

# Flache Fernsehbildschirme: sehen, messen und bewerten

Im Beitrag wird die messtechnische Erfassung der für flache Fernsehbildschirme relevanten elektro-optischen Abhängigkeiten nach EBU Tech 3325 unter Berücksichtigungen der spezifischen Eigenarten unterschiedlicher Anzeigetechniken (LCD, PDP, OLED) beschrieben. Des Weiteren werden Messinstrumente, Verfahren und Auswertungen vorgestellt, um bei vertretbarem Aufwand eine sichere messtechnische Basis für die objektive Bewertung der Leistungsmerkmale von Flachbildschirmen zu schaffen.

This contribution describes measurement techniques for assessment of the performance of broadcast video monitors in the context of EBU Tech 3325 with consideration of the specific characteristics of LCD, PDP and OLED screen technologies. It also discusses the use of measuring tools, procedures and evaluations, to form a trustworthy basis for the objective judgement and comparison of flat screen monitor quality.

## Einleitung

Die naturgetreue Wiedergabe von bewegten Bildern auf Bildschirmen (*high fidelity display*) erfordert die Übereinstimmung des elektro-optischen Verhaltens des Bildschirms mit den von den Normen vorgegebenen Abhängigkeiten. (Recommendation ITU-R BT.709-5 usw.). Die Angaben in den Datenblättern der Hersteller sind im Privatkundenbereich aussageschwach und unvollständig, und selbst bei Geräten für den professionellen Einsatz sind die technischen Daten oft lückenhaft, kryptisch und nicht reproduzierbar.

Im Beitrag wird die messtechnische Erfassung der für flache Fernsehbildschirme relevanten elektro-optischen Abhängigkeiten nach EBU Tech 3325 unter Berücksichtigungen der spezifischen Eigenarten unterschiedlicher Anzeigetechniken (LCD, PDP, OLED) beschrieben. Zudem werden Messinstrumente, Verfahren und Auswertungen vorgestellt, um bei vertretbarem Aufwand eine sichere messtechnische Basis für die objektive Bewertung der Leistungsmerkmale von Flachbildschirmen zu schaffen [1,2].

## Bildschirmtechniken und ihre Eigenheiten Flüssigkristallbildschirme

Bildschirme auf der Grundlage von Flüssigkristallen (*LCD screens*) sind eine Kombination von zwei wesentlichen Bauteilen: Einer hellen, über die Fläche sehr gleichförmigen Beleuchtungseinheit (*backlight unit*, BLU) und dem davor angebrachten Flüssigkristall-Modulator mit hoher räumlicher Auflösung (zum Beispiel  $1920 \times 1080$  Bildelemente),

der über Farbfilter aus dem weißen Licht der BLU die Primärfarben R, G, und B erzeugt (durch Absorption, mit hohen Verlusten!) und dessen steuerbare Transmission die Darstellung von Bildern ermöglicht.

Nachdem die Fertigungstechnik für Flüssigkristallbildschirme gegen Mitte der 1990er Jahre einen Stand erreicht hatte, der die Produktion großer Stückzahlen mit hinreichender Ausbeute ermöglichte und somit die Preise für Monitore mit 13 inch bis 15 inch Bildschirmdiagonale erschwinglich wurden, begann in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts die Ablösung von Bildschirmarbeitsplätzen mit CRT-Monitoren im Büro durch LCD-Monitore, was zu erheblich verbesserten Arbeitsbedingungen führte [3].

Die ergonomischen Vorteile von LCD-Monitoren im Vergleich mit CRT-Monitoren bei der Büroarbeit sind [4]:

- erhöhter Kontrast auch in heller Umgebung (durch gute Entspiegelung),
- eine wirksame Vermeidung von Fusionskonflikten durch mattierte Bildschirmoberfläche und
- das Fehlen von Flimmern (durch Erhaltungsdarstellung).

In der Folgezeit wurde die Fertigungstechnik immer weiter optimiert, die Bildschirmdiagonalen wurden größer und die Verfügbarkeit von Bildschirmen hatte im letzten Quartal des Jahres 2007 einen Stand erreicht, dass weltweit erstmals mehr LCD-Fernseher als CRT-basierte Geräte ausgeliefert wurden. Heute steht dem Käufer eine große Auswahl an großformatigen LCD-Fernsehbildschirmen mit echter HD-Pixelmatrix ( $1920 \times 1080$  Bildelemente) zur Auswahl.

Eine Flüssigkristallzelle ist im Wesentlichen ein Paar gekreuzt angeordneter (linear)

Polarisatoren, zwischen denen die spannungsgesteuerte Flüssigkristallschicht die Polarisationsseigenschaften des durchfallenden Lichts so beeinflusst, dass die Transmission der Gesamtanordnung mit der Spannung zwischen hell (hohe Transmission) und dunkel (geringe Transmission) gesteuert werden kann.

Die natürlichen Beschränkungen von Flüssigkristallbildschirmen, nämlich die Änderung von Leuchtdichte, Kontrast und Farbe mit der Schichtung und die schlechte Wiedergabe von bewegten Bildinhalten wurden in den letzten Jahren von der Industrie intensiv bearbeitet und die damit verbundenen offensichtlichen Nachteile erheblich verringert. Neben der Optimierung der flüssigkristallinen Materialien (zum Beispiel verringerte Viskosität zur Verbesserung des Schaltverhaltens) haben Veränderungen an der Hinterleuchtungseinheit eine wesentlich verbesserte Darstellung von bewegten Bildern bewirkt. Anstelle einer zeitlich konstanten und über die Fläche gleichmäßigen Hinterleuchtung eröffnet die Umstellung der Lichtquellen von Leuchtstoffröhren (CCFL) auf Leuchtdioden (LED) die Möglichkeit, die Hinterleuchtung zeitlich und örtlich zu steuern. Auch durch Erhöhung der Bildwiederholrate wurde versucht, die Bewegtbilddarstellung bei LCD-Bildschirmen zu verbessern. Die trotz elektronischer Beschleunigung (*overdriving*) immer noch zu langen Schaltzeiten (im Bereich von  $\sim 5$  ms), innerhalb deren die Bildinformation einschwingen muss, bilden hier die Grenze des momentan Möglichen [5].

Der Schwarz-Zustand des Bildschirms, der bei konstanter Hinterleuchtung bei etwa  $0,5 \text{ cd/m}^2$  liegt, kann bei dunklen Bildinhalten durch Absenken der Intensität der Hinterleuchtung als Ganzes entsprechend verbessert werden (*global backlight dimming*).

Dr.-Ing. **Michael E.**

**Becker** ist Gründer der Display-Messtechnik & Systeme GmbH & Co. KG und hat einen Lehrauftrag für aktive und passive elektro-optische Anzeigen am Karlsruher Institut für Technologie – KIT (vormals Uni Karlsruhe). Er arbeitet aktiv in der Standardisierung (IEC TC110 und ISO/TC159/SC4/WG2 – NI-ERG/UA2), lieferte Beiträge zum „VESA Flat Panel Display Measurement“-Standard (FPDM2) und ist Europäischer Obmann des ICDM (SID International Committee of Display Measurement).



Diese Einstellung der Hinterleuchtung – je nach mittlerem Grauwert des Bildinhalts – setzt entsprechende Berechnungen voraus. Zur Annäherung der Impulswiedergabe von CRT-Bildschirmen kann die Hinterleuchtungseinheit nach Einschreiben und Stabilisieren der Bildinformation kurzzeitig mit hoher Intensität eingeschaltet werden (*backlight flashing*), was aber oft zur Wahrnehmung von Flimmern führt.

Wenn (zum Beispiel bei seitenbeleuchteten Hinterleuchtungen) die Intensität von horizontalen Flächenelementen in Übereinstimmung mit dem Einschreiben der Information in den Bildschirm (zeilensequentiell, spaltensimultan) synchron gesteuert und nur für einen Bruchteil der Bildperiode eingeschaltet wird, so kann die Darstellung von bewegten Bildinhalten erheblich verbessert werden (*scanning backlight*).

