Evaluation zur Störung der Anzeigen von LCD-Bildschirmen durch die Beleuchtung

Bearbeiter:

TU Ilmenau
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz
Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
98693 Ilmenau
Prof.-Schmidt-Str. 26
(03677) 69-3731

HAWK Hildesheim
Fakultät Gestaltung
Lighting Design
Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits

31134 Hildesheim
Kaiserstraße 43-45
(05121) 881-350

Auftraggeber:

Gesetzliche Unfallversicherung VBG
Sachgebiet Büro
Deelbögenkamp 4
22339 Hamburg

Ilmenau, März 2012

Inhalt

1. Ziel 4
2. Aufgabenstellung 4
3. Reflexe auf Bildschirmoberflächen 4
4. Messtechnische Bestimmung der Reflexionsgrade 6
   4.1 Gerichtete Komponente 6
   4.2 Diffuse Komponente 6
5. Kontrastberechung nach DIN EN ISO 9241-307 7
   5.1 Anforderungen an Leuchten bei Virtualitätsdarstellung 7
   5.2 Anforderungen an die Leuchten bei Realitätsdarstellung 8
6. Verwendete Bildschirme und Bildschirmeinstellungen 9
   6.1 Bildschirm BS1 9
   6.2 Bildschirm BS2 10
   6.3 Bildschirm BS3 10
7. Versuchsaufbau 11
   7.1 Untersuchungen zur gerichteten Reflexion 11
   7.2 Untersuchungen zur gestreuten Reflexion 13
8. Direkte Reflexion: Bewertungsergebnisse 15
   8.1 Median der Angaben für „merkbar“ bzw. „störend“ 15
   8.2 Median und Minimum der Angaben für „merkbar“ bzw. „störend“ 16
9. Gestreute Reflexion: Bewertungsergebnisse 17
   9.1 Median der Angaben für „merkbar“ und „störend“ 17
   9.2 Median, Minimum und Maximum der Angaben für „merkbar“ und „störend“ 18

10. Gestreute Reflexion: Messung der Kontraste 19
10.1 Textdarstellung 19
10.2 Darstellung eines Fotos 21
10.3 Gemessene Kontraste und Vergleich mit Probandenangaben 21
10.4 Vergleich der Kontraste bei verschiedenen Beleuchtungsrichtungen 23
11. Direkte Reflexion: Leuchtdichte und Kontrast 25
11.1 Leuchtdichtemessung schwarzer Bildschirm, L_{max} 25
11.2 Leuchtdichtemessung bei L_H = 115 cd/m^2, L_{max} 26
11.3 Leuchtdichtemessung bei L_H = 115 cd/m^2, L bei „merkbar“ bzw. „störend“ 27
11.4 Kontraste bei Spiegelung von Linie und Rechteck 28
12. Vergleich der subjektiven mit den berechneten Werten 30
12.1 Vergleich gerichtete Reflexion 30
12.2 Vergleich bei gestreuter Reflexion 30
13. Messung von Bildschirmfarben und Farbabständen 31
14. Zusammenfassung und Empfehlungen für künftige Normen 36

1. Ziel

Durch das Projekt sollen wissenschaftlich abgesicherte Ergebnisse gewonnen werden, für die Ableitung von:

- Zielstellungen für die Normung im Bereich "Bildschirmanforderungen" (z. B. DIN EN ISO 9241-30x) hinsichtlich der Robustheit von Bildschirmen gegen Umgebungslicht (Beleuchtungsstärken, Leuchtdichten);

- Zielstellungen für die Normung im Bereich „Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen“ (z. B. DIN 5035-7 “Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen“) hinsichtlich maximaler Leuchtdichten von Leuchten;

- Empfehlungen für die Qualität von Bildschirmen und die Gestaltung der Beleuchtung an Bildschirmarbeitsplätzen für BG-Informationen (z. B. BGI 650 „Bildschirm- und Büroarbeitsplätze“, BGI 856 "Beleuchtung im Büro").

2. Aufgabenstellung

- Untersuchung der Störung durch Schleierleuchtdichte und Spiegelbilder bei der Variation von Parametern. Die Untersuchung wird auf der Basis von Urteilen durchgeführt.

- Ableitung von Zielstellungen für die Normung

- Die Untersuchungen werden gemeinsam von der TU Ilmenau und der HAWK Hildesheim durchgeführt

3. Reflexe auf Bildschirmoberflächen

Reflexionen auf Bildschirmen führen im Allgemeinen zur Verringerung des Kontrastes auf dem Bildschirm. Der Ausgangskontrast eines Bildschirmes (ohne Beleuchtung) ist dabei wie folgt definiert:

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

Bei Positivdarstellung (schwarzes Zeichen auf hellem Hintergrund) entspricht L_H der Hintergrundleuchtdichte und L_L der Zeichenleuchtdichte. In der Negativdarstellung ist es entsprechend umgekehrt (siehe Bild 1). Die messtechnische Bestimmung erfolgt, indem die Leuchtdichten im ein- und im ausgeschalteten Zustand (stromlos oder dunkelstes Schwarz) gemessen werden.

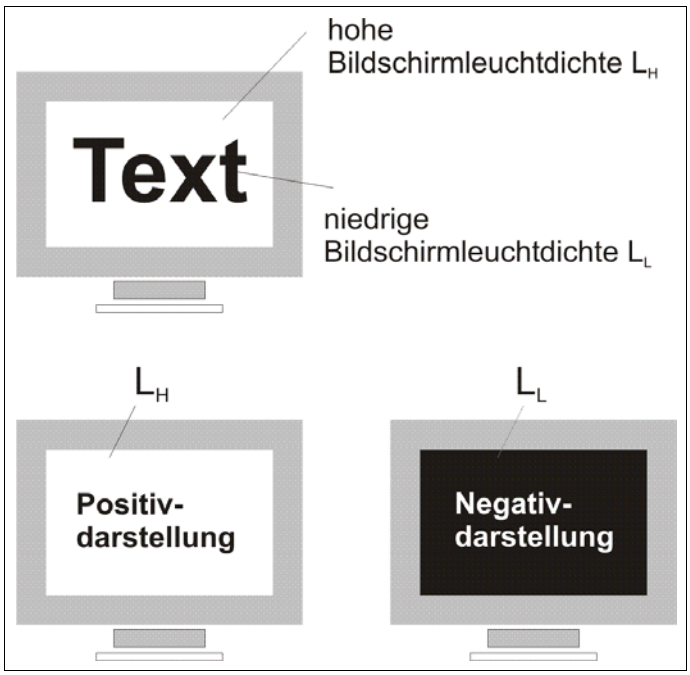


Bild 1: Leuchtdichtedarstellung auf dem Bildschirm

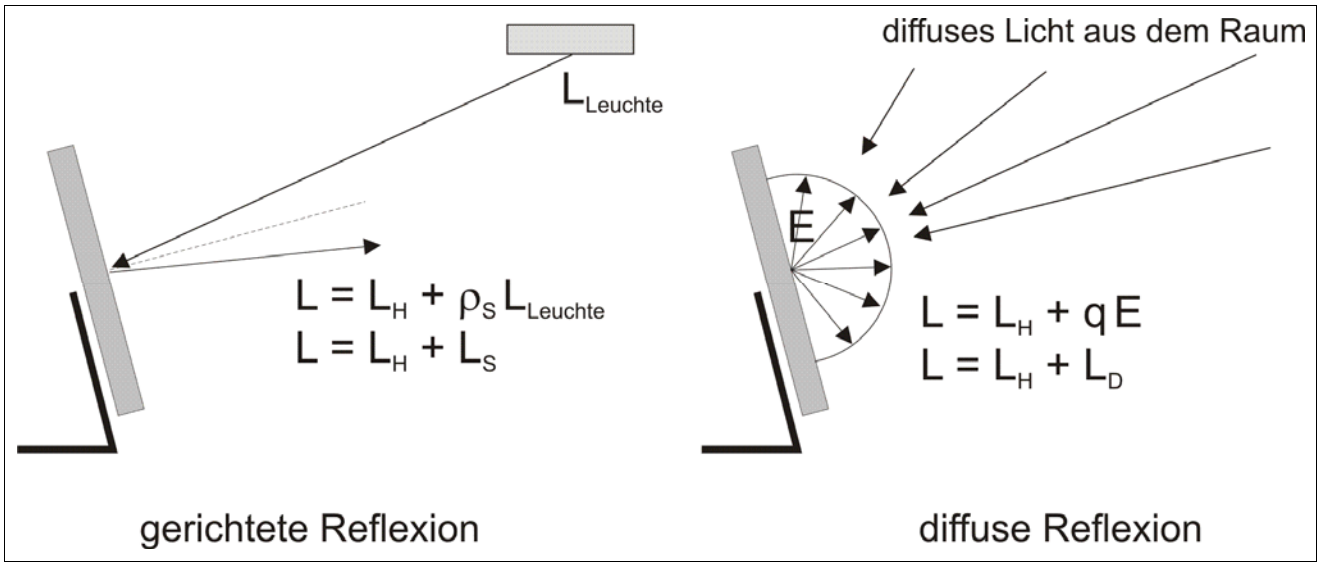


Bild 2: Gerichtete und diffuse Reflexion an der Bildschirmoberfläche

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

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) $$L_S = \rho_s \cdot L_{Leuchte}$$

Die diffuse Komponente L_D lässt sich über den Leuchtdichtekoeffizient q und die auf dem Bildschirm herrschende Beleuchtungsstärke bestimmen.

(3) $L_D = q \cdot E$

Diesen kann man in den Grad der diffusen Reflexion ρ_d umrechnen:

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

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

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

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.

4. Messtechnische Bestimmung der Reflexionsgrade

4.1 Gerichtete Komponente

Laut DIN EN ISO 9241-305 kann ρ_S als Verhältnis zwischen der Leuchtdichte des Reflexes L_S und der Leuchtenleuchtdichte $L_{Leuchte}$ ermittelt werden:

(6) $\rho_S = \frac{L_S}{L_{Leuchte}}$

Bei der Untersuchung wurden die Messwerte L_S und $L_{Leuchte}$ aus Leuchtdichtebildern entnommen.

4.2 Diffuse Komponente

Laut DIN EN ISO 9241-305 kann ρ_d als Verhältnis zwischen der Leuchtdichte des Reflexes L_D und der Leuchtdichte einer diffusen Fläche an der Bildschirmposition $L_{diff,}$ multipliziert mit dem diffusen Reflexionsgrad ρ_{diff} dieser Fläche angegeben werden:

(7) $\rho_d = \rho_{diff} \frac{L_D}{L_{diff}}$

Die Ermittlung erfolgte ebenfalls mir einer Leuchtdichtekamera. Als diffuse Fläche wurde ein weißes Papier mit einem diffusen Reflexionsgrad von ρ_{diff} = 0,88 verwendet. Dieser Wert wurde mit Hilfe einer Messung von Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke ermittelt.

5. Kontrastberechung nach DIN EN ISO 9241-307

5.1 Anforderungen an Leuchten bei Virtualitätsdarstellung

Nach DIN EN ISO 9241-307 bestehen folgende Anforderungen an Bildschirme in Positivdarstellung. Sie gelten sowohl für CRT als auch für LCD Bildschirme:

(8) $$\frac{L_H + L_D + L_S}{L_L + L_D + L_S} \geq 2{,}2 + 4{,}84 \cdot (L_L + L_D + L_S)^{-0{,}65}$$

(9) $$\frac{L_H + L_D + L_S}{L_H + L_D} \leq 1{,}25$$ daraus folgt: $L_S = \rho_S \cdot L_{Leuchte} \leq 1{,}25 \cdot (L_H + L_D) - (L_H + L_D)$

$$L_{Leuchte} \leq \frac{L_H + L_D}{4 \cdot \rho_S}$$

(10) $$CR_{min} = \frac{L_H + L_D + L_S}{L_L + L_D + L_S} = 2{,}2 + 4{,}84 \cdot (L_L + L_D + L_S)^{-0{,}65}$$

Für die gegebenen Bildschirme wurden für verschiedene Situationen die Anforderungen berechnet (Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 1: Zulässige maximale Leuchtenleuchtdichte $L_{Leuchte}$ (gerundet) und minimale Kontraste CR_{min} bei verschiedenen Bildschirmbeleuchtungsstärken E und Bildschirmhintergrundleuchtdichte L_H

		BS1		BS2		BS3	
E in lx	L_H in cd/m²	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}
0	200	12 000	5,2	56 000	4,9	1 000	5,2
	150	8 800	4,9	42 000	4,7	800	4,3
	115	6 800	4,9	32 000	4,8	600	4,2
	80	4 700	4,8	22 000	4,8	400	3,9
300	200	12 000	4,7	56 000	4,7	1 000	5,2
	150	9 000	4,6	42 000	4,7	800	4,3
	115	7 000	4,5	32 000	4,6	600	4,2
	80	4 900	4,3	23 000	4,3	400	3,9
1400	200	12 000	4,1	60 000	3,9	1 000	5,2
	150	9 700	3,7	46 000	3,6	800	4,3
	115	7 500	3,5	36 000	3,4	600	4,1
	80	5 500	3,1	26 000	2,6	400	3,9

Tabelle 2: Zulässige Bildschirmbeleuchtungsstärken (gerundet) für $L_{Leuchte}$ = 0 cd/m²

		BS1		BS2		BS3	
$L_{Leuchte}$ in cd/m²	L_H in cd/m²	E in lx	CR_{min}	E in lx	CR_{min}	E in lx	CR_{min}
0	200	15 000	2,4	13 000	2,4	225 000	2,5
	150	11 000	2,5	9 500	2,5	150 000	2,6
	115	8 000	2,5	7 000	2,5	110 000	2,6
	80	5 000	2,7	4 500	2,6	65 000	2,6

5.2 Anforderungen an die Leuchten bei Realitätsdarstellung

Nach DIN EN ISO 9241-307 bestehen folgende Anforderungen an Bildschirme für Realitätsdarstellung. Sie gelten sowohl für CRT als auch für LCD Bildschirme:

(11) $$\frac{L_H + L_D + L_S}{L_L + L_D + L_S} \geq 6{,}7 + 44{,}89 \cdot (L_L + L_D + L_S)^{-0{,}65}$$

(12) $$CR_{min} = \frac{L_H + L_D + L_S}{L_L + L_D + L_S} = 6{,}7 + 44{,}89 \cdot (L_L + L_D + L_S)^{-0{,}65}$$

Für die gegebenen Bildschirme wurden für verschiedene Situationen die Anforderungen berechnet.

