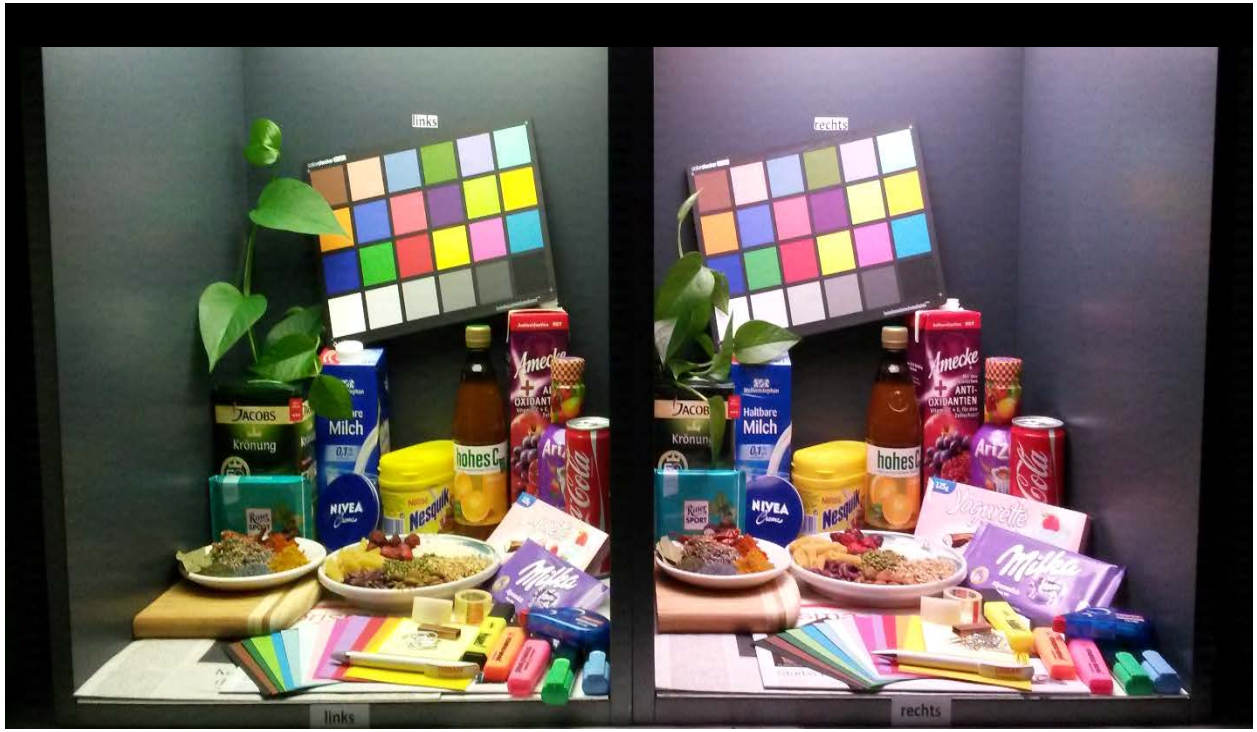
TM 30-15: Untersuchung zur Farbwiedergabe weißer LEDs



Karin Bieske;
Ulla Hartwig;
Christoph Schierz

TU Ilmenau

Alexander Wilm
Carolin Horst

OSRAM OS

Inhalt

1. Motivation & Forschungsfragen
2. Versuchsaufbau & Methodik
3. Ergebnisse
4. Zusammenfassung

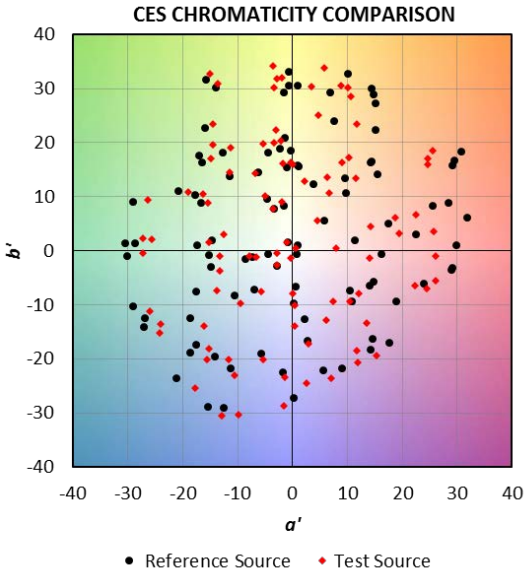
- LEDs in vielen Anwendungsbereichen etabliert
- Farbwiedergabeeigenschaften wichtiges Qualitätskriterium von Lichtquellen
- Lichtqualität durch Spektralverteilung bestimmt
- Zunehmend Einsatz von pc LEDs in Innenraumbeleuchtung
- Optimierung von pc LEDs: Spektren blaue LED/ UVED & Leuchtstoff/ Leuchtstoffkombinationen
- Optimierungskriterien müssen bekannt sein (T_{cp}, Duv^2, R_i, R_a, LER, η , a_{smel} , … ?)
- Standard CIE R_a (CIE 13.3: 1995)
- TM-30-15: IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition, (2015)
- CIE 224: 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use

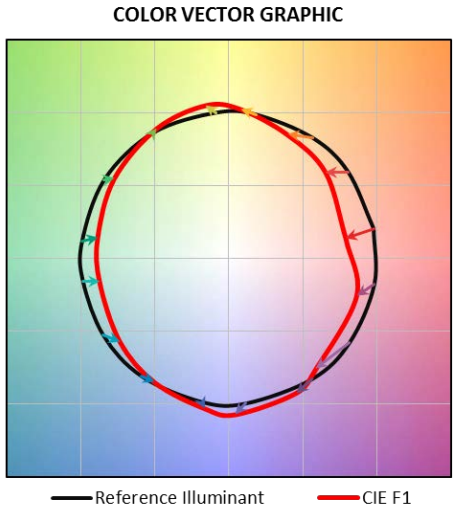
CIE R_a (1995)