In einem weiteren Schritt kann die Hinterleuchtung als zweidimensionale Rasteranordnung von wenigen, aber schnell schaltenden Lichtquellen mit hoher Dynamik ausgelegt werden, was insbesondere mit Leuchtdioden (LED) möglich ist (*local backlight dimming, 2D dimming*). Durch diese Kombination von zwei visuellen Anzeigen (Überlagerung von Hinterleuchtung und LCD) mit unterschiedlichen, sich ergänzenden Eigenschaften, kann das zur Anzeige notwendige Licht an den erforderlichen Stellen im Bild und zu der Zeitpunkt erzeugt werden, zu denen es benötigt wird. Auf diese Weise können sehr hohe Kontraste bei gleichzeitig reduzierter Leistungsaufnahme realisiert werden (Tabelle I).

### IPS-Effekt

Die starken Änderungen von Leuchtdichte, Kontrast und Farbe mit der Betrachtungsrichtung, wie sie von den ersten LCD-Bildschirmen bekannt ist, wurden auch durch eine Reihe von Verbesserungen in der Flüssigkristallzelle selbst reduziert [7]. Ein wesentlicher Schritt in diese Richtung war die Einführung des IPS-Effekts (*in-plane switching*), dessen grundlegende Idee bereits 1974 von Soref veröffentlicht, dann am IAF in Freiburg weiterentwickelt und von Hitachi zur Fertigungsreife gebracht wurde. Beim IPS-Effekt wird ein elektrisches Feld durch interdigitale Elektroden erzeugt, die nur auf einem Glassubstrat angebracht sind. Obwohl die ersten IPS-LCDs einen hohen Kontrast (bei kleiner Transmission und hohen Ansteuerspannungen) zeigten, waren die dynamischen Kenngrößen stark verbesserungsbedürftig. So wurde

**Tabelle I.** Reduktion der Leistungsaufnahme von LCD-Bildschirmen durch Steuerung der Hinterleuchtung in Abhängigkeit vom Bildinhalt nach [6]

Art der BLU-Steuerung	Leistungseinsparung	Bemerkung
global dimming (0 D)	bis 15 %	ein steuerbares Segment
scanning backlight (1 D)	bis 27 %	acht steuerbare Segmente
local dimming (2 D)	bis 50 %	100 steuerbare Segmente
	bis 75 %	1000 steuerbare Segmente
0,5 % Clipping	zusätzlich 10 %	Abschneiden von Spitzen

1998 von Hitachi die Hoffnung geäußert, dass man die Schaltzeiten (Summe aus *Ein* und *Aus*) bald auf 25 ms verringern könne. Bald wurden viele unterschiedliche Varianten dieses Effekts untersucht und in die Fertigung von Bildschirmen überführt. Die hohen Kontraste, die sich mit IPS-Zellen erzielen lassen, beruhen auf dem dunklen Schwarz-Zustand und dessen Stabilität gegenüber Sehrichtungsänderungen. Neue Elektrodenkonfigurationen (zum Beispiel S-IPS, IPS-Pro) erhöhen die Transmission im Hellzustand, sodass die Leistungsaufnahme der Hinterleuchtungseinheit reduziert werden konnte. Wird die Elektrodenstruktur so verändert, dass das elektrische Feld innerhalb des Flüssigkristalls stark inhomogen wird, so erhält man einen als FFS bezeichneten Effekt (*fringe-field switching*), der mit planarer und homeotroper („vertikaler“) Ausrichtung des Flüssigkristalls realisiert werden kann. IPS-Zellen sind im spannungsfreien Zustand dunkel (*normally black*). Bei der Herstellung der Flüssigkristall-Zellen (*LCD panel*) vom IPS-Typ werden die Substratplatten in eine Richtung „gebüßtet“, um den Flüssigkristall einheitlich auszurichten. Dieser Prozessschritt bei der Fertigung ist schlecht reproduzierbar und kann zu Fertigungsausfällen führen. Eine Möglichkeit, diesen unzuverlässigen Prozessschritt zu vermeiden, bieten solche Effekte, bei denen der Flüssigkristall im feldfreien Zustand senkrecht zu den Substratplatten der Anzeige angeordnet ist (*vertical alignment, VA*).

### VA-Effekte

Die Grundlagen zu allen Flüssigkristalleffekten mit „vertikaler“ Ausrichtung (das heißt, senkrecht zum Substrat der Anzeige) wurden durch die Arbeiten von Schiekel und Fahrenschon (1971) sowie Soref und Rafuse (1972) gebildet, von J. F. Clerc et al. zu Beginn der 1990er Jahre weiterentwickelt und von Fujitsu gegen Ende der 1990er Jahre erstmals als Produkt realisiert [7]. Wegen der zunächst ausgeprägten Abhängigkeit der Transmission von der Betrachtungsrichtung müssen bei VA-

Effekten zwei Maßnahmen implementiert werden: Zuerst werden doppelbrechende Folien (*retarder sheets*) in Kombination mit den Polarisatoren eingesetzt und zusätzlich werden unterschiedliche mikroskopische Domänen (*multi-domain*) mit unterschiedlicher Ausrichtung innerhalb der Teilbildelemente (*sub-pixel*) der Flüssigkristallanzeige erzeugt, die das Auge des Betrachters nicht auflösen kann und deren Sehrichtungsabhängigkeiten sich gegenseitig kompensieren. Die Erzeugung dieser Domänen erfolgte bei den ersten VA-LCD-Bildschirmen von Fujitsu durch kleine Strukturen innerhalb des Flüssigkristalls (Pyramiden, Wälle). Dieser LCD-Effekt wurde als MVA (*multi-domain vertical alignment*) bezeichnet. VA-LCDs wurden von anderen Herstellern unter anderen Bezeichnungen entwickelt und vermarktet; bei Sharp verwendet man die Bezeichnung CPA (*continuous pinwheel alignment*), Samsung nennt seine VA-Effekte PVA (*patterned vertical alignment*). Die Erzeugung von Domänen unterschiedlicher Ausrichtung erfolgt in allen modernen Bildschirmen über inhomogene elektrische Felder (zum Beispiel durch Schlitze in den Elektroden, fischgrätenähnliche Elektrodenstrukturen), da das Verfahren von Fujitsu (Pyramiden, Wälle) zu Problemen bei der Fertigung führte.

In den letzten Jahren hat sich die LCD-Industrie weiter um die Verbesserung des Transmissionsgrades (*aperture*) der Anzeige bemüht, um die Absenkung der Leuchtdichte des Schwarz-Zustands (bis  $<0,05 \text{ cd/m}^2$ , also höhere Kontraste) und um die Verringerung der Schaltzeiten. Hier hat insbesondere die Ausrichtung des Flüssigkristalls durch spezielle UV-strahlungsempfindliche Polymerschichten (*polymer stabilized alignment, PSA*) zu weiter verbesserten Ergebnissen geführt (Schaltzeit  $\sim 5 \text{ ms}$ ). Außerdem ist auch bei allen PSA-Effekten kein Reiben oder Büsten der Substrate notwendig (*no-rubbing technology*), was zu höheren Ausbeuten bei der Fertigung führt. Zur Stabilisierung der elektro-optischen Kennlinie (*electro-optical transfer function, EOTF*) bezüglich der Seh-

richtung werden in LCD-Fernsehbildschirmen oft zwei Teilbildelemente mit unterschiedlicher elektrischer Ansteuerung durch jeweils zwei Dünnfilmtransistoren (*thin film transistor, TFT*) eingesetzt.

Die verschiedenen hier vorgestellten Maßnahmen zur Verbesserung der statischen und dynamischen Aspekte der Bilddarstellung auf LCD-Bildschirmen beruhen auf erheblichen Berechnungen und Bearbeitungen des Bildsignals im Datenstrom. Viele der für den Betrachter offensichtlichen visuellen Eigenschaften von LCD-Fernsehbildschirmen werden hauptsächlich durch die Qualität der Implementierung dieser Berechnungen bestimmt. Außerdem werden durch numerische Manipulation des Bildsignals, wie zum Beispiel für Spannungsvorhalten (*overdriving*), Nachführen der Hinterleuchtung (*backlight dimming*), EOTF-Anpassung usw. auch wieder Artefakte eingeführt (Bild 1).

