

Tran Quoc Khanh, Peter Bodrogi
und Trinh Quang Vinh

Beleuchtung in Innenräumen – Human Centric Integrative Lighting

Technologie, Wahrnehmung,
nichtvisuelle Effekte



Inhaltsverzeichnis

[Cover](#)

[Titelseite](#)

[Impressum](#)

[Vorwort und Danksagung](#)

[1 Einleitung und Motivation](#)

[1.1 Einführung: ein historischer Rückblick und
aktuelle Fragestellungen](#)

[Literatur](#)

[2 Grundlagen der Lichttechnik – visuelle und nicht
visuelle Grundaspekte](#)

[2.1 Das menschliche Sehsystem: visuelle und nicht
visuelle Signalverarbeitung](#)

[2.2 Lichttechnische und farbmetrische Kenngrößen](#)

[2.3 Grundlagen der nicht visuellen Aspekte](#)

[Literatur](#)

[3 Grundprinzipien von Human Centric](#)

[Lighting/integrativer Beleuchtung](#)

[3.1 Grundsätzliche Fragestellungen, allgemeine
Aspekte](#)

[3.2 Eingangsgrößen – eine Systematik](#)

[3.3 Gehirnverarbeitung zur Bildung subjektiver und
objektiver Verhaltensgrößen](#)

[3.4 Timing-System, zirkadianer Rhythmus und
Schlafverhalten](#)

[3.5 Ausgangsgrößen des visuellen und des nicht
visuellen Gehirnverarbeitungsapparats: eine
Systematik](#)

3.6 Grundaspekte von Human Centric Lighting – Integrative Lighting_[35]

3.7 Werkzeuge und Methoden für die Ermittlung der subjektiv und objektiv messbaren Lichtwirkungen

Literatur

4 Sehleistungen – Arbeitsleistungen

4.1 Stand der Normung für Innenraumbeleuchtung am Beispiel der DIN EN 12464

4.2 Sehleistungen

4.3 Arbeitsleistungen

Literatur

5 Moderne Aspekte der Helligkeit und der visuellen Klarheit im Kontext der Lichtqualität und visuelle Leistung

5.1 Einführung

5.2 Versuchsmethode der Probandenstudie [23]

5.3 Modellierung der Helligkeit und der visuellen Klarheit

5.4 Zusammenfassung

Literatur

6 Farbqualität und psychophysisch-emotionale Aspekte, Laborexperimente

6.1 Einleitung

6.2 Bevorzugte horizontale Beleuchtungsstärken [1]

6.3 Bevorzugte Leuchtdichten von der Wand am Monitorarbeitsplatz

6.4 Bevorzugte Farbtemperaturen [23]

6.5 Bevorzugte Bereiche von Farbtemperaturen und Beleuchtungsstärken [25, 26]

[6.6 Bevorzugte Farborte \(Weißtöne\) \[37\]](#)

[6.7 Farbqualität](#)

[6.8 Farbpräferenz für die Beleuchtung des Hauttöns \[58\]](#)

[6.9 Farbwiedergabeindizes und deren semantische Bedeutung \[61\]](#)

[6.10 Zusammenfassung des Kapitels 6: Vorläufige Konsequenzen für die Innenraumbeleuchtung](#)

[Literatur](#)

[7 Neue Lichtqualitätsmodelle aus Laborexperimenten und Validation in Feldversuchen](#)

[7.1 Einführung](#)

[7.2 Eingangs- und Ausgangsparameter der Lichtqualitätsmodelle](#)

[7.3 Versuchsanordnungen für die Lichtqualitätsmodelle](#)

[7.4 Gleichungen der Lichtqualitätsmodelle](#)

[7.5 Modellierung mit dem circadian stimulus \(CS\)](#)

[7.6 Validation der Lichtqualitätsmodelle \(in Abschn. 7.4\) in drei Museen in Japan \[34\]](#)

[7.7 Zusammenfassung](#)

[Literatur](#)

[8 Korrelationsanalyse der HCL-Kenngrößen und Konsequenzen für die Messtechnik nicht visueller Effekte](#)

[8.1 Generelle Betrachtung der Korrelation der Kenngrößen für visuelle Leistung, Farbqualität und nicht visuelle Wirkungen](#)

[8.2 Spezifische Betrachtung der Korrelation der Kenngrößen für visuelle Leistung, Farbqualität und nicht visuelle Wirkungen](#)

8.3 Struktur und Kategorien der
Eingangskenngrößen im HCL-System
Literatur

9 Psychophysisch-emotionale Aspekte – visueller
Komfort und nicht visuelle Wirkungen

9.1 Psychologisch-emotionale Aspekte der
Lichtwirkung

9.2 Raumeindruck, Raumhelligkeit und
Gesichtsfeldleuchtdichte

9.3 Visueller Komfort – Flimmern und
stroboskopische Effekte

9.4 Nicht visuelle Lichtwirkungen in den
nächtlichen Stunden

9.5 Psychologische und gesundheitliche Aspekte
von Tageslicht

9.6 Einflüsse von Lichtintensität und Zeitpunkt der
Lichtexposition auf das Schlafverhalten [76]

9.7 Lichtwirkungen auf die Wachheit -
Literaturanalyse verschiedener Publikationen

9.8 Ergebnisse der Lichtwirkung auf die Wachheit
in der Frühschicht in einem Industriebetrieb

Literatur

10 Praktische HCL-Lichtmesstechnik im Innen-und
Außenbereich

10.1 Einführung [1]

10.2 Arbeitsthesen und Fragestellungen für die
HCL-Lichtmesstechnik [13]

10.3 Lichtmesstechnische Aspekte [13, 23, 29]

10.4 Zirkadian wirksame Bestrahlung im Außen-
und Innenbereich durch integrale Feldmessungen

10.5 Tageslichtmessung – fundamentale und praktische Ansätze

10.6 HCL-Lichtmessungen an Büroarbeitsplätzen

Literatur

11 Technologische Aspekte der HCL – Beleuchtung in Gebäuden

11.1 Einführung in die Thematik Smart Lighting nach [1]

11.2 Technische Grundlagen von Smart Lighting nach [3]

11.3 Struktur von Cloud-Software und Applikationsfälle

11.4 Lichtregelung und spektrale Optimierung für hochqualitatives und gesundes Licht

11.5 Farb- und Lichtsensorik

Literatur

12 HCL-Orientierte Beleuchtungsplanung – Grundaspekte und Umsetzung

12.1 Einordnung von HCL-Konzeption des Prozesses der Beleuchtungsqualität

12.2 Prozess und Einflussfaktoren zur Erzielung der Beleuchtungsqualität – Lichtplanung

12.3 Tageslicht und Tageslichtplanung

12.4 Spezifikation der HCL-Beleuchtungsanlagen für Tageszeit – Entwurf für eine Empfehlung

12.5 Dynamisches Licht – Steuerkurven

12.6 Beleuchtung für Nutzer/-innen mit höherem Lichtbedarf

Literatur

13 Zusammenfassung und Ausblick

13.1 Zusammenfassung

[13.2 Ausblick](#)