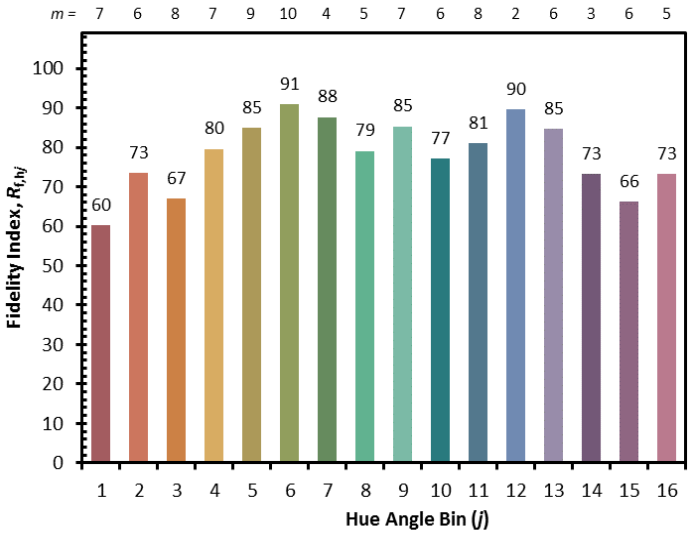
Betrachtung nur der Farbtreue

IES TM-30-15 (2015)

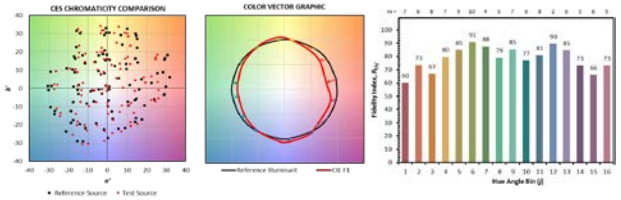
Farbtreue: Fidelity-Index R_f,
Farbgamut: Gamut-Index R_g,
detaillierte Grafiken …





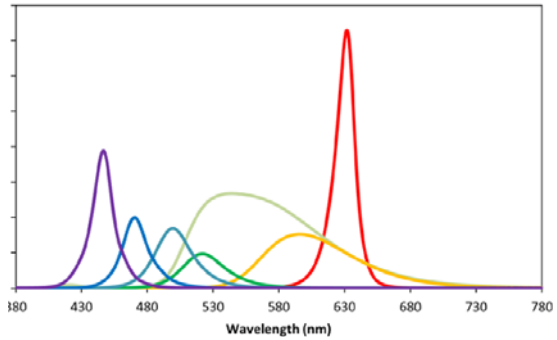


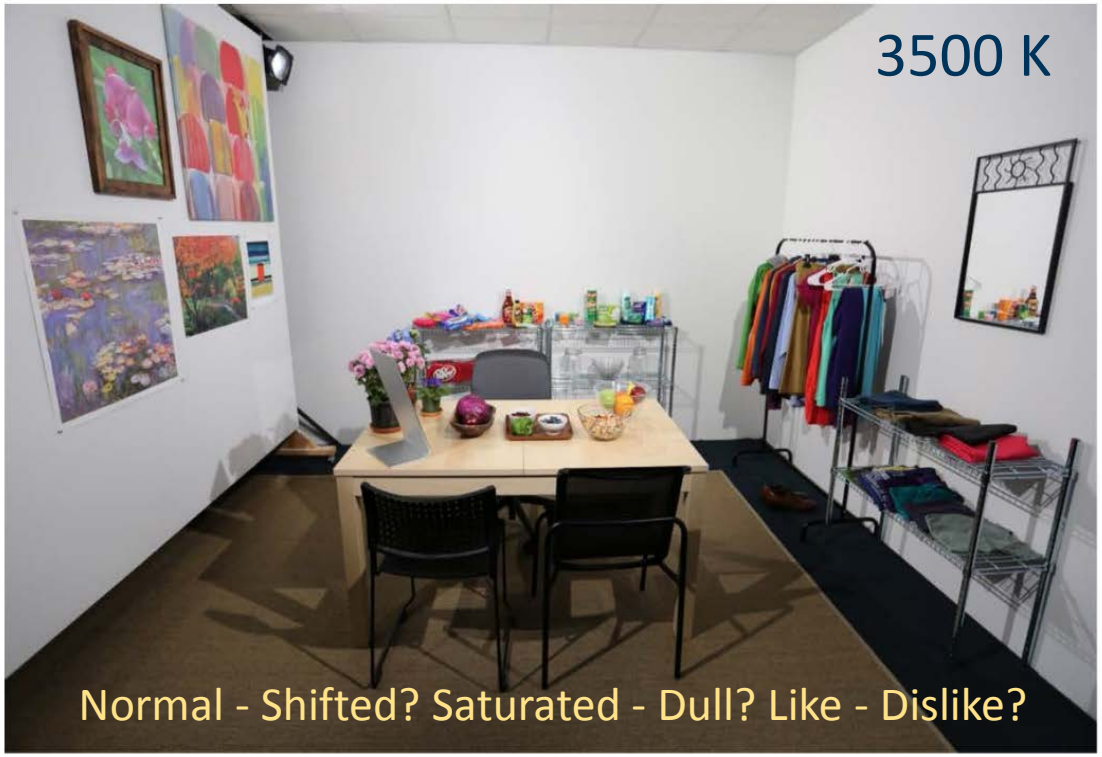
CIE R_a (1995)		IES TM-30-15 (2015)
Betrachtung nur der Farbtreue	⇨	Farbtreue: Fidelity-Index R_f, Farbgamut: Gamut-Index R_g, detaillierte Grafiken …
Berechnung der Farbwerte mit CIE 1931 CMFs	⇨	Berechnung der Farbwerte mit CIE 1964 CMFs
CIE 1964 U*V*W*	⇨	CAM02-UCS (CIE CAM02)
8 Testfarben	⇨	99 Testfarben
Keine unteren Grenzwert	⇨	Wertebereich von 0 bis 100
Referenzlichtart, Sprung-funktion bei 5000K	⇨	Referenzlichtart, kontinuierliche Funktion, 4500K bis 5500K Übergang

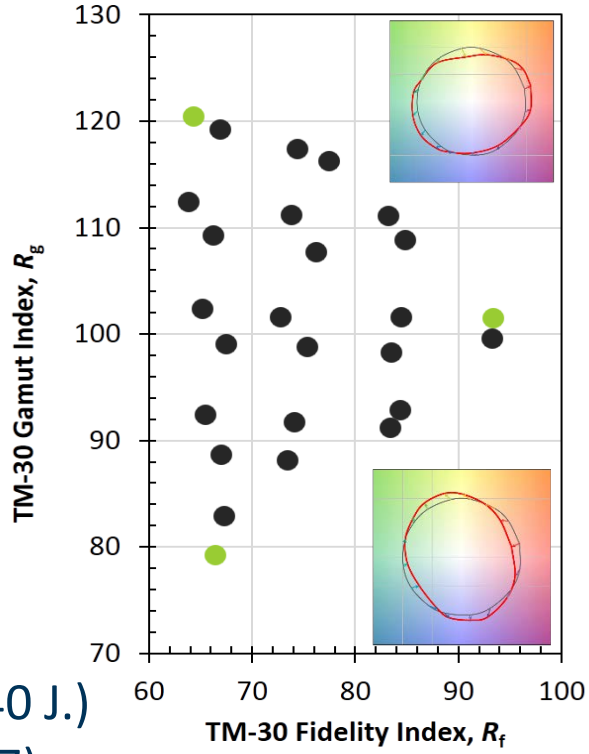


IES-Study: **Royer, M. and Houser, K. (2016):**

Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape.