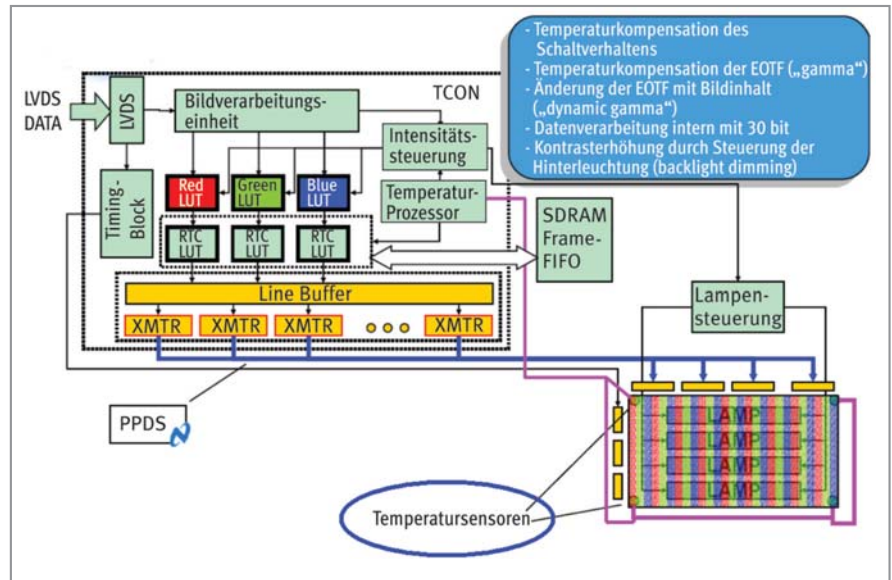


Bild 1. Beispiel für eine Implementierung der Vielzahl von Rechenschritten, die in einem LCD-Fernseher auf die Eingangssignale angewandt werden (nach Unterlagen von National Semiconductor)

**Berechnungen im LCD-Fernseherät**

- Skalierung der Pixelmatrix (*scaling*), Umsetzung von Halbbild- auf Vollbildwiedergabe (*de-interlacing*),
- Steuerung des Schaltens (*overdriving*) in Abhängigkeit von der Temperatur der Anzeige,
- Korrektur der elektro-optischen Kennlinie in Abhängigkeit von der Temperatur der Anzeige,
- Anpassung der elektro-optischen Kennlinie an den Bildinhalt (dunkel/hell),
- Kontrasterhöhung durch Nachführen der Hinterleuchtung (backlight dimming),
- ...

**Plasma-Bildschirme**

Ein Plasma-Bildschirm (*plasma-display panel, PDP*) ist im Wesentlichen eine regelmäßige Anordnung individuell gesteuerter kleiner Leuchtstoffröhren mit den Primärfarben Rot, Grün und Blau (Bild 2). Die Emission von sichtbarem Licht erfolgt durch Phosphore, die durch UV-Strahlung angeregt werden (*Photo-Lumineszenz*). Die UV-Strahlung selbst wird durch eine dielektrisch behinderte Glimmentladung in einer verdünnten Edelgas Mischung (Ne + Xe bei ~0,66 bar) erzeugt, die ein ausgeprägt nichtlineares elektrisches Verhalten zeigt und entweder vollständig ein- oder aus-geschaltet ist. Die Erzeugung von Graustufen erfolgt über eine Pulsweitenmodulation mit Unterteilung der Bildperioden in acht Teilperioden unterschiedlicher Dauer. Diese Art der Farbmi-

schung führt bei der Darstellung von bewegten Bildinhalten oft zu wahrnehmbaren Artefakten (falsche Konturen).

In modernen Wechselspannungs-Plasma-Bildschirmen mit drei Elektroden wird die UV-Strahlung erzeugende Oberflächenentladung durch Spannungspulse mit Amplituden im Bereich von 200 V bei Anstiegszeiten von etwa 100 ns gesteuert. Die maximale darstellbare Leuchtdichte ist abhängig von der darzustellenden Fläche (Leistungsbegrenzung) und kann bis zu 1000 cd/m<sup>2</sup> betragen. Da die Emission der Neon-Entladung auch im Dunkelzustand der Anzeige nie ganz zu Null wird (etwa 0,1 cd/m<sup>2</sup>), werden Kontraste bis zu 10.000 erreicht. Das führt in einer dunklen Umgebung (das heißt, ohne Reflexionen von Umgebungslicht) zu einer sehr lebhaften, kontrastreichen Bildwiedergabe mit hoher Farbsättigung. Wegen des hohen Reflexionsgrads der Anzeigeroberfläche, der durch dicht liegende leitfähige Elektroden und deren Metallisierung verursacht wird, nimmt der Kontrast der Bilddarstellung und die Sättigung der Farben in heller Umgebung stark ab.

PDP-Bildschirme wurden bisher hauptsächlich in großen Formaten hergestellt (32 inch bis 63 inch Bilddiagonale, 2008: 150 inch von Panasonic), da die Realisierung von Teilbildelementen mit Abmessungen <1 mm wegen parasitärer Entladungen (Überschläge) problematisch war.

Im Jahr 2007 war die Herstellung von Plasma-Bildschirmen durch hohe Material-

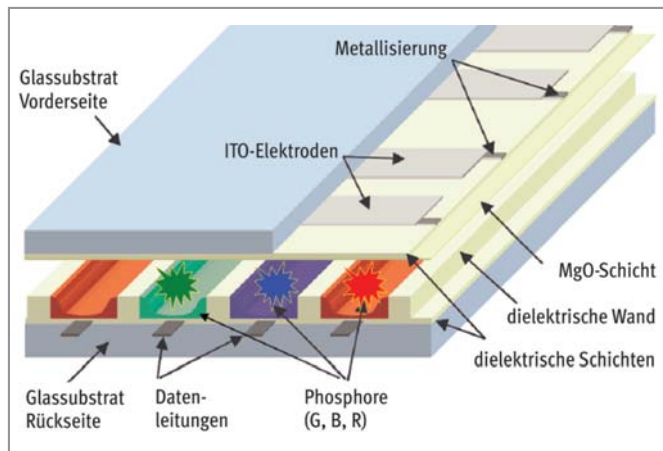
kosten bei relativ geringen Ausbeuten und langsamen Prozessen gekennzeichnet. Die anspruchsvolle Elektronik (hohe Spannungen bei Anstiegszeiten von 100 ns), die unterschiedliche Alterung der Phosphore (Blau ist am empfindlichsten) und das nicht reversible Einbrennen von Bildinformation stellen weitere Nachteile dieser Anzeigentechnik dar. Eine konzertierte Aktion im Rahmen des japanischen APDC (*Advanced PDP Development Center*) nahm sich 2007 dieser Probleme an und strebte die Erhöhung der Lichtausbeute auf 3 lm/W in noch flacheren Bildschirmen an. Im Jahr 2008 stellt Panasonic seine Produktlinie Kuro (schwarz) vor, die eine erheblich reduzierte Leuchtdichte im Schwarz-Zustand (0,01 cd/m<sup>2</sup> statt bisher 0,1 cd/m<sup>2</sup>) bei reduzierter Bautiefe des Bildschirms bietet.

Nachdem Pioneer im Jahr 2008 das gesamte geistige Eigentum im Bereich PDP an Matsushita (Panasonic) übergeben hat und im Folgejahr die Fertigung einstellte, melden die Marktforschungsinstitute einen glänzenden Geschäftsverlauf für Plasma-Bildschirme im Jahr 2010, in dem der Umsatz hauptsächlich durch die beschränkte Anzahl der verfügbaren Geräte begrenzt wurde.

**OLED-Bildschirme**

Ein Nachweis von Elektrolumineszenz in organischen Materialien erfolgte erstmals im Jahr 1952 durch Bernanose in Nancy. In der Folgezeit nahmen sich die Forscher erst wieder in

**Bild 2.** Aufbau einer AC-Plasma-Anzeige mit drei Elektroden (nach [8])



den späten 1980er Jahren dieses Themas an, und die Forscher bei Kodak (Tang und Van Slyke) konnten 1987 Elektrolumineszenz in organischen Materialien mit erhöhter Lichtausbeute realisieren. Ein Autoradio von Pioneer war zehn Jahre später das erste kommerziell erhältliche Produkt mit einer OLED-Anzeige. Es dauerte dann zwanzig Jahre, bis Sony gegen Ende 2007 den Verkauf des ersten OLED-Fernsehgeräts ankündigte. Das XEL-1 genannte Gerät hat einen Bildschirm mit einer Diagonale von 11 inch bei nur  $960 \times 540$  Bildelementen. Reißerisch wurde der Kontrast des Bildschirms mit „1 Million“ angegeben.