Tabelle 3: Zulässige maximale Leuchtenleuchtdichte $L_{Leuchte}$ (gerundet) und minimale Kontraste CR_{min} bei verschiedenen Bildschirmbeleuchtungsstärken E und Bildschirmhintergrundleuchtdichte L_H
* auch bei $L_{Leuchte}$ = 0 cd/m² Mindestkontrast nicht erzielbar

		BS1		BS2		BS3	
E in lx	L_H in cd/m²	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}	$L_{Leuchte}$ in cd/m²	CR_{min}
0	200	3 200	14,9	14 000	15,6	170	14,9
	150	1 900	17,9	8 900	17,4	50	18,2
	115	1 100	21,8	5 000	21,4	*	
	80	440	30,2	1 700	30,8	*	
300	200	2 600	14,8	12 000	15,2	170	14,7
	150	1 300	17,6	6 400	17,4	50	17,9
	115	490	21,5	2 500	21,4	*	
	80	*		*		*	
1400	200	220	14,5	*		150	15,0
	150	*		*		*	19,4
	115	*		*		*	
	80	*		*		*	

Tabelle 4: Zulässige Bildschirmbeleuchtungsstärken (gerundet bei $L_{Leuchte}$ = 0 cd/m²
* auch bei E = 0 lx Mindestkontrast nicht erzielbar

		BS1		BS2		BS3	
$L_{Leuchte}$ in cd/m²	L_H in cd/m²	E in lx	CR_{min}	E in lx	CR_{min}	E in lx	C
0	200	1 500	14,5	1 200	15,5	14 000	14,8
	150	850	18,1	750	17,5	4 000	18,4
	115	500	21,8	420	21,5	*	
	80	200	30,2	145	30,7	*	

6. Verwendete Bildschirme und Bildschirmeinstellungen

Für die Untersuchungen wurden die Bildschirme ausschließlich in Positivdarstellung betrieben. Den Testpersonen wurde ein Text (schwarze Zeichen mit L_L auf hellem Hintergrund mit 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.

Mit ortsaufgelöster Messtechnik wurden für alle Bildschirme die Kontraste C_0 ohne zusätzliche Beleuchtung vermessen. Zunächst wurde die Leuchtdichteverteilung für den schwarzen Bildschirm (entspricht L_L) und für alle untersuchten Bildschirmleuchtdichten bestimmt (entspricht L_H). Daraus ergibt sich der Kontrast C_0 an allen Punkten auf der Bildschirmoberfläche nach Gleichung (13):

$$C_0 = \frac{L_H}{L_L} \qquad (13)$$

Aus den Verteilungen wurden Minimalwert, Maximalwert und Mittelwert entnommen.

6.1 Bildschirm BS1

Flachbildschirm mit mäßiger Entspiegelung (matte Oberfläche)
Bilddiagonale 38,5 cm

Tabelle 5: Kennzahlen des Bildschirmes BS1

q in cd/m^2/lx	ρ_d	ρ_s
0,0092	0,029	0,0042

Tabelle 6: Bildschirmleuchtdichten L_L ohne Beleuchtung

	L_L
$L_{L\ min}$ in cd/m^2	0,47
$L_{L\ max}$ in cd/m^2	4,86
$L_{L\ mittel}$ in cd/m^2	1,17

Tabelle 7: Bildschirmleuchtdichten L_H und Kontraste ohne Beleuchtung für die Textdarstellung

	L_H = 200 cd/m^2	L_H = 150 cd/m^2	L_H = 115 cd/m^2	L_H = 80 cd/m^2
$L_{H\ min}$ in cd/m^2	180	125	83	55
$L_{H\ max}$ in cd/m^2	237	209	173	140
$L_{H\ mittel}$ in cd/m^2	216	170	130	99
C_{min}	47	42	34	27
C_{max}	451	312	220	156
C_{mittel}	232	176	131	98

Tabelle 8: Bildschirmleuchtdichten und Kontraste ohne Beleuchtung für das Foto

	Foto
L_{max} in cd/m^2	226,0
L_{min} in cd/m^2	3,5
C	65,0

6.2 Bildschirm BS2

Flachbildschirm mit guter Entspiegelung (matte Oberfläche)
Bilddiagonale 48 cm

Tabelle 9: Kennzahlen des Bildschirmes BS2

q in cd/m²/lx	ρ_d	ρ_s
0,0105	0,033	0,00089

Tabelle 10: Bildschirmleuchtdichten L_L ohne Beleuchtung

	L_L
$L_{L\ min}$ in cd/m²	0,20
$L_{L\ min}$ in cd/m²	0,50
$L_{L\ mittel}$ in cd/m²	0,24

Tabelle 11: Bildschirmleuchtdichten und Kontraste ohne Beleuchtung

	L_H = 200 cd/m²	L_H = 150 cd/m²	L_H = 115 cd/m²	L_H = 80 cd/m²
$L_{H\ min}$ in cd/m²	149	82	42	103
$L_{H\ max}$ in cd/m²	232	182	138	24
$L_{H\ mittel}$ in cd/m²	201	143	90	66
C_{min}	380	218	119	70
C_{max}	962	722	537	404
C_{mittel}	799	563	384	267

Tabelle 12: Bildschirmleuchtdichten und Kontraste ohne Beleuchtung für das Foto

	Foto
L_{max} in cd/m²	221,0
L_{min} in cd/m²	1,3
C	177,0

6.3 Bildschirm BS3

Hochglänzender Flachbildschirm
Bilddiagonale 54.6 cm (21.5 Zoll)

Tabelle 13: Kennzahlen desBildschirmes BS3

q in cd/m²/lx	ρ_d	ρ_s
0,00057	0,0018	0,047

Tabelle 14: Bildschirmleuchtdichten L_L ohne Beleuchtung

	L_L
$L_{L\ min}$ in cd/m²	0,20
$L_{L\ min}$ in cd/m²	0,77
$L_{L\ mittel}$ in cd/m²	0,32

Tabelle 15: Bildschirmleuchtdichten und Kontraste ohne Beleuchtung

	L_H = 200 cd/m²	L_H = 150 cd/m²	L_H = 115 cd/m²	L_H = 80 cd/m²
$L_{H\ min}$ in cd/m²	198	128	102	70
$L_{H\ max}$ in cd/m²	240	160	129	89
$L_{H\ mittel}$ in cd/m²	223	146	117	81
C_{min}	265	170	134	94
C_{max}	1020	664	529	366
C_{mittel}	738	484	386	268

Tabelle 16: Bildschirmleuchtdichten und Kontraste ohne Beleuchtung für das Foto

	Foto
L_{max} in cd/m²	230,0
L_{min} in cd/m²	1,8
C	129,0

7. Versuchsaufbau

7.1 Untersuchungen zur gerichteten Reflexion

Die Untersuchungen fanden im Lichtlabor der HAWK Hildesheim, Kompetenzfeld Lighting Design statt.

Vor einer weiß verhängten Wand wurde der Arbeitstisch mit den drei Bildschirmen positioniert. Die Beleuchtung des Arbeitstisches wurde mit Hilfe von regelbaren Wandflutern und einer mobilen Spiegelrasterleuchte so optimiert, 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 befanden 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 freistrahlende Lichtleiste mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung realisiert. Um das Leuchtenumfeld bei der Dimmung stabil zu halten, wurde der rückwärtige Lichtstrom durch schwarzes Blendenmaterial absorbiert.

Die Rechteck-Leuchte bestand aus einem tiefstrahlenden Rinnenstrahler mit T16 Leuchtstofflampen-Bestückung dessen Austrittsfläche mit einer Diffusorscheibe abgedeckt war. Die Lichtaustrittsfläche wurde auf die oben angegebene Größe durch eine Maskierung reduziert. 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“ (bei den Bildschirmen BS1 und BS2) bzw. als „störend“ (BS3) empfanden.

Bei den Monitoren 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 BS3 waren die Spiegelbilder der Störquellen auch bereits bei der niedrigsten Dimmstellung sichtbar. Daher wurde hier auf das Urteil „merkbar“ verzichtet.

Bild 3: Fotos der Untersuchungen zur direkten Reflexion in Hildesheim

7.2 Untersuchungen zur gestreuten 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 „merkbare“ Änderung wahrgenommen zu werden. Daher kam zusätzlich ein Scheinwerfer zum Einsatz. 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 65 000 lx (Maximalwert auf der Fläche des Bildschirmes) möglich. Wenn im Folgenden Beleuchtungsstärken angegeben sind, handelt es sich immer um die maximalen Werte auf der Bildschirmfläche (entsprechend Bild 6), da davon ausgegangen wird, dass der Beobachter die größte Störung innerhalb der Bildschirmoberfläche bewertete.

Durch die Verwendung des Scheinwerfers entspricht der gewählte Versuchsaufbau nicht den Mess- und Bewertungskriterien für eine diffuse Beleuchtung, die für die Festlegung zulässiger Beleuchtungsstärke gefordert wird. 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.

Um den Einfluss der Lichtrichtung zu ermitteln, wurden für eine weitere Einstrahlrichtung (60°) Leuchtdichten und Kontraste bestimmt.

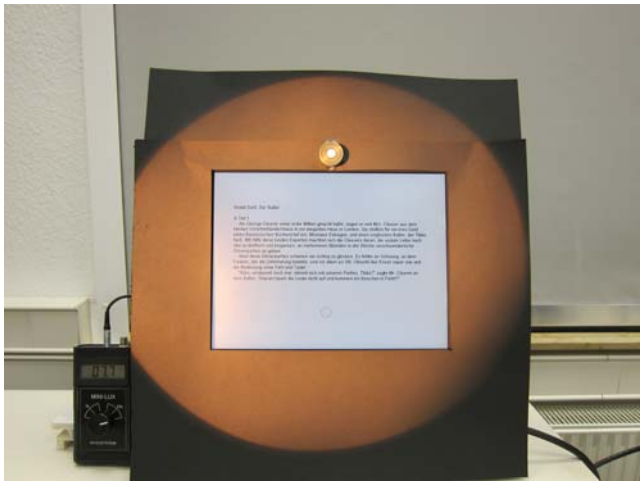


Bild 4: Fotos der Untersuchungen zur gestreuten Reflexion in Ilmenau

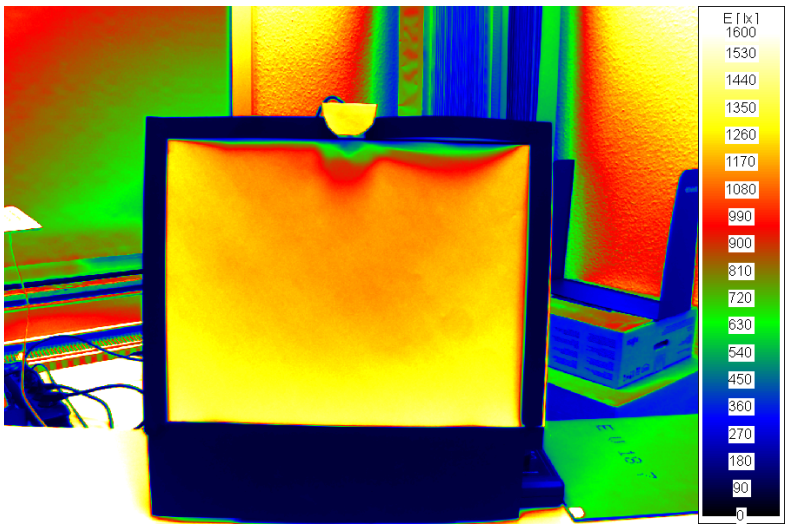


Bild 5: Raumbeleuchtung: Beleuchtungsstärkeverteilung in der Bildschirmebene
(Skala entspricht nur innerhalb der Bildschirmfläche den realen Messwerten)

