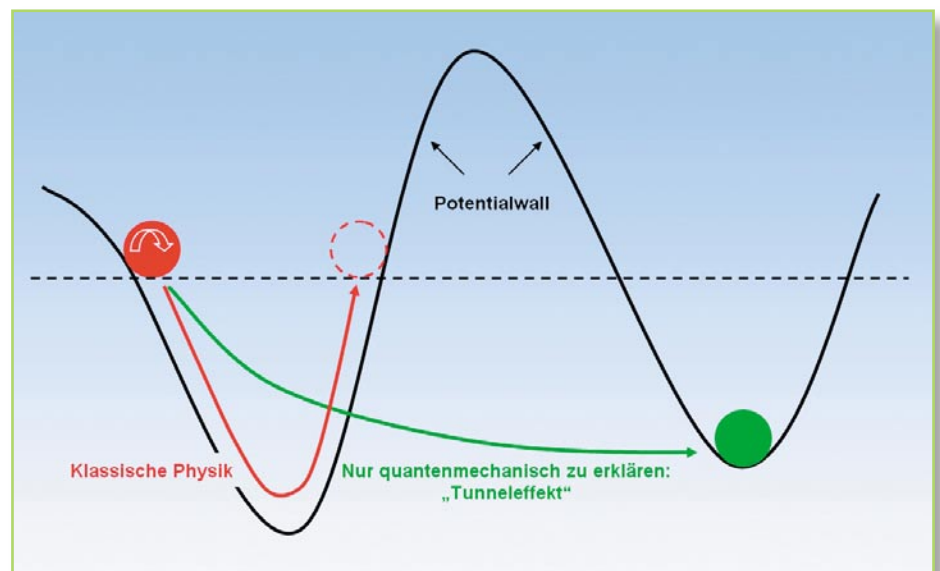


Bild 4: Zur Erläuterung des Tunneleffekts: Mit den Gesetzen der klassischen Physik ist es nicht zu erklären, wie ein Teilchen eine Potentialbarriere überwinden kann, wenn es nicht über die dafür erforderliche Energie verfügt. Für die Quantenmechanik gelten andere Gesetze, die auf Wahrscheinlichkeiten anstelle von Gewissheiten beruhen.

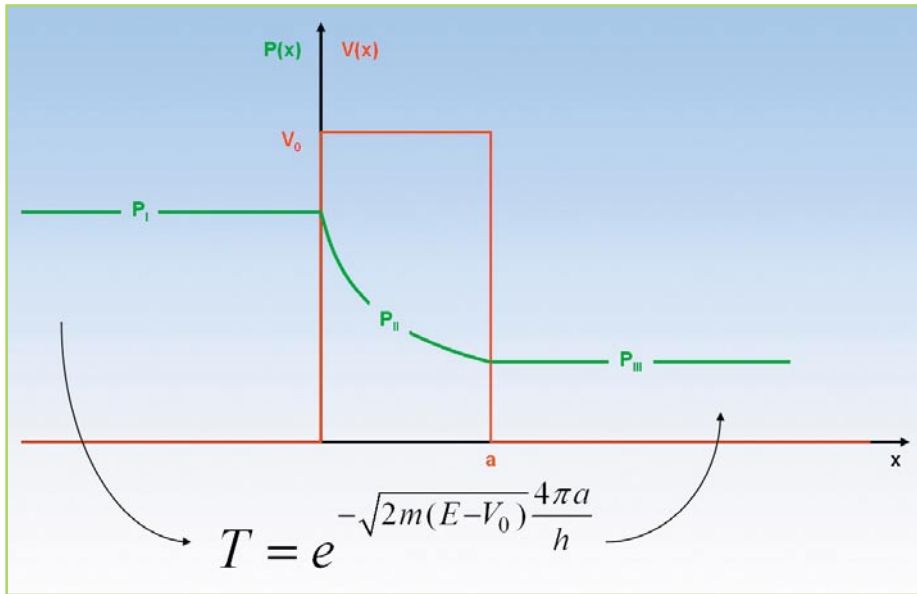


Bild 5: Weil die Wellenfunktion im Potentialwall exponentiell abnimmt, ist an seinem Ausgang immer noch eine geschwächte Welle vorhanden. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Elektrons als Betragsquadrat der Wellenfunktion ist also nicht gleich Null. Und dies, obwohl nach klassischer Betrachtung die Elektronenenergie gar nicht ausreichen kann, um den Potentialwall zu überwinden. Erst die mathematische Beschreibung der Elektronenmaterie als Welle liefert die Begründung für dieses „Tunnelphänomen“.

Jahr warten auf ihre Auslastung. Beide Unternehmen wollen ihre spezifischen Stärken bei Elektronenemission und Mikrostrukturherstellung (Canon) sowie in der Bildröhrentechnologie und der Massenproduktion von Flüssigkristalldisplays und komplexen integrierten Schaltungen (Toshiba) bündeln und mit der SED-Technologie Flüssigkristall- und Plasmadisplays Paroli bieten. Grundvoraussetzung für den Erfolg ist ein wettbewerbsfähiger Preis. Die technischen Daten sprechen jedenfalls für das SED.

