

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlagen</b>	15
1.1	Einleitung	15
1.2	Lichttechnische und optische Grundlagen	19
1.2.1	Das Wesen des Lichtes	19
1.2.2	Licht als spektrale und integrale Größe	19
1.2.3	Licht als Welle und Teilchen	22
1.2.4	Ausbreitung des Lichtes	23
1.2.5	Die vier Grundgrößen der Lichttechnik	24
1.2.5.1	Lichtstrom	24
1.2.5.2	Lichtstärke	25
1.2.5.3	Beleuchtungsstärke	27
1.2.5.4	Leuchtdichte	28
1.2.6	Ergänzende Grundgrößen der Lichttechnik	29
1.2.6.1	Pupillenlichtstärke	29
1.2.6.2	Zylindrische, halbzylindrische und sphärische Beleuchtungsstärke	30
1.2.6.3	Lichtmenge $Q$	31
1.2.6.4	Spezifische Lichtausstrahlung $M$	31
1.2.6.5	Lichteinfallsstärke $J$	31
1.2.6.6	Belichtung und Leitzahl	31
1.2.7	Strahlungsphysikalische Größen	32
1.2.8	Abgeleitete Größen	32
1.2.8.1	Stoffkennzahlen	32
1.2.8.2	Ergänzende Stoffkennzahlen	33
1.2.8.3	Wirkungsgrade	36
1.2.9	Beziehungen zwischen den Grundgrößen	37
1.2.10	Berechnung einfacher Elementarstrahler	40
1.2.10.1	Zusammenhang zwischen Lichtstärke im Maximum der Ausstrahlung und dem Lichtstrom	40
1.2.10.2	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes für Sekundärstrahler (Lambertstrahler)	41
1.2.10.3	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes für Sekundär- und Primärstrahler	41
1.2.10.4	Berechnung der Beleuchtungsstärke mittels zonalem Lichtstromverfahren	42
1.2.11	Grundbegriffe der Beleuchtungsoptik	44
1.2.11.1	Geometrische Optik	45
1.2.11.2	Wellenoptik	47
1.2.11.3	Nichtabbildende Optik – Beleuchtungsoptik	50
1.3	Grundlagen der Farbmehrheit	55
1.3.1	Farbreiz, CIE-Normvalenzsystem, CIE-Normfarbtafel, MACADAM-Ellipsen	55
1.3.2	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farbräume, Farbdifferenzformeln	60
1.3.3	Farbwiedergabe, Farbwiedergabeindex und dessen semantische Deutung	65
1.3.4	Zusammenfassung und Ausblick	69
1.4	Physiologische und psychologische Grundlagen	69
1.4.1	Aufbau des Auges	69
1.4.1.1	Optische Abbildung	69
1.4.1.2	Streulicht im Auge	70
1.4.1.3	Retina (Netzhaut)	71
1.4.2	Anpassung des Auges an die visuellen Bedingungen	73
1.4.2.1	Pupillenweite	73