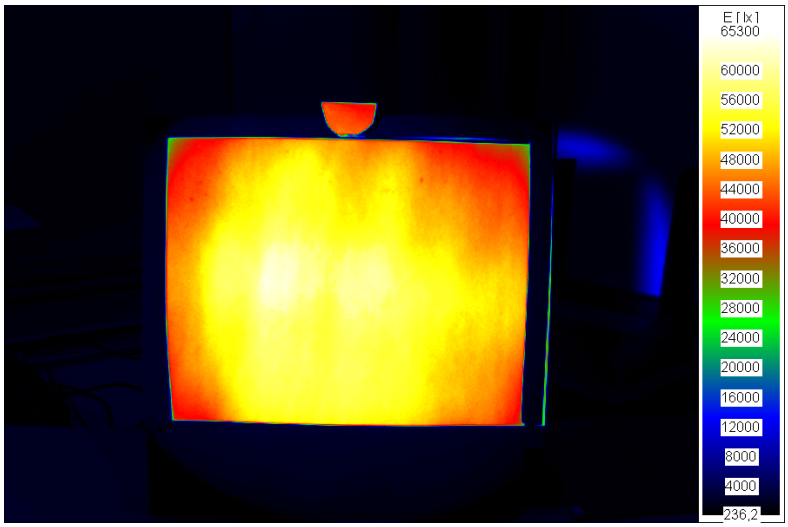


Bild 6: Scheinwerferbeleuchtung: Beleuchtungsstärkeverteilung in der Bildschirmebene
(Skala entspricht nur innerhalb der Bildschirmfläche den realen Messwerten)

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. Auf dem Bildschirm wurde dabei der gleiche Text dargestellt, wie in den Untersuchungen zur direkten Reflexion.

Während der Betrachtung des Bildschirmes 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.

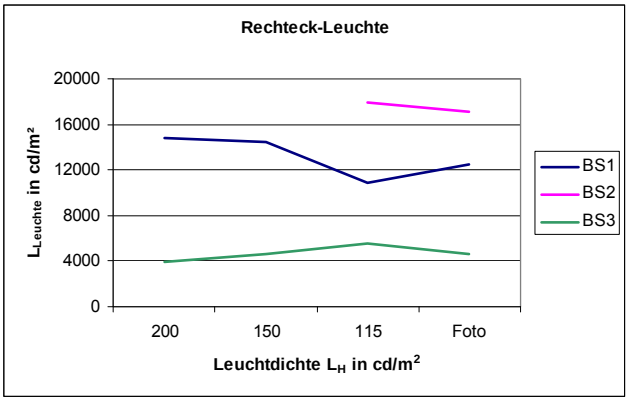
8. Direkte Reflexion: Bewertungsergebnisse

8.1 Median der Angaben für „merkbar“ bzw. „störend“

In den folgenden Bildern ist der Median 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 Bildschirmes abhängig.

Beim glänzenden BS3 wurden bereits Leuchten-Leuchtdichten größer als 4000 cd/m² als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte ($L_{Leuchte}$ < 1500 cd/m²) gestört. Eine weitere Versuchsperson hingegen fühlte sich auch bei der höchsten realisierbaren Leuchtleuchtdichte 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.



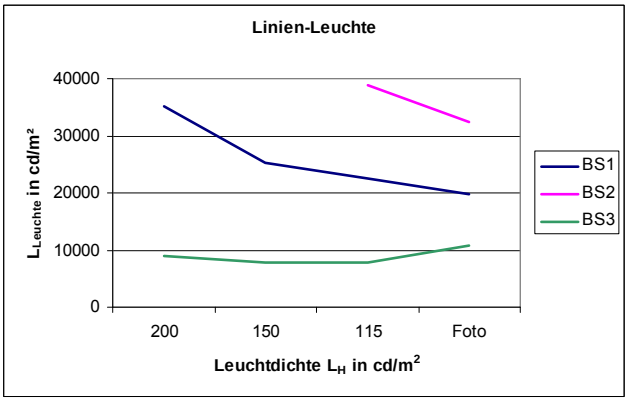


Bild 7: Median der Angabe für „merkbar“ für BS1 und BS2, „störend“ für BS3 für die Recheck-Leuchte (links) und die Linien-Leuchte (rechts)

8.2 Median und Minimum der Angaben für „merkbar“ bzw. „störend“

In den folgenden Bildern sind der Median und das Minimum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ bzw. „störend“ dargestellt. Die Werte der y-Achse entsprechen der Leuchtdichte der sich spiegelnden Leuchte $L_{Leuchte}$.

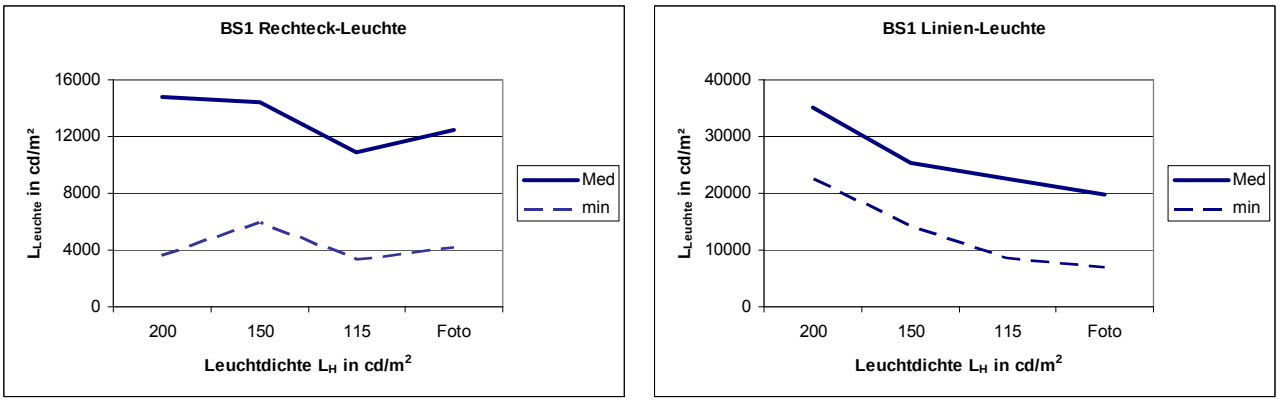


Bild 8: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS1

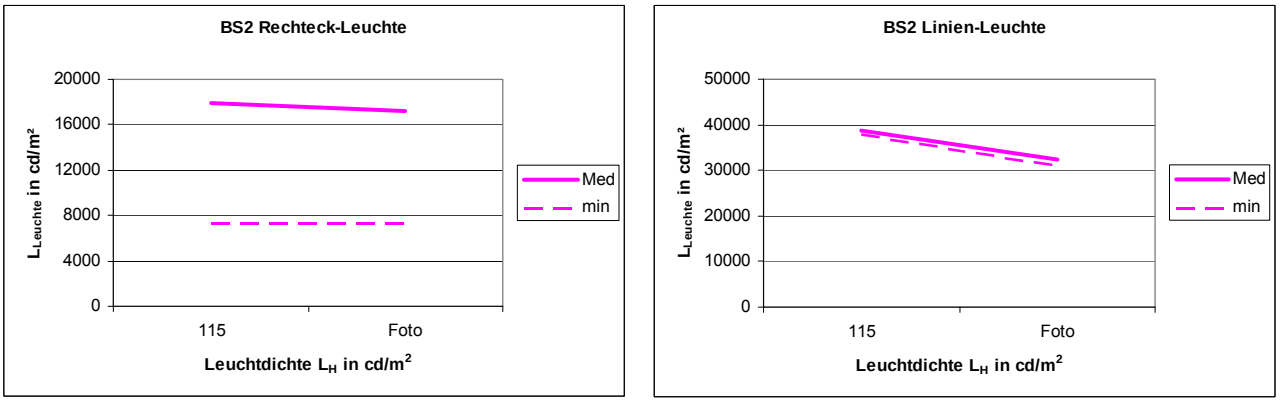


Bild 9: Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ für BS2

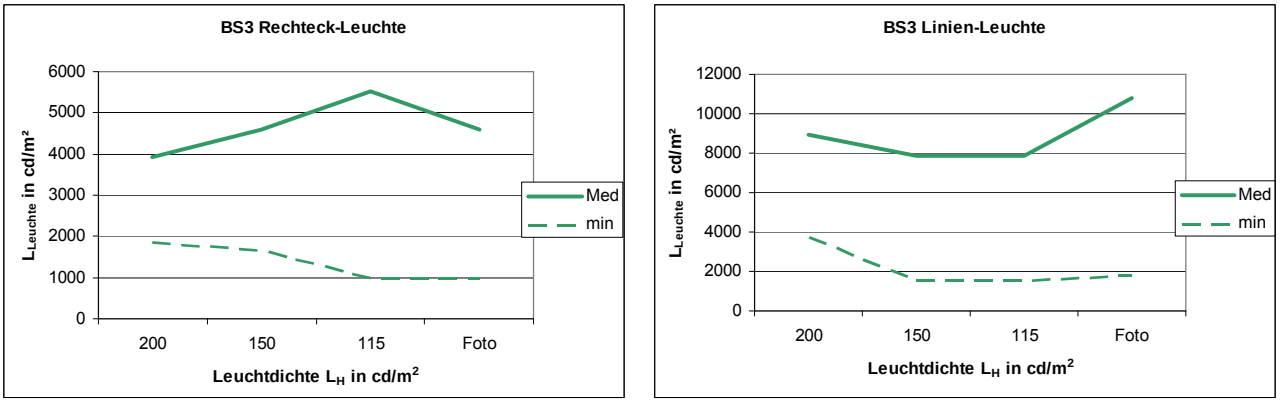


Bild 10: Median und Minimum der Angabe für „störend“ für BS3

9. Gestreute Reflexion: Bewertungsergebnisse

9.1 Median der Angaben für „merkbar“ und „störend“

In den folgenden Bildern ist der Median über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ und „störend“ dargestellt. Der Werte der y-Achse entsprechen dem Maximalwert der Beleuchtungsstärke auf dem Bildschirm (Maximalwert gemäß Bild 6)

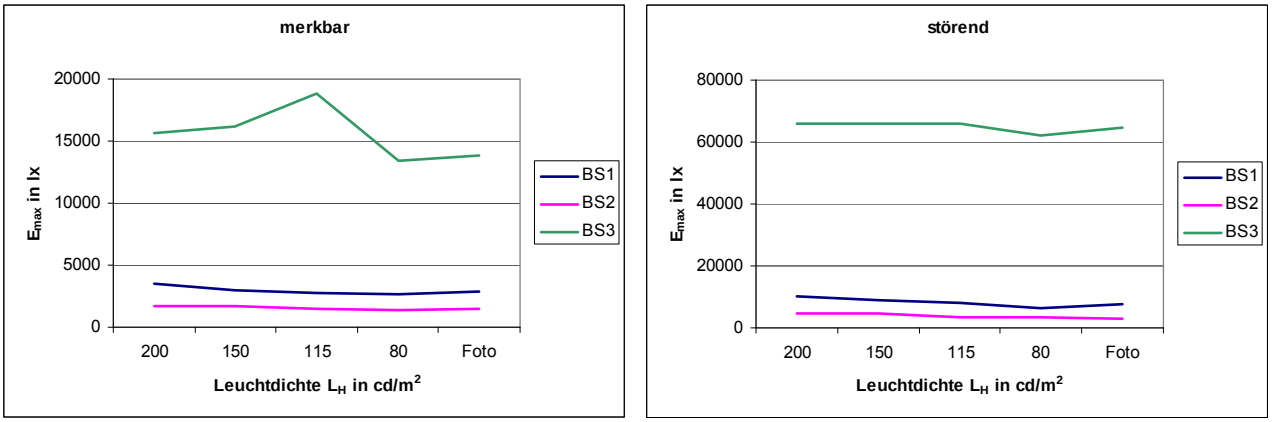


Bild 11: Median der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für alle Bildschirme

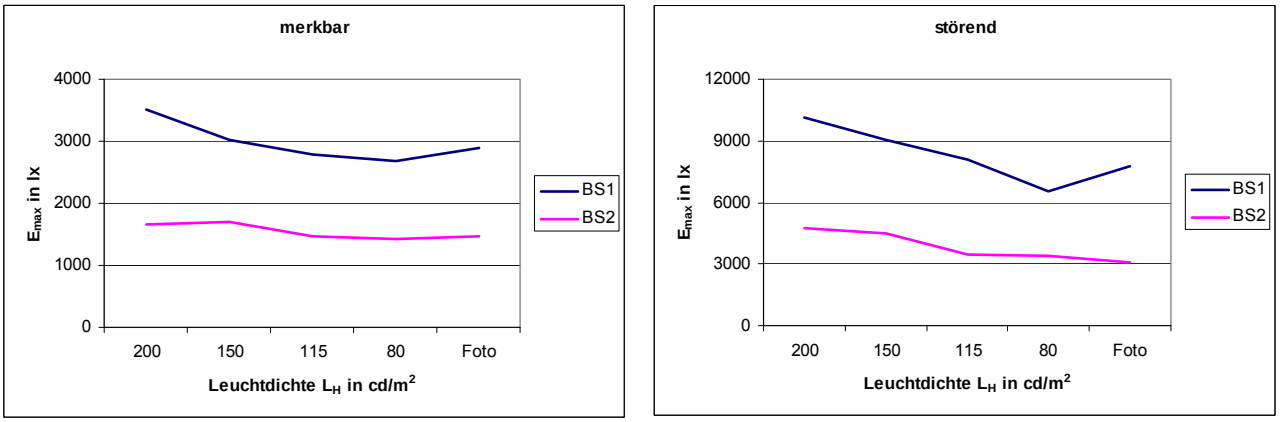


Bild 12: Median der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS1 und BS2, entspricht Bild 11 mit anderer Skalierung der y-Achse

9.2 Median, Minimum und Maximum der Angaben für „merkbar“ und „störend“

In den folgenden Bildern sind der Median sowie Minimum und Maximum über alle 21 Versuchspersonen für die Angabe „merkbar“ und „störend“ dargestellt. Der Werte der y-Achse entsprechen dem Maximalwert der Beleuchtungsstärke auf dem Bildschirm (Maximalwert gemäß Bild 6).