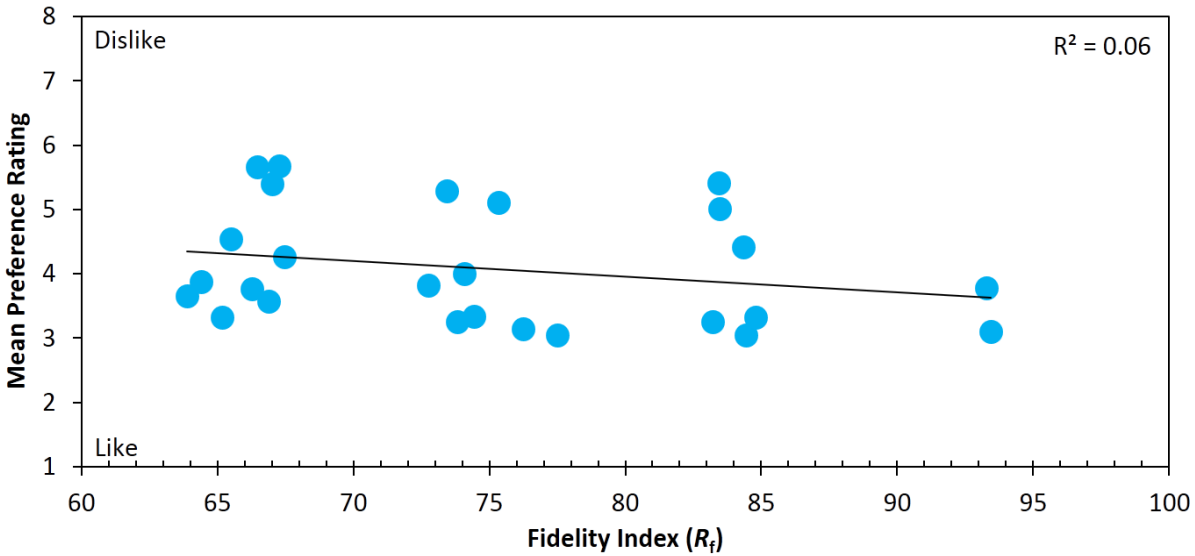




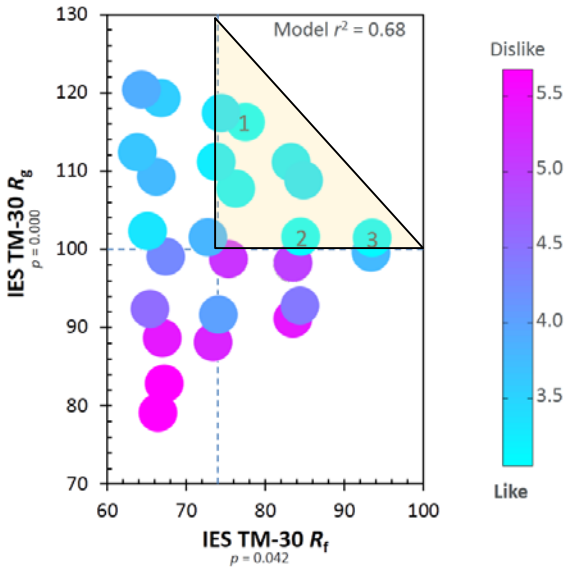
- 28 Probanden (12 Männer, 16 Frauen; 19-65 J., Ø 40 J.)
- 26 Spektralverteilungen(R_f: 64 bis 93, R_g: 79 bis 117)

IES-Study: **Royer, M. and Houser, K. (2016):**

Präverenz vs. Farbtreue (Fidelity)