[Anhang A Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen \(Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V.\)](#)

[Literatur](#)

[Stichwortverzeichnis](#)

[Endbenutzer-Lizenzvereinbarung](#)

Tabellenverzeichnis

Kapitel 1

[Tab. 1.1 Große Meilensteine in der Entwicklung der Lichtquellentechnik. Quelle: ...](#)

[Tab. 1.2 Große Meilensteine in der Entwicklung der CIE-Farbmeterik. Quelle: TU Da...](#)

Kapitel 2

[Tab. 2.1 Konstanten für die fünf \$\varphi\$ -opischen...](#)

Kapitel 3

[Tab. 3.1 Freilaufende intrinsische zirkadiane Periodendauer. Quelle: Basierend a...](#)

Kapitel 4

[Tab. 4.1 Industrielle und handwerkliche Tätigkeiten – Elektro- und Elektronikind...](#)

[Tab. 4.2 Büros. Quelle: Tabelle 5.26 – DIN EN 12464:2011-08.](#)

[Tab. 4.3 Gesundheitseinrichtungen – Untersuchungsräume \(allgemein\). Quelle: Tabe...](#)

[Tab. 4.4 Kontraste von typischen Lesematerialien. Quelle: TU Darmstadt, zusammen...](#)

[Tab. 4.5 Leuchtdichten von Papiermaterialien unterschiedlicher Reflexionsgrade b...](#)

[Tab. 4.6 Sehfeldgrößen in Winkelminuten für flüssiges Lesen bei unterschiedliche...](#)

[Tab. 4.7 Sehobjektkontraste und kritische Detailabmessungen zur Kennzeichnung un...](#)

[Tab. 4.8 Testbedingungen der Sehleistungstests von Weston, 1945. Quelle: TU Darm...](#)

[Tab. 4.9 Notwendige Beleuchtungsstärken für eine relative Sehleistung \$P = 95\%\$ b...](#)

[Tab. 4.10 Testverfahren und Ergebnisse der Experimente von Boyce \(Quelle: Krüger...](#)

[Tab. 4.11 Die lichttechnischen Eigenschaften der Landolt-Ringe \(Typ A und Typ B\)...](#)

[Tab. 4.12 Testpersonen in den Experimenten von Lindner. Quelle: TU Darmstadt, zu...](#)

[Tab. 4.13 Ergebnis der Experimente von Lindner für die Altersgruppe 20–40 Jahre....](#)

[Tab. 4.14 Ergebnis der Experimente von Lindner für die Altersgruppe 50–60 Jahre....](#)

[Tab. 4.15 Arbeitsphysiologische Bewertungen im Laborversuch mit industriellem Ch...](#)

[Tab. 4.16 Arbeitsphysiologische Bewertungen im Betriebsversuch mit industriellem...](#)

[Tab. 4.17 Geometrie und lichttechnische Eigenschaften der Testaufgaben, s. Gl. \(...](#)

[Tab. 4.18 Durch die Autoren dieses Buchs errechnete Beleuchtungsstärken für eine...](#)

[Tab. 4.19 Nennbeleuchtungsstärke und Lichtrichtung für Arbeitsplätze mit erhöhte...](#)

Kapitel 5

[Tab. 5.1 Parameterwerte der Gl. \(5.3\) und die entsprechenden Werte des...](#)

[Tab. 5.2 Parameterwerte der Gl. \(5.3\) und die entsprechenden Werte des...](#)

Kapitel 6

[Tab. 6.1 Bevorzugte Beleuchtungsstärken aus Studien in den 1960er- und 1970er-Ja...](#)

[Tab. 6.2 Präferierte horizontale Beleuchtungsstärken in drei Feldstudien. Quelle...](#)

[Tab. 6.3 Bevorzugte Leuchtdichteverhältnisse und Leuchtdichten der Wand. Quelle:...](#)

[Tab. 6.4 Die ähnlichsten Farbtemperaturen \(CCT\) sowie die allgemeinen Farbwieder...](#)

[Tab. 6.5 Vergleich der mittleren visuellen Präferenzwerte \(s. Abb. 6.13\) zwische...](#)

[Tab. 6.6 Korrelationskoeffizienten der ähnlichsten Farbtemperatur \(CCT\) zu den N...](#)

[Tab. 6.7 Abhängigkeit der bevorzugten Farbtemperatur \(CCT in Kelvin\) und Beleuch...](#)

[Tab. 6.8 Wichtigste Wahrnehmungsaspekte der Farbqualität. Das subjektive Urteil ...](#)

[Tab. 6.9 Parameterwerte der Gl. \(6.11\) für die verschiedenen CCTs bei 750 lx. Nu...](#)

[Tab. 6.10 Parameterwerte der Gl. \(6.11\) für die verschiedenen CCTs bei 2000 lx. ...](#)

[Tab. 6.11 Zusammenfassung der Farbpräferenzergebnisse der Abb. 6.27 laut Gl. \(6....](#)

[Tab. 6.12 Farbmetrische Kenngrößen der elf LED-Spektren bei der Hauttonbeleuchtung...](#)

[Tab. 6.13 Farbmetrische Kenngrößen der zehn LED-Spektren bei der Hauttonbeleuchtung...](#)

[Tab. 6.14 Die 36 Spektren im Versuch zur Ermittlung der semantischen Bedeutung d...](#)

[Tab. 6.15 CIE Ra-Werte bei den spezifischen Werten der subjektiv ermittelten sem...](#)

