

Störung durch Reflexionen auf Flachbildschirmen

Paul W. Schmits
 HAWK Hildesheim
 Fakultät Gestaltung
 Lighting Design
 31134 Hildesheim
 Kaiserstraße 43-45
 (05121) 881-350

Cornelia Vandahl
 Christoph Schierz
 TU Ilmenau
 Fachgebiet Lichttechnik
 98693 Ilmenau
 Prof.-Schmidt-Str. 26
 (03677) 69-3732

1. Einleitung

Um störende Reflexe auf Bildschirmen zu vermeiden, sind in den Normen Grenzwerte, insbesondere für Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken sich spiegelnder Leuchten festgelegt. Diese stammen jedoch noch auch Zeiten, in denen vorwiegend CRT-Bildschirme im Einsatz waren. Moderne Bildschirme sind hinsichtlich Entspiegelungstechnologie und Ausgangskontrast weiter entwickelt. Daher ist zu erwarten, dass die genormten Grenzwerte nicht mehr aktuell sind. Die Grenzen für LCD-Bildschirme sind bisher noch nicht detailliert ermittelt worden.

In dem Projekt wurden wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse gewonnen, die in die Normenwerke und Empfehlungen für Bildschirmforderungen (z. B. DIN EN ISO 9241-30x) und für die Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen (z. B. DIN 5035-7, BGI 650) einfließen können.

An der TU Ilmenau und der HAWK Hildesheim wurden an 3 ausgewählten Bildschirmen Untersuchung der Störung durch Schleierleuchtdichte und Spiegelbilder bei der Variation von verschiedenen Parametern durchgeführt. Die Untersuchung fand auf der Basis von Urteilen durch 21 Versuchspersonen statt.

2. Reflexe am Bildschirm

Reflexionen auf Bildschirmen führen im Allgemeinen zur Verringerung des Kontrastes auf dem Bildschirm. Der Ausgangskontrast eines Bildschirms (ohne Beleuchtung) ist dabei nach Gleichung (1) definiert.

$$(1) \quad C_0 = \frac{L_H}{L_L}$$

Reflexionen an der Bildschirmoberfläche können gerichtet oder diffus erfolgen. Die Leuchtdichten der Reflexion überlagern sich den Ausgangsleuchtdichten (Abb. 1) und führen dann zur Kontrastreduktion.

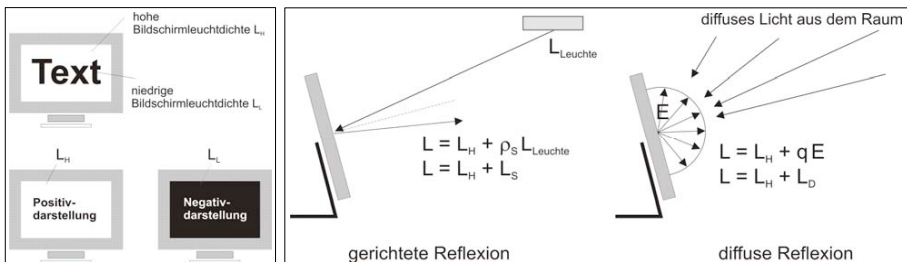


Abb. 1: Leuchtdichtedarstellung auf dem Bildschirm, gerichtete und diffuse Reflexion an der BS-Oberfläche

Die gerichtete Komponente L_S kann über den Grad der gerichteten Reflexion ρ_s und die Leuchtdichte der sich spiegelnden Leuchte L_{Leuchte} beschrieben werden:

$$(2) \quad L_S = \rho_s \cdot L_{\text{Leuchte}}$$

Die diffuse Komponente L_D lässt sich über den Leuchtdichtekoeffizient q und die auf dem Bildschirm herrschende Beleuchtungsstärke bestimmen. Diesen kann man in den Grad der diffusen Reflexion ρ_d umrechnen.

$$(3) \quad L_D = q \cdot E \quad q = \frac{L_D}{E} \quad L_D = \frac{\rho_d \cdot E}{\pi \cdot \Omega_0} \quad \rho_d = q \cdot \pi \cdot \Omega_0$$

Im Allgemeinen treten beide Reflexionskomponenten gleichzeitig auf, was zu folgendem Kontrast führt:

$$(4) \quad CR = \frac{L_H + L_S + L_D}{L_L + L_S + L_D}$$

Bei Bildschirmen mit glänzender Oberfläche tritt fast ausschließlich gerichtete Reflexion auf. Bei matten Bildschirmoberflächen ist die gerichtete Komponenten jedoch nicht zu vernachlässigen, daher wird im folgenden nicht von diffuser sondern von gestreuter Reflexion gesprochen.