SED-Vorteile konkret

Nachdem wir uns mit den Prinzipien des SED beschäftigt haben, wollen wir seine Eigenschaften näher beleuchten.

- **Energieverbrauch:**
Der Wirkungsgrad eines SEDs liegt bei 5 W Leistungsverbrauch pro Lumen Lichtstrom. Damit ist der Stromverbrauch vergleichbar großer LCD-Paneele doppelt und auf Plasma basierender sogar fünfmal so hoch. Angesichts eines sich deutlich abzeichnenden weltweiten Trends zu großen Flachbildschirmen bei gleichzeitiger Absicht den Energieeinsatz dafür zu verringern, ist dies ein nicht zu unterschätzender Vorteil.
- **Uneingeschränkter Betrachtungswinkel:**
Weil das SED selbstleuchtend ist, gibt es hier weder in vertikaler noch in horizontaler Richtung die von anderen Flachdisplay-Techniken bekannte Blickwinkelabhängigkeit von Helligkeit, Kontrast und Farbe (Abbildung 7). Der Kampf vor dem Fernseher um den „besten Sehplatz“ gehört damit der Vergangenheit an.
- **Extreme Schwarzauflösung:**
Das SED zeigt auch in dunklen Bildbereichen eine Nuancierung, die andere Flachbildschirm-Techniken nicht erreichen. Das Kontrastverhältnis soll bis zu 100.000:1 betragen können (Abbildung 8). Der Grund dafür liegt

Im Ergebnis beschreibt das Betragsquadrat der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit, mit der sich ein Teilchen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort im Potential befindet (Abbildung 5). Der Transmissionsgrad

$$T = e^{-\sqrt{2m(E-V_0)} \frac{4\pi a}{h}}$$

gibt an, wie gut die Barriere „durchtunnelt“ werden kann. Je breiter und höher sie ist, umso kleiner ist die Tunnelwahrscheinlichkeit. So lassen sich Elektronen aus einer kalten Elektrode über eine extrem angenäherte zweite Elektrode „absaugen“.

Wem all dies nicht recht einleuchten will, der sei getröstet: Schon der Prüfungsausschuss an der Pariser Sorbonne-Universität, der über de Broglies kühne Dissertation urteilen sollte, akzeptierte die Arbeit erst, nachdem sich Einstein von ihr beeindruckt zeigte. Auch die führenden Physiker der Zeit diskutierten sich die Köpfe heiß.

Der belgische Großindustrielle Ernest Solvay hatte 1911 eine erste nach ihm

benannte Konferenz in Brüssel organisiert, wo die Wissenschaftselite das Thema „Die Theorie der Strahlung und der Quanten“ beleuchtete und der bis dahin ein Schattendasein fristenden Quantentheorie zum Durchbruch verhalf. Auf der 5. Solvay-Konferenz 1927 zum Thema „Elektronen und Photonen“ besaßen 17 der 29 Teilnehmer den Nobelpreis oder erhielten ihn später (Abbildung 6) (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Solvay-Konferenz>).

Know-how-Bündelung für den Erfolg

Die SED-Technologie wird seit 1987 durch Canon entwickelt. 2004 erklärten Toshiba und Canon ihre Absicht, durch ihr Gemeinschaftsunternehmen SED Inc. die Massenproduktion von SEDs Ende 2005 aufnehmen zu wollen. Dieses Ziel wurde verfehlt, aber auf der IFA 2006 rechtfertigten eindrucksvolle Demonstrationen vor dem Fachpublikum die Vermutung, dass der Vermarktungsbeginn der SED-Technologie unmittelbar bevorsteht. Fertigungskapazitäten für über 100.000 SED-Panels pro

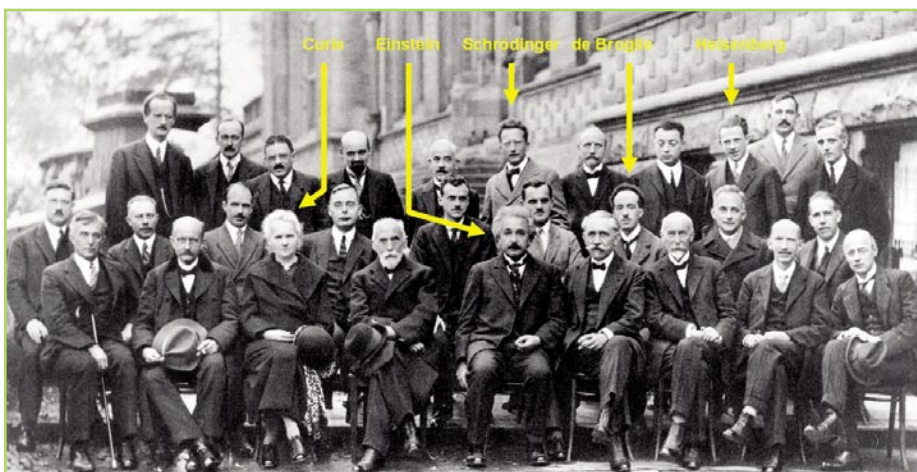


Bild 6: Unter den 29 Teilnehmern an der Solvay-Konferenz 1927 in Brüssel waren 17 Nobelpreisträger. Quelle: Wikipedia.