[Tab. 6.16 CIE Rf-Werte bei den spezifischen Werten der subjektiv ermittelten sem...](#)

Kapitel 7

[Tab. 7.1 Beleuchtungsstärken \(Ev in Lux\), ähnlichste Farbtemperaturen \(CCT in Ke...](#)

[Tab. 7.2 Lichttechnische Parameter in den drei Versuchslokalitäten \(i = 1, 2, 3\)...](#)

Kapitel 8

[Tab. 8.1 Struktur der Daten für die Kenngrößenbewertung. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Tab. 8.2 Korrelationskoeffizienten zwischen den Kenngrößen der 387 untersuchten ...](#)

[Tab. 8.3 Korrelationskoeffizienten aller im kurzwelligen Bereich aktiven Signala...](#)

[Tab. 8.4 Korrelationen der Farbqualitätskenngrößen \(CQS Qp, IES Rf, IES Rg\), der...](#)

[Tab. 8.5 Korrelationskoeffizienten der Normfarbwertanteile x, y und z mit dem He...](#)

Kapitel 9

[Tab. 9.1 Vier Lichtszenarien im Feldversuch von Fleischer; vgl. mit Abb. 9.4. Qu...](#)

[Tab. 9.2 Lichtszenarien der Tab. 9.1, die zufriedenstellende Ergebnisse lieferte...](#)

[Tab. 9.3 Einstellungen der getesteten PWM-Signale \[1\]. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Tab. 9.4 Die Konstanten a, b, c und d für die logistischen Funktionen zur Beschr...](#)

[Tab. 9.5 Wert von circadian stimulus \(CS\) für verschiedene Kategorien unterarchie...](#)

[Tab. 9.6 Korrelationen und Signifikanz zwischen der Melatoninunterdrückung und d...](#)

[Tab. 9.7 Testbedingungen zur Bestimmung des Aktionsspektrums zur Melatoninunterd...](#)

[Tab. 9.8 Daten der Melatoninunterdrückung sowie die ermittelten CS- und die mit ...](#)

[Tab. 9.9 Beleuchtungsstärken am Auge \(in Lux\) von Jugendlichen und Erwachsenen b...](#)

[Tab. 9.10 Farbmétrische, fotométrische und zirkadian wirksame Kennwerte eines ge...](#)

[Tab. 9.11 Daten von drei ausgewählten Feldstudien zur Phasenverschiebung für Nac...](#)

[Tab. 9.12 Wesentliche Daten der Untersuchung über rotierende Schichten von Lowde...](#)

[Tab. 9.13 Prozentuelle Flächenanteile vom Fenster im Verhältnis zur Fassadenfläc...](#)

[Tab. 9.14 Empfehlungen von Beleuchtungsstärken bzw. Beleuchtungen am Auge für di...](#)

[Tab. 9.15 Farbmétrische Kenngrößen zum Vergleich Tageslicht - Kunstlicht. Quelle...](#)

[Tab. 9.16 Helligkeit - Kenngrößen zum Vergleich Tageslicht - Kunstlicht. Quelle:...](#)

[Tab. 9.17 Zirkadiane Kenngrößen und Lichtqualitätskenngrößen zum Vergleich Tages...](#)

[Tab. 9.18 Farbqualitätskennwerte von verglichenen Tageslicht- und Kunstlichtquel...](#)

[Tab. 9.19 Helligkeitskennwerte von verglichenen Tageslicht- und Kunstlichtquelle...](#)

[Tab. 9.20 Werte von amel-Faktoren, von Circadian Stimulus \(CS\) und Lichtqualität...](#)

[Tab. 9.21 Die durch Hommes und Giménez zusammengestellten Daten zur Rekonstrukt...](#)

[Tab. 9.22 t-Test-Ergebnisse für die Koeffizienten der Modelle für die Chronotypg...](#)

[Tab. 9.23 t-Test-Ergebnisse für die Koeffizienten der Modelle für die einzelnen ...](#)

Kapitel 10

[Tab. 10.1 Typische Gesichtsfelder entsprechend der Umgebungsbeleuchtung nach CIE...](#)

[Tab. 10.2 Melanopische Wirkungsfaktoren unterschiedlicher Lichtquellen nach \[20\]...](#)

[Tab. 10.3 Mittlere, maximale und Standardabweichungen bei der Ermittlung des Zus...](#)

[Tab. 10.4 Die Koeffizienten \(\$a_0\$ - \$a_6\$ \) der vier Polynomfunktionen sechsten Grades f...](#)

[Tab. 10.5 Die Anpassungsparameter \$a\$, \$b\$ und \$c\$ in der Gl. \(10.8\) nach Truong et al...](#)

[Tab. 10.6 Melanopische und farbmetrische Daten der 15 real gemessenen Spektren \(...\)](#)

[Tab. 10.7 Aus der Messung mit dem Spektroradiometer CSS-45 berechnete Beleuchtun...](#)

[Tab. 10.8 Auswertung des aus der LMK-Aufnahme herausgelösten Monitorbereichs \(s....](#)

Kapitel 11

[Tab. 11.1 Aktuelle Entwicklung der Pflegeeinrichtungen \(Heime und ambulante Pfle...](#)

[Tab. 11.2 Begriffe, Bedeutung und Anwendbarkeit der Komponenten der Vernetzungst...](#)

[Tab. 11.3 Datenformate und Datenbanktypen zur Abspeicherung. Quelle: \[3\].](#)

[Tab. 11.4 Übersicht über potenzielle Applikationsfälle. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Tab. 11.5 CS-Werte für vier konstante Farbtemperaturen und vier Beleuchtungsstär...](#)

[Tab. 11.6 Farbtemperatur \(CCT\) und Farbwiedergabeindizes \(CIE CRI\) der in der Ab...](#)

[Tab. 11.7 Ähnlichste Farbtemperatur, Farbwiedergabeindizes \(CIE CRI\) und melanop...](#)

[Tab. 11.8 Ähnlichste Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex \(CIE CRI\) und melanopis...](#)

[Tab. 11.9 Ähnlichste Farbtemperatur, Farbwiedergabeindizes \(CIE CRI\) und melanop...](#)