3. Untersuchte Bildschirme

Für die Untersuchungen wurden drei Bildschirme (zwei mit matter und einer mit hochglänzender Oberfläche) ausgewählt. Die Bildschirme wurden ausschließlich in Positivdarstellung betrieben. Den Testpersonen wurde ein Text (schwarze Zeichen mit Leuchtdichte L_L auf hellem Hintergrund mit Leuchtdichte L_H) präsentiert. Der weiße Hintergrund L_H wurde in 4 Stufen variiert: 200, 150, 115 und 80 cd/m^2 . Zusätzlich wurde ein Foto dargeboten.

Ortsaufgelöste Messtechnik ergab für alle Bildschirme den mittleren Kontrast C_0 ohne zusätzliche Beleuchtung. In Tab. 1 sind die wesentlichen Kennzahlen der untersuchten Bildschirme dargestellt.

	BS1	BS2	BS3
Oberfläche	matt	matt	glänzend
q in $\text{cd/m}^2/\text{lx}$	0,0092	0,0105	0,00057
ρ_d	0,029	0,033	0,0018
ρ_s	0,0042	0,00089	0,047
L_L mittel in cd/m^2	1,17	0,24	0,32
C_0 mittel bei $L_H = 200 \text{ cd/m}^2$	232	799	738
C_0 mittel bei $L_H = 150 \text{ cd/m}^2$	176	563	484
C_0 mittel bei $L_H = 115 \text{ cd/m}^2$	131	384	386
C_0 mittel bei $L_H = 80 \text{ cd/m}^2$	98	267	268

Tab. 1: Kennzahlen der Bildschirme

Die Bildschirme BS1 und BS2 hatten eine matte Oberfläche. Bei BS1 handelt sich um einen LCD-Bildschirm älterer Bauart, der hier als „worst case“ zum Vergleich mit in die Untersuchung einbezogen wurde. BS3 hat eine hochglänzende Oberfläche.

4. Versuchsaufbau

4.1 Untersuchungen zur gerichteten Reflexion

Die Untersuchungen fanden im Lichtlabor der HAWK Hildesheim, Kompetenzfeld Lighting Design statt. Der Arbeitstisch mit den drei Bildschirmen stand vor einer weiß verhängten Wand. Regelbare Wandfluter und eine mobilen Spiegelrasterleuchte (Abb. 2) optimierten so die Beleuchtung des Arbeitstisches, dass die folgenden Parameter während des gesamten Versuches stabil eingehalten werden konnten:

- Beleuchtungsstärke im Arbeitsbereich (Tisch und Bewegungszone): 500 lx ($U_0 > 0,65$)
- Leuchtdichte auf der Wand hinter den Monitoren (bis zu einer Höhe von 2,2 m) 80 cd/m²
- Beleuchtungsstärke auf allen drei Bildschirmen < 25 lx

Als Störquellen (Abb. 2) befanden sich zwei Leuchten in 6 m Abstand so an einem Deckensystem, dass sich auf allen drei Bildschirmen mittig in der oberen Bildschirmhälfte für den Beobachter ein Reflexbild ergab.

Die leuchtenden Flächen beider Leuchten wurden so modifiziert, dass sich in Richtung der Bildschirme und bezogen auf diese eine weitgehend gleichmäßig leuchtende Fläche mit einem Raumwinkel von $5 \cdot 10^{-5}$ sr ergab

- Leuchte 1: längliche Fläche von 1,45 m x 16 mm (im folgenden „Linien-Leuchte“ genannt)
- Leuchte 2: rechteckige Fläche von 300 mm x 78 mm (im folgende „Rechteck-Leuchte“ genannt)

Die Linien-Leuchte wurde durch eine freistrahrende Lichtleiste mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung realisiert. Um das Leuchtenumfeld bei der Dimmung stabil zu halten, absorbierte schwarzes Blendenmaterial den rückwärtigen Lichtstrom.

Die Rechteck-Leuchte bestand aus einem tiefstrahlenden Rinnenstrahler mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung dessen Austrittsfläche mit einer Diffusorscheibe abgedeckt war. Eine Maskierung reduzierte die Lichtaustrittsfläche auf die oben angegebene Größe. Beide Leuchten konnten über eine DALI Anlage stufenlos zwischen 35 % und 100 % gedimmt werden.