Die Lichterzeugung (Elektrolumineszenz) in organischen Materialien (man unterscheidet molekulare und polymere Materialien) erfolgt durch Injektion von Ladungsträgern in dünne organische Schichten, die Rekombination von Elektronen und Defekt-Elektronen (Löcher) zu Excitonen (angeregte Elektron-Loch-Paare) und die von diesen induzierte Lichtemission (durch Fluoreszenz oder Phosphoreszenz).

Die Erwartungen an organische Leuchtdioden war groß, man versprach sich einfache Herstellungsprozesse (zum Beispiel: Drucken) mit kostengünstigen Materialien, hohe Lichtausbeuten ohne Wärmeverluste (bis  $100 \text{ lm/W}$ ), gesättigte Farben und schnelles Schalten. Auch der Bereich der möglichen Anwendungen schien allumfassend: Von der großflächigen Lichtquelle bis zum Bildschirm mit hoher Auflösung als Rollenware sollten flexible Substrate zu leichten, robusten Anzeigen verhelfen, deren Größenbeschränkung durch drucktechnische Fertigung aufgehoben sein sollte.

Nach der anfänglichen Euphorie und der unreflektierten Hysterie der Medien, die über Jahre die unmittelbar bevorstehende Verdrängung aller anderen Bildarstellungstechni-

ken ankündigten, waren und sind die Probleme im Bereich organischer LED und insbesondere bei OLED-Bildschirmen alles andere als gelöst.

So sind die OLED-Materialien sehr empfindlich bezüglich Wasser und Sauerstoff, was eine wirksame Verkapselung erforderlich macht, die Materialien für unterschiedliche Farben altern (recht) unterschiedlich, und die Auskopplung des in einer dünnen Schicht erzeugten Lichts aus der Schichtstruktur ist nicht einfach.

Auch bereitet die elektrische Ansteuerung und Adressierung der Bildelemente einige Probleme, denn im Gegensatz zu LCDs, bei denen Dünnfilmtransistoren aus amorphem Silizium die Selektion der Bildelemente und die gesteuerte Aufladung des Bildelement-Kondensators ermöglichen, muss bei der OLED ein Strom fließen, wenn Licht emittiert werden soll. Eine erhöhte Stromdichte über längere Zeiträume erfordert die Verwendung von Halbleitermaterialien mit höherer Ladungsträgerdichte (zum Beispiel polykristallines Silizium) und deren Fertigung auf großformatigen Substraten.

Als Sony im Jahr 2007 den weltweit ersten Fernseher mit OLED-Bildschirm vorstellte, war die offizielle Aussage eines Sony-Managers, dass sowohl die im XEL-1 verwendete Strukturierung der Farbstoffe (durch Bedampfen des Substrats im Vakuum durch Metallmaske) wie auch die Herstellung der zur Adressierung verwendete TFT-Matrix aus polykristallinem Silizium nicht für größere Substrate (das heißt oberhalb von  $280 \text{ mm}$  Bildschirmdiagonale) einsetzbar sind [9].

Da der Markt für Fernsehbildschirme gegenwärtig  $40 \%$  des Umsatzes aller Anzeigen ausmacht (das heißt, etwa  $40 \text{ Mrd. USD}$  pro Jahr), ist es verständlich, dass auch für die OLED-Hersteller dieser Marktanteil starke Anreize ausübt. Obwohl OLED-Bildschirme

keine Merkmale aufweisen, die sie sofort besser stellen als andere Anzeigetechniken (zum Beispiel PDP, LCD), vermitteln OLED-Bildschirme in dunkler Umgebung einen lebendigen Bildeindruck mit hohen Kontrasten und gesättigten Farben, die mit der Sehrichtung keine ausgeprägten Änderungen erfahren.

Die Erwartungen insbesondere bezüglich der Darstellung bewegter Bildinhalte wurde sehr hoch geschraubt, da die Emission von OLED-Anzeigen sehr schnell zu schalten ist ( $<10 \mu\text{s}$ ) und damit die Vermutung nahe liegt, dass Artefakte (zum Beispiel Kantenverschleifen, *motion blur*) wie man sie von LCDs kennt, hier nicht auftreten. Dabei wird vergessen, dass diese Darstellungsfehler zunächst durch die Erhaltungsdarstellung bedingt sind, das heißt, durch die Tatsache, dass der Bildinhalt während einer Bildperiode im Wesentlichen konstant erhalten und angezeigt wird, während das Auge des Betrachters das bewegte Ziel kontinuierlich verfolgt (*smooth pursuit eye-tracking*). Alleine die Impulsdarstellung – wie beim CRT-Bildschirm – vermeidet diesen Fehler durch die Kürze der Darbietung ( $\sim 1 \text{ ms}$ ). Sollte die Impulsdarstellung auf OLED-Bildschirmen implementiert werden, so müsste der gesamte erforderliche Lichtstrom innerhalb eines Bruchteils der Bildperiode generiert werden (zum Beispiel  $1 \text{ ms}$  von  $16,7 \text{ ms}$ ), sodass die Emission innerhalb dieser Zeitdauer etwa 17-mal höher sein muss als im Fall der Erhaltung der Emission über die gesamte Bildperiode. Das bedeutet aber höhere Ströme und damit eine erhöhte Belastung der Dünnfilmtransistoren sowie der organischen Emitter – somit beschleunigte Alterung und reduzierte Lebensdauer.

### Forderungen an qualitativ hochwertige Bildschirme

Die Forderungen an Bildschirme zur naturgetreuen Wiedergabe von (zeitlich veränderlichem) Bildmaterial lassen sich im wesentlichen durch die in **Tabelle II** dargestellten Abhängigkeiten beschreiben.

Zur messtechnischen Erfassung und zur Beschreibung der Leistungsdaten eines Fernsehbildschirms werden die in der **Tabelle III** dargestellten Kenngrößen gemessen, berechnet und ausgewertet.

### Messaufbau, Komponenten

Der Aufbau zur Durchführung reproduzierbarer Messungen (**Bild 3**) an Bildschirmen umfasst drei wesentliche Komponenten:

- das *Messobjekt mit Signalquelle* (kri-

Tabelle II.

elektro-optische Übertragungsfunktion	Leuchtdichte ( $L$ ), Farbart ( $X, Y, Z$ ) als Funktion von Eingangssignal	
	Eingangssignal $S_i$ zwischen 16 und 235 (bei 8-bit-Systemen)	
	Eingangssignal $S_i$ zwischen 64 und 940 (bei 10-bit-Systemen)	
	normiertes Eingangssignal $s_i = \frac{S_i - S_{i\min}}{S_{i\max} - S_{i\min}}$	
Sollfunktion exakt	$L(s_i) = \left( \frac{s_i + 0,099}{1,099} \right)^{1/0,45}$ für $0,081 \leq s_i \leq 1,0$	
	$L(s_i) = \frac{s_i}{4,5}$ für $0 \leq s_i < 0,081$	
angenähert	$L(s_i) \cong s_i^{1,958 \cdot 1,2} = s_i^{2,35}$ mit rendering-intent	
	x (CIE 1931)	y (CIE 1931)
Farbort Primärfarben	R	0,640
	G	0,300
	B	0,150
Farbort Weiß, Grau ( $s_{iR} = s_{iG} = s_{iB}$ )	W	0,3127