Präferenz vs. Fidelity/ Gamut

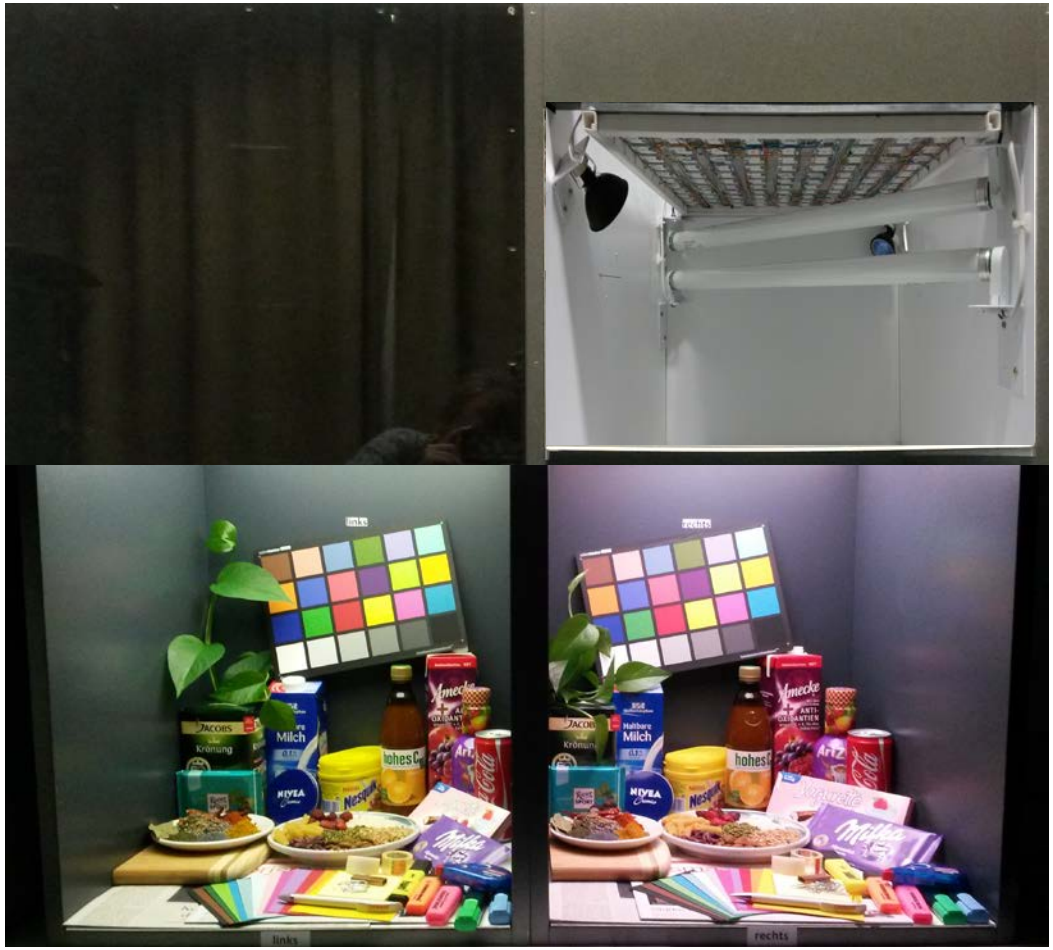


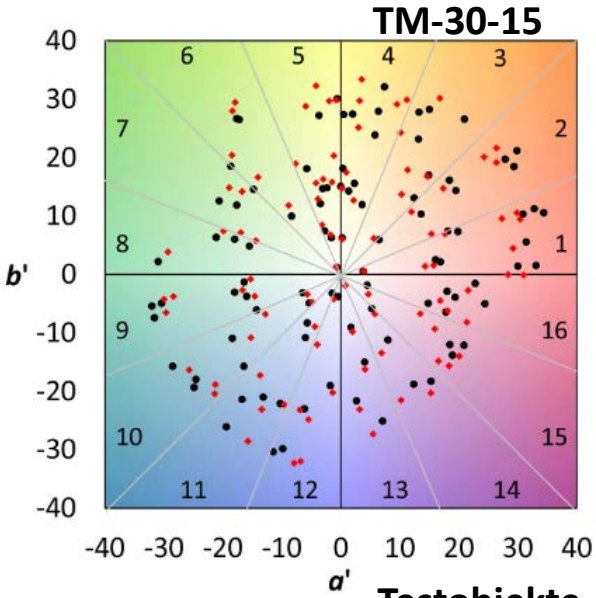
- Keine Korrelation zwischen Präferenz und Farbtreue (Fidelity)
- Präferierter Bereich $R_f \geq 75$ & $R_g > 100$
- Mittlerer Farbtreue-Index schwacher Prädiktor,
  CIE Ra < 80 für die meisten Testsituationen klar präferiert

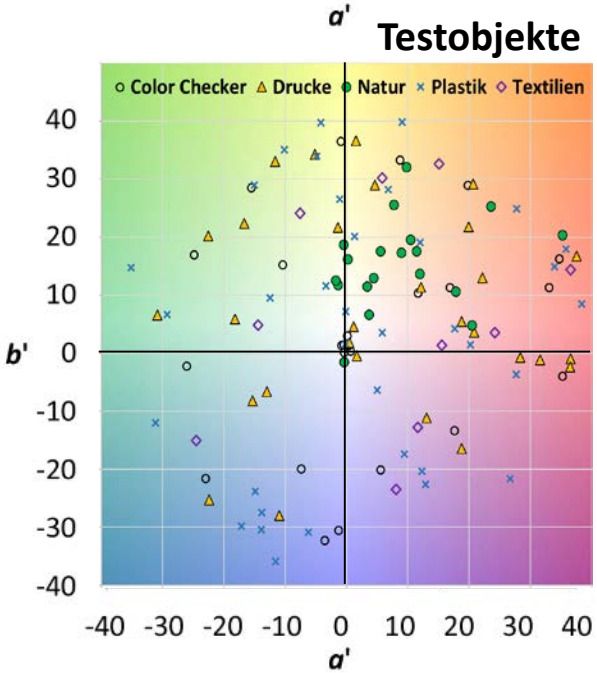
Hypothesen

- **Mit pc LEDs Forderungen von ROYER ($R_f \geq 75$ & $R_g > 100$) erfüllbar**
- **R_f- und R_g-Werte des TM 30-15 zeigen hohe Korrelation zu subjektiven Bewertungen der Farbwiedergabeeigenschaften**
- **Im Vergleich zur Leuchtstofflampe mit identischen R_f- und R_g-Werten werden pc LEDs bevorzugt.**