Die Untersuchung wurde mit 21 Testpersonen durchgeführt, die nacheinander die drei Bildschirme bewerteten. Die Testpersonen stellten ihre Sitzposition mit Hilfe eines höhenverstellbaren Sitzes jeweils so ein, dass das Reflexbild der Störleuchten sich mittig in der oberen Bildschirmhälfte befand.

Auf dem Bildschirm wurde dreimal ein Text mit schwarzen Zeichen auf unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten dargestellt (200 cd/m², 150 cd/m² und 115 cd/m²) sowie eine Fotografie. Nach kurzer Adaptationszeit wurde jeweils eine Störquelle eingeschaltet und deren Leuchtdichte langsam solange erhöht, bis die Testpersonen den Reflexions-Effekt der Störquelle als „merkbar“ (BS1 und BS2) bzw. als „störend“ (BS3) empfanden.

Bei den Bildschirmen BS1 und BS2 wurde das Urteil „störend“ nicht untersucht, da bereits beim Vortest die 100 % Einstellung der Störquellen als „nicht störend“ empfunden wurde und höhere Leuchtdichten irrelevant sind. Aufgrund der hohen gerichteten Reflexion des Bildschirms BS3 waren die Spiegelbilder der Störquellen auch bereits bei der niedrigsten Dimmstellung sichtbar. Daher wurde hier auf das Urteil „merkbar“ verzichtet.



Abb. 2: Versuchsaufbau bei der Untersuchung der direkten Reflexion in Hildesheim

4.2 Untersuchungen zur diffusen Reflexion

Die Untersuchungen fanden in einem Laborraum der TU Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik statt. Der Raum war mit einem direkt abstrahlenden dimmbaren Deckensystem ausgestattet. Die drei Bildschirme wurden im Raum so positioniert, dass keine direkte Reflexion der Leuchten zustande kommen konnte.

Die Beleuchtungsstärke, die mit dem Beleuchtungssystem maximal möglich war, betrug 1400 lx in der Bildschirmebene. Vorversuche zeigten, dass die Beleuchtungsstärke nicht ausreichte, um vom Beobachter als „merkbar“ Änderung wahrgenommen zu werden. Daher kam zusätzlich ein Scheinwerfer zum Einsatz (Abb. 3). Dieser strahlte unter 25° gegenüber der Senkrechten auf den Bildschirm und führte nicht zu einer direkten Reflexion in Richtung des Beobachters. Mit dem Scheinwerfer waren Beleuchtungsstärken bis zu 65000 lx (Maximalwert auf der Fläche des Bildschirmes) möglich.

Durch die Verwendung des Scheinwerfers entspricht der gewählte Versuchsaufbau nicht den Mess- und Bewertungskriterien für eine diffuse Beleuchtung, die für die Festlegung zulässiger Beleuchtungsstärken gefordert sind. Andererseits sind im Innenraum Beleuchtungsstärken über 1400 lx in der Bildschirmebene unrealistisch. Höhere Werte werden meist durch direkte Sonneneinstrahlung erreicht, die ähnlich gerichtet wie die Scheinwerferbeleuchtung erfolgt.



Abb. 3: Versuchsaufbau zur Untersuchung der diffusen Reflexion in Ilmenau

Die Untersuchung fand mit 21 Testpersonen statt, die nacheinander die drei Bildschirme mit jeweils 4 Leuchtdichten L_H (200 cd/m², 150 cd/m², 115 cd/m² und 80 cd/m²) betrachteten.

Während der Betrachtung des Bildschirms wurde nur die Helligkeit des Scheinwerfers langsam erhöht und die Probanden hatten anzugeben, wann sie eine Änderung bemerkten („merkbar“) bzw. als störend empfanden („störend“). Mit jeder Testperson wurde die Einstellung dreimal vorgenommen. Die drei Ergebnisse jeder Testperson wurden anschließend gemittelt.

5. Ergebnisse

5.1 Direkte Reflexion

In den Abb. 14 bis 16 sind der Median und das Minimum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ (BS1 und BS2) bzw. „störend“ (BS3) dargestellt. Die Werte der y-Achse entsprechen der Leuchtdichte der sich spiegelnden Leuchte L_{Leuchte} .

Es zeigt sich, dass bei allen Bildschirmen bei der Rechteck-Leuchte geringere Leuchten-Leuchtdichten als „merkbar“ angegeben werden als bei der Linien-Leuchte. Die Angabe ist von der Hintergrundleuchtdichte des Bildschirms abhängig.