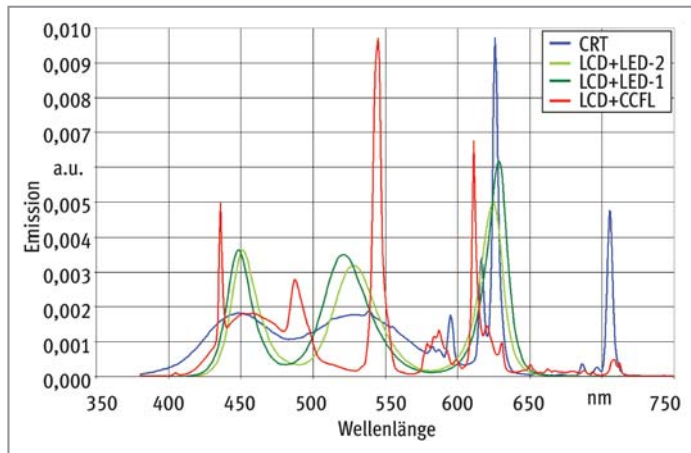


Bild 3. Spektren von Weiß für einen CRT-Bildschirm und drei verschiedene LCD-Bildschirme mit CCFL- und LED-Hinterleuchtung

- tisch: die Reproduzierbarkeit der Einstellungen des Messobjekts, thermische Stabilisierung),
- die *Messgeräte und deren Positionierung* (Ausrichtung, Fremdlicht, Kalibration, Messunsicherheiten, Zeitsteuerung der Messung, Polarisationsempfindlichkeit, usw.) und
- der *Messtechniker* (kritisch: Dokumentation, Wiederholpräzision, Vergleichspräzision, Ermittlung von Messunsicherheiten usw.).

**Messobjekt**

Das Messobjekt muss mit geeigneten Eingangssignalen angesteuert (Vorsicht, Einbrennen bei PDP) über eine hinreichend lange Periode aufwärmen, bis die Verlustleistung (bei emissiven Anzeigen abhängig vom Eingangssignal) bei der gegebenen Umgebungstemperatur zu einer stabilen Temperatur des Messobjekts geführt hat. Bei kritischen Messungen kann auch die Oberflächentemperatur des Bildschirms (zusätzlich zur Temperatur des Messlabors) zur besseren Reproduzierbarkeit der Messung erfasst und dokumentiert werden. Weitere Bedingungen werden in EBU Tech 3325 angegeben.

**Messlabor**

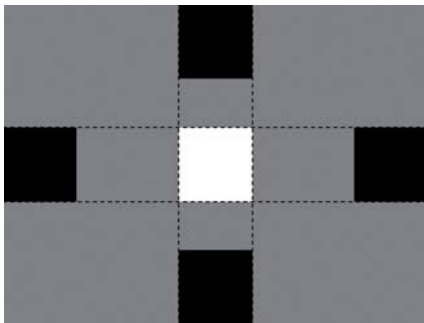
Im Messlabor muss sichergestellt sein, dass kein Fremdlicht (zum Beispiel von Kontrolllampen der Gerätschaften) auf die Messfläche auf dem Messobjekt fällt, insbesondere bei der Messung von sehr geringen Leuchtdichten (bei CRT oder OLED-Bildschirm).

Tabelle III.

Variable	Messgröße	Bemerkung
Eingangssignal Prüfmuster	Leuchtdichte/Farbart elektro-optische Kennlinie (EOTF)	Übereinstimmung der gemessenen Leuchtdichte/Farbart mit der EOTF-Sollfunktion (Exponent $\gamma$ ); ⇒ Leuchtdichtedynamik, maximaler Kontrast usw. ⇒ Farbumfang (color gamut) ⇒ Farbart (ähnlichste Farbtemperatur) von Weiß
Position auf Bildschirm	Spektrum, L, X, Y, Z als Funktion der Messposition ( $x, y$ )	Gleichförmigkeit von Leuchtdichte und Farbart über die Bildschirmfläche. Nebensprechen mit geeigneten Prüfmustern.
Sehrichtung	Leuchtdichte, Kontrast, Farbart	Setzt entsprechende Positioniereinrichtung (Goniometer) voraus. Standard-Messrichtung: senkrecht zur Bildschirmoberfläche
Zeit	Schaltzeiten, Kantenverschleifung, Einschwingen (Stabilisierung), Nachbilder usw.	Kurzzeiteffekte ( $<$ Bildwiederholperiode) Langzeiteffekte ( $>$ Bildwiederholperiode)
Umgebungsbeleuchtung (je nach Anwendungsfall)	Leuchtdichte/Farbart bei spezifizierter Beleuchtung in Spiegelrichtung	Kontrastreduktion, Farbentsättigung bei Auflicht; zur Charakterisierung von Entspiegelungsmaßnahmen.

## Messgeräte

Wegen der stark modulierten spektralen Verteilung der Emission (Transmission) von Fernsehbildschirmen, empfiehlt sich die Verwendung eines Spektroradiometers mit hoher Wellenlänge selektivität (Halbwertsbreite des spektralen Bandpass  $\leq 5$  nm) und genau einstellbarer Zeitsteuerung der Datenerfassung. Letzteres ist erforderlich, da die Emission des Bildschirms zeitlich sehr stark moduliert sein kann (zum Beispiel Graustufensteuerung bei PDP durch Pulsweitenmodulation, gesteuerte Hinterleuchtungen bei LCD-Bildschirmen). Auch sollte die Streulichtunterdrückung des Messgeräts sehr hoch sein, damit die Umgebung des Messfelds einen möglichst geringen verfälschenden Einfluss auf die Messgröße hat. Im Zweifelsfall oder wenn das Prüfmuster es erfordert (um Beispiel Leuchtdichte eines vollständig weißen Bildschirms) muss Störlicht durch geeignete Blenden (Kegelstumpfblenden oder ähnlich) oder Prüfmuster vermieden werden. Für Messungen an LCD-Bildschirmen darf das



**Bild 4a.** Horizontales und vertikales Übersprechen: Die schwarzen Blöcke beeinflussen die Leuchtdichte des zentralen hellen Feldes.

Messgerät bezüglich der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichts nur wenig empfindlich sein. Wegen der stetig abnehmenden Leuchtdichte des Dunkelzustands (insbesondere bei OLED-Bildschirmen oder bei LCD-Bildschirmen mit nachgeführter Hinterleuchtung) sollte die Messunsicherheit auch unterhalb von  $0,01 \text{ cd/m}^2$  hinreichend gering bleiben. Es sollte auch immer sichergestellt sein, dass das Gerät während des Einsatzes rückführbar gültig kalibriert ist.

## Prüfmuster

Bei der Auswahl der Prüfmuster (*test pattern*) ist zu beachten, dass bei emissiven Bildschirmen (CRT, PDP usw.) aufgrund einer eingebauten Leistungsbegrenzung die maximal erreichbare Leuchtdichte abhängig ist von der Fläche, über die diese Leuchtdichte angezeigt wird. Die maximal mögliche Leuchtdichte wird nur bei sehr kleinen ausgeleuchteten Flächen (zum Beispiel 4 % der gesamten Bildschirmfläche, 4 % *window*) messtechnisch zu erfassen sein. Bei LCD-Bildschirmen,



**Bild 4b.** Das zentrale helle Feld wird nicht über horizontales und vertikales Übersprechen der schwarzen Blöcke beeinflusst.

**Bild 4a und b.** Je nach Eigenart des Bildschirms bzw. je nach eingesetzten Verfahren zum Beispiel zur Erhöhung des Kontrastes (backlight dimming) müssen spezielle Prüfmuster verwendet werden, um diese Mechanismen außer Kraft zu setzen und somit die Eigenschaften des LCD-Bildschirms ohne Verbesserung messen zu können.



**Bild 5.** Prüfmuster mit Feldern maximaler Leuchtdichte, die verhindern, dass die Leuchtdichte der Hinterleuchtung abgesenkt wird (backlight dimming). Die Größe dieser Felder kann auf wenige Bildelemente beschränkt sein.

die das von der Hinterleuchtung emittierte Licht modulieren, tritt diese Abhängigkeit nicht auf. Hier ist aber darauf zu achten, dass durch elektrisches Übersprechen (*cross-talk*) in der Matrix der Dünnschichttransistoren die Leuchtdichte eines (zum Beispiel zentralen) Prüffelds durch den Ansteuerzustand der Umgebung beeinflusst werden kann, insbesondere aber durch Bildobjekte (Blöcke) mit gleicher horizontaler und vertikaler Position (Bild 4 und 5).