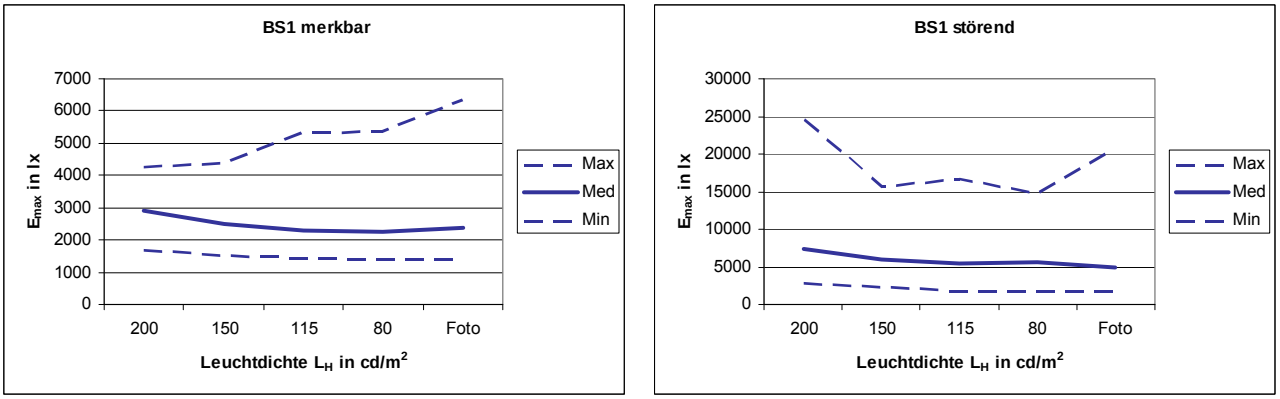


Bild 13: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS1

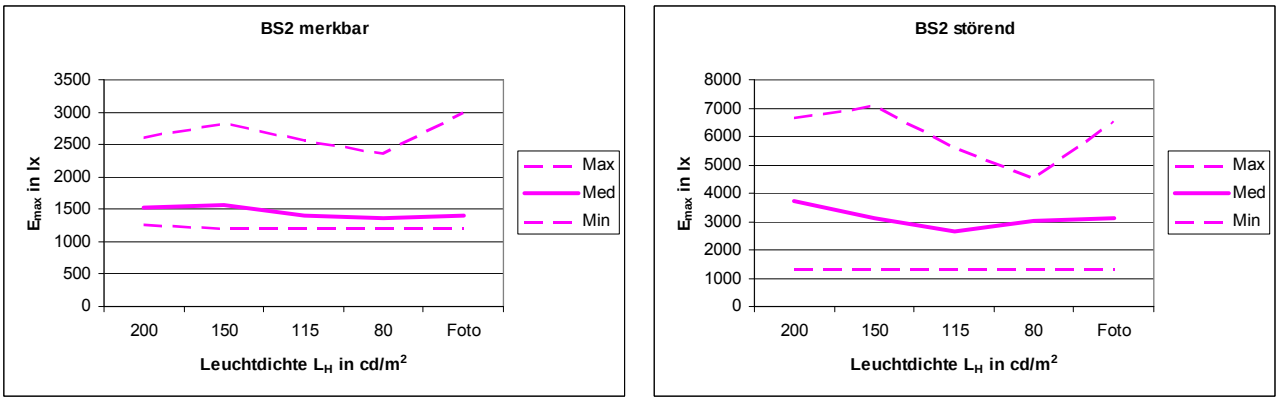


Bild 14: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS2

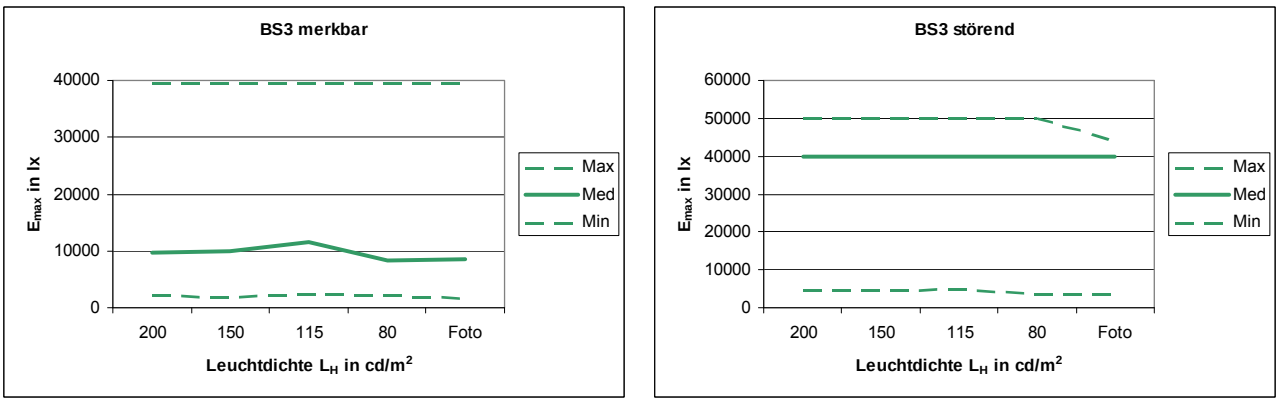


Bild 15: Maximum, Median und Minimum der Angabe für „merkbar“ und „störend“ für BS3

10. Gestreute Reflexion: Messung der Kontraste

10.1 Textdarstellung

Alle Bildschirme wurden mit ortsaufgelöster Messtechnik vermessen. Zunächst wurde die Leuchtdichteverteilung für den schwarz-getasteten Bildschirm (entspricht L_L+L_D) und für alle untersuchten Bildschirmleuchtdichten bestimmt (entspricht L_H+L_D). Daraus wurde der Kontrast an allen Punkten auf der Bildschirmoberfläche wie folgt berechnet:

$$C = \frac{L_H + L_D}{L_L + L_D} \tag{14}$$

Dargestellt ist das Beispiel BS2 mit einer maximalen Beleuchtungsstärke von 3554 lx (maximale Beleuchtungsstärke des Raumes auf der Bildschirmoberfläche 1993 lx und Scheinwerferbeleuchtung).

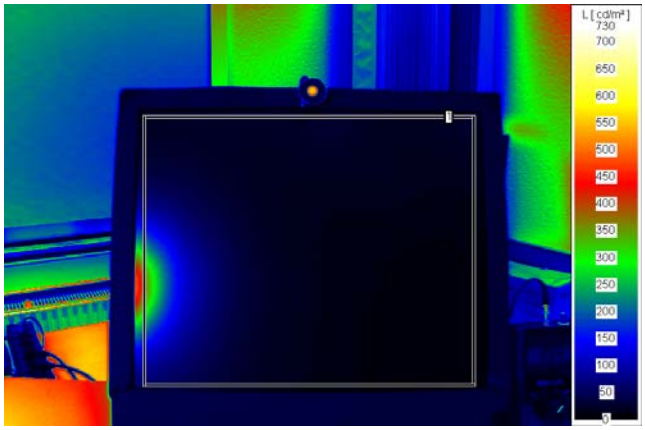


Bild 16: Leuchteverteilung L_L+L_D (schwarzer Bildschirm)

