



(Bild: Instrument Systems)

Qualitätsbewertung von Display-Systemen:

Display-Messtechnik, brauchen wir das?

Displays sind mittlerweile ein so natürlicher Bestandteil des Alltags, dass sie kaum noch auffallen. Es sei denn, sie funktionieren nicht mehr korrekt oder wurden für eine Anwendung falsch spezifiziert. Wie lässt sich nun die Qualität eines Displays objektiv bewerten und mit welchen Methoden und mit welcher Technik kann sie überprüft und verbessert werden?

Von Dr. Michael E. Becker

Ob ein Fernsehbild angenehm ist, ob eine Uhr bei Sonnenlicht gut ablesbar ist, oder ob die Instrumentenanzeige im Automobil auch im Winter noch schnell genug schaltet, ist jedem Benutzer meist intuitiv klar. Das individuelle Urteil ist dabei auch von äußeren Umständen wie dem Umgebungslicht oder der Temperatur abhängig. Die grundlegende Frage für die messtechnische Erfassung lautet deshalb: Wie lassen

sich persönliche visuelle Sinneseindrücke, die zunächst nicht messbar sind, mit objektiven Messungen korrelieren?

Um die Qualität der Wiedergabe von Bildschirmen bestimmen zu können, werden eindeutige Parameter benötigt, die die visuelle Wahrnehmung von Bildschirminhalten beschreiben und die auch messtechnisch ermittelt werden können. Die Bezugsgrundlage für diese messtechnischen Kenngrößen ist

immer das visuelle System des menschlichen Betrachters. Andere relevante Größen wie zum Beispiel die Leistungsaufnahme bzw. Lichtausbeute (Lichtstromleistung pro elektrischer Leistung) werden im Rahmen dieses Beitrags nicht betrachtet.

Das Ziel der Display-Vermessung ist die Gewinnung von technischen Daten, die analysiert und verglichen werden können. Sie sind die Grundlage für folgende drei Anforderungsszenarien:

- Überprüfen der ergonomischen Eignung von Displays zur Erledigung von Arbeitsaufgaben. Hauptanwendung dafür sind Computer-Monitore. Dies betrifft den Bereich Arbeitssicherheit [1] und den Bereich Ergonomie von Mensch-Maschine-Schnittstellen [2].
- Erstellen des Produktdatenblattes zur Unterstützung der Kaufentscheidung für den privaten und gewerblichen Bereich. Dies betrifft den Bereich Trans-

parenz und Relevanz bei der Produktinformation, Verbraucherschutz.

→ Produktverbesserung durch die Hersteller, insbesondere in der Automobil-Industrie, in der Steuer- und Regeltechnik, in der Medizintechnik, usw. Dies betrifft die Bereiche Forschung und Entwicklung in der Display-Industrie.

Typische Anwendungssituation

Bild 1 zeigt einen Bildschirm in einer typischen Anwendungssituation. Er wird von außen mit Bilddaten und anderen elektrischen Signalen und Spannungen versorgt. Diese Bilddaten kann das Display in eine zeitlich veränderliche, visuell wahrnehmbare Information (das „Bild“) umsetzen. Die Bewertung eines Displays erfolgt nur im Wellenlängenbereich zwischen 380 bis 780 nm, der für die menschliche Wahrnehmung relevant ist. Strahlung in diesem Bereich wird als Licht bezeichnet. Als Beobachter dient meist der Normalbeobachter nach CIE 1931 (2 ° Sehfeld) oder CIE 1964 (10 ° Sehfeld).