Beim glänzenden BS3 wurden bereits Leuchten-Leuchtdichten größer als 4000 cd/m^2 als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte ($L_{\text{Leuchte}} < 1500 \text{ cd/m}^2$) gestört. Eine weitere Versuchsperson hingegen fühlte sich auch bei der höchsten realisierbaren Leuchtdichte nicht gestört. Hier zeigte sich auch eine Abhängigkeit der Bewertung von den Nutzergewohnheiten. Kritisch wird insbesondere die gute Erkennbarkeit des Spiegelbildes, unabhängig von der Leuchtdichte, gesehen.

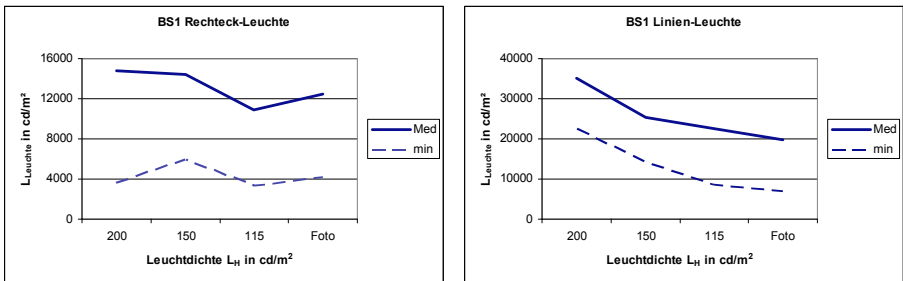


Abb. 4: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS1

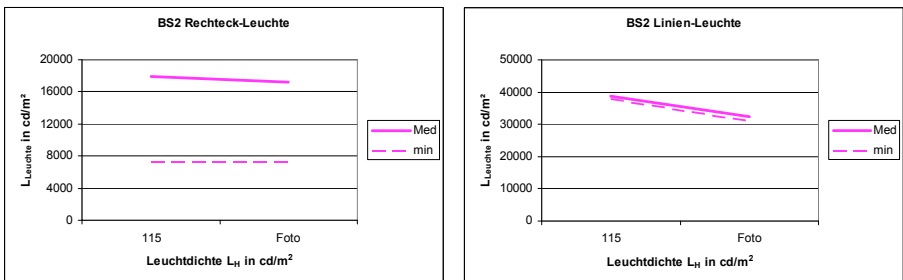


Abb. 5: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS2

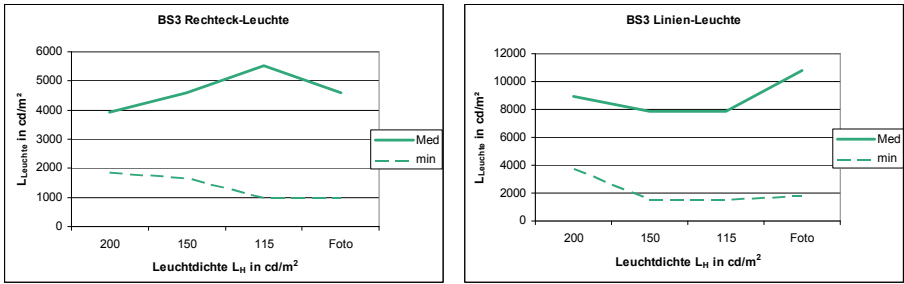


Abb. 6: Median und Minimum der Angabe für „störnd“ für BS3

5.2 Diffuse Reflexion

In den Abb. 17 bis 19 sind der Median sowie Minimum und Maximum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ und „störnd“ dargestellt. Der Werte der y-Achse entsprechen dem Maximalwert der Beleuchtungsstärke auf dem Bildschirm. Bei der Untersuchung der gestreuten Reflexion wurden bei keinem Bildschirm bei Beleuchtungsstärken unter 3000 lx der Lichtschleier als „störnd“ eingestuft.

Beim Bildschirm BS3 fiel den Testpersonen die Angabe einer Störwirkung sehr schwer. Entsprechend groß ist die Streuung. Selbst in der höchsten Einstellung von 50000 lx konnten einige Probanden keine Störwirkung feststellen. Für hochglänzende Bildschirme spielt die Beleuchtungsstärke keine Rolle, solange sie nicht durch sich direkt spiegelnde leuchtende Flächen erzeugt wird.