[Tab. 11.10 Ähnlichste Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex \(CIE CRI\) und melanopi...](#)

[Tab. 11.11 Ähnlichste Farbtemperatur \(CCT\), Farbwiedergabeindex \(CIE CRI Ra\) und...](#)

[Tab. 11.12 Kenngrößen der Licht- und Farbqualität sowie zirkadiane Kenngrößen fü...](#)

[Tab. 11.13 Farbtemperaturen und dominante Wellenlängen \$\lambda_d\$ von gemessenen Spektre...](#)

[Tab. 11.14 Unterschiedliche, mathematisch mögliche Matrizierungstypen für die Fa...](#)

[Tab. 11.15 Berechnung derfarbmetrischen und zirkadian wirksamen Metriken aus der...](#)

Kapitel 12

[Tab. 12.1 Kategorien zur Beschreibung der Impression einer Szene nach Flynn \[8\]....](#)

[Tab. 12.2 Raumerscheinungsmerkmale und die zugehörigen fotometrischen und farbme...](#)

[Tab. 12.3 Semantische Skalierung zur Gewichtung der Nutzeranforderungen \[22\]. Re...](#)

[Tab. 12.4 Liste der Nutzeranforderungen in vier verschiedenen Gruppen. Reproduzi...](#)

[Tab. 12.5 \(Fortgesetzt\). Liste der Nutzeranforderungen in vier verschiedenen Gru...](#)

[Tab. 12.6 \(Fortgesetzt\). Liste der Nutzeranforderungen in vier verschiedenen Gru...](#)

[Tab. 12.7 Empfehlung für die Tageslichtversorgung durch Tageslichtöffnungen in v...](#)

[Tab. 12.8 Werte vom Tageslichtkoeffizienten für die Stadt Berlin zwischen 1,8-2,...](#)

[Tab. 12.9 Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsfläche der angenommenen Modellräume...](#)

[Tab. 12.10 Die Beleuchtungsstärke- und Belichtungsdaten als mediane Werte für di...](#)

[Tab. 12.11 Lage der Arbeitszeit von abhängigen Beschäftigten \(n = 17 934\). Quell...](#)

[Tab. 12.12 Präferierte horizontale Beleuchtungsstärken von vier Feldstudien. Que...](#)

[Tab. 12.13 Interpretation der Ergebnisse von Hubalek et al. \[38, 49\] mit CS-Wert...](#)

[Tab. 12.14 Fotometrische, farbmetrische und zirkadian wirksame Kenngrößen und de...](#)

[Tab. 12.15 Entwurf für eine Empfehlung für eine präferierte und zirkadian wirksa...](#)

[Tab. 12.16 Empfehlungen von der SHC-Studie für eine Beleuchtungsanlage für eine ...](#)

[Tab. 12.17 CS-Werte und D65-äquivalente Beleuchtungsstärken am Auge bei der Real...](#)

[Tab. 12.18 CS-Werte und D65-äquivalente Beleuchtungsstärke am Auge bei der Reali...](#)

[Tab. 12.19 Faktor KPupille\(A\) in Abhängigkeit vom Alter. Quelle: \[52\].](#)

[Tab. 12.20 Zusammengeführte Ergebnisse von der Lichtstudie in einem Altenheim in...](#)

[Tab. 12.21 Fotometrische, farbmetrische und zirkadian wirksame Kennwerte für die...](#)

Abbildungsverzeichnis

Kapitel 1

[Abb. 1.1 Inhalte des vorhandenen Buchs. Quelle: TU Darmstadt.](#)

Kapitel 2

[Abb. 2.1 Aufbau des menschlichen Auges. O \(optic disk\): blinder Fleck - der Punk...](#)

[Abb. 2.2 Schematische Darstellung der retinalen Schaltkreise beim Menschen. Verb...](#)

[Abb. 2.3 Stäbchendichte \(durchgezogene Kurve\) und Zapfendichte \(Punkte\) in Abhän...](#)

[Abb. 2.4 Relative spektrale Empfindlichkeit der L-, M- und S-Zapfen \(engl. cones...](#)

[Abb. 2.5 Vergleich der 2°- Normspektralwertfunktionen...](#)

[Abb. 2.6 Wichtige Farborte in der Normfarbtafel. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 2.7 Relativer spektraler Strahlungsfluss \(\$\equiv 1\$ bei 555 nm\) der Schwarzkörper...](#)

[Abb. 2.8 Veranschaulichung eines dreidimensionalen Farbkörpers mit den Grundeige...](#)

[Abb. 2.9 Zwei Beobachtungsumstände mit dem gleichen Farbreiz. Farbreiz \(kleine K...](#)

[Abb. 2.10 Komprimierung der adaptierten Rezeptorsignale im CIECAM02-Farberschein...](#)

[Abb. 2.11 Experimentelle Daten nach Brainard et al. \[26\] und Thapan et al. \[27\]...](#)

[Abb. 2.12 Spektrale Empfindlichkeit der Fotorezeptoren bzw. der Netzhautmechanis...](#)

[Abb. 2.13 Berechnungsverfahren des Modells von Rea et al. \[24\]. Eingabegrofeen de...](#)

[Abb. 2.14 Vertikale Beleuchtungsstärkewerte \(Ordinate, in Lux\), die für die Erre...](#)

[Abb. 2.15 Vertikale Beleuchtungsstärkewerte \(Ordinate, in Lux\), die für die Erre...](#)

[Abb. 3.1 Übersicht der Eingangsgrößen, Einflussfaktoren und Ausgangsgrößen bei d...](#)

[Abb. 3.2 Vereinfachtes Schema der Signalübertragung von der Lichtquelle bis zum ...](#)

[Abb. 3.3 Beispiel einer beleuchteten und mit Objekten ausgestatteten Innenraumsz...](#)

[Abb. 3.4 Spektren der Tageslichtphasen D50 und D65 sowie die thermischen Strahle...](#)

[Abb. 3.5 Relative Spektren derzeitiger Halbleiter-LEDs verschiedener Peakwellenl...](#)

[Abb. 3.6 Spektrale Empfindlichkeitskurven für Tagessehen, Nachtsehen und das bei...](#)

[Abb. 3.7 Verschaltung in der Bipolarschicht \(nach Hubel, 1989 \[2\]\). Reproduziert...](#)