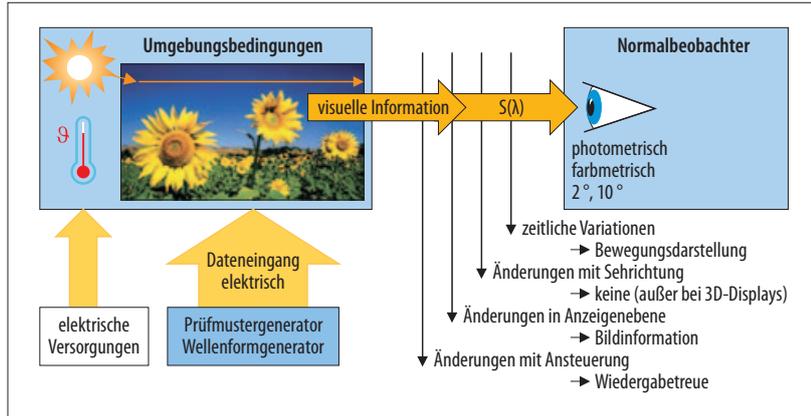


Bild 1. Der Bildschirm in einer typischen Anwendungssituation.

(alle Bildquellen: Instrument Systems)

Auf dieser Basis werden Leuchtdichte und Farbart des Bildschirms erfasst. Die beiden Größen sind die physikalischen Entsprechungen für die Sinneswahrnehmungen Helligkeit und Farbe.

Visuelle Bildinformation

Die visuell wahrnehmbare Information eines Bildschirms ergibt sich meist aus einer fein gerasterten und regelmäßigen

Anordnung von Bildelementen (Pixel) in einer meist ebenen Bildschirmfläche. Die Intensität und die Farbart lassen sich für jedes Bildelement einzeln steuern. Ihre Anzahl in horizontaler und vertikaler Richtung bestimmt die laterale Rasterung des Bildschirms (zum Beispiel 1920 × 1080 Pixel bei HDTV).

Die Abhängigkeit der Bildinformation – Leuchtdichte und Farbart – vom Eingangssignal ist durch die Normen sRGB

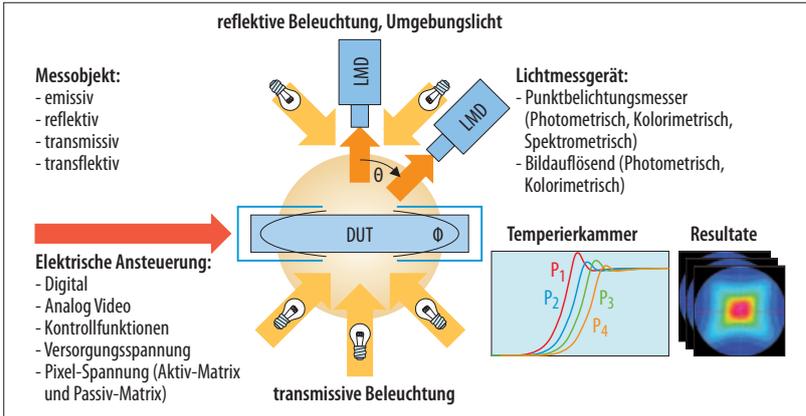


Bild 2. Schematischer Messaufbau für die beschriebene Anwendungssituation.

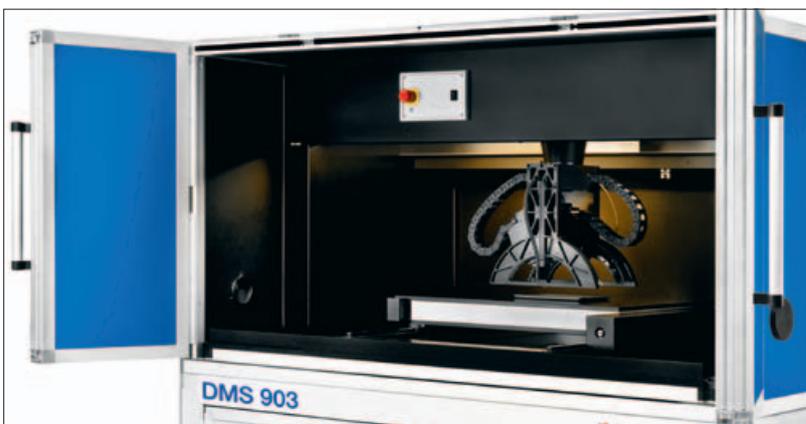


Bild 3. Beispiel für eine Positioniermechanik mit sechs motorisierten Achsen (im Bild DMS-903 von Instrument Systems).

