

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort und Danksagung	<i>V</i>
1	Einleitung und Motivation	<i>1</i>
1.1	Einführung: ein historischer Rückblick und aktuelle Fragestellungen	<i>1</i>
	Literatur	<i>4</i>
2	Grundlagen der Lichttechnik – visuelle und nicht visuelle Grundaspekte	<i>5</i>
2.1	Das menschliche Sehsystem: visuelle und nicht visuelle Signalverarbeitung	<i>5</i>
2.2	Lichttechnische und farbmimetrische Kenngrößen	<i>10</i>
2.2.1	Lichttechnik und Farbmimetrik	<i>10</i>
2.2.2	Farbmimetrik: CIE-Normvalenzsystem und CIE-Normfarbtafel	<i>11</i>
2.2.3	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farbräume, Farbdifferenzformeln	<i>14</i>
2.2.4	Das CIECAM02-Farberscheinungsmodell	<i>16</i>
2.2.5	CAM02-UCS-Farbraum	<i>19</i>
2.3	Grundlagen der nicht visuellen Aspekte	<i>19</i>
2.3.1	Melatoninunterdrückung in der Nacht	<i>19</i>
2.3.2	Modellierung der Melatoninunterdrückung in der Nacht mit dem zirkadianen Stimulus (CS) und dem melanopischen Wirkungsfaktor	<i>21</i>
2.3.3	Spektrale Aktivitätsfunktionen nach der CIE	<i>24</i>
2.3.4	Mathematische Zusammenhänge zwischen circadian stimulus (CS), melanopischer Beleuchtungsstärke und D65-äquivalenter Beleuchtungsstärke	<i>25</i>
	Literatur	<i>26</i>
3	Grundprinzipien von Human Centric Lighting/integrativer Beleuchtung	<i>29</i>
3.1	Grundsätzliche Fragestellungen, allgemeine Aspekte	<i>29</i>
3.2	Eingangsgrößen – eine Systematik	<i>31</i>
3.3	Gehirnverarbeitung zur Bildung subjektiver und objektiver Verhaltensgrößen	<i>34</i>
3.3.1	Visuelle Verarbeitungssysteme	<i>34</i>
3.3.2	Verarbeitungszentren und Übertragungsbahnen für nicht visuelle Lichtwirkungen	<i>40</i>
3.4	Timing-System, zirkadianer Rhythmus und Schlafverhalten	<i>44</i>
3.4.1	Fragestellungen	<i>44</i>

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 3.4.2 Timing-System: Entrainment, Zeitgeberrolle 45
- 3.4.3 PRC-Funktion, Phasenverschiebung 46
- 3.4.4 Chronotypen, Schlafverhalten 47
- 3.5 Ausgangsgrößen des visuellen und des nicht visuellen
Gehirnverarbeitungsapparats: eine Systematik 49
- 3.6 Grundaspekte von Human Centric Lighting – Integrative Lighting 49
- 3.7 Werkzeuge und Methoden für die Ermittlung der subjektiv und objektiv
messbaren Lichtwirkungen 53
- 3.7.1 Fragebögen zur umfassenden subjektiven Bestimmung der Beleuchtungsqualität
von Innenräumen 53
- 3.7.2 Fragebögen zum Schlafverhalten, Schläfrigkeit, Wachheit – subjektive Basis 54
- 3.7.3 Objektive Methoden und Werkzeuge 55
- Literatur 56

- 4 Sehleistungen – Arbeitsleistungen 59**
- 4.1 Stand der Normung für Innenraumbeleuchtung am Beispiel der
DIN EN 12464 59
- 4.2 Sehleistungen 64
- 4.2.1 Definition und Einflussfaktoren 64
- 4.2.2 Das RVP-Modell von Rea, 1991 66
- 4.2.3 Das Modell von Kokoschka auf der Datenbasis von Weston 70
- 4.3 Arbeitsleistungen 73
- 4.3.1 Zuordnung der Arbeitsleistungsaspekte 73
- 4.3.2 Modell zur Beanspruchungsregulation bei schlechter Beleuchtung 74
- 4.3.3 Einfluss des Beleuchtungsniveaus auf die geistige Arbeit 76
- 4.3.4 Einfluss des Beleuchtungsniveaus auf die Arbeitsleistung
an Industriearbeitsplätzen 81
- 4.3.5 Zusammenfassung der Aussagekraft der Sehleistungs- und
Arbeitsleistungsergebnisse – vorläufige Konsequenzen für die
Innenraumbeleuchtung 84
- Literatur 85