## Messungen Elektro-optische Übertragungsfunktion (EOTF)

Die Messung der elektro-optischen Übertragungsfunktion erfolgt mit einer Reihe von Prüfmustern ( $\geq 20$ ), die ein zentriertes Blockmuster mit der gewünschten Ansteuerung (R, G, B) enthalten. Die Größe dieses Blockes sollte insbesondere bei erhöhten Eingangspegeln keinen Einfluss auf die gemessene Leuchtdichte haben. Sollte das doch der Fall sein, kann ein Problem mit Störlicht oder mit Übersprechen vorliegen.

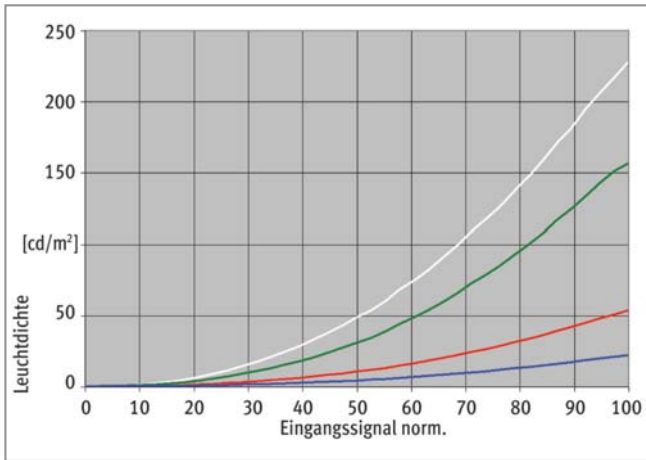
Aus der *Messung der Leuchtdichte* ( $L$ ) als Funktion des Eingangssignals lassen sich folgende Kenngrößen ermitteln:

- Der Leuchtdichtebereich (Dynamik) zwischen Schwarz, Weiß und Super-Weiß,
- der Kontrast (Quotient der Leuchtdichten von Weiß und Schwarz) und
- der Exponent Gamma der Potenzfunktion, die die EOTF beschreibt.

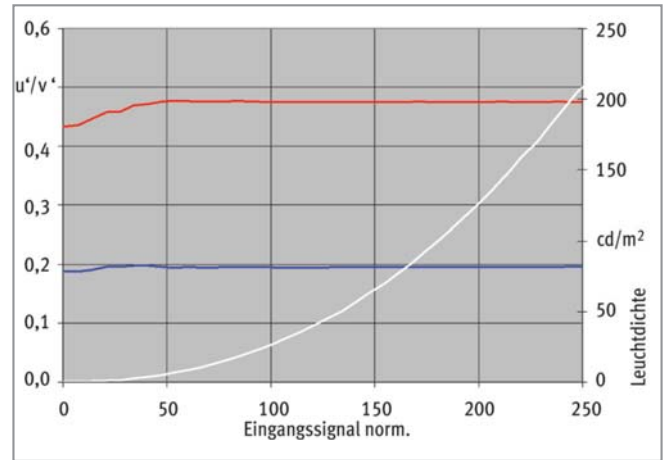
Aus der *Messung der Farbart* ( $X, Y, Z$ ) lassen sich folgende Kenngrößen ermitteln:

- Farbart von Grau zwischen Schwarz und Weiß (sollte konstant und gleich der Farbart von Weiß sein); bei LCD-Bildschirmen ohne entsprechende numerische Korrektur ist die Farbart von Graustufen mit geringer Leuchtdichte blaulastig.
- Farbwiedergabebereich (*color gamut*) durch Farborte der Primärfarben bei maximalem Eingangssignal.
- Konstanz der Farbart der Primärfarben bezüglich der Ansteuerung. Hierbei ist zu beachten, dass jeweils die Farbart von Schwarz zu subtrahieren ist, da ansonsten die Farbe der Primärfarben bei kleinen Leuchtdichten stark entsättigt und achromatisch wird.
- Die Additivität der Farbwerte kann für alle Abtastwerte überprüft werden bzw. die Abweichung vom Idealfall (das heißt,  $L(R+G+B) = L(R) + L(G) + L(B)$ ) kann bestimmt werden.

Die korrekte Additivität der Primärfarbkanäle



**Bild 6a.** Elektro-optische Übertragungsfunktion (EOTF, Leuchtdichte) eines IPS-LCD-Bildschirms für die Primärfarben (R, G, B) und die Graustufen (40 Abtastpunkte)



**Bild 6b.** Elektro-optische Übertragungsfunktion (EOTF, Farbwertanteile  $u'$ ,  $v'$ ) eines IPS-LCD-Bildschirms für die Graustufen (40 Abtastpunkte). Dunkle Zustände werden blaulastig.

kann bei erheblich reduziertem Aufwand im Messlabor alleine über die EOTF der Graustufen überprüft werden. Da die Additivität auch für die Farbwerte X und Z gelten muss, muss die Farbart der Grauzustände über den gesamten Bereich zwischen Schwarz und Weiß konstant bleiben. Die Einhaltung dieser Forderung kann bei LCD-Bildschirmen nur durch numerische Korrektur erreicht werden, da ansonsten (wegen der normalen Dispersion der Brechzahlen des Flüssigkristalls) bei abnehmender Leuchtdichte (Transmission) eine Verschiebung nach Blau auftritt (Bild 6b).

Die Ermittlung des Wertes des Exponenten der Potenzfunktion, die die EOTF beschreibt, Gamma, kann durch numerische Anpassung (*least squares fitting*) oder aus jeweils benachbarten Stützstellen der doppelt logarithmisch aufgetragenen Kennlinie erfolgen (Bild 7a bis 7d). Je nach Verfahren, das zur Ermittlung des Exponenten Gamma angewandt wird, ergeben sich unterschiedliche Resultate [1,10]. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Ergebnissen muss das Verfahren und die verwendeten Randbedingungen angegeben werden. Der Zielwert für Gamma (einschließlich eines Faktors von 1,2 – *rendering intent*) nach EBU Tech 3320 ist  $2,35 \pm 0,15$ .

### Laterale und direktionale Abhängigkeiten

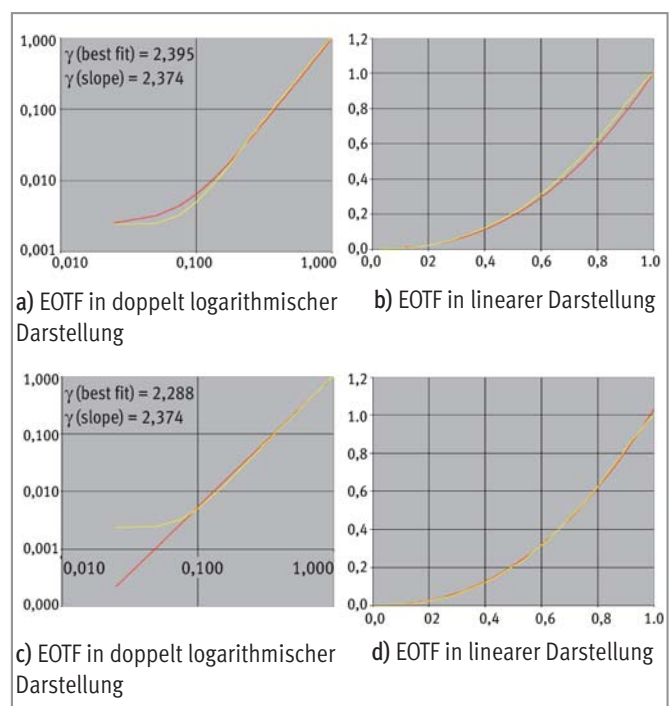
Die Messung von lateralen (in der Ebene des Bildschirms) und direktionalen Abhängigkeiten stellt hohe Ansprüche an die verwendete Positioniereinrichtungen, da entweder die Messobjekte und/oder die Messgeräte mit

guter Wiederholgenauigkeit eingestellt und ausgerichtet werden müssen. Das ist erforderlich, um laterale und direktionale Änderungen klar voneinander zu entkoppeln. So sieht ein Betrachter eines Bildschirms jeden Punkt auf der Bildschirmfläche unter einer anderen Richtung (Sehrichtung, Betrachtungsrichtung) und aus dieser Position sind wahrgenommene Änderungen von Leuchtdichte, Kontrast und Farbe nicht mehr eindeutig auf die Änderung des Ortes oder der Richtung zurückzuführen. Um diese Vermischung zu vermeiden, müssen Sehrichtungsabhängigkeiten jeweils an einem konstanten Ort und örtliche Abhängigkeiten jeweils bei