[3] bzw. die ITU-R Recommendation BT.709 (Rec. 709) festgelegt. Die Übereinstimmung der elektro-optischen Kennlinie eines Bildschirms mit der von den Normen geforderten Kennlinie entscheidet über seine Wiedergabetreue (fidelity). Diese beiden Normen legen ebenfalls die Primärfarben fest, innerhalb derer die Farbwiedergabe erfolgen soll (Tabelle 1).

Das angezeigte Bild kann zeitlich veränderlich sein, zum Beispiel wenn

Bewegungsabläufe dargestellt werden. Ein Fehlerfall liegt vor, wenn Bewegungsabläufe ruckelnd statt gleichmäßig wiedergegeben werden oder es zum Verwischen von Bildinhalten kommt, dem sogenannten Motion Blur.

Wichtige Messgrößen

Die für die visuelle Wahrnehmung der Bildinformation wichtigste Größe ist der Kontrast, der sich aus dem Verhältnis der Leuchtdichten von zwei aneinandergrenzenden Flächen ergibt. Der Farbanteil (Chrominanz) im Bild spielt hierbei zunächst eine untergeordnete Rolle, da die Empfindlichkeit des menschlichen Sehapparats bei der Unterscheidung von Bilddetails hauptsächlich durch die Leuchtdichte beziehungsweise die wahrgenommene Helligkeit (Luminanz) bestimmt wird. Deshalb ist in vielen Fällen die laterale Rasterung des

Fernseh- oder Videobildes für die Chrominanz-Signale größer als für die Luminanz-Signale.

Ein weiterer Faktor für die subjektive Qualität von wahrgenommenen Bildinhalten ist deren Stabilität bezüglich der Betrachtungsrichtung. Es wird als unangenehm empfunden, wenn sich Kontraste und Farben mit der Betrachtungsrichtung ändern. Solche Effekte minderten in der Vergangenheit häufig die Qualität von LCD-Bildschirmen. Hingegen nutzen 3D-fähige Bildschirme diesen Effekt gezielt, um die Rauminformation über die Betrachtungsrichtung zu vermitteln.

Die naturgetreue Wiedergabe von Fernseh- und Videobildern in Form von blauem Himmel, grünen Wiesen und natürlichen Gesichtsfarben bei Menschen ist durch die Anforderungen geregelt, die in der ITU-R Empfehlung BT.709 (Rec. 709) festgelegt sind.

Um ein Display umfassend zu charakterisieren, sind messtechnisch folgende Größen zu erfassen:

- Farbwiedergabebereich (Color Gamut), der durch die Farbwertanteile (umgangssprachlich auch „Farbkoordinaten“) der Primärfarben bestimmt wird.
- Farbart der zwischen Schwarz und Weiß liegenden Grauzustände (Farbwertanteile).
- Leuchtdichte der Eingangsdaten, Übereinstimmung mit den Forderungen der anwendbaren Standards.
- Leuchtdichte-Kontrast zwischen Schwarz, Weiß und den Graustufen.
- Veränderung dieser Größen mit der Betrachtungsrichtung und unter Umgebungslicht.

Komponenten eines Messaufbaus

In der Display-Messtechnik sind folgende Komponenten relevant:

- Das Messobjekt (Display, Bildschirm), dessen Eigenschaften gut bekannt sein müssen, damit aussagefähige und reproduzierbare Messungen möglich sind.
- Die Lichtmessgeräte (Photometer, Kolorimeter, Spektroradiometer, integrierend oder bildauflösend), die im Messaufbau den menschlichen Betrachter ersetzen.
- Eine Positioniereinrichtung, die Messobjekt und Lichtmessgeräte präzise zueinander ausrichtet.