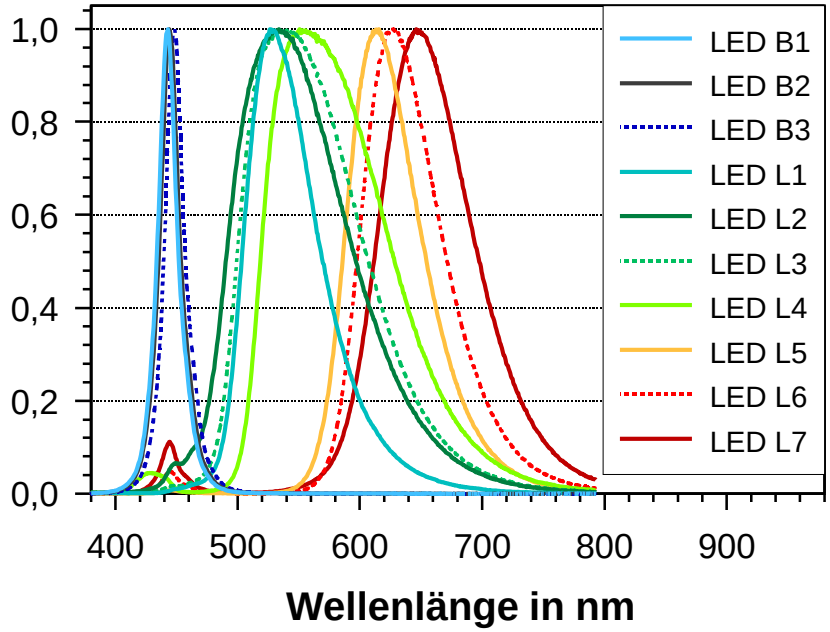
Versuchsaufbau

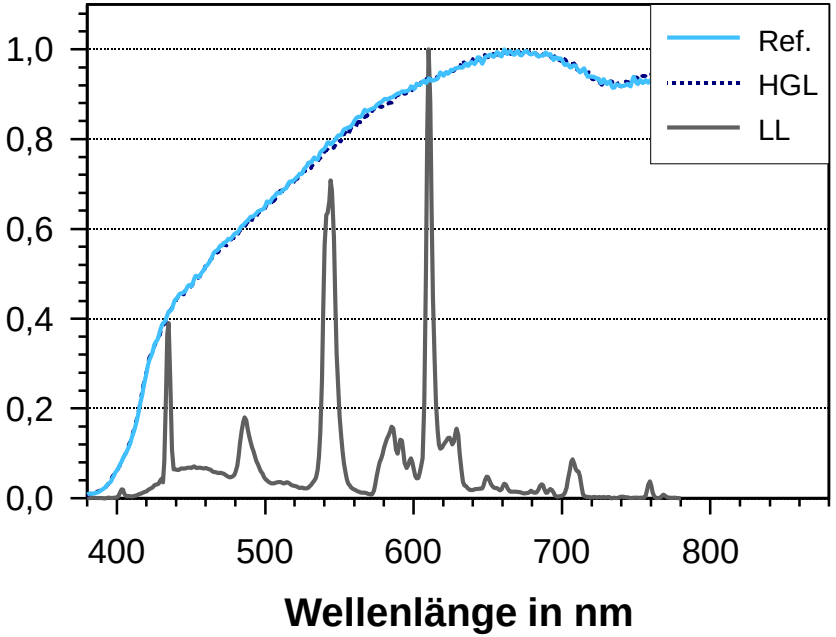




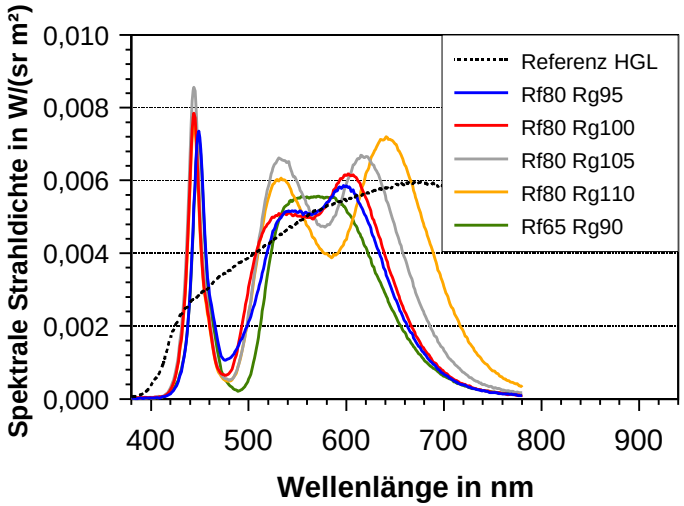


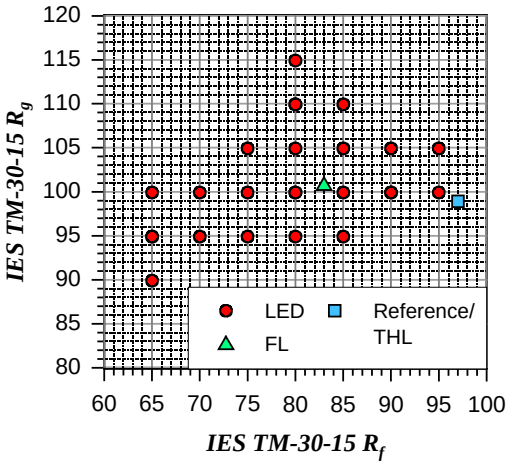
Spektralverteilungen





Spektralverteilungen und Testspektren





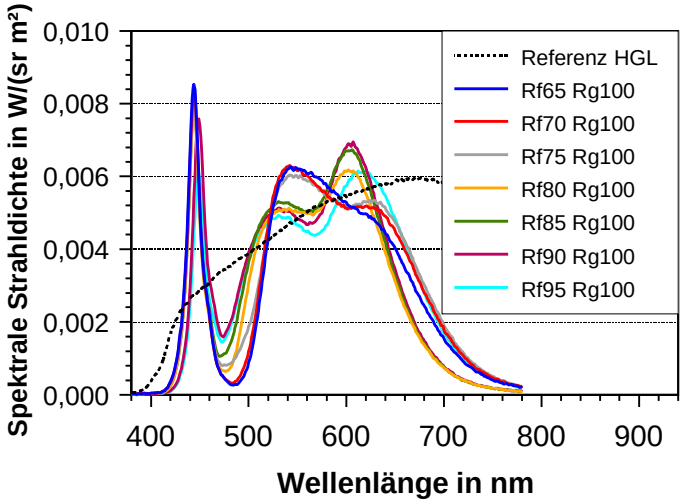
Szenen: 21

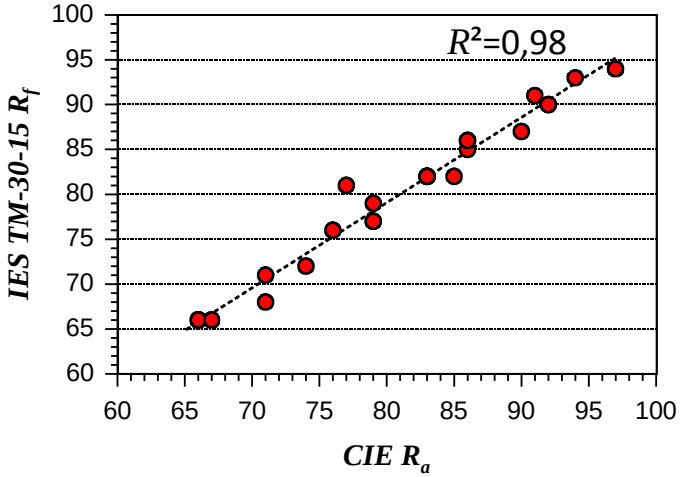
R_f: 66 – 97

R_g: 92 – 114

T_{cp}: 3800K

E : 600 lx





Methodik

- 34 Probanden
- Alter: 23 – 48 Jahre (∅ 35 Jahre)
- 10 Frauen, 24 Männer

Bewertungen mit Fragebogen von:

- *Farbunterschied*
- *Sättigung, Helligkeit, Temperatur*
- *Farbverschiebung*
- *Gefallen, Natürlichkeit*
- *Farbvorstellung*
- *Farbqualität*

