

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort und Danksagung V

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

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
<b>4</b>	<b>Sehleistungen – Arbeitsleistungen</b>	<b>59</b>
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
<b>5</b>	<b>Moderne Aspekte der Helligkeit und der visuellen Klarheit im Kontext der Lichtqualität und visuelle Leistung</b>	<b>87</b>
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
<b>6</b>	<b>Farbqualität und psychophysisch-emotionale Aspekte, Laborexperimente</b>	<b>103</b>
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
<b>7</b>	<b>Neue Lichtqualitätsmodelle aus Laborexperimenten und Validation in Feldversuchen</b>	<b>163</b>
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

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
<b>8</b>	<b>Korrelationsanalyse der HCL-Kenngrößen und Konsequenzen für die Messtechnik nicht visueller Effekte</b>	<b>191</b>
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
<b>9</b>	<b>Psychophysisch-emotionale Aspekte – visueller Komfort und nicht visuelle Wirkungen</b>	<b>209</b>
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
<b>10</b>	<b>Praktische HCL-Lichtmesstechnik im Innen- und Außenbereich</b>	<b>281</b>
10.1	Einführung	281
10.2	Arbeitsthemen 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

<b>11</b>	<b>Technologische Aspekte der HCL – Beleuchtung in Gebäuden</b>	<b>319</b>
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
<b>12</b>	<b>HCL-Orientierte Beleuchtungsplanung – Grundaspekte und Umsetzung</b>	<b>359</b>
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

<b>13</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>413</b>
13.1	Zusammenfassung	413
13.2	Ausblick	417

<b>Anhang A</b>	<b>Einheitliche Bewertung von Lichtsituationen mit dem LiTG-Fragebogen (Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e. V.)</b>	<b>419</b>
	Literatur	422

<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>423</b>
-----------------------------	------------