Pixel-Matrix HDTV	1080 x 1920 (Zeilen x Spalten)
Bildwiederholrate HDTV	50 / 60 Hz progressiv
Farbwiedergabebereich	$x_r = 0,640, x_g = 0,300, x_b = 0,150$ $y_r = 0,330, y_g = 0,600, y_b = 0,060$
Weisspunkt – D65	$x_w = 0,3127, y_w = 0,3290$
Intensitäts_rasterung	3 x 256 Stufen
EOTF	$L \cong V^{2,2}$ $L = \begin{cases} \frac{V}{4,5} & V < 0,081 \\ \left(\frac{V + 0,099}{1,099} \right)^{0,45} & V \geq 0,081 \end{cases}$

Quelle: IEC 61966-2-1:1999 / Rec. 709

Tabelle 1: Spezifikationen für sRGB und HDTV.

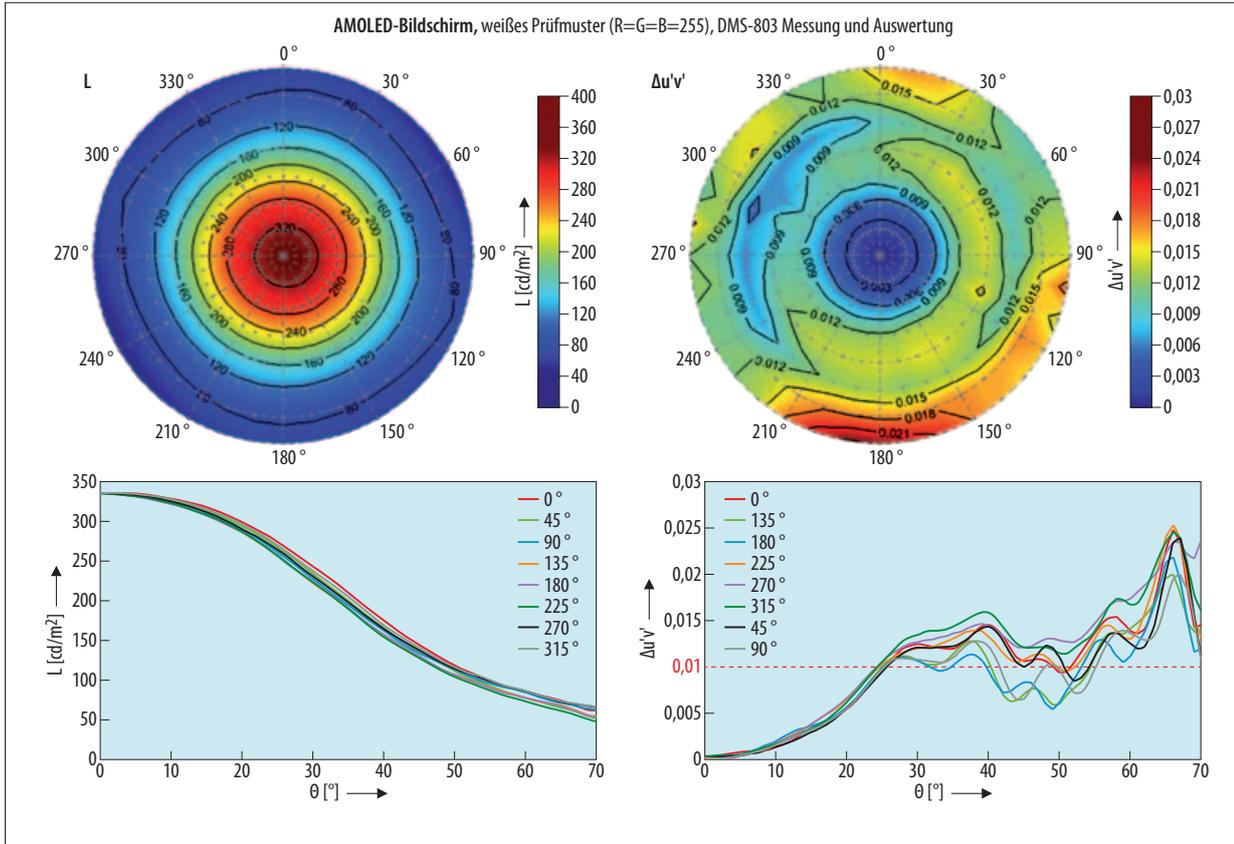


Bild 4. Messung der Änderung von Leuchtdichte und Farbart eines AM-OLED-Bildschirms mit der Betrachtungsrichtung.