1. Nehmen Sie einen Farbunterschied zwischen den rechten und den linken Objekten wahr, wenn ja wie stark?

nein	wenig	mittelmäßig	ziemlich	sehr

2. Wie wirken die Farben der linken Objekte, im Vergleich zur rechten Seite?

a)	sehr gesättigt	etwas gesättigter	kein Unterschied	etwas ungesättigter	sehr ungesättigt
b)	sehr hell	etwas heller	kein Unterschied	etwas dunkler	sehr dunkel
c)	sehr warm	etwas wärmer	kein Unterschied	etwas kälter	sehr kalt

3. Nehmen Sie einen Farbstich/Farbverschiebung in den Farben der linken Objekte, im Vergleich zur rechten Seite wahr, wenn ja wie stark?

nein	wenig	mittelmäßig	ziemlich	sehr

Wenn ja, in welche Richtung?

violett	rot	orange	gelb	grün	blau

4. Wie empfinden Sie die Farben der linken Objekte, im Vergleich zur rechten Seite?

a)	gefällt sehr gut	gefällt etwas besser	kein Unterschied	gefällt etwas schlechter	gefällt sehr schlecht
b)	wirkt sehr natürlich	wirkt etwas natürlicher	kein Unterschied	wirkt etwas unnatürlicher	wirkt sehr unnatürlich

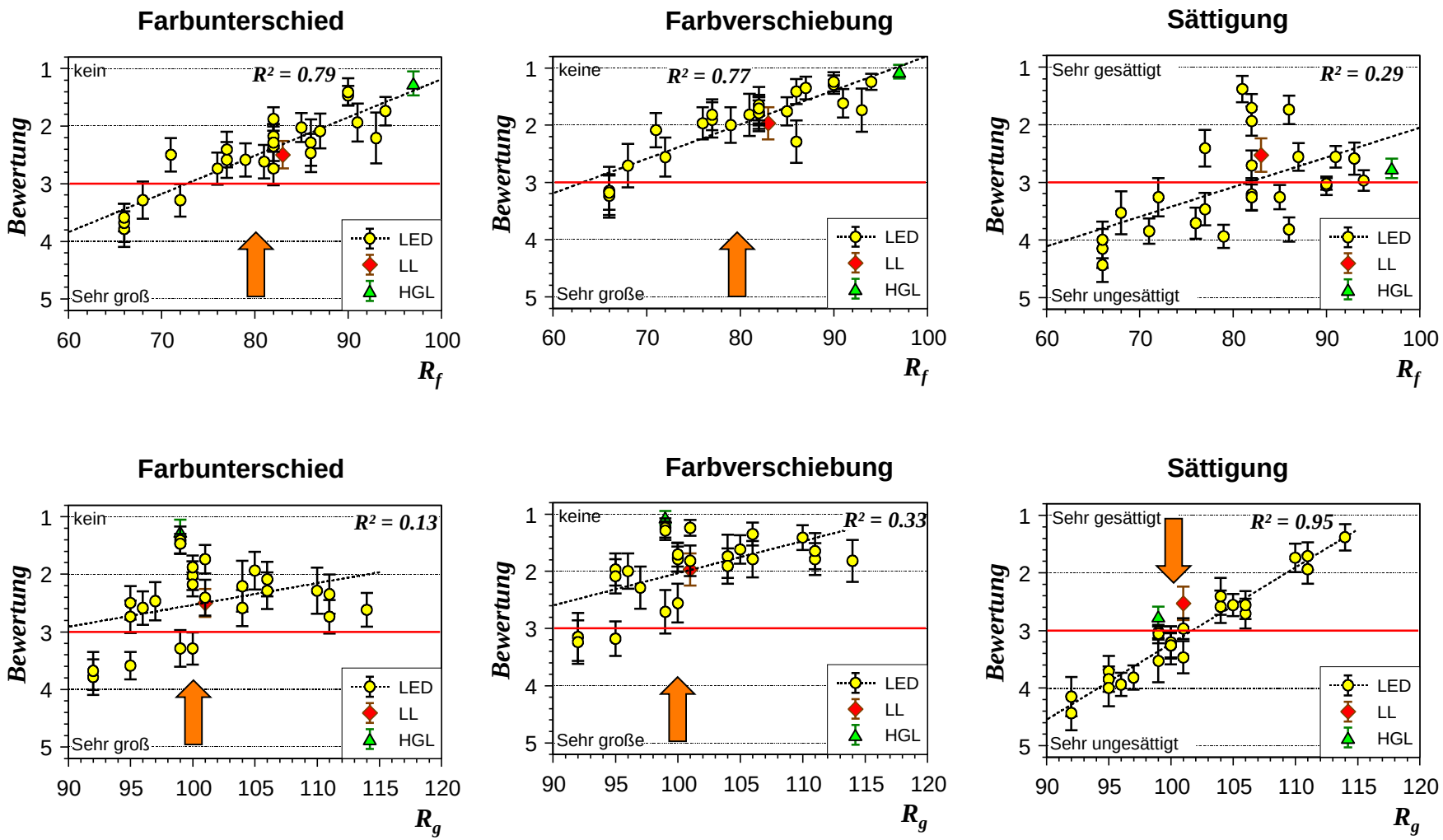
5. Welche Seite entspricht mehr Ihrer Vorstellung von den Farben der Objekte?