[Abb. 3.8 Sehbahn im Gehirn. Quelle: TU Darmstadt \[1\].](#)

[Abb. 3.9 Verarbeitungsschaltung für die visuelle Wahrnehmung. Quelle: TU Darmsta...](#)

[Abb. 3.10 Verarbeitungszentren und Übertragungsbahnen für nicht visuelle Lichtwi...](#)

[Abb. 3.11 Verarbeitungszentren und Übertragungsbahnen des ipRGC-Signals mit dem ...](#)

[Abb. 3.12 Zirkadiane Rhythmen von den beiden Hormonarten Melatonin und Cortisol ...](#)

[Abb. 3.13 Unterschiedliche ipRGC-Signalbahnen wirken auf das Lernen und die Stim...](#)

[Abb. 3.14 Phase response curve \(PRC\). Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 3.15 Zirkadiane und homöostatische Komponenten der Wachheit über zwei Tage....](#)

[Abb. 3.16 Ausgangsgrößen des visuellen und nicht visuellen Gehirnverarbeitungsap...](#)

[Abb. 3.17 Struktur und Rahmen der HCL-Kenngrößen, die aus dem Spektrum der Bele...](#)

[Abb. 3.18 Gesamtheit der HCL-Komplexe. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 3.19 KSS-Fragebogen \(Karolinska Sleepiness Scale\) in deutscher Sprache. Que...](#)

Kapitel 4

[Abb. 4.1 Fotometrische Kenngrößen in den internationalen Normungen der Innenraum...](#)

[Abb. 4.2 Bewertungsverfahren für die notwendigen Beleuchtungsniveaus. Quelle: TU...](#)

[Abb. 4.3 Zur Veranschaulichung des Begriffs Kontrast in Gl. \(4.1\). Quelle: TU Da...](#)

[Abb. 4.4 Landolt-Ringe mit unterschiedlichen Größen und Orientierungen von Ringl...](#)

[Abb. 4.5 Schriftreihen mit unterschiedlichen Kontrasten und Schriftgrößen. Quell...](#)

[Abb. 4.6 Relative visuelle Leistung RVP als Funktion des Kontrastes mit den Adap...](#)

[Abb. 4.7 Relative visuelle Leistung RVP als Funktion der Adaptationsleuchtdichte...](#)

[Abb. 4.8 Das RVP-Modell von Rea und Ouelette von 1991 in mathematischer Form \[5\]...](#)

[Abb. 4.9 Relative visuelle Leistung von drei unterschiedlichen Altersgruppen bei...](#)

[Abb. 4.10 Absolute Sehleistung P als Funktion der Beleuchtungsstärke, Kontrast u...](#)

[Abb. 4.11 Leistungsorientierte Einflussphären des Beleuchtungsniveaus nach \[13\]...](#)

[Abb. 4.12 Prozess und Komponenten zur Arbeitsleistungserzeugung- und Regelung na...](#)

[Abb. 4.13 Kompensationsphasen nach Haider und Rohmert \(1978\) Quelle: Kruger et a...](#)

[Abb. 4.14 Leistung und Fehler in Abhängigkeit von Beleuchtungsstarken in den Exp...](#)

Kapitel 5

[Abb. 5.1 Stufen der Entwicklung der lichttechnischen Kenngrößen zur Beschreibung...](#)

[Abb. 5.2 Sehklarheit mit achromatischen und chromatischen Kontrasten: \(a\)_gering...](#)

[Abb. 5.3 Signalkomponenten des menschlichen Sehsystems zur Bildung einer numeris...](#)

[Abb. 5.4 Spektrale Empfindlichkeit der Stäbchen, S-Zapfen und der...](#)

[Abb. 5.5 Versuchsanordnung zur Bestimmung der subjektiven Beurteilung von Hellig...](#)

[Abb. 5.6 Spektren in den untersuchten 25 Beleuchtungssituationen in der Probande...](#)

[Abb. 5.7 Mittlere, visuell skalierte Helligkeitswerte aller Beobachter aus...](#)

[Abb. 5.8 Mittlere, visuell skalierte Helligkeitswerte aller Beobachter aus..](#)

[Abb. 5.9 Zusammenhang \(\$r^2 = 0,97\$ \) zwischen der mittleren, visuell skalierten Seh...](#)

[Abb. 5.10 Mittlere, visuell skalierte Sehklarheitswerte aller Beobachter aus dem...](#)

[Abb. 5.11 Mittlere, visuell skalierte
Sehklarheitswerte aller Beobachter aus dem...](#)

Kapitel 6

[Abb. 6.1 Testaufbau mit Tisch, zwei Displays vor
den Versuchspersonen \(Laptop un...](#)

[Abb. 6.2 Das Display mit der Folie 1 \(mit \$r = g = b\$
 \$= 255\$ \). Die Größe des Laptop...](#)

[Abb. 6.3 Mittlere relative Spektren \(gemittelt über
die acht Leuchtdichteniveaus...](#)

[Abb. 6.4 Bewertungsbogen der Probanden für die
Frage Nr. 4 - allgemeine Annehmli...](#)

[Abb. 6.5 Mittlere Bewertung der 23
Versuchspersonen für die allgemeine Annehmlic...](#)

[Abb. 6.6 Mittlere Bewertung der 23
Versuchspersonen für die allgemeine Annehmlic...](#)

[Abb. 6.7 Spektren von zwei typischen
Tageslichtphasen \(D50 und D65\) sowie von zw...](#)

[Abb. 6.8 Spektren der untersuchten
Testlichtquellen in der Studie \[23\]. Quelle: ...](#)

[Abb. 6.9 Beleuchtung des Testraums mit weißen
Objekten auf dem Tisch mit weißen ...](#)

[Abb. 6.10 Die spektralen Strahldichtekoeffizienten
der weißen bzw. neutralen Obj...](#)

[Abb. 6.11 Objektspezifische Farbwiedergabeindizes
für die weißen bzw. neutralen ...](#)

[Abb. 6.12 Fragebogen für die Testpersonen bei den
zwei getesteten Lichtniveaus f...](#)

[Abb. 6.13 Mittelwerte und deren 95%-
Konfidenzintervalle für jede Farbtemperatur ...](#)