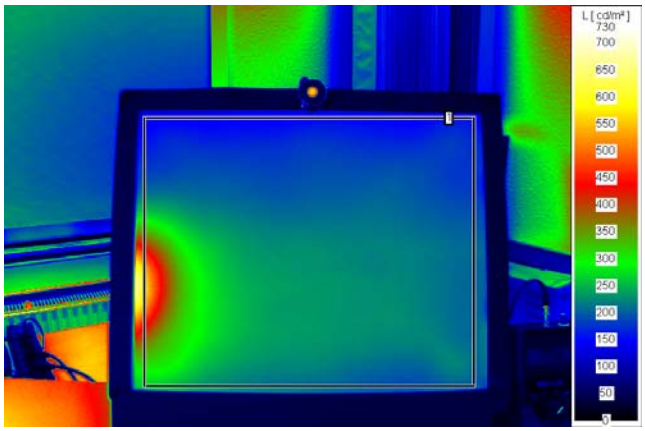


Bild 17: L_H + L_D bei L_H = 200 cd/m^2

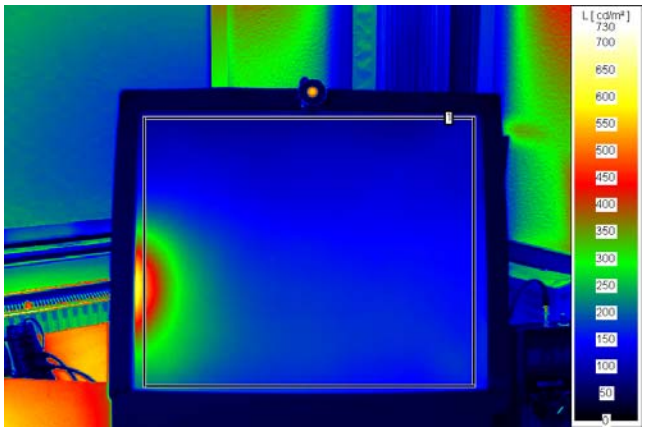


Bild 18: L_H + L_D bei L_H = 150 cd/m^2

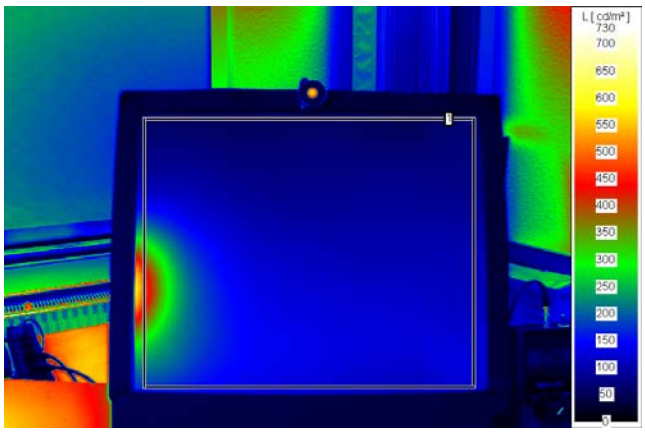


Bild 19: $L_H + L_D$ bei $L_H = 115\ cd/m^2$

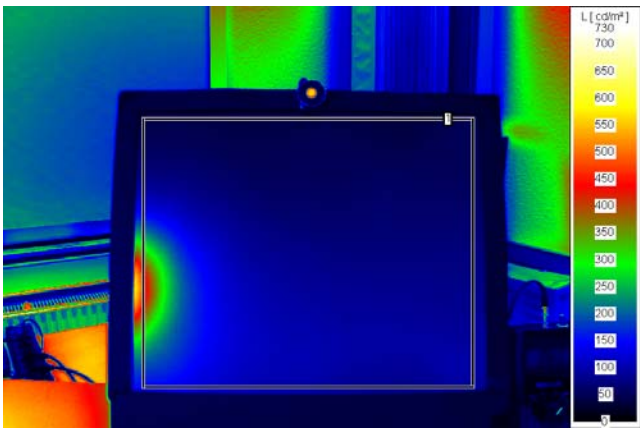


Bild 20: $L_H + L_D$ bei $L_H = 80\ cd/m^2$

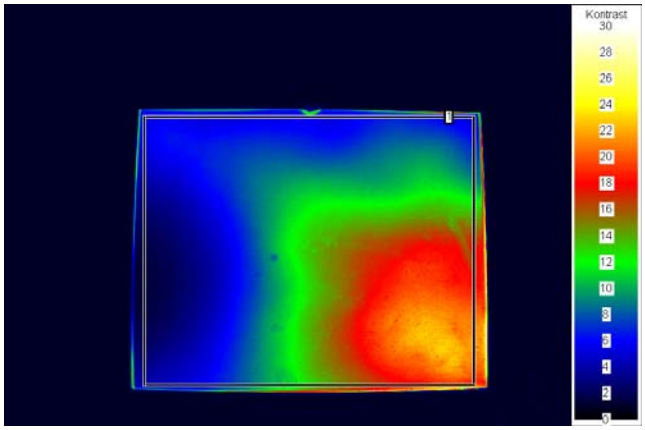


Bild 21: Kontrast für $L_H = 200\ cd/m^2$

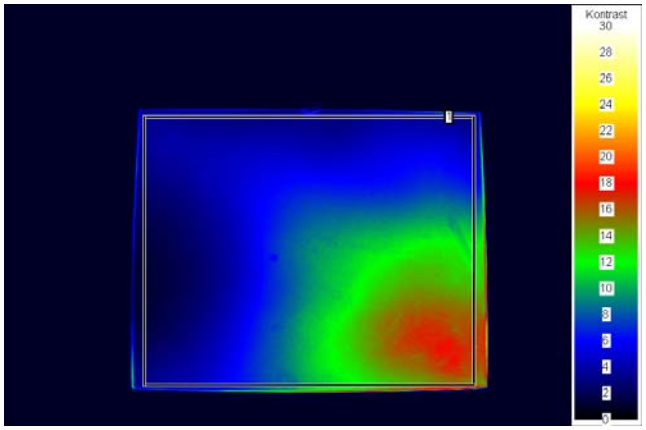


Bild 22: Kontrast für $L_H = 150\ cd/m^2$

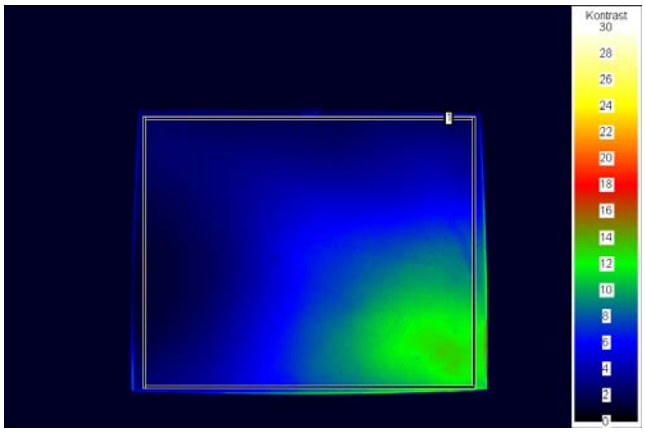


Bild 23: Kontrast für $L_H = 115\ cd/m^2$

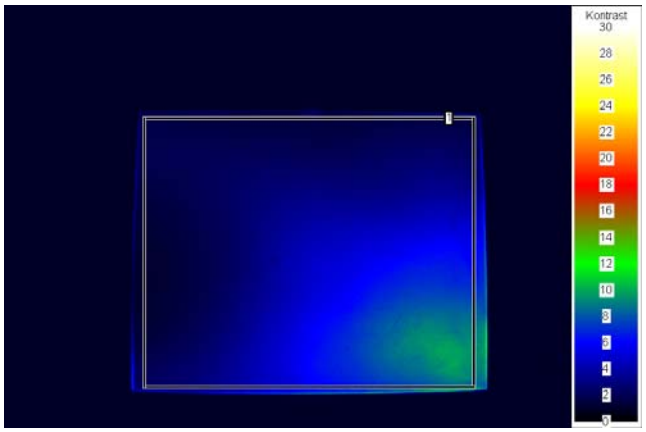


Bild 24: Kontrast für $L_H = 80\ cd/m^2$

10.2 Darstellung eines Fotos

Hier wurde die Leuchtdichteverteilung innerhalb der Fläche aus dem Minimalwert und dem Maximalwert berechnet. Das ist allerdings nicht der Kontrast, den der Betrachter wahrnimmt, da diese beiden Punkte weit auseinander liegen können. Zudem könnte es sich dabei um einzelne Pixel handeln, die völlig irrelevant sind.

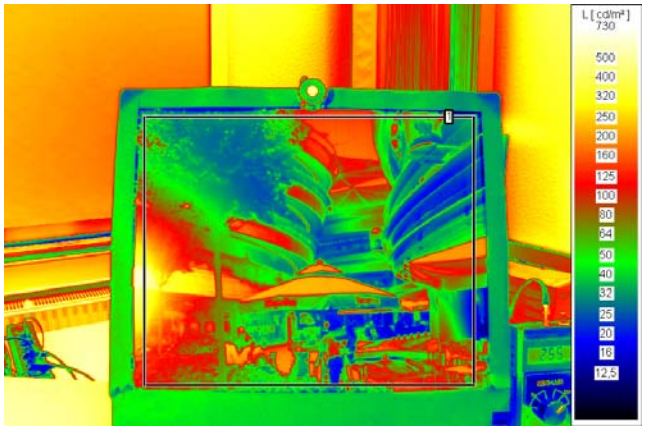


Bild 25: Leuchtdichteverteilung des Fotos

10.3 Gemessene Kontraste und Vergleich mit Probandenangaben

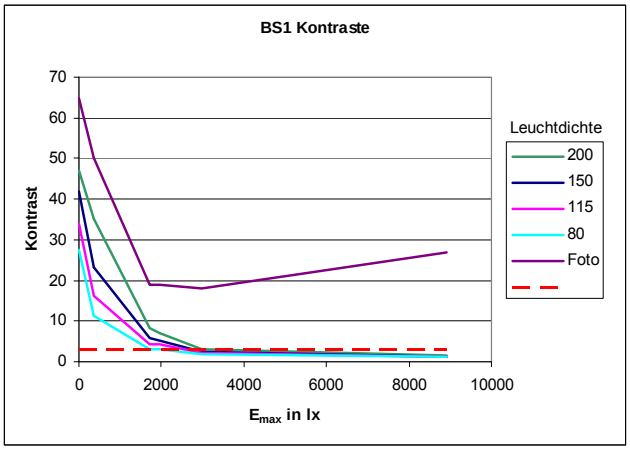
In den folgenden Bildern sind die gemessenen minimalen Kontraste in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmebene dargestellt. Das heißt, es wurden aus den Kontrastverteilungen (Kapitel 10.1) innerhalb der Bildschirmfläche der Minimalwert verwendet. Auf der rechten Seite ist zusätzlich der von den Probanden als „merkbar“ festgestellte Einstellwert der maximalen Beleuchtungsstärke gekennzeichnet.

Mit einer roten Linie ist der Kontrast von 3 gekennzeichnet, der früher in DIN EN ISO 9241-3 als Grenzwert angesehen wurde. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Mindestwerte nach DIN EN ISO 9241-307 differenzierter dargestellt. Sie liegen dort im Bereich 2,4 bis 5,2. Hier liegen die Kontraste in Bereichen nach Tabelle 17.

Tabelle 17: gemessene Kontrast bei der Einstellung „merkbar“

BS1	2 bis 3
BS2	2,7 bis 8
BS3	4,5 bis 8

Die Kontraste beim Foto sind aufgrund der abweichenden Kontrastbestimmung nicht vergleichbar.



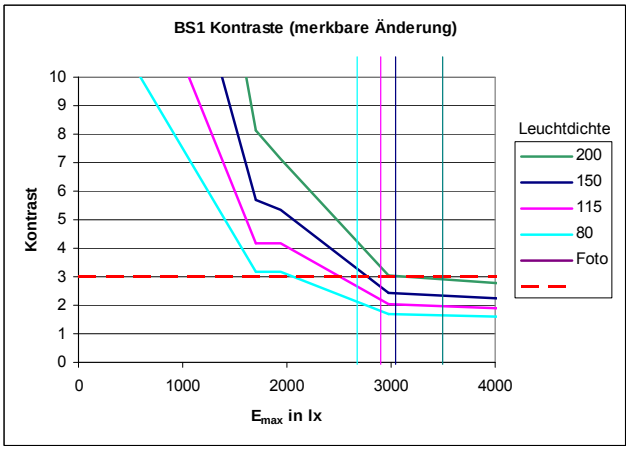
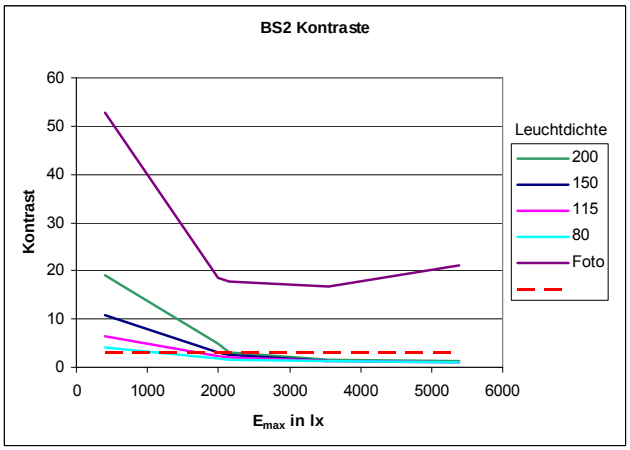


Bild 26: links: Minimaler gemessener Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS1 bei der Bewertung „merkbar“, rechts: gleiche Darstellung, die senkrechten Linien kennzeichnen den Median der subjektiven Einstellungen



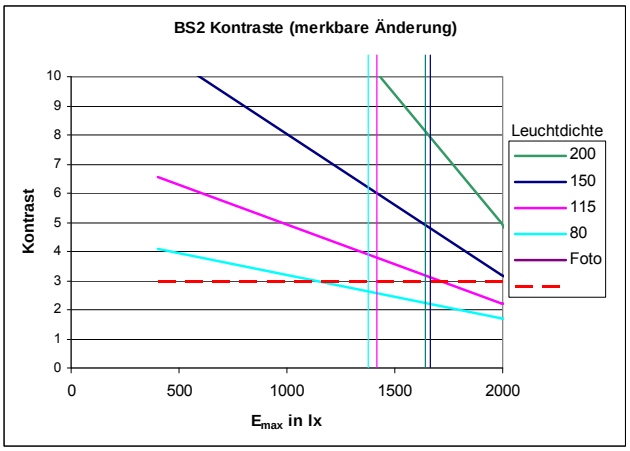
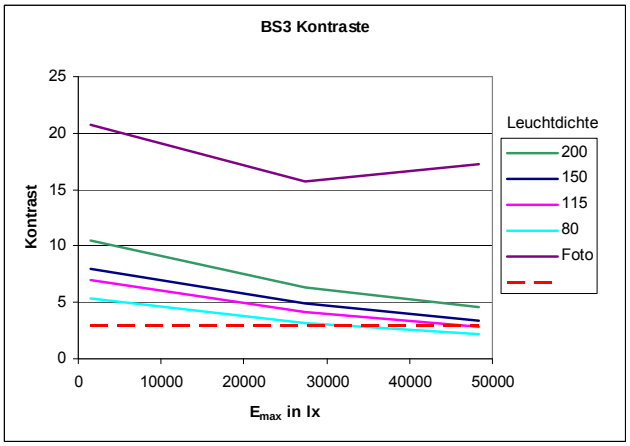


Bild 27: links: Minimaler gemessener Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS2 bei der Bewertung „merkbar“, rechts: gleiche Darstellung, die senkrechten Linien kennzeichnen den Median der subjektiven Einstellungen



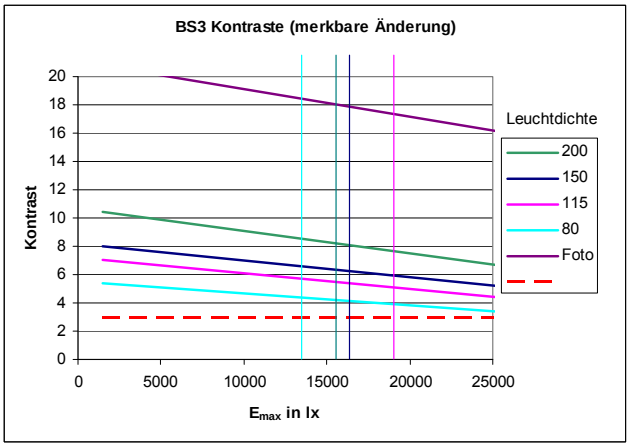


Bild 28: links: Minimaler gemessener Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS3 bei der Bewertung „merkbar“, rechts: gleiche Darstellung, die senkrechten Linien kennzeichnen den Median der subjektiven Einstellungen

10.4 Vergleich der Kontraste bei verschiedenen Beleuchtungsrichtungen

Um den Einfluss der Einstrahlrichtung zu bestimmen, wurden weitere Kontrastmessungen bei einer Einstrahlrichtung des Scheinwerfers von 60° durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei den matten Oberflächen bei gleicher Beleuchtungsstärke höhere Kontraste erzielt werden. Dass heißt, hier würden bei subjektiven Befragungen höhere zulässige Beleuchtungsstärken ermittelt werden.