1.4.2.2	Akkommodation .....	74
1.4.2.3	Adaptation des Auges .....	74
1.4.2.4	Augenbewegungen .....	75
1.4.3	Von der Beleuchtung beeinflusste Sehfunktionen .....	76
1.4.3.1	Kontrastwahrnehmung .....	76
1.4.3.2	Sehschärfe .....	82
1.4.3.3	Wahrnehmungsgeschwindigkeit .....	85
1.4.3.4	Hellemfindung .....	85
1.4.3.5	Sehfunktionen bei komplizierten Sehobjekt- und Umfeldstrukturen .....	86
1.4.4	Störgrößen der Beleuchtung .....	87
1.4.4.1	Physiologische Blendung .....	88
1.4.4.2	Psychologische Blendung .....	89
1.4.4.3	Wahrnehmen von Flimmern .....	90
1.4.4.4	Stroboskopeffekt .....	91
1.4.5	Nicht-visuelle Wirkungen von Licht .....	92
1.4.5.1	Anatomische Strukturen der visuellen Bahnen und Hellemfindlichkeit für Tagessehen .....	92
1.4.5.2	Entdeckung der intrinsisch fotosensitiven retinalen Ganglienzellen .....	93
1.4.5.3	Anatomische Strukturen der nicht-visuellen Bahnen und melanopische Empfindlichkeit .....	93
1.4.5.4	Melanopische Bewertung von Licht .....	94
1.4.5.5	Einfluss des Lebensalters auf die nicht-visuellen Wirkungen des Lichtes .....	96
1.4.5.6	Bedeutung der nicht-visuellen Wirkungen für die Beleuchtungstechnik .....	97
1.5	Lichttechnische Berechnungen .....	97
1.5.1	Berechnung der ebenen Beleuchtungsstärke .....	98
1.5.1.1	Lichtstrommethode .....	99
1.5.1.2	Lichtstärkemethode .....	105
1.5.2	Berechnung von Raumbeleuchtungsstärken .....	116
1.5.2.1	Mittlere räumliche Beleuchtungsstärke (sphärische Beleuchtungsstärke) $E_s$ .....	116
1.5.2.2	Halbsphärische Beleuchtungsstärke $E_{hs}$ .....	116
1.5.2.3	Raumbeleuchtungsstärke $E_0$ .....	116
1.5.2.4	Zylindrische Beleuchtungsstärke $E_z$ .....	117
1.5.2.5	Halbzylindrische Beleuchtungsstärke $E_{hz}$ .....	118
1.5.3	Berechnung der Leuchtdichte .....	119
1.5.3.1	Leuchtdichteberechnung der Raumbegrenzungsfächen im Innenraum .....	119
1.5.3.2	Leuchtdichte bei der Blendungsberechnung im Innenraum .....	119
1.5.3.3	Leuchtdichte in der Außenbeleuchtung .....	120
1.5.3.4	Gegenüberstellung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteberechnung .....	121
1.5.3.5	Festlegungen zur Beobachtungsgeometrie .....	122
1.5.3.6	Ermittlung und Darstellung der Leuchtdichtekoeffizienten .....	125
1.5.3.7	Kennzeichnung und Klassifizierung des Leuchtdichtekoeffizienten für Straßendeckschichten .....	127
1.5.3.8	Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten .....	132
1.5.3.9	Punktleuchtdichten .....	132
1.5.3.10	Mittlere Leuchtdichte .....	133
1.5.3.11	Leuchtdichtegleichmäßigkeit .....	133
1.5.3.12	Leuchtdichteberechnungen bei Lichtimmissionen .....	134
1.5.4	Lichtberechnungsprogramme .....	135
1.5.4.1	Rechenalgorithmen .....	136
1.5.4.2	Wirkungsgradmethode .....	137
1.5.4.3	Punkt-zu-Punkt-Verfahren .....	139
1.5.4.4	Rechengenauigkeiten und Toleranzen .....	139
1.5.4.5	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Innenraumbereich .....	141
1.5.4.6	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Außenraumbereich .....	143
1.5.4.7	Darstellung der Berechnungsergebnisse bei Flutlichtanlagen .....	144
1.5.4.8	Darstellung der Berechnungsergebnisse bei Tageslichtberechnungen und Besonnungen .....	145
1.5.4.9	Raytracing-Verfahren .....	146
1.5.4.10	Lichtplanungsprogramm Relux Suite und DIALux .....	147
1.5.4.11	Echtzeit-Lichtsimulationsprogramme .....	149
1.5.4.12	Virtual Reality .....	149

1.6	Lichttechnische Messungen .....	151
1.6.1	Messung fotometrischer Größen .....	151
1.6.1.1	Grundlagen .....	151
1.6.1.2	Messprinzipien und Geräte .....	161
1.6.2	Messungen an Lampen und Leuchten .....	174
1.6.3	Messung an LED-Leuchten .....	176
1.6.3.1	Grundlegendes .....	176
1.6.3.2	Einflussgrößen bei der Messung .....	177
1.6.3.3	Richtlinien für die Messtechnik an LED-Quellen .....	178
1.6.4	Messunsicherheiten .....	178
1.6.5	Messung an Beleuchtungsanlagen .....	182
1.6.5.1	Innenraumbeleuchtung .....	183
1.6.5.2	Außenbeleuchtung .....	186
<b>2</b>	<b>Lichtquellen und Zubehör .....</b>	<b>193</b>
2.1	Lampen .....	193
2.1.1	Übersicht zur Lichterzeugung .....	193
2.1.2	Glühlampen .....	195
2.1.3	Halogenglühlampen .....	198
2.1.4	Leuchtstofflampen .....	200
2.1.4.1	Leuchtstofflampen mit den Durchmessern 38 mm (T12) und 26 mm (T8) .....	201
2.1.4.2	Leuchtstofflampen mit 16 mm Durchmesser (T5) .....	204
2.1.4.3	Leuchtstofflampen mit 7 mm Durchmesser (T2) .....	205
2.1.5	Kompakte Leuchtstofflampen .....	205
2.1.5.1	Kompakte Leuchtstofflampen mit Stecksockel .....	207
2.1.5.2	Kompakte Leuchtstofflampen mit Schraubsockel .....	208
2.1.6	Induktionslampen .....	209
2.1.7	Natriumdampf-Niederdrucklampen .....	209
2.