[Abb. 6.14 Korrelation zwischen der Größe \(B/Lv\) nach Fotios nach Gl. \(6.3\) und d...](#)

[Abb. 6.15 Das Kruithof-Diagramm, durch die Autoren aus \[33\] rekonstruiert. Quell...](#)

[Abb. 6.16 Tisch mit farbigen Objekten und einer weißen Tischdecke im ersten Expe...](#)

[Abb. 6.17 Kategorie \(laut Abb. 7.2b\) der mittleren Szenenpräferenzbewertung alle...](#)

[Abb. 6.18 Wolke kleiner Punkte: Bereich der sog. „industriellen“ Weißpunkte \(eng...](#)

[Abb. 6.19 Kammer eines Beobachtungskastens mit farbigen Objekten, die \(a\) in Exp...](#)

[Abb. 6.20 Vergleich verschiedener experimenteller Daten für die Weißtonpräferenz...](#)

[Abb. 6.21 Veranschaulichung der Natürlichkeit \(Farbtreue oder Farbwiedergabeeige...](#)

[Abb. 6.22 Die 14 CIE-Testfarben. Zur Berechnung des aktuellen allgemeinen CIE-Fa...](#)

[Abb. 6.23 Die 15 CQS-Testfarben. Quelle: CQS-Berechnungstabelle \[47\] \(NIST, USA,...](#)

[Abb. 6.24 Stilllebenanordnungen der verwendeten farbigen Objekte. Die vertikale ...](#)

[Abb. 6.25 Mittlere visuelle Skalenwerte der Farbpräferenz-, Natürlichkeits- und ...](#)

[Abb. 6.26 Stillleben im Experiment für die subjektive Bewertung der Farbpräferen...](#)

[Abb. 6.27 Modellkurven der Farbpräferenz mit der Kenngröße CQ \(Gl. 6.11\) mit den ...](#)

[Abb. 6.28 Spektrale Reflexionsgrade von roten und blauen Objekten sowie die rela...](#)

[Abb. 6.29 Beispiel für das Diagramm IES TM-30 Color Vector Graphics. Abszisse: no...](#)

[Abb. 6.30 Messanordnung zur Messung des spektralen Strahldichtefaktors der Haut...](#)

[Abb. 6.31 Spektrale Strahldichtefaktoren der Hauttöne der 15 Testpersonen. Quell...](#)

[Abb. 6.32 Spektrale Strahldichtefaktoren der Hauttöne der 32 Testpersonen aus de...](#)

[Abb. 6.33 Anordnung zur visuellen Bewertung der Hauttonbeleuchtung. Quelle: TU D...](#)

[Abb. 6.34 LED-Spektren von elf verschiedenen Sättigungsstufen \(\$\Delta C^*\$ \) und Schwar...](#)

[Abb. 6.35 Spektren von zehn Sättigungsstufen bei der ähnlichsten Farbtemperatur ...](#)

[Abb. 6.36 Mittlere subjektive Farbpräferenzwerte für den Hautton von 15 jungen n...](#)

[Abb. 6.37 Zusammenhang zwischen der subjektiven Farbpräferenzbewertung für den H...](#)

[Abb. 6.38 Mittlere subjektive Farbpräferenzwerte für den Hautton von 15 jungen n...](#)

[Abb. 6.39 Zusammenhang zwischen der subjektiven Farbpräferenzbewertung für den H...](#)

[Abb. 6.40 Anordnung des Versuchs zur semantischen Bedeutung der Farbwiedergabeei...](#)

[Abb. 6.41 Zusammenhang des Farbwiedergabeindex Ra mit der subjektiv ermittelten ...](#)

[Abb. 6.42 Zusammenhang des Farbwiedergabeindex Rf mit der subjektiv ermittelten ...](#)

Kapitel 7

[Abb. 7.1 Vier Testaufbauten für \(a\) die Helligkeit, \(b\) visuelle Klarheit oder S...](#)

[Abb. 7.2 Bewertungsskalen: \(a\) für die Helligkeit, \(b\) für die visuelle Klarheit...](#)

[Abb. 7.3 Spektren der 36 Lichteinstellungen während der vier visuellen Experimen...](#)

[Abb. 7.4 Mittlere, visuell skalierte Helligkeit B der Versuchspersonen als Funkt...](#)

[Abb. 7.5 \(a\) Sehklarheit \(visuelle Klarheit\) als Funktion der Beleuchtungsstärke...](#)

[Abb. 7.6 Metrik der visuellen Klarheit \(VC\) nach Gl. \(7.3\) als Funktion der Bele...](#)

[Abb. 7.7 Abhängigkeit des zweiten Terms der Gl. \(7.4\), \$\[-0,003\Delta C^2 + 0,0252\Delta C^* + ...\$](#)

[Abb. 7.8 Korrelation zwischen dem CP-Modell nach Gl. \(7.4\) und dem visuell skali...](#)

[Abb. 7.9 Farbpräferenzmetrik \(CP\) der Gl. \(7.4\) als Funktion der Beleuchtungsstä...](#)

[Abb. 7.10 Mittelwerte der visuell skalierten Szenenpräferenz \(oder Raumpräferenz...](#)

[Abb. 7.11 Szenenpräferenzwerte SP aus dem SP-Modell nach Gl. \(7.5\) als Funktion ...](#)

[Abb. 7.12 Abhängigkeit der mittleren subjektiven Helligkeit \(B\) vom circadian st...](#)

[Abb. 7.13 Abhängigkeit der mittleren subjektiven visuellen Klarheit \(VC\) von der...](#)

[Abb. 7.14 Abhängigkeit der mittleren subjektiven Farbpräferenz \(CP\) von der Mode...](#)

[Abb. 7.15 Abhängigkeit der mittleren subjektiven Szenenpräferenz \(SP\) von der Mo...](#)

[Abb. 7.16 VC-Werte des Modells der visuellen Klarheit in einem \$\Delta C^*\$ -CS-Konturdiag...](#)

[Abb. 7.17 Unterschiedliche CP-Werte in \$\Delta C^*\$ -CS-Konturdiagrammen gemäß Gl. \(7.8\). ...](#)

[Abb. 7.18 Unterschiedliche SP-Werte in \$\Delta C^*\$ -CS-Konturdiagrammen gemäß Gl. \(7.9\)....](#)