- Eine Messablaufsteuerung, die die Vielzahl von Variationen und Parametereinstellungen verwaltet und die eigentliche Messung nach vorheriger Festlegung ohne weitere menschliche Interaktion ablaufen lässt.
- Der Messtechniker, der mit seinen fundierten Fachkenntnissen über Messobjekte und Messgeräte sowie deren Möglichkeiten und Grenzen für wiederholbare und aussagefähige Messergebnisse sorgt.

Die Anwendungssituation aus **Bild 1** kann mit folgendem Messaufbau nachgebildet werden: Die Positionierung der Lichtmessgeräte relativ zum Messobjekt erfolgt durch eine Mechanik. Sie kann mit unterschiedlichen Kinematiken realisiert werden, um eine blickrichtungsabhängige Messung zu ermöglichen. Zur Beleuchtung des Messobjekts im Durchlicht- und Auflichtbetrieb sind sowohl Lichtquellen wie auch Beleuchtungseinrichtungen zur räumlichen Formung der Beleuchtung vorgesehen. Durch eine Auflichtbeleuchtung kann auch die Umgebungsbeleuchtung während der Messungen nachgestellt werden. Eine Temperierkammer stellt die Kontrolle über die Temperatur des Messobjekts sicher. Lichtschutzgehäuse sorgen dafür, dass die Messung nicht durch unkontrollierte Einflüsse im Messlabor gestört wird.

Bild 2 zeigt schematisch einen solchen Aufbau mit zentraler Positioniermechanik, den Beleuchtungseinrichtungen und der Optik, die das vom Messobjekt ausgehende Licht über flexible Lichtleiter zu den Detektoren führt. Eine mögliche Realisierung einer Positioniermechanik mit sechs motorisierten Achsen ist in **Bild 3** zu sehen.

Als Detektoren können schnelle Photometer in Kombination mit einem Spektralradiometer verwendet werden. Das