links	rechts	beide	keine

6. Unabhängig von der rechten Seite, wie empfinden Sie die Farbqualität der Objekte in der linken Box?

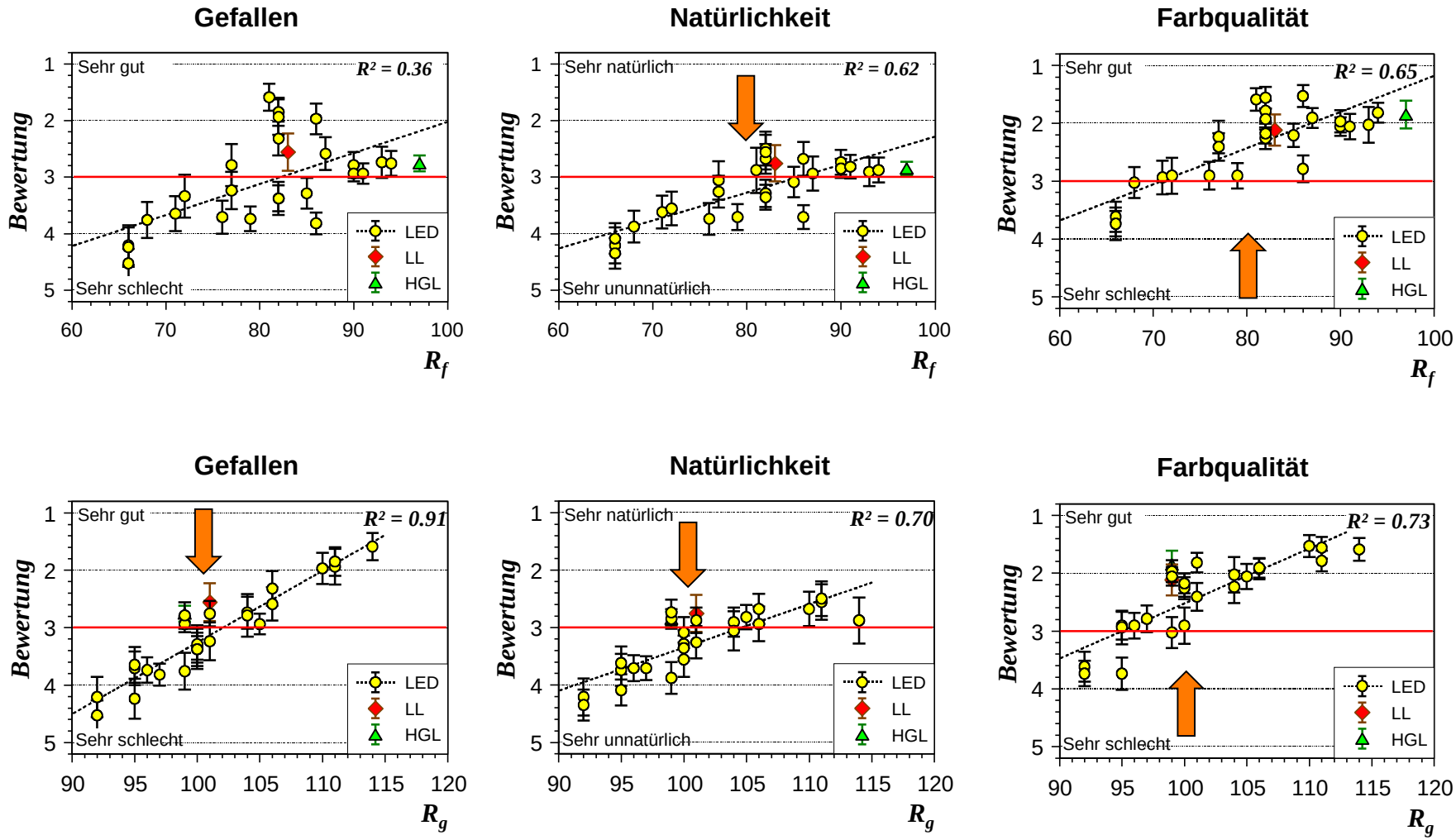
außerordentlich gut	gut	mittelmäßig	schlecht	außerordentlich schlecht

Mittelwerte und Konfidenzintervall, N=34; Lineare Regression auf Basis aller Einzelbewertungen



- Bewertungen von Farbunterschiede und Farbverschiebung korrelieren stark mit R_f
- Bewertung der Sättigung über R_g beschreibbar

Mittelwerte und Konfidenzintervall, N=34; Lineare Regression auf Basis aller Einzelbewertungen



- Gefallen hängt stark von R_g ab
- Bewertungen von Natürlichkeit und Farbqualität korrelieren mit R_f und R_g

Item	R^2 zu R_a	R^2 zu R_f	R^2 zu R_g	R^2 zu Item FQ
Farbqualität FQ	**0,62**	**0,65**	**0,73**	1,00
Farbunterschied	**0,80**	**0,79**	0,13	**0,58**
Sättigung	0,25	0,29	**0,95**	**0,77**
Farbverschiebung	**0,77**	**0,77**	0,33	**0,79**
Helligkeit	0,01	0,01	0,41	0,17
Temperatur	**0,55**	**0,63**	0,06	**0,52**
Gefallen	0,32	0,36	**0,91**	**0,85**
Natürlichkeit	**0,61**	**0,62**	**0,70**	**0,92**