Kapitel 8

[Abb. 8.1 Die drei Hauptkomponenten der HCL-Lichttechnik. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 8.2 Komponenten zur Bildung einer numerischen Kenngröße für die Helligkeits...](#)

[Abb. 8.3 Kenngrößen für eine umfassende HCL-orientierte Charakterisierung der Li...](#)

[Abb. 8.4 Relative Spektren der 387 untersuchten Lichtquellen. Quelle: TU Darmstad...](#)

[Abb. 8.5 Korrelation zwischen den beiden Farbwiedergabeindizes CIE Ra \(1995\) und...](#)

[Abb. 8.6 Korrelation zwischen dem Farbgamutindex Rg und dem Farbwiedergabeindex ...](#)

[Abb. 8.7 Korrelation zwischen Helligkeitswerten nach den Formeln von Fotios et a...](#)

[Abb. 8.8 Korrelation zwischen der ähnlichsten Farbtemperatur \(CCT in Kelvin\) und...](#)

[Abb. 8.9 Korrelation zwischen dem amel-Wert und der Helligkeit nach Fotios et al...](#)

[Abb. 8.10 Korrelation zwischen dem amel-Wert und dem Farbwiedergabeindex Ra für ...](#)

[Abb. 8.11 Lichtausbeute \(in Lumen pro Watt\) und Farbwiedergabeindex CIE Ra der 3...](#)

[Abb. 8.12 Die Faktoren CS \[20\] und \$\ln\(a \cdot m_e \cdot 500 \text{ lx}\)\$ bei einer vertikalen Beleuc...](#)

[Abb. 8.13 CS-Faktor bei einer Beleuchtungsstärke von \$E_v = 500 \text{ lx}\$ und die Helligk...](#)

[Abb. 8.14 Vergleich der Kenngröße CQS \$Q_p\$ \[17\] mit \(a\) den Kenngrößen CS \[20\] und...](#)

[Abb. 8.15 Struktur der HCL-Ausgangsgrößen \[21\]. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 8.16 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Rezeptortypen und physiologisc...](#)

[Abb. 8.17 Gegenüberstellung der relativen Signale der Melatoninunterdrückung in ...](#)

Kapitel 9

[Abb. 9.1 Charakterisierung der menschlichen Emotionen mit dem PAD-Modell \[4, 7\]....](#)

[Abb. 9.2 Emotionale Einflussfaktoren aus der Sicht des Human Centric Lighting na...](#)

[Abb. 9.3 Emotionale Einflussfaktoren in einem Innenraum aus der Sicht des Human ...](#)

[Abb. 9.4 Schema zur Wirkung von Umweltreizen nach \[7\]. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 9.5 Funktionsprinzip des himmelszustandsabhängigen Lichtszenarios D nach \[7...](#)

[Abb. 9.6 50 %-Konfidenzbereiche der Lichtsituationseinstellung mit den Parameter...](#)

[Abb. 9.7 Für den Vormittag zwischen 8-12 Uhr favorisierte Lichtsituation nach \[7...](#)

Abb. 9.8 Die für den Nachmittag zwischen 15-18 Uhr favorisierte Lichtsituation n...

Abb. 9.9 Attribut Pleasure (Gefallen) für die zwei Lichtsituationen ww/tw und tw...

Abb. 9.10 Der Faktor arousal (Aktivierung) für die zwei Lichtsituationen ww/tw u...

Abb. 9.11 Gesichtsfeld einer sitzenden Person bei der Sichtlinie des Auges in de...

Abb. 9.12 Die wahrgenommene Raumhelligkeit in Abhängigkeit von der Leuchtdichte ...

Abb. 9.13 Helligkeitsbewertung der Wand senkrecht zur Blickrichtung bei einer ko...

Abb. 9.14 Helligkeitsbewertung der Raumdecke bei einer konstanten Beleuchtungsst...

Abb. 9.15 Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur weißer LEDs bei Pulsweitenmodu...

Abb. 9.16 Stroboskopeffekt bei (a) langsamer und (b) schneller Objektbewegung. Q...

Abb. 9.17 Stroboskopeffekt bei kritischer Flimmerfrequenz und (a) kleinem Tastve...

Abb. 9.18 Untersuchung [1] wurde in einem Büroraum mit weißen Wänden und ohne Ta...

Abb. 9.19 Die drei verwendeten Signaltypen [1]. Quelle: TU Darmstadt.

Abb. 9.20 Leuchtdichteverteilung aus Sicht der Testperson [1]. Quelle: TU Darmst...

Abb. 9.21 Die Probanden mussten mit zum Teil schnellen aber natürlichen Bewegung...

Abb. 9.22 Histogramm der Altersverteilung der Testpersonen [1]. Quelle: TU Darms...

[Abb. 9.23 Mittlere Auffälligkeit nach Aufgaben \[1\].
\(a\) Tastverhältnis 20 % und ...](#)

[Abb. 9.24 Mittlerer Störfaktor nach Aufgaben \[1\].
\(a\) Tastverhältnis 20 % und \(b...](#)

[Abb. 9.25 Bewertung der Auffälligkeit bei Aufgabe
5, Tastverhältnis 20% \[1\]. Que...](#)

[Abb. 9.26 Bewertung des Störfaktors bei Aufgabe
5, Tastverhältnis 20 % \[1\]. Quel...](#)

[Abb. 9.27 Histogramm der Bewertungen der
Aufgabe 5, Tastverhältnis 20 % \[1\]. Que...](#)

[Abb. 9.28 Mittelwerte von Männern und Frauen,
Aufgabe 5, Tastverhältnis 20 % \[1\]...](#)

[Abb. 9.29 Lichttechnische Größen,
Einflussparameter und Lichtwirkungen in den nä...](#)

[Abb. 9.30 Daten und mathematische Beziehungen
zwischen Beleuchtungsstärke am Aug...](#)

[Abb. 9.31 Daten und Beziehungen zwischen
Beleuchtungsstärke am Auge und den Ausg...](#)

[Abb. 9.32 Zeitliche Verläufe der vier Variablen \(a\).
Melatoninunterdrückung, \(b\)...](#)

[Abb. 9.33 Daten der Melatoninunterdrückung von
Brainard und Thapan \(in Prozent\) ...](#)