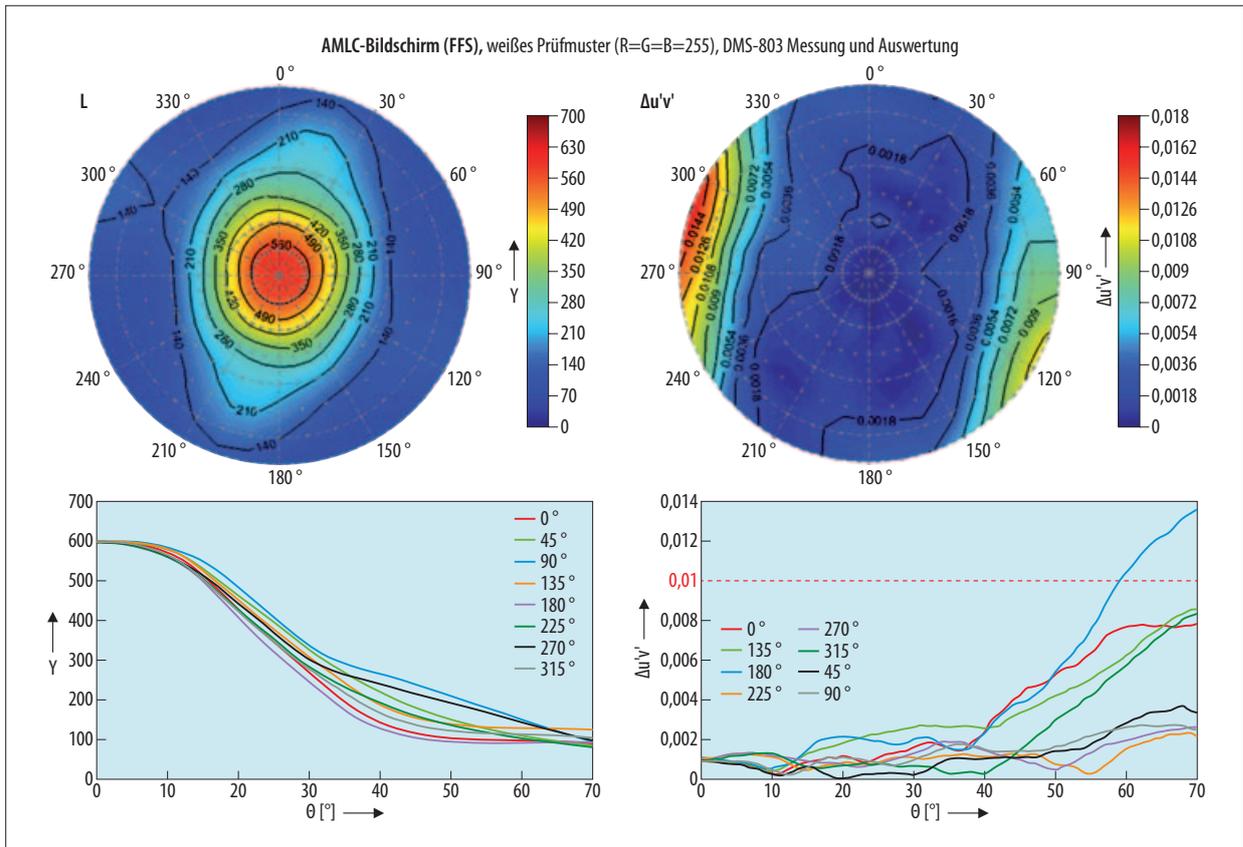


Bild 5. Messung der Änderung von Leuchtdichte und Farbart eines LCD-Bildschirms mit der Betrachtungsrichtung.

Photometer ermöglicht die zeitaufgelöste Erfassung von schnellen Übergängen zwischen verschiedenen optischen Zuständen, aus denen die Schaltzeiten und Kenngrößen für die Bewegungunschärfe ermittelt werden. Leuchtdichte und farbmetrische Kenngrößen der stationären (eingeschwungenen) Zustände werden mit einem Spektralradiometer ermittelt.

Eine zentrale Funktion in einem solchen Messsystem übernimmt die Software. Sie steuert alle Komponenten des Systems und den Messablauf, nimmt die anfallenden Daten auf, speichert sie und macht sie für die darauf folgende Auswertung als grafische Darstellung

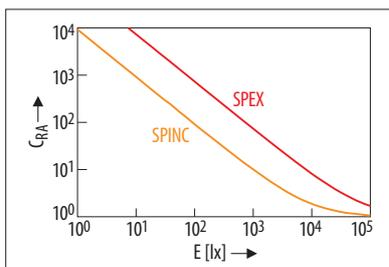


Bild 6. Kontrast eines OLED-Bildschirms unter halbräumlich diffusem Auflicht als Funktion der Beleuchtungsstärke bei eingeschlossenen (SPINC) und ausgeblendeten (SPEX) Spiegelreflexionen.

verfügbar. Die Software integriert alle beteiligten Komponenten und stellt sicher, dass das Gesamtsystem erheblich mehr leistet als die Summe der Komponenten.