Bild 7: Ein großer Vorteil von SEDs ist die völlige Unabhängigkeit der Bildqualität vom Betrachtungswinkel. Nur mit den perspektivischen Verzerrungen muss man leben.

darin, dass ein schwarzer Bildpunkt auch wirklich schwarz ist, weil die zugehörigen Subpixel keinerlei Licht aussenden.

- Konstante Bildschärfe:

Im Vergleich zu konventionellen Bildröhren, wo die Schärfe zu den Bildrändern wegen einer Defokussierung des Elektronenstrahls abnimmt, weist das SED (wie auch LCD und PD) in allen Bildbereichen die gleiche hohe Bildschärfe auf (Abbildung 9).

- Kurze Reaktionszeiten:

Selbst schnellste Bewegungen werden von SEDs durch die kurzen Reaktionszeiten <1 Millisekunde ohne Nachzieheffekte und ohne merkbare Verzögerungen dargestellt.

- Praktisch unbegrenzte Bildschirmgröße:

Die Größe der Bildschirme unterliegt im Prinzip keinen Begrenzungen. Bei gegebener Auflösung vergrößern sich auch die Strukturen der Zellen, was die Anforderungen an die Fertigungspräzision verringert. Die SED-Technologie

zielt zunächst auf Bildschirmdiagonalen >50" (>127 cm).

- Volle HDTV-Auflösung von 1920 x 1080p

(1080 Zeilen, 1920 Spalten, progressiver Bildaufbau) mit hohen Bildwiederholraten ist heute schon möglich.

Die Nachteile des SEDs sind gering, sollten aber nicht unerwähnt bleiben. Wie bei anderen Flachbildschirmen kann das SED (im Gegensatz zur Bildröhre) nur eine

einzig Bildschirmauflösung unterstützen und Pixelfehler aufweisen. Prinzipbedingt gibt das SED wie die Bildröhre aber eine geringe Röntgenstrahlung über den Bildschirm ab.

Zusammenfassung

Das SED vereint nahezu alle Vorteile der Farbbildröhre mit denen des LCDs. Für die volle HDTV-Auflösung sind 1920

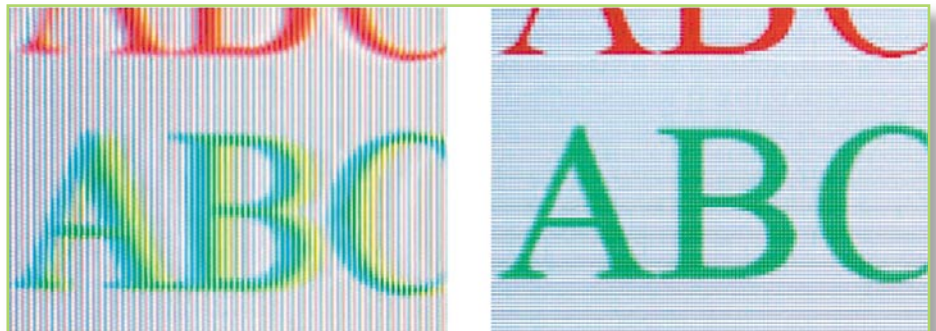


Bild 9: In allen Displaybereichen weist ein SED optimale Schärfe auf. Konvergenzprobleme, wie sie die Bildröhre in den Randbereichen kennt, gibt es prinzipbedingt nicht. Quelle: Toshiba.



Bild 8: Ein gutes Display zeichnet sich durch lückenlose Wiedergabe aller Farben in allen Intensitäten aus. In dunklen Bildpartien, wo LCD und PD nicht mehr fein nuancieren, liegt die besondere Stärke des SED.

x 1080 x 3 = 6.220.800 Elektronenquellen (eine pro Subpixel) auf einem Glassubstrat von beispielsweise 50"-Diagonale zu integrieren. Dies entspricht etwa 8 Elektronenquellen pro Quadratmillimeter! Nur wenn es gelingt, den hochkomplexen Fertigungsprozess kostengünstig und ausschussarm zu beherrschen, sind attraktive Marktpreise möglich. In diesem Fall kann dem SED wegen seiner überzeugenden Abbildungseigenschaften eine glänzende Zukunftsprognose gestellt werden. Ab Ende 2007 sollte sich abzeichnen, ob das SED das Zeug hat, seine LCD-, Plasma- und OLED-Wettbewerber auszusteichen. **ELV**

Literatur:

1. http://www.canon.com/technology/canon_tech/explanation/sed.html
2. <http://www3.toshiba.co.jp/sed/eng/about/index.htm>
3. [http://de.wikipedia.org/wiki/Tunneleffekt_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Tunneleffekt_(Physik))