Beim hochglänzenden BS3 hingegen bleiben die Kontraste nahezu unabhängig von der Einfallsrichtung.

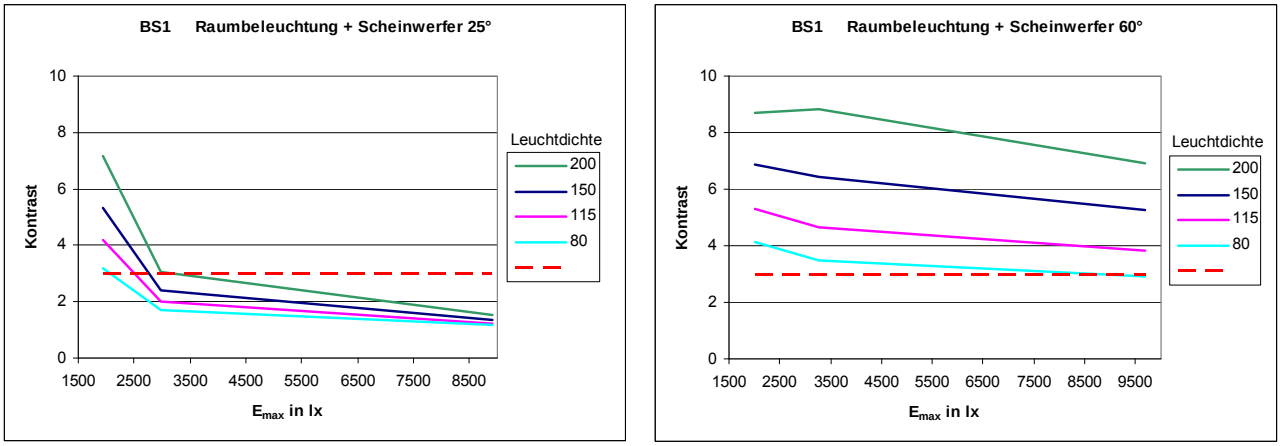


Bild 29: Minimaler Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS1 bei der Bewertung „merkbar“, links: Einstrahlung unter 25° (gleich Darstellung wie in Kapitel 10.3), rechts: Einstrahlung unter 60°

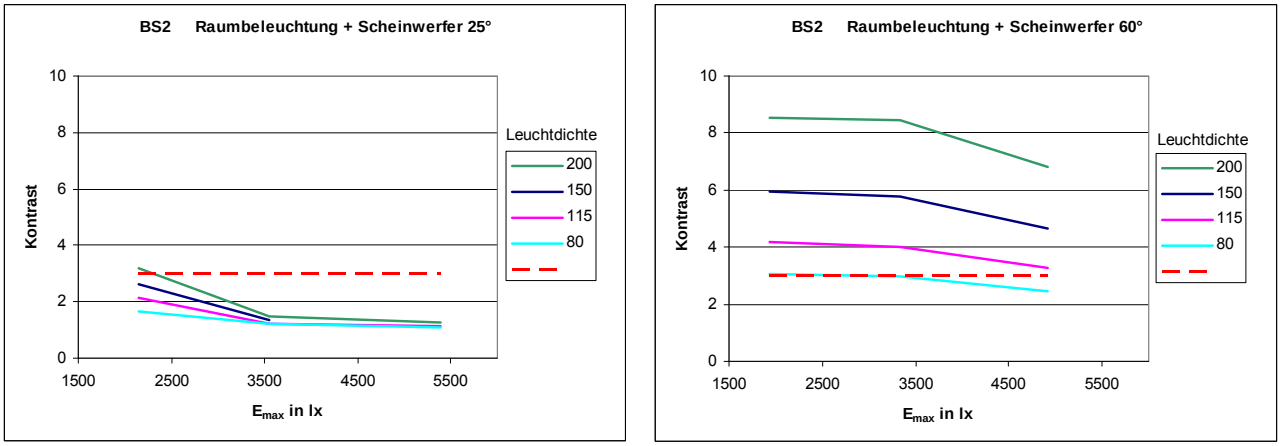
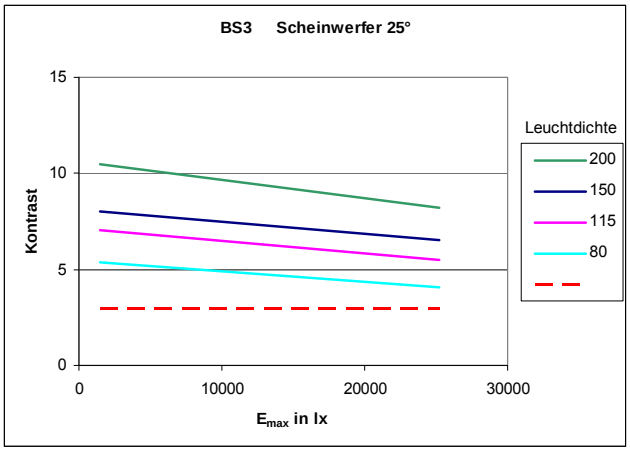


Bild 30: Minimaler Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS2 bei der Bewertung „merkbar“, links: Einstrahlung unter 25° (gleich Darstellung wie in Kapitel 10.3), rechts: Einstrahlung unter 60°



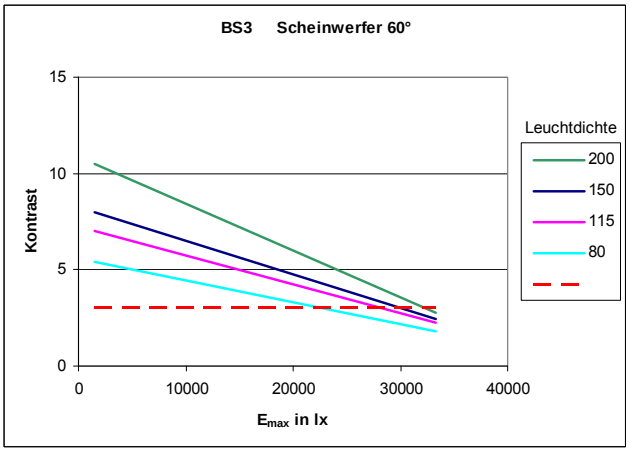


Bild 31: Minimaler Kontrast in Abhängigkeit von der maximalen Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche BS3 bei der Bewertung „merkbar“, links: Einstrahlung unter 25° (gleich Darstellung wie in Kapitel 10.3), rechts: Einstrahlung unter 60°