Messpraxis: Richtungsabhängigkeit

Zur Demonstration einiger Aspekte der hier beschriebenen Messtechnik für Displays wurde die Änderung von Farbart und Leuchtdichte des Weißzustands mit der Betrachtungsrichtung bei zwei aktuellen Bildschirmen (OLED- und LCD-Technik) ausgemessen. Die in Bild 4 und Bild 5 dargestellten Richtungsabhängigkeiten sind Falschfarbdarstellungen von Leuchtdichte (links) und Farbartunterschieden, $\Delta u'v'$ (CIE 1976), in polaren Koordinatensystemen, in denen der Abstand zum Zentrum proportional ist zum Neigungswinkel der Sehrichtung (θ , relativ zur Normalen der Displayfläche) und der Azimutwinkel (Φ , Drehwinkel) direkt aufgetragen ist. Darunter sind die Abhängigkeiten vom Neigungswinkel für die verschiedenen Drehwinkel dargestellt.

Aus diesen Darstellungen ist direkt ersichtlich, dass die Richtungsverteilung der Leuchtdichte beim OLED-Bildschirm

eine ausgeprägte Rotationssymmetrie aufweist und die Abnahme mit dem Neigungswinkel etwas geringer ausfällt als beim LCD-Bildschirm. Bei der Änderung der Farbart in Relation zur senkrechten Betrachtungsrichtung zeigt jedoch der LCD-Bildschirm bei weitem geringere Abhängigkeiten als der OLED-Bildschirm. Die Ursache dafür liegt in der für diese Display-Technik typische Verschiebung der Emissionsspektren in Richtung Blau mit zunehmendem Neigungswinkel.

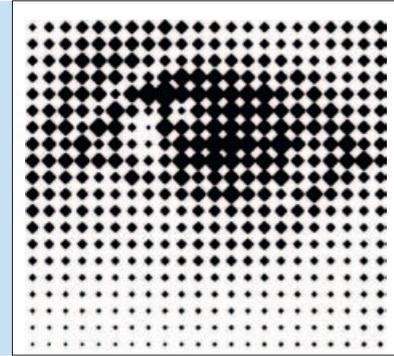
Messpraxis: Reflexion

Die meisten Daten, die zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Bildschirmen in Produktbeschreibungen zu finden sind, werden im Dunkelraum gemessen. Dies entspricht nicht dem normalen Anwendungsfall. Reflexionen von Licht aus der Umgebung im Display verringern den Kontrast (siehe Textkasten: Kontrast), bleichen die dargestellten Farben aus, können zu Fokussierungskonflikten und zur Blendung führen. Anwendungsbezogene, realistische Leistungsdaten sollten also Messungen unter Auflicht beinhalten. Die Norm IEC 62341-6-2:2015 beschreibt ein Verfahren

Kontrast

An einem Büroarbeitsplatz kann es leicht zu 100 cd/m^2 Streulicht kommen (weiße Wand, Fenster, Deckenbeleuchtung). Dieses Licht fällt auf das Display und die 8 % Reflektionen (8 cd/m^2) addieren sich nun zu dem austretenden Licht der Display-Hinterleuchtung. Angenommen, ein Display hat eine Kontraste von 1000:1. Dieser Wert ergibt sich aus

$0,5 \text{ cd/m}^2$ für schwarze Pixel und 500 cd/m^2 für weiße Pixel ($500/0,5 = 1000$). Gemessen wird dies von den Display-Herstellern in speziell abgedunkelten Räumen. Mit den im Alltag auftretenden Reflexionen (8 cd/m^2) ergeben sich nun aber $8,5 \text{ cd/m}^2$ für schwarze und 508 cd/m^2 für weiße Pixel. Der Kontrast fällt damit auf 60:1 ($508/8,5$).



zur messtechnischen Bestimmung von Kontrast und Farbart unter Aufsicht unterschiedlicher Intensität und spektraler Verteilung, bei halbräumlich diffuser Verteilung und bei gerichteter Beleuchtung. Instrument Systems hat das Messverfahren nach diesem Standard in seine Display-Messsysteme integriert. Ein Beispiel ist das DMS-803/505, mit dem auch die Messung in Bild 4 und 5 durchgeführt wurde.