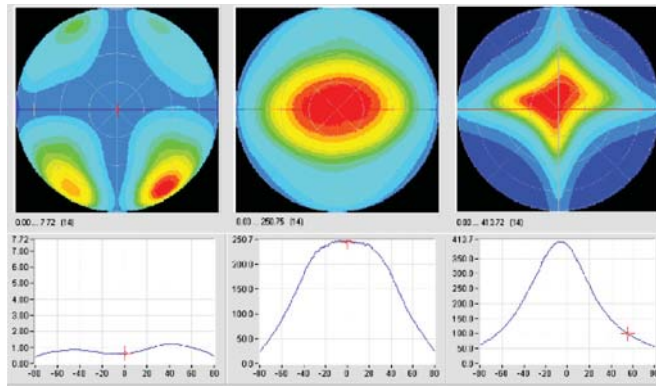
konstanter Sehrichtung (zum Beispiel senkrecht) ermittelt werden. Die Messung von lateralen Änderungen mit Leuchtdichte- oder Farbkameras führt generell zur beschriebenen, nichtauflösbaren Vermischung von örtlichen und direktionalen Variationen und ist deshalb von beschränkter Aussagekraft.

Positioniereinrichtungen zur motorisierten Abtastung von lateralen und direktionalen Änderungen sind im Allgemeinen voluminös, aufwendig und teuer. Eine Alternative zur mechanischen Abtastung bietet die Konoskopie (Bild 8), bei der ein komplexes Linsensystem die Richtungsabhängigkeiten in eine ebene Figur umsetzt [11].

7 a bis d. Bestimmung des Exponenten  $\gamma$  (Gamma) eines LCD-Bildschirms durch numerische Anpassung (*fitting*) und durch die Steigung des linearen Teil der Kurve in doppelt-logarithmischer Darstellung.



**Bild 8.** Leuchtdichte des Schwarz-Zustands (links), des Weiß-Zustands (Mitte) und der daraus berechnete Kontrast (Leuchtdichteverhältnis, im Dunkelraum) eines IPS-LCD-Monitors als Funktion der Betrachtungsrichtung ( $\Theta$ ,  $\varphi$ ) in einem polaren Koordinatensystem (oben) mit entsprechenden horizontalen Profilen. Konoskopische Messung bis zu einem Neigungswinkel von  $80^\circ$ .



Ungleichförmigkeiten von Leuchtdichte und Farbe werden bei LCD-Bildschirmen besonders offensichtlich, seitdem Hinterleuchtungseinheiten mit LEDs realisiert werden. Hier bietet die Verwendung von RGB-LED prinzipiell gute Möglichkeiten zur Einstellung der Farbart von Weiß ohne Verlust von Graustufen, andererseits unterscheiden sich die spektralen Verteilungen der Emission selbst bei

gleichartigen LED noch genug, dass Farbunterschiede über die Bildschirmfläche bemerkbar werden. Außerdem ändert sich diese Spektralverteilung auch mit dem emittierten Lichtstrom, sodass sich die Farbart von Weiß mit der Leuchtdichte ändert falls nicht spezielle Maßnahmen zur numerischen Korrektur dieser Abhängigkeiten implementiert werden.

## Zeitliche Änderungen

Zeitliche Änderungen bei Bildschirmen lassen sich je nach Dauer in zwei Klassen einteilen. Die Dauer von Kurzeffekten liegt bei oder unterhalb der Bildwiederholperiode (zum Beispiel 20 ms), Langzeiteffekte zwischen Sekunden und Stunden. Kurzeffekte werden meist durch die Änderung der Leuchtdichte beschrieben und mit schnellen Photometern gemessen (zum Beispiel OTR-3 [12]).

### Kurzeffekte (~ Bildwiederholperiode)

- Übergänge zwischen verschiedenen Ansteuerzuständen (Schaltzeiten), Bestimmung der Kantenverschleifung aus den zeitlichen Übergängen
- Modulationen durch Bildwiederholung (*frame response*)
- Modulationen durch die Hinterleuchtungseinheit (PWM)



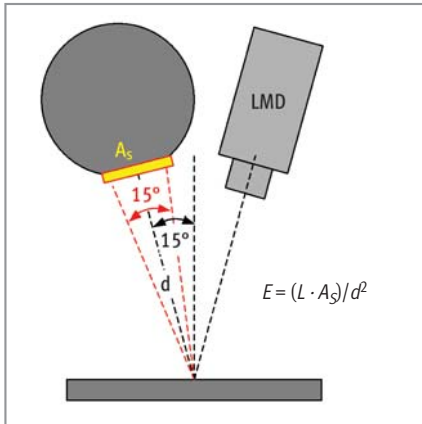


Bild 9. Anordnung zur Messung der Reduktion von Kontrast und Farbsättigung

tungseinrichtung, Messobjekt und Messgerät messtechnisch kritisch [14].

Eine einfache Möglichkeit zur Ermittlung von Kontrastreduktion und Entsättigung der Farben wird in [1,14] angegeben: Eine flächige Lichtquelle (zum Beispiel die Austrittsöffnung einer Ulbrichtkugel) wird mit einem Neigungswinkel von 15° zur Bildschirnormalen angebracht, sodass die Lichtquelle (Austrittsöffnung) einen Winkel von 15° aufspannt (Bild 9). Das Lichtmessgerät (*light measuring device, LMD*) wird in Spiegelrichtung zur Lichtquelle angeordnet. Die Leuchtdichte der Austrittsöffnung „L“ wird so eingestellt, dass die Beleuchtungsstärke „E“ am Messort auf dem Bildschirm den gewünschten Betrag annimmt (zum Beispiel 1000 lx).

1931) wurden anhand von Experimenten von Wright (1928) und Guild (1931) mit 17 Probanden festgelegt. Individuelle Abweichungen von diesen standardisierten Verläufen sind erheblich, was zu individuell recht unterschiedlichen Farbwahrnehmungen führen kann. Die Tatsache, dass ein Betrachter zwei Farben (mit unterschiedlicher spektraler Verteilung) als gleich wahrnimmt, ein zweiter Betrachter diese beiden Farben als unterschiedlich wahrnimmt, wird als Beobachter-Metamerie bezeichnet.

Andererseits können zwei Farbreize, die sich in ihrer spektralen Verteilung sehr stark unterscheiden, als gleich wahrgenommen werden. Diese Form der Metamerie ist die Grundlage der Möglichkeit, auf allen Arten von Bildschirmen trotz unterschiedlicher Darstellungstechniken (CRT, PDP, LCD+CCFL, LCD+LED, OLED usw.) und somit unterschiedlichen Emissionsspektren, die gleichen Farben darstellen zu können (Bild 10a und 10b).

Praktische Konsequenzen der Beobachter-Metamerie hat B. Hill (RWTH Aachen, 2010) kürzlich in einer Versuchsreihe mit neun Probanden demonstriert, bei der die Aufgabe darin bestand, das Weiß eines Bildschirms an das Weiß einer reflektierenden Probe anzupassen. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale individuelle Gleichheit zwischen beiden Proben für die beiden Augen der Versuchspersonen bei unterschiedlichen Farbwertanteilen erreicht wird, wobei die Streubreite der Ergebnisse bei etwa ±0,006 xy-Einheiten (CIE 1931) liegt.