11. Direkte Reflexion: Leuchtdichte und Kontrast

11.1 Leuchtdichtemessung schwarzer Bildschirm, L_{max}

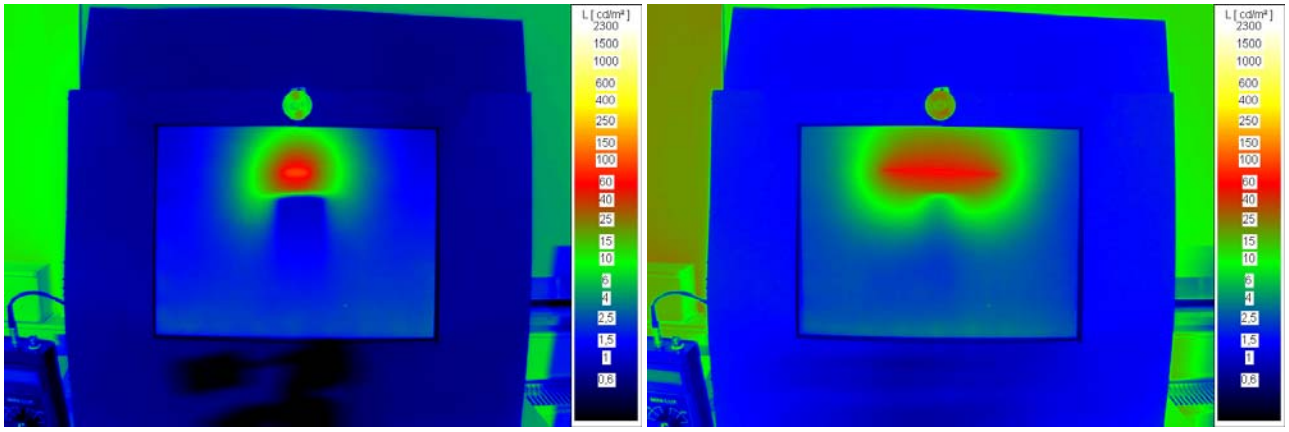


Bild 32: BS1, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

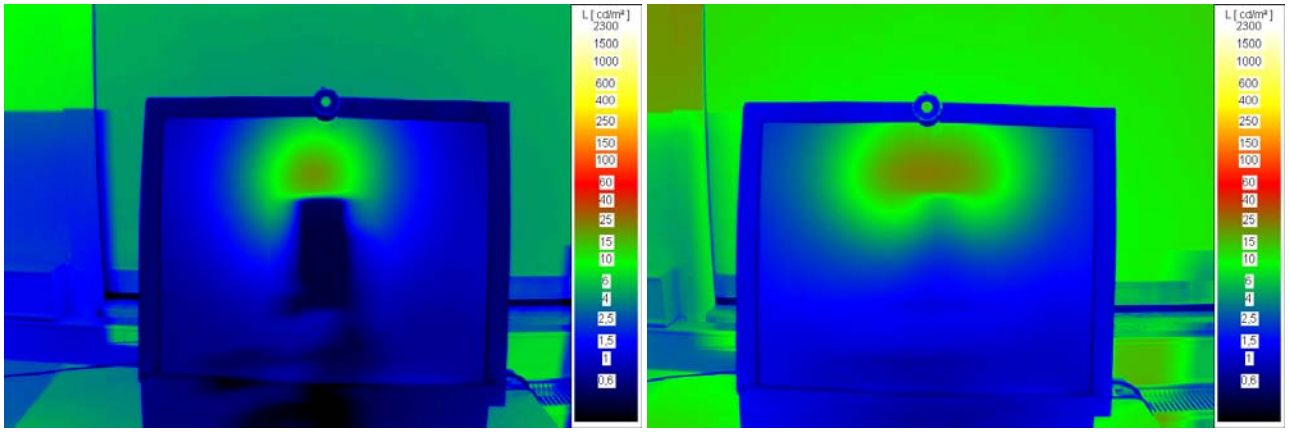


Bild 33: BS2, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

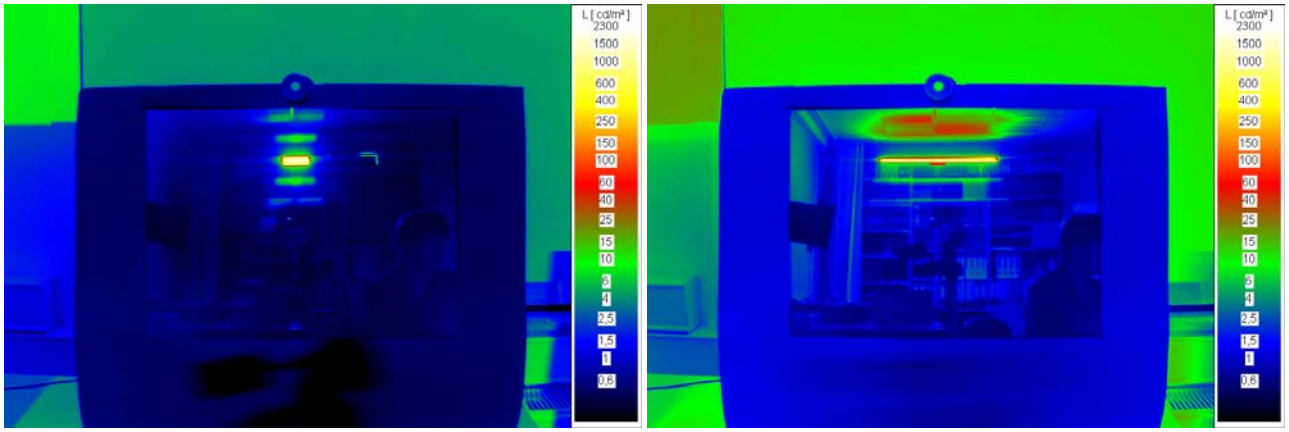


Bild 34: BS3, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

11.2 Leuchtdichtemessung bei L_H = 115 cd/m², L_{max}

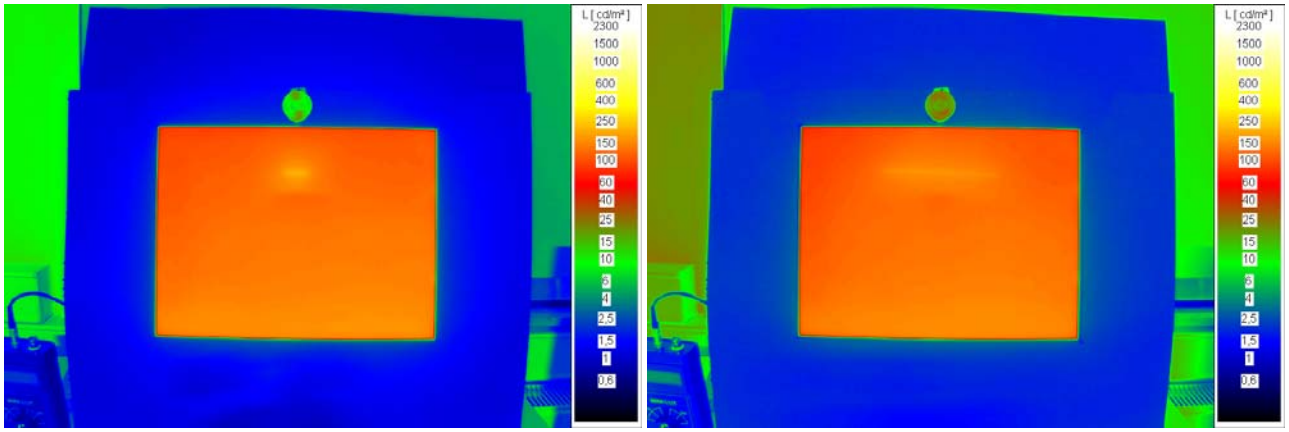


Bild 35: BS1, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

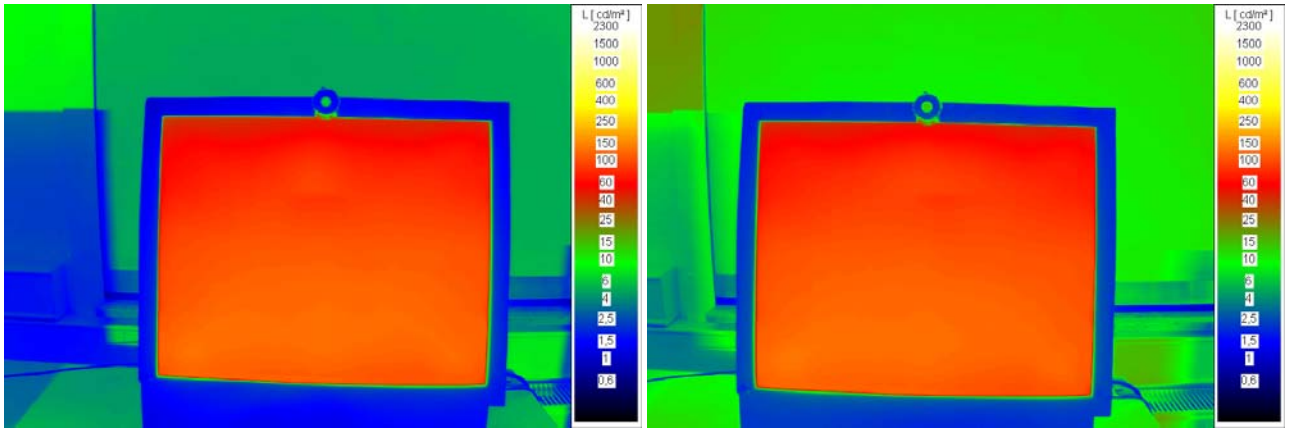


Bild 36: BS2, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

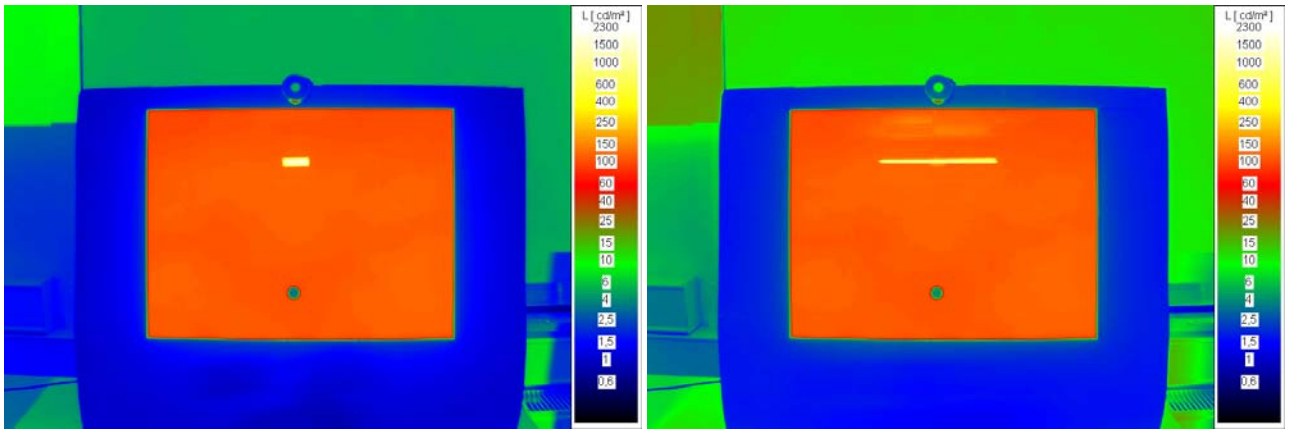


Bild 37: BS3, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), maximale Leuchtdichte der Leuchte $L_{Leuchte}$

11.3 Leuchtdichtemessung bei L_H = 115 cd/m², L bei „merkbar“ bzw. „störend“

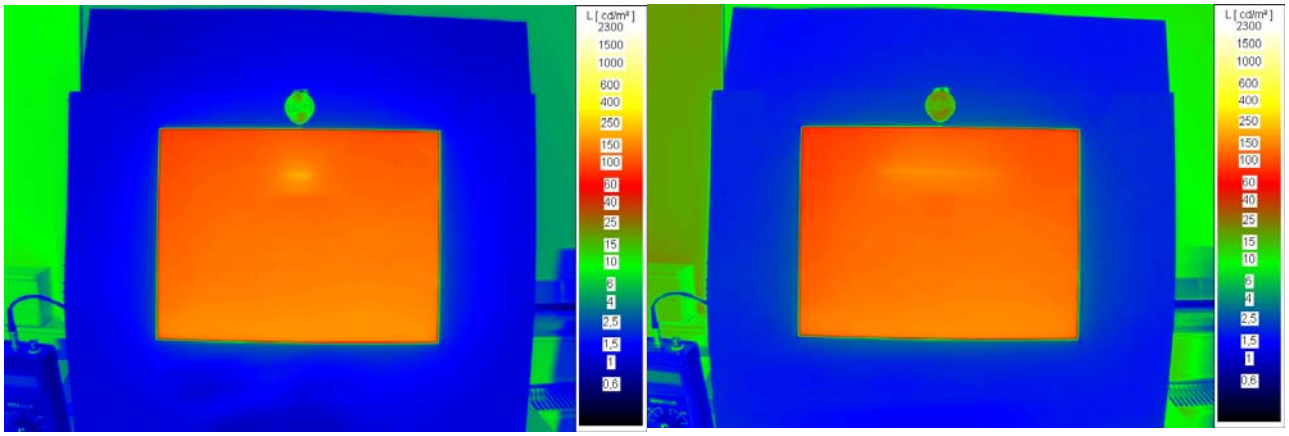


Bild 38: BS1, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), $L_{Leuchte}$ entspricht „merkbar“

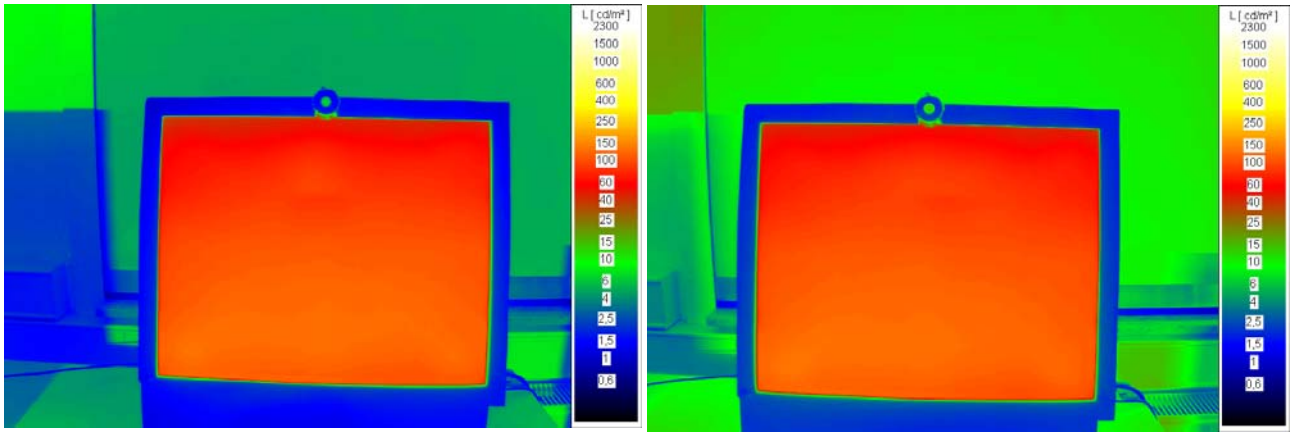


Bild 39: BS2, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), $L_{Leuchte}$ entspricht „merkbar“

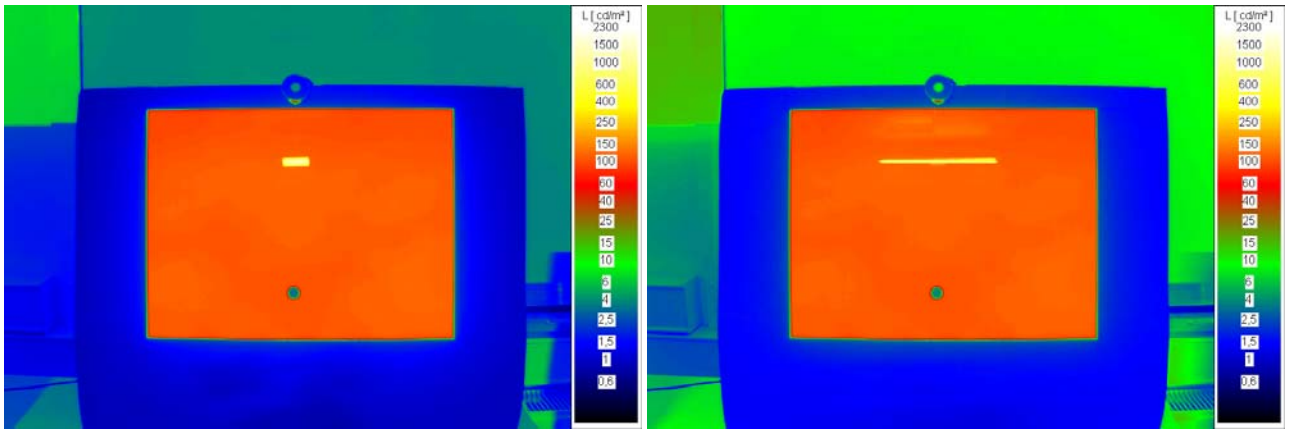


Bild 40: BS3, Reflex von Rechteck-Leuchte (links) und Linien-Leuchte (rechts), $L_{Leuchte}$ entspricht „störend“

11.4 Kontraste bei Spiegelung von Linie und Rechteck

Aus den Leuchtdichtebildern wurde durch Differenzbildung der Bilder mit und ohne Reflex die maximale gerichtet reflektierte Leuchtdichte L_S ermittelt und daraus der Kontrast berechnet:

$$(15) \qquad C = \frac{L_H + L_S}{L_L + L_S}$$

Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen dargestellt. Sie liegen bei den matten Bildschirmen BS1 und BS2 für die Textdarstellung erwartungsgemäß im Bereich von 2,5 bis 6,8. Für die Darstellung des Fotos werden höhere Kontraste gefordert.

Beim hochglänzenden BS3 ergeben sich Kontraste, die nur geringfügig über 1 liegen. Hier haben die Testpersonen wahrscheinlich durch Kopfbewegung vermieden, die geringen Kontraste im Sehfeld zu haben, zumal der Bereich relativ klein ist.