Ein typisches Ergebnis für einen Smartphone-Bildschirm in OLED-Technik ist in Bild 6 als Funktion der halbräumlich gleichförmig verteilten Beleuchtungsstärke dargestellt. Hier steht „Spex“ für „Specular Excluded“ und entspricht dem Fall der Abschattung des direkten Lichteinfalls wie es sich durch den Kopf des Betrachters einfach realisieren lässt. Der Fall „Spinc“ bedeutet „Specular Included“ und besagt, dass die Reflexionen in Spiegelrichtung nicht abgeschattet werden. Bei einer halbräumlichen, diffusen Beleuchtungsstärke von 1.000 lx bewirken Spiegelreflexionen eine Abnahme des Kontrastes von 73 auf 10, wie in der Messkurve zu sehen ist.

Anforderungen an ein „gutes“ Display

Aus den dargestellten Zusammenhängen lassen sich mehrere Forderungen für eine gute Wiedergabe von farbigen, bewegten Bildinhalten ableiten: Die dynamischen Eigenschaften des Bildschirms sollten die Wiedergabe von bewegten Bildinhalten ohne Fehler (z.B. Ruckeln, Verwischen, Flimmern) gestatten. Bei gleichem Eingangssignal für alle Bildelemente sollte der Bildschirm einen gleichförmigen Bildinhalt anzeigen. Die Umsetzung des Eingangssignals in die angezeigte Leuchtdichte und den dargestellten Farbbereich muss auf Basis der anwendbaren Normen (sRGB

bzw. Rec. 709) erfolgen, um eine naturgetreue Wiedergabe zu ermöglichen. Kontraste, Farben und Bewegtbilddarstellung sollten von der Betrachtungsrichtung möglichst unabhängig sein. Der Einfluss der Umgebungsbedingungen – zum Beispiel Umgebungslicht und Temperatur – auf die Bildwiedergabe sollte so gering wie möglich ausfallen. Das ist besonders für Displays wichtig, die in Automobilen, Flugzeugen oder Schiffen zum Einsatz kommen.

Zur realistischen Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Bildschirmen unter tatsächlich auftretenden Bedingungen sollten die von den Standards geforderten Eigenschaften unter Aufsicht und als Funktion der Betrachtungsrichtung gemessen werden. Displays, die in Land-, Wasser- oder Luftfahrzeugen zum Einsatz kommen, müssen über den für den Einsatzfall relevanten Temperaturbereich gemessen werden, um die (bei LCDs) intrinsischen Temperaturabhängigkeiten durch elektronische Maßnahmen kompensieren zu können. Für Landfahrzeuge reicht der typische Temperaturbereich beispielsweise von -40 °C bis 100 °C .

Auch der Messtechniker spielt eine entscheidende Rolle, um die Ergebnisse von elektro-optischen Messungen an Bildschirmen reproduzierbar und aussagefähig zu machen. Kennt er die Messobjekte und deren Eigenschaften genau, kann er durch geeignete Prüf-

muster verhindern, dass undurchschaubare Algorithmen den Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und angezeigter Information manipulieren. Das betrifft unter anderem die Kontrast- und Farbverstärkung. *mha*

Literatur und Links

- [1] <http://www.ergo-online.de>
- [2] ISO 9241-300: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion.
- [3] IEC 61966-2-1:1999 Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB.



Dr. Michael E. Becker

ist seit 2012 technisch-wissenschaftlicher Berater bei Instrument Systems mit dem Schwerpunkt Display-Messtechnik. In seiner Doktorarbeit (1979-1984) an der Universität

Karlsruhe widmete sich Becker der numerischen Simulation von LCD-Anzeigesystemen. Bei Autronics übernahm er als technischer Leiter ab 1985 die Kommerzialisierung von Messgeräten und Simulationssoftware und wurde ab 1993 Geschäftsführer. Er ist Gründer der Display-Messtechnik & Systeme, Verfasser zahlreicher Beiträge zur Standardisierung der LCD-Messtechnik – u.a. für den DKE, das IEC, die VESA sowie das ICDM – und präsentiert regelmäßig aktuelle Inhalte auf Konferenzen und in Fachartikeln.

becker@instrumentsystems.com.