- 5 Moderne Aspekte der Helligkeit und der visuellen Klarheit im Kontext
der Lichtqualität und visuelle Leistung 87**
- 5.1 Einführung 87
- 5.2 Versuchsmethode der Probandenstudie 92
- 5.3 Modellierung der Helligkeit und der visuellen Klarheit 94
- 5.4 Zusammenfassung 99
- Literatur 100

- 6 Farbqualität und psychophysisch-emotionale Aspekte, Laborexperimente 103**
- 6.1 Einleitung 103
- 6.2 Bevorzugte horizontale Beleuchtungsstärken 104
- 6.3 Bevorzugte Leuchtdichten von der Wand am Monitorarbeitsplatz 106
- 6.3.1 Einführung 106
- 6.3.2 Versuchsmethode 107

- 6.3.3 Auswertung der Ergebnisse 112
- 6.3.4 Zusammenfassung 112
- 6.4 Bevorzugte Farbtemperaturen 114
- 6.4.1 Einführung 114
- 6.4.2 Experimentelle Methode 115
- 6.4.3 Ergebnisse und Diskussion 120
- 6.5 Bevorzugte Bereiche von Farbtemperaturen und Beleuchtungsstärken 122
- 6.5.1 Das Wesen der Beleuchtungsstärke und der Farbtemperatur 122
- 6.5.2 Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur in der Literatur 123
- 6.5.3 Visuelle Experimente zum kombinierten Effekt von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke 125
- 6.5.4 Ergebnisse: kombinierter Effekt von Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke 127
- 6.5.5 Abhängigkeit der bevorzugten Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke von Alter und Geschlecht für Aktivierung und Entspannung 128
- 6.6 Bevorzugte Farborte (Weißtöne) 130
- 6.6.1 Einführung 130
- 6.6.2 Versuchsmethode 132
- 6.6.3 Ergebnisse 132
- 6.7 Farbqualität 134
- 6.7.1 Wahrnehmungsaspekte der Farbqualität 134
- 6.7.2 Modellierung der Farbpräferenz, der Natürlichkeit und der Lebhaftigkeit 139
- 6.7.3 Berücksichtigung von roten Objektfarben im Farbpräferenzmodell 144
- 6.8 Farbpräferenz für die Beleuchtung des Hauttons 147
- 6.8.1 Einführung 147
- 6.8.2 Methode des Versuchs zur Farbpräferenz für die Beleuchtung des Hauttons 147
- 6.8.3 Ergebnisse der subjektiven Skalierung der Farbpräferenz für den Hautton und optimale Sättigungsstufen 152
- 6.9 Farbwiedergabeindizes und deren semantische Bedeutung 155
- 6.9.1 Einführung 155
- 6.9.2 Methodik des Experiments zur semantischen Bedeutung der Farbwiedergabeindizes 155
- 6.9.3 Ergebnisse des Experiments zur semantischen Bedeutung der Farbwiedergabeindizes 158
- 6.10 Zusammenfassung des Kapitels 6: Vorläufige Konsequenzen für die Innenraumbeleuchtung 159
- Literatur 160
- 7 Neue Lichtqualitätsmodelle aus Laborexperimenten und Validation in Feldversuchen 163**
- 7.1 Einführung 163
- 7.2 Eingangs- und Ausgangsparameter der Lichtqualitätsmodelle 165
- 7.2.1 Eingangsparameter 165
- 7.2.2 Ausgangsparameter 165
- 7.3 Versuchsanordnungen für die Lichtqualitätsmodelle 166
- 7.4 Gleichungen der Lichtqualitätsmodelle 170

x | *Inhaltsverzeichnis*

- 7.4.1 Helligkeit 170
- 7.4.2 Visuelle Klarheit 171
- 7.4.3 Farbpräferenz 173
- 7.4.4 Szenenpräferenz 175
- 7.5 Modellierung mit dem circadian stimulus (CS) 175
 - 7.5.1 Berechnungsmethode 178
 - 7.5.2 Helligkeit 178
 - 7.5.3 Visuelle Klarheit (VC) 179
 - 7.5.4 Farbpräferenz (CP) 179
 - 7.5.5 Szenenpräferenz (SP) 181
 - 7.5.6 Visualisierung der VC-, CP- und SP-Modelle in Konturdiagrammen 181
- 7.6 Validation der Lichtqualitätsmodelle in drei Museen in Japan 183
- 7.7 Zusammenfassung 185
 - Literatur 187