[Abb. 9.34 Daten der Melatoninunterdrückung von
Brainard und Thapan \(in Prozent\) ...](#)

[Abb. 9.35 CSt-Werte in Abhängigkeit von
log₁₀\(CLA\) und Belichtungsdauer. Quelle:...](#)

[Abb. 9.36 Messaufbau für die Messung der
spektralen Bestrahlungsstärke in einem ...](#)

[Abb. 9.37 Verlauf der Beleuchtungsstärke und der
Farbtemperatur in einem Abstand...](#)

[Abb. 9.38 Homöostatische \(S\), zirkadiane Wachheitskomponente und die Summe davon...](#)

[Abb. 9.39 PRC-Kurve \(engl. phase response curve\) nach \[32, 33\]. Reproduziert aus...](#)

[Abb. 9.40 Zeitregime der Schichtenrotation, Beleuchtungsprofil und die Wechselun...](#)

[Abb. 9.41 Systematik der Themen im Zusammenhang mit der Tageslichtnutzung. Quell...](#)

[Abb. 9.42 Tageslichtspektrum \(gemessen in Darmstadt\) und Spektren von Leuchtstof...](#)

[Abb. 9.43 Tageslichtspektren, Spektren von leuchtstoffkonvertierten weißen LEDs ...](#)

[Abb. 9.44 Verteilung von einem tageslichtähnlichen LED-Vollspektrum und von eine...](#)

[Abb. 9.45 Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems Wachheit im kybernetischen Si...](#)

[Abb. 9.46 \$\Delta KSS\$ In Abhängigkeit von der fotopischen Beleuchtungsstärke \(engl. p-i...](#)

[Abb. 9.47 \$\Delta KSS\$ in Abhängigkeit von der melanopisch wirksamen Beleuchtungsstärke ...](#)

Kapitel 10

[Abb. 10.1 Struktur der Kenngrößen am Eingang und am Ausgang des menschlichen Lic...](#)

[Abb. 10.2 Münch et al. formuliert drei Gruppen von Wissenslücken in der Tageslic...](#)

[Abb. 10.3 Schematische Verteilung der ipRGCs auf der Netzhaut und die daraus res...](#)

[Abb. 10.4 Schematische Darstellung der Gesichtsfeldregionen nach Broszio et al.,...](#)

[Abb. 10.5 Beispielanwendung der Gesichtsfeldmaskierung nach Broszio et al. aus d...](#)

[Abb. 10.6 Komponenten zur Bildung einer numerischen Kenngröße für die Helligkeit...](#)

[Abb. 10.7 Aktionsspektren für die fünf Rezeptorenkanäle sowie die Normspektralwe...](#)

[Abb. 10.8 Der Weg von circadian light \(CL\) bis zum CS-Wert bzw. der Melatoninunt...](#)

[Abb. 10.9 Zusammenhang zwischen CS und der Größe \$\log_{10}\(E_v \cdot a_{mel}\)\$. Quelle: TU D...](#)

[Abb. 10.10 Zusammenhang zwischen dem circadian stimulus \(CS\) und dem Konstrukt F...](#)

[Abb. 10.11 Zusammenhang zwischen den aus den originalen Spektren berechneten CS-...](#)

[Abb. 10.12 Dreidimensionale Darstellung des funktionalen Zusammenhangs \$CS = f\(E_v...\$](#)

[Abb. 10.13 Mobile Feldmessung der zirkadian wirksamen Bestrahlung mit einem Fahr...](#)

[Abb. 10.14 Aufenthaltsorte im Außenbereich und in einem Kaufhaus mit fensterlose...](#)

[Abb. 10.15 Verläufe der \(a\) vertikalen Beleuchtungsstärke und \(b\) der Farbtemper...](#)

[Abb. 10.16 CS-Werte im Außenbereich und im Kaufhaus. Quelle: TU Darmstadt.](#)

[Abb. 10.17 Wetterverläufe am Messtag 3. Juli 2017. Quelle: \[www.timeanddate.de/we...\]\(http://www.timeanddate.de/we...\)](#)

[Abb. 10.18 Fotos an verschiedenen Orten am 3. Juli 2017 aufgenommen. Quelle: TU ...](#)

[Abb. 10.19 Aufzeichnung der vertikalen Beleuchtungsstärke von 8:54 bis 23:05 Uhr...](#)

[Abb. 10.20 Aufzeichnung der Farbtemperatur von 8:54 bis 23:05 Uhr am 3. Juli 201...](#)

[Abb. 10.21 Der CS-Wertverlauf über den Tag von 8:54 bis 23:05 Uhr am 3. Juli 201...](#)

[Abb. 10.22 Zeitliche Verläufe der vertikalen Beleuchtungsstärken und der Farbtem...](#)

[Abb. 10.23 Zeitliche Verläufe der Farbtemperatur und der CS-Werte ab 18:00 Uhr i...](#)

[Abb. 10.24 Horizontale Beleuchtungsstärken \(Rechteck-Kurve\) und Farbtemperaturen...](#)

[Abb. 10.25 Verlauf der CS-Werte \(Rechteckkurve\) und der Farbtemperaturen \(Kreisk...](#)

[Abb. 10.26 Spektren von 6:32 bis etwa 20:45 Uhr in einem ca. 60-minütigen Abstan...](#)

[Abb. 10.27 Verhältnisse der 15 real gemessenen Spektren \(s. Abb. 10.26\) zu den 2...](#)

[Abb. 10.28 Prinzipieller Aufbau der Leuchtdichtemesskamera LMK 5 Color. Reproduz...](#)

[Abb. 10.29 Messaufbau aus Spektralradiometer CSS-45 \(links\) und der Leuchtdichte...](#)

[Abb. 10.30 Verwendung der in Abb. 10.29 dargestellten Messgeräte am Büroarbeitsp...](#)

[Abb. 10.31 Spektrale Strahldichtemessung einer Lichtquelle \(hier Monitor\) mittel...](#)

[Abb. 10.32 Mittels CS-2000-Messung ermittelte spektrale Strahldichten verschiede...](#)

[Abb. 10.33 Beispiel einer Monitormaskierung der LMK-Aufnahme. Nur der innere Ber...](#)