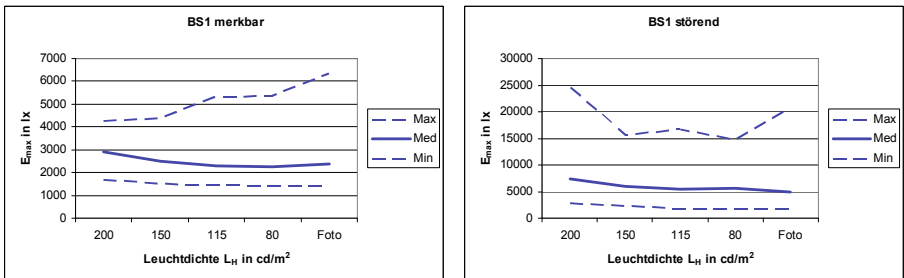


Abb. 7: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störnd“ für BS1

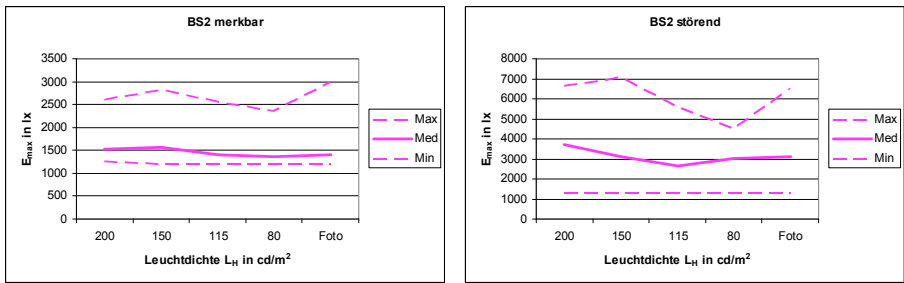


Abb. 8: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS2

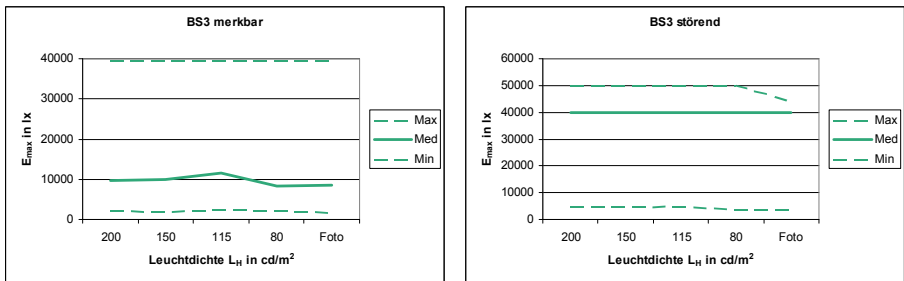


Abb. 9: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS3

6. Zusammenfassung

In der Studie wurden 2 Bildschirme mit matter Oberfläche und ein hochglänzender Bildschirm hinsichtlich ihrer Reflexionen und deren Störwirkung auf den Nutzer untersucht. Dabei wurden sowohl die Leuchtdichte der sich spiegelnden Lichtquelle als auch die diffuse Raumbelichtung variiert. Die Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche wurde weiterhin mit einer gerichteten, jedoch nicht in Beobachtungterrichtung gespiegelten Beleuchtung realisiert. Damit waren Beleuchtungsstärken bis 65000 lx erzielbar.

Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass bei den entspiegelten Bildschirmen der gerichtete Anteil der Reflexion sehr klein ist. Erst gerichtete Reflexionen mit Leuchtdichtewerten $L_{\text{Leuchte}} > 10000 \text{ cd/m}^2$ wurden als „merkbar“ beurteilt. Leuchten mit so hohen Leuchtdichten oberhalb des Ausstrahlungswinkels von 65° führen aber mit Sicherheit zu UGR-Werten größer 19 und dürfen daher in Büros und vergleichbaren Bildschirmarbeitsplätzen nicht eingesetzt werden.

Bei zukünftigen Empfehlungen und Vorschriften kann daher für den Bildschirm-Typ „entspiegelter Flachbildschirm“ im bürotypischen Einsatz (Positiv-Zeichen-Darstellung) auf eine Begrenzung der Leuchtdichte von Leuchten in typischer Büroumgebung verzichtet werden, wenn die Begrenzung der Direktblendung eingehalten wird.