- 8 Korrelationsanalyse der HCL-Kenngrößen und Konsequenzen für die Messtechnik nicht visueller Effekte 191**
 - 8.1 Generelle Betrachtung der Korrelation der Kenngrößen für visuelle Leistung, Farbqualität und nicht visuelle Wirkungen 191
 - 8.1.1 Einführung 191
 - 8.1.2 Bewertung der Farbwiedergabeindizes 195
 - 8.1.3 Bewertungen der Helligkeitskenngrößen 197
 - 8.1.4 Melanopische Wirkung und Farbwiedergabe 199
 - 8.2 Spezifische Betrachtung der Korrelation der Kenngrößen für visuelle Leistung, Farbqualität und nicht visuelle Wirkungen 200
 - 8.3 Struktur und Kategorien der Eingangskenngrößen im HCL-System 202
 - Literatur 207

- 9 Psychophysisch-emotionale Aspekte – visueller Komfort und nicht visuelle Wirkungen 209**
 - 9.1 Psychologisch-emotionale Aspekte der Lichtwirkung 209
 - 9.1.1 Einführung 209
 - 9.1.2 Psychologische Wirkung der veränderlichen Lichtsituationen, Raumwirkung 212
 - 9.2 Raumeindruck, Raumhelligkeit und Gesichtsfeldleuchtdichte 219
 - 9.3 Visueller Komfort – Flimmern und stroboskopische Effekte 221
 - 9.3.1 Pulsweitenmodulation und Konstantstromregelung 221
 - 9.3.2 Flimmern und stroboskopische Effekte 221
 - 9.3.3 Stand der Forschung 222
 - 9.3.4 Untersuchung 224
 - 9.3.5 Ergebnisse 228
 - 9.3.6 Fazit 232
 - 9.4 Nicht visuelle Lichtwirkungen in den nächtlichen Stunden 232
 - 9.4.1 Einführung 233
 - 9.4.2 Lichtwirkungen in nächtlichen Stunden mit polychromatischem weißem Licht 233

- 9.4.3 Lichtwirkungen in nächtlichen Stunden mit quasimonochromatischem Licht 238
- 9.4.4 Bildung einer Metrik zur Charakterisierung der zeitabhängigen Melatoninunterdrückung 241
- 9.4.5 Bestimmung der potenziellen Ursachen für die Melatoninunterdrückung in nächtlichen Stunden 244
- 9.4.6 Beleuchtungstechnische Aspekte für die Schichtarbeiten 246
- 9.5 Psychologische und gesundheitliche Aspekte von Tageslicht 252
- 9.5.1 Psychologische Aspekte 253
- 9.5.2 Gesundheitliche Aspekte von Tageslicht 255
- 9.5.3 Quantitative Charakteristik von Tageslicht und elektrischem Licht – ein Vergleich 258
- 9.6 Einflüsse von Lichtintensität und Zeitpunkt der Lichtexposition auf das Schlafverhalten 264
- 9.7 Lichtwirkungen auf die Wachheit – Literaturanalyse verschiedener Publikationen 267
- 9.7.1 Wachheit in den abendlichen und nächtlichen Stunden 267
- 9.7.2 Wachheit in der Tageszeit 268
- 9.8 Ergebnisse der Lichtwirkung auf die Wachheit in der Frühschicht in einem Industriebetrieb 272
- 9.8.1 Ergebnisse der Datenauswertung 273
- 9.8.2 Zusammenfassung und Diskussion 274
- Literatur 275