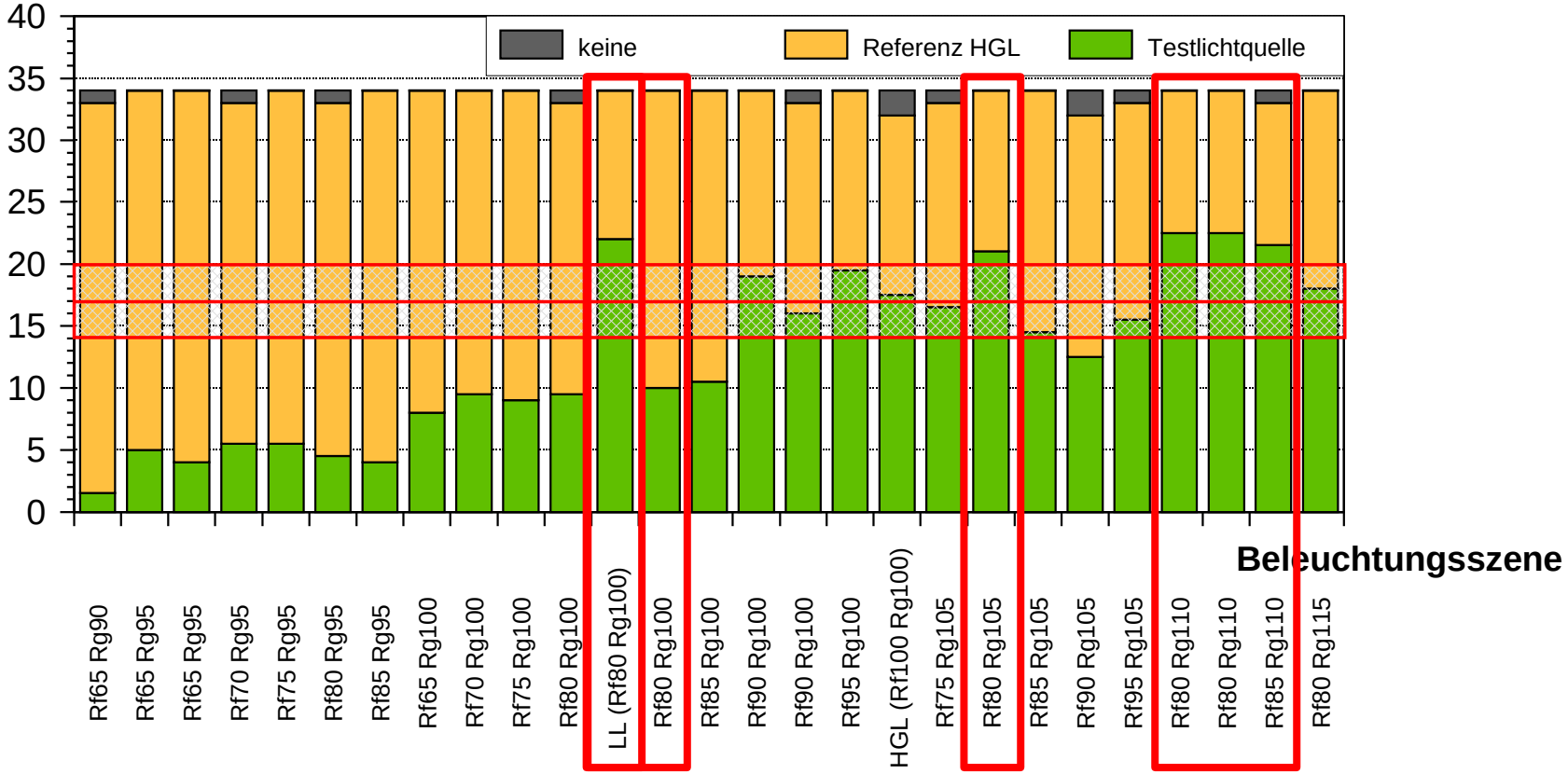
Gleichwertigkeit R_a und R_f

➡ **Farbqualität mehrdimensionales Problem**

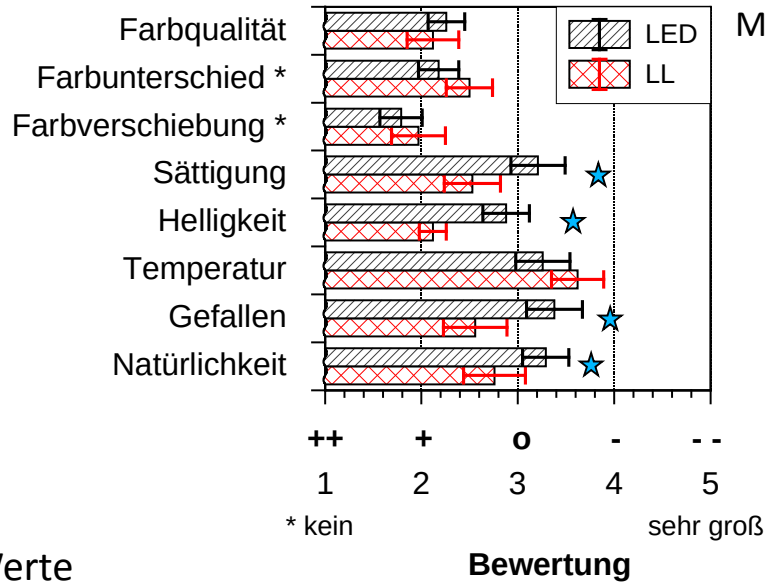
Testlicht-quelle

Referenz-lichtquelle

Vorstellungen der Objektfarben entsprechen den gesehenen Farben absolute Häufigkeiten



Vergleich LL vs. LED (R_f = 80 & R_g = 100)



Mittelwert & KI, N = 34

- Lichtsituation mit Leuchtstofflampe im Versuch besser bewertet als LED-Lichtsituation
- Gleiche subjektive Bewertung der Leuchtstofflampe wie pc LEDs mit R_f = 75 & R_g = 105 und R_f = 80 & R_g = 105

p-Werte

R_g	95			100					105		
Item/ R_f	75	80	85	75	80	85	90	95	75	80	85
Farbqualität *FQ*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Farbunterschied *FU*	1,000	1,000	1,000	1,000	0,082	0,277	*0,000*	*0,000*	1,000	1,000	0,622
Farbverschiebung *FV*	1,000	1,000	0,910	1,000	1,000	1,000	*0,000*	*0,002*	1,000	1,000	*0,030*
Sättigung *S*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,002*	*0,037*	0,303	1,000	1,000	1,000
Gefallen *G*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	*0,026*	*0,000*	*0,009*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Natürlichkeit *NK*	*0,000*	*0,000*	*0,000*	0,185	*0,036*	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Interpretation	*LL signifikant besser*			*LED signifikant besser*				kein signifikanter Unterschied			

Vergleich Hypothesen & Ergebnisse

- **Mit pc LEDs Forderungen von ROYER ($R_f \geq 75$ & $R_g \geq 100$) erfüllbar**
  - **Mit Kombinationen aktueller Leuchtstoffe sind pc LEDs mit diesen Parametern bei gleichzeitiger hoher Effizenz möglich.**

Vergleich Hypothesen & Ergebnisse

- R_f- und R_g-Werte des TM 30-15 zeigen hohe Korrelation zu subjektiven Bewertungen der Farbwiedergabeeigenschaften
  - Der R_f-Wert korreliert stark mit den Bewertungen für Farbunterschiede, Farbverschiebung und wärmere oder kältere Farbwirkungen.
  - Der R_g-Wert korreliert stark mit den Bewertungen für Sättigung und Gefallen.
  - Für Bewertungen von Natürlichkeit und Farbqualität sind beide Größen maßgeblich.

Vergleich Hypothesen & Ergebnisse

- **Im Vergleich zur Leuchtstofflampe mit identischen R_f- und R_g-Werten werden pc LEDs bevorzugt.**
  - **Bei gleichen Werten wurde die Leuchtstofflampe besser im Gefallen bewertet.**
  - **Vergleichbare Bewertungen zur Leuchtstofflampe wurden mit LEDs (R_f = 75 & R_g = 105; R_f = 80 & R_g = 105) erzielt.**

Zusammenfassung

- Die Wahrnehmung der Farbqualität ist kein eindimensionales Problem. Viele Aspekte sind zu berücksichtigen und weder der R_f noch der R_g allein beschreiben die Farbqualität hinreichend.
- Optimierungen bezüglich des CIE R_a genauso wie des R_f optimieren in Bezug auf das Referenzspektrum. Sie sagen nichts über das Gefallen der Objektfarben aus.
- pc LED-Spektren mit $R_f \geq 80$ und R_g = 100, 105, 110 gefielen den Probanden im Vergleich zur Referenz besser.

Vielen Dank!

OSRAM
Opto Semiconductors

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

13N13395