BS1, Linien-Leuchte

Tabelle 18: $L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS1

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
200	35 109	4,4	22 495	5,2
150	25 315	4,3	14 272	4,6
115	22 493	3,4	8 715	3,8
Foto	19 671	5,5	7 055	6,2

BS1, Rechteck-Leuchte

Tabelle 19: $L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS1

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
200	14 812	3,5	3 634	4,1
150	14 421	3,0	5 980	3,3
115	10 902	2,5	3 358	2,8
Foto	12 466	3,8	4 140	4,4

BS2, Linien-Leuchte

Tabelle 20: $L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS2

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
115	38 761	6,8	37 484	6,8
Foto	32 370	11,6	30 959	11,6

BS2, Rechteck-Leuchte

Tabelle 21: $L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS2

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „merkbar“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
115	17 940	5,6	7 360	6,4
Foto	17 158	12,5	7 360	14,4

BS3, Linien-Leuchte

Tabelle 22: $L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS3

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
200	8 922	1,20	3 735	1,25
150	7 885	1,15	1 502	1,20
115	7 885	1,11	1 502	1,15
Foto	10 790	1,18	1 776	1,24

BS3, Rechteck-Leuchte

Tabelle 23: $L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Median und Minimum) in cd/m^2 und zugehöriger Kontrast für BS3

L_H in cd/m^2	$L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Median) in cd/m^2	Kontrast	$L_{Leuchte}$ bei „störend“ (Minimum) in cd/m^2	Kontrast
200	3 910	1,21	1 863	1,24
150	4 600	1,14	1 656	1,17
115	5 522	1,10	984	1,13
Foto	4 600	1,19	984	1,26

12. Vergleich der subjektiven mit den berechneten Werten

12.1 Vergleich bei gerichteter Reflexion

Es liegen die Daten der Rechteck-Leuchte zugrunde.

Tabelle 24: Vergleich der berechneten zulässigen Werte für die Leuchtdichte $L_{Leuchte}$ mit den subjektiven Angaben „merkbar“ (BS1 und BS2) bzw. „störend“ (BS3) der Probanden bei gerichteter Reflexion

	BS1		**BS2**		**BS3**	
L_H in cd/m²	$L_{Leuchte}$ berechnet in cd/m²	$L_{Leuchte}$ subjektiv in cd/m²	$L_{Leuchte}$ berechnet in cd/m²	$L_{Leuchte}$ subjektiv in cd/m²	$L_{Leuchte}$ berechnet in cd/m²	$L_{Leuchte}$ subjektiv in cd/m²
200	11 000	14 812	56 000		1 000	3 910
150	8 800	14 421	42 000		800	4 600
115	6 800	10 902	32 000	17 940	600	5 520
80	4 700		22 000		400	
Foto	11 000	12 446	14 000	17 158	170	4 600

Bei den matten Bildschirmen BS1 und BS2 liegen berechnete und subjektiv ermittelte Werte in der gleichen Größenordnung. Die vorausberechnete starke Abhängigkeit von der Bildschirmleuchtedichte L_H wurde subjektiv nicht festgestellt.

Für den glänzenden Bildschirm BS3 zeigen sich große Unterschiede zwischen den Werten da hier das Urteil „störend“ herangezogen wurde. Die subjektiv ermittelten zulässigen Leuchten-Leuchtdichten sind daher deutlich größer als berechnet.

12.2 Vergleich bei gestreuter Reflexion

Tabelle 25: Vergleich der berechneten zulässigen Werte für die Beleuchtungsstärke mit den subjektiven Angaben „merkbar“ der Probanden bei gestreuter Reflexion

	BS1		**BS2**		**BS3**	
L_H in cd/m²	E berechnet in lx	E subjektiv in lx	E berechnet in lx	E subjektiv in lx	E berechnet in lx	E subjektiv in lx
200	15 000	3 213	13 000	1 664	225 000	15 594
150	11 000	3 021	9 500	1 701	150 000	16 196
115	8 000	2 779	7 000	1 474	110 000	18 857
80	5 000	2 671	4 500	1 419	65 000	13 403
Foto	1 500	2 887	1 200	1 478	14 000	13 860

Für alle drei Bildschirme sind die subjektiv ermittelten zulässigen Beleuchtungsstärken in der Bildschirmebene niedriger als die berechneten. Allerdings liegen diese alle deutlich oberhalb realistischer Vertikalbeleuchtungsstärken im Innenraum. Lediglich direkte Sonneneinstrahlung könnte problematisch werden.

13. Messung von Bildschirmfarben und Farbabständen

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. In der Norm wird empfohlen, die Bildschirmfarben R, G und B einzeln und in Kombination jeweils mit 100 % und mit 75 % anzusteuern. Ansteuerwerte von 50% sollten die Anforderung erfüllen.

Der Farbabstand berechnet sich wie folgt:

(14) $$\Delta E^*_{uv} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2}$$

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_w}\right)^{1/3} - 16$$

$$u^* = 13 \cdot L^* (u' - u'_w)$$

$$v^* = 13 \cdot L^* (v' - v'_w)$$

Y ... Leuchtdichte der Farbe

Y_w ... Leuchtdichte des Weißpunktes

u', v' ... Farbkorrdinaten der Farbe

u'_w, v'_w ... Farbkorrdinaten des Weißpunktes

Mit dem Spektralmessgerät Jeti 1100 wurden für den Bildschirm BS2 die Farbkoordinaten u' und v' für alle Farben gemäß Bild 41 für den dunklen Raum und für Beleuchtungsstärken von 1000 lx und 3000 lx in der Bildschirmebene gemessen und daraus gemäß den angegebenen Formeln die Farbabstände zwischen allen Farben ermittelt. Als Weißpunkt wurde das Weiß der jeweiligen Mess-Situation verwendet.

Die Messergebnisse sind in den Tabellen 26 bis 28 dargestellt.

Im Dunkelraum sind alle Farbabstände größer als 20. Der kleinste Wert liegt bei 22 für die unbunte Kombination Weiß-Grau75. Die Farbkombination mit dem kleinsten Abstand (26) ist Cyan100-Cyan75. Subjektiv erscheint dieser Abstand aber nicht kritisch.

Die Beleuchtungsstärke von 1000 lx in der Bildschirmebene ändert an den Messergebnissen nichts Wesentliches.

Bei 3000 lx in der Bildschirmebene liegen einige Farbabstände zu Grau75 und nahezu alle zu Grau50 unter 20. Hier handelt es sich jedoch immer um eine Kombination mit Unbunt. Die ausschließlich bunten Kombinationen für die 100 % und die 75 % Ansteuerungen haben ausreichend große Farbabstände.

Farben mit 50 % Ansteuerung haben mehrheitlich Farbabstände unter 20. Laut Norm sind hier Farbabstände größer 20 lediglich wünschenswert, jedoch nicht erforderlich. Die subjektive Einschätzung durch den Versuchsleiter zeigte, dass in diesen Fällen die Unterscheidung schwierig oder nicht mehr möglich ist.

Bild 41: Bildschirmfarben zur Ermittlung der Farbabstände

Tabelle 26: Berechnete Farbabstände für Bildschirm BS2 ohne zusätzliche Beleuchtung

E = 0 lx

	rot100	grün100	blau100	gelb100	magenta100	cyan100	grau75	rot75	grün75	blau75	gelb75	magenta75	cyan75	grau50	rot50	grün50	blau50	gelb50	magenta50	cyan75	schwarz	weiß
rot100	0	271	257	182	178	257	183	52	246	229	172	173	240	181	110	219	205	169	170	218	188	186
grün100		0	260	98	275	127	140	231	39	227	98	246	124	145	194	85	194	115	210	133	163	141
blau100			0	254	99	144	139	214	225	41	221	87	137	132	172	187	87	187	95	129	137	149
gelb100				0	232	153	116	151	90	218	36	208	143	123	134	98	182	77	178	138	147	113
magenta100					0	181	135	147	241	96	205	35	170	133	130	202	114	177	79	156	147	139
cyan100						0	74	211	101	122	129	156	26	84	163	88	110	112	131	58	116	76
grau75							0	137	108	107	86	108	58	27	93	77	81	62	80	49	76	22
rot75								0	203	182	134	133	192	131	58	171	154	123	122	168	135	143
grün75									0	191	77	211	93	109	161	47	156	82	174	97	125	113
blau75										0	185	70	109	95	135	150	46	148	60	94	95	121
gelb75											0	178	115	89	105	69	147	41	145	106	111	88
magenta75												0	142	102	105	170	80	147	45	124	112	116
cyan75													0	62	141	69	89	92	112	33	90	67
grau50														0	80	69	60	55	65	38	49	49
rot50															0	122	101	79	77	114	78	106
grün50																0	112	49	130	58	78	89
blau50																	0	107	42	63	49	100
gelb50																		0	110	73	70	74
magenta3																			0	88	68	95
cyan50																				0	57	67
schwarz																					0	98
weiß																						0

Tabelle 27: Berechnete Farbabstände für Bildschirm BS2 mit 1000 lx in der Bildschirmebene

E = 1000 lx in der Bildschirmebene

	rot100	grün100	blau100	gelb100	magenta100	cyan100	grau75	rot75	grün75	blau75	gelb75	magenta75	cyan75	grau50	rot50	grün50	blau50	gelb50	magenta50	cyan75	schwarz	weiß
rot100	0	236	234	157	156	227	157	48	210	204	146	146	208	151	97	178	171	140	138	182	142	161
grün100		0	246	88	252	116	128	198	37	214	90	223	113	131	163	82	177	106	186	119	138	128
blau100			0	241	94	139	136	197	214	38	212	89	134	135	165	179	86	181	104	131	147	142
gelb100				0	213	142	105	128	78	206	32	187	129	108	111	82	163	68	153	119	112	104
magenta100					0	169	124	131	218	84	187	33	157	124	123	179	94	161	76	142	132	128
cyan100						0	71	183	93	116	121	144	25	81	140	84	98	107	119	57	106	70
grau75							0	113	96	103	78	97	53	23	74	63	66	57	66	39	54	20
rot75								0	168	163	109	113	162	104	49	133	126	96	95	135	94	120
grün75									0	181	67	188	83	96	130	45	141	73	150	84	102	100
blau75										0	176	65	106	98	129	143	48	144	69	97	108	112
gelb75											0	160	105	78	83	55	132	36	124	90	80	82
magenta75												0	129	93	95	147	63	131	43	112	100	104
cyan75													0	59	118	64	80	86	100	32	81	58
grau50														0	59	55	55	47	55	32	31	43
rot50															0	89	85	57	61	88	45	87
grün50																0	101	38	107	48	57	74
blau50																	0	98	35	59	61	81
gelb50																		0	92	63	44	68
magenta3																			0	75	57	79
cyan50																				0	49	54
schwarz																					0	73
weiß																						0

Tabelle 28: Berechnete Farbabstände für Bildschirm BS2 mit 3000 lx in der Bildschirmebene

E = 3000 lx in der Bildschirmebene

	rot100	grün100	blau100	gelb100	magenta100	cyan100	grau75	rot75	grün75	blau75	gelb75	magenta75	cyan75	grau50	rot50	grün50	blau50	gelb50	magenta50	cyan75	schwarz	weiß
rot100	0	145	141	93	97	145	89	38	113	103	80	78	118	80	63	88	82	75	72	92	75	98
grün100		0	161	59	171	79	85	114	38	123	65	135	72	86	96	70	98	78	105	79	88	87
blau100			0	156	61	92	87	116	130	47	131	63	89	93	104	109	81	111	84	92	100	86
gelb100				0	145	101	70	71	46	112	29	110	80	67	65	54	81	52	81	68	65	75
magenta100					0	122	86	87	136	58	121	39	107	89	89	108	78	102	72	95	93	87
cyan100						0	56	110	64	71	85	95	30	68	88	69	71	79	80	59	78	51
grau75							0	54	50	44	45	51	30	17	35	29	24	31	28	18	29	18
rot75								0	78	72	50	55	81	43	25	50	45	38	36	54	37	66
grün75									0	88	34	99	44	49	59	32	61	41	67	42	50	58
blau75										0	85	31	53	47	58	64	35	65	38	48	54	50
gelb75											0	84	59	39	38	27	53	23	53	41	37	55
magenta75												0	74	51	52	69	40	65	34	58	54	58
cyan75													0	39	59	40	43	49	52	29	48	34
grau50														0	20	19	15	18	19	12	11	35
rot50															0	28	25	18	20	30	12	51
grün50																0	31	12	36	17	18	45
blau50																	0	30	11	19	19	40
gelb50																		0	31	23	13	47
magenta3																			0	28	20	44
cyan50																				0	19	35
schwarz																					0	46
weiß																						0

14. Zusammenfassung und Empfehlungen für künftige Normen

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 Raumbeleuchtung variiert. Die Beleuchtungsstärke auf der Bildschirmoberfläche wurde weiterhin mit einer gerichteten, jedoch nicht in Beobachterrichtung 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 Leuchtdichte-Werten $L_{Leuchte}$ > 10000 cd/m² wurden als „merkbar“ beurteilt. Leuchten mit so hohen Leuchtdichten oberhalb des Ausstrahlungswinkels γ = 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/m² als „störend“ eingestuft. Eine Testperson fühlte sich bereits bei der niedrigsten angebotenen Leuchtdichte ($L_{Leuchte}$ < 1500 cd/m²) 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 betrüge 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 künstli-

cher 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 Bildschirmebene die Farbabstände der Farben untereinander gemessen. Bei 1000 lx entsprachen alle Farbabstände der Anforderung und lagen über 20. Bei 3000 lx in der Bildschirmebene 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.