Bei dem hochglänzenden Bildschirmtyp wurden bereits Leuchten-Leuchtdichten größer als 4000 cd/m^2 als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte gestört. Eine weitere Versuchsperson hingegen fühlte sich auch bei der höchsten realisierbaren Leuchtenleuchtdichte nicht gestört. Dies kann

als Hinweis betrachtet werden, dass als zusätzliche Einflussgröße auf das Urteil die Haltung zu dem Produkt eine Rolle spielen könnte. Bei dem hochglänzenden Bildschirmtyp scheint weniger die Höhe der Leuchtdichte für die Bewertung „störend“ relevant zu sein als vielmehr die gute Erkennbarkeit des Spiegelbildes (unabhängig von der Leuchtdichte) und die damit verbundene ablenkende Information. Hochglänzend spiegelnde Bildschirme sollten daher beim bürotypischen Einsatz nicht verwendet werden.

Bei der Untersuchung der gestreuten Reflexion wurden bei keinem Bildschirm mit Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmfläche $E < 1500$ lx Lichtschleier als „merkbar“ eingestuft. Bei Beleuchtungsstärken ab 3000 lx wurden die Lichtschleier als „störend“ empfunden. Diese Beleuchtungsstärken sind im Büroraum höchstens durch das Tageslicht in Fensternähe erreichbar. Mit der künstlichen Beleuchtung wären diese Werte mit horizontalen Beleuchtungsstärken über 3000 lx verbunden. Diese Werte dürften schon aus energetischen Gründen kaum zum Einsatz kommen.

Die mittlere horizontale Beleuchtungsstärke für die künstliche Beleuchtung am Büro-Arbeitsplatz dürfte zu keiner Zeit 1500 lx überschreiten, die Beleuchtungsstärke auf einem bis maximal 45° geneigten Bildschirm betrage dann höchstens 1000 lx.

Mit den kritischeren Bedingungen für Störung durch gestreute Reflexion ist bei Tageslicht zu rechnen. Typische Beleuchtungsstärke-Werte auf Bildschirmen, die zu fensternahen Arbeitsplätzen (ohne direkte Sonneneinstrahlung) gehören und parallel zu den Seiten-Wandflächen ausgerichtet sind, dürften in diesem Fall 3000 lx nicht überschreiten.

Zur Vermeidung von Störungen auf entspiegelten Bildschirmen durch gerichtete wie auch durch gestreute Reflexion im Zusammenhang mit Büroarbeit bei Tageslicht und künstlicher Beleuchtung ist eine Beschränkung der Beleuchtungsstärke auf 3000 lx sowie die Einhaltung der Blendungsbegrenzung UGR 19 ausreichend.

Zur Erkennung der Farbcodierung von Bildschirmen wird nach DIN EN ISO 9241-307 ein Farbabstand von $\Delta E_{uv} \geq 20$ gefordert. Dieser muss auch unter einer gegebenen Beleuchtung erreicht werden. Für ausgewählte Testfarben wurden bei 1000 lx und bei 3000 lx in der Bildschirmenebene die Farbabstände der Farben untereinander gemessen. Bei 1000 lx entsprachen alle Farbabstände der Anforderung und lagen über 20. Bei 3000 lx in der Bildschirmenebene ergaben sich bei dunkleren Farben mehrheitlich Farbabstände unter 20. Die subjektive Einschätzung durch den Versuchsleiter zeigte, dass in diesen Fällen die Unterscheidung schwierig oder nicht mehr möglich war. Daraus ist abzuleiten, dass Bildschirme für eine vorgesehene Bildschirmbeleuchtungsstärke von mindestens 1500 Lux bis 2000 Lux ausgelegt sein sollten.

In der Norm DIN EN 12464-1:2011-08 sind für Leuchten, die sich in Bildschirmen spiegeln können, Grenzleuchtdichten festgelegt. Für Büroarbeit (d. h. Zeichen in Positivkontrast) beträgt für Bildschirmleuchtdichten unter 200 cd/m^2 diese Grenzleuchtdichte 1500 cd/m^2 . Die Untersuchung hat gezeigt, dass für moderne Bildschirme diese Begrenzung nicht mehr notwendig ist. Vielmehr sind auch für diese Bildschirme Grenzleuchtdichten von 3000 cd/m^2 als unkritisch anzusehen, die nach DIN EN 12464-1 nur für Bildschirmleuchtdichten ab 200 cd/m^2 zugelassen sind. Der Anwender hat damit die Möglichkeit, nach dem aktuellen Stand der Technik zu planen.