- 10 Praktische HCL-Lichtmesstechnik im Innen- und Außenbereich 281**
- 10.1 Einführung 281
- 10.2 Arbeitsthesen und Fragestellungen für die HCL-Lichtmesstechnik 283
- 10.3 Lichtmesstechnische Aspekte 286
- 10.3.1 Gesichtsfeldeinteilung 286
- 10.3.2 Derzeitige Definitionen der zirkadian wirksamen Bestrahlungsstärke 287
- 10.3.3 Ermittlung von circadian stimulus (CS) durch die vertikale Beleuchtungsstärke und Normfarbwertanteile z 292
- 10.3.4 Ermittlung von circadian stimulus (CS) durch die vertikale Beleuchtungsstärke und die ähnlichste Farbtemperatur CCT 294
- 10.4 Zirkadian wirksame Bestrahlung im Außen- und Innenbereich durch integrale Feldmessungen 296
- 10.4.1 Die Feldmessungen im Winter 297
- 10.4.2 Feldmessungen an einem Sommertag 298
- 10.4.3 Feldmessungen am Abend eines Herbsttages 300
- 10.5 Tageslichtmessung – fundamentale und praktische Ansätze 304
- 10.5.1 Fundamentale spektrale Messung der Tageslichtspektren 304
- 10.6 HCL-Lichtmessungen an Büroarbeitsplätzen 310
- 10.6.1 Benötigte Messgrößen sowie verwendete Messtechnik 310
- 10.6.2 Messaufbau 311
- 10.6.3 Messräume 312
- 10.6.4 Messergebnisse an verschiedenen Büroarbeitsplätzen 313
- Literatur 316

XII | *Inhaltsverzeichnis*

11	Technologische Aspekte der HCL – Beleuchtung in Gebäuden	319
11.1	Einführung in die Thematik Smart Lighting	319
11.2	Technische Grundlagen von Smart Lighting	323
11.3	Struktur von Cloud-Software und Applikationsfälle	331
11.4	Lichtregelung und spektrale Optimierung für hochqualitatives und gesundes Licht	334
11.4.1	Stufen der Realisierungsmöglichkeiten der Leuchten für die HCL-Beleuchtungstechnik	334
11.4.2	Stufen 1 und 2 mit konstanter Farbtemperatur	335
11.4.3	Entwicklungsstufen 3 und 4 mit variabler Farbtemperatur und variabler Beleuchtungsstärke	343
11.4.4	Entwicklungsstufe 5 mit variabler Farbtemperatur, variabler Beleuchtungsstärke und mit einer hohen Farbqualität	344
11.4.5	Entwicklungsstufe 6 mit variabler Farbtemperatur, variabler Beleuchtungsstärke und Tageslichtberücksichtigung	346
11.5	Farb- und Lichtsensorik	352
	Literatur	356
12	HCL-Orientierte Beleuchtungsplanung – Grundaspekte und Umsetzung	359
12.1	Einordnung von HCL-Konzeption des Prozesses der Beleuchtungsqualität	359
12.1.1	Konzeptionen und Gedankenprozesse über die Beleuchtungsqualität bis ins Jahr 2002	359
12.1.2	Derzeitiger Literaturstand und neue Gedanken über die Beleuchtungsqualität	366
12.1.3	Zusammenfassende Konzeption über HCL und Beleuchtungsqualität – ein Konzeptentwurf	368
12.2	Prozess und Einflussfaktoren zur Erzielung der Beleuchtungsqualität – Lichtplanung	370
12.2.1	Ziele und Einordnung der HCL-orientierten Lichtplanung	370
12.2.2	Prozessschritte der HCL-orientierten Lichtplanung	371
12.3	Tageslicht und Tageslichtplanung	377
12.3.1	Einführung	377
12.3.2	Tageslicht in lichtplanerischer Sicht – Tageslichtplanung im Rahmen der Normung	378
12.3.3	Tageslichtplanung für nicht visuelle Effekte	380
12.3.4	Einige Daten über Tageslichtwirkungen	381
12.4	Spezifikation der HCL-Beleuchtungsanlagen für Tageszeit – Entwurf für eine Empfehlung	382
12.4.1	Einführung	382
12.4.2	Beleuchtungsniveau, zirkadian wirksame Beleuchtungsstärken	383
12.5	Dynamisches Licht – Steuerkurven	392
12.6	Beleuchtung für Nutzer/-innen mit höherem Lichtbedarf	398
12.6.1	Das Sehen im Alter – einige Aspekte	399
12.6.2	Beleuchtung für Altenheime und an Demenz erkrankten Menschen	403
12.6.3	Vorschlag für die Beleuchtungsplanung für Altenheime und Pflegeheime	406
	Literatur	408

13 Zusammenfassung und Ausblick 413

13.1 Zusammenfassung 413

13.2 Ausblick 417

**Anhang A Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen
(Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V.) 419**

Literatur 422

Stichwortverzeichnis 423