Es ist somit festzuhalten, dass es aufgrund individueller Unterschiede bei der Farbwahrnehmung prinzipiell unmöglich ist, verschiedene Bildschirme (insbesondere solche mit unterschiedlichen Primärfarbspektren) so einzustellen, dass sie für alle

**Langzeiteffekte**  
(>>Bildwiederholperiode)

- Stabilisieren des Bildschirms nach Einschalten oder Prüfmusterwechsel
- Ausbildung bzw. Abbau von Nachbildern (reversible Effekte)

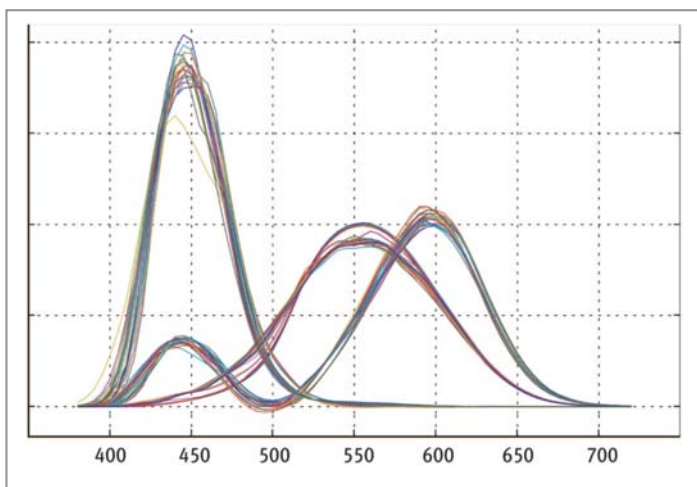
**Einfluss von Umgebungslicht**

Die Leistungsfähigkeit von Bildschirmen in heller Umgebung (zum Beispiel Beleuchtungsstärke >100 lx) wird im Wesentlichen durch die Reflexionseigenschaften des Bildschirms bestimmt. Diese beschreiben den Anteil des meist „weißen“ Umgebungslichts, der vom Bildschirm reflektiert wird und damit den Kontrast und die Sättigung der angezeigten Farben verringert. Die messtechnische Erfassung der Reflexionseigenschaften (Reflexionsgrad und dessen Richtungsverteilung BRDF) im Detail ist apparativ aufwendig und wegen der engen Verkopplung von Beleuch-

**Abgleich von mehreren Bildschirmen**

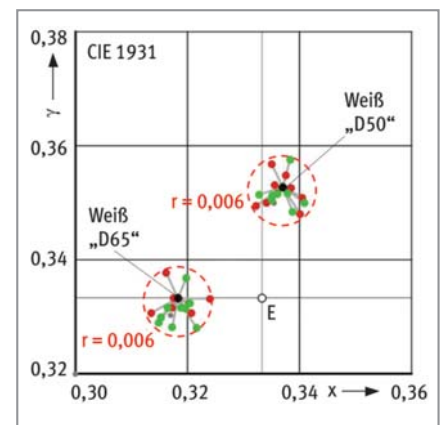
Wenn in einer Arbeitsumgebung mehrere Fernsehbildschirme nebeneinander aufgestellt werden, so möchte man diese farblich untereinander angleichen, sodass alle Bildschirme die gleiche Farbart von Weiß darstellen. Die Praxis hat gezeigt, dass dieser Versuch, insbesondere wenn Bildschirme mit unterschiedlichen Wiedergabetechniken (zum Beispiel CRT, PDP, LCD+CCFL, LCD+LED, OLED) verwendet werden, meist nicht erfolgreich ist, selbst dann, wenn für diesen Abgleich hochwertige Spektroradiometer zur Verwendung kommen.

Ein solcher Abgleich erfolgt über die Einstellung der Farbart von Weiß, sodass alle beteiligten Bildschirme einen Weißzustand mit gleichen Farbwertanteilen x, y (CIE 1931) anzeigen. Die zur Bestimmung der Farbwertanteile verwendeten Spektralwertkurven (des farbmetrischen 2°-Normalbeobachters CIE



← Bild 10a. Individuelle Variationen der Spektralwertkurven für 24 Probanden, 2° und 10° Normbeobachter (B. Hill)

→ Bild 10b. Variationsbereiche bei der visuellen Anpassung von „Weiß“ bei 9 Probanden. Rote und grüne Punkte: Ergebnisse für linke und rechte Augen (B. Hill).



→ Bild 10b. Variationsbereiche bei der visuellen Anpassung von „Weiß“ bei 9 Probanden. Rote und grüne Punkte: Ergebnisse für linke und rechte Augen (B. Hill).

Betrachter gleich aussehen. Es bleibt also nur die Möglichkeit, die Bildschirme messtechnisch auf optimale Gleichheit einzustellen und die individuell wahrgenommenen Unterschiede zu akzeptieren. Außerdem sollten, um visuelle Verwirrungen zu vermeiden, innerhalb eines Raumes möglichst nur Bildschirme mit gleichen Primärfarbspektren aufgestellt werden.

### Schlussbemerkung

Die Möglichkeiten zur naturgetreuen Darstellung von bewegten Bildinhalten haben sich in den letzten Jahren bei LCD- und PDP-Bildschirmen stark verbessert. Viele der eingeführten Maßnahmen zur Verbesserung der Bildwiedergabe beruhen auf einer Veränderung der Eigenschaften des Bildschirms in Abhängigkeit vom aktuellen Bildinhalt. Die hierzu erforderliche, aber im Detail nicht bekannte numerische Analyse und Bearbeitung des Bilddatenstroms kann allerdings auch zu störenden Artefakten führen und ist bei der messtechnischen Charakterisierung

von Bildschirmen oft hinderlich. Die Qualität der vom Betrachter wahrgenommenen Bild-darstellung ist heute weitestgehend von der Qualität der Implementierung der „Verbesserungsmaßnahmen“ (das heißt, Bildanalyse- und -bearbeitungsalgorithmen) bestimmt.

Zur objektiven Bewertung der elektro-optischen Eigenschaften von Bildschirmen ist es unumgänglich, die Bildschirme unter klar definierten Bedingungen zu vermessen. Insbesondere bei qualitativ hochwertigen Monitoren stellen solche Messungen hohe Anforderungen an die Messgeräte, an das Messlabor und an den Messtechniker selbst. **||**

### Schrifttum

- [1] Becker, M. E.: Display-metrology for liquid-crystal-television screens. *Displays*, 26/4-5 (2005), S. 197–207.
- [2] EBU Tech 3325(2008): Methods for the Measurement of the performance of Studio Monitors.
- [3] Kuhlmann, U.: Bilder einer Ausstellung. Testbericht über 20 TFT-Flachdisplays zwischen 13 inch und 15 inch. Heise Verlag, c't, 6/1998, S. 204.
- [4] Becker, M. E.; Kuhlmann, U.: Glänzend oder matt – Ärger mit spiegelnden Displayoberflächen. Heise Verlag, c't, 2009, Heft 10, S. 153.
- [5] Becker, M. E.; Kuhlmann, U.: Rasante Zeiten – Techniken zur besseren Bewegtbilddarstellung auf Flachbildschirmen. Heise Verlag, c't, 9/2005.
- [6] Langendijk, E. H. A.; et al.: Contrast gain and power savings using local dimming backlights. *Journal of the SID*, 16/12, 2008, S. 1237.
- [7] Becker, M. E.; Kuhlmann, U.: Kristallmanufaktur – Schritte auf dem Weg zum schichtungsunabhängigen LC-Schirm. Heise Verlag, c't, 2005, Heft 22, S. 222–226.
- [8] Boeuf, J. P.: Plasma display panels: physics, recent developments and key issues. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36, 2003, R53–R79.
- [9] Urabe, T.: The Outstanding Potential of OLED Displays for TV Applications. *Information Display Magazine*, 9/2008, S. 14.
- [10] Roberts, A.: Measurement of display transfer characteristic. *EBU Technical Review*, 1993.
- [11] Becker, M. E.: Viewing-cone Analysis of LCDs: a Comparison of Measuring Methods. *Proc. SID*, 1996, S. 199.
- [12] [www.display-messtechnik.de](http://www.display-messtechnik.de): Optischer Transienten Rekorder OTR-3.
- [13] Becker, M. E.: Motion Blur Measurement and Evaluation: From Theory to the Laboratory. *Proc. SID2007*, S. 1122.
- [14] Becker, M. E.: Measurement and evaluation of display scattering. *Journal of the SID*, 131 (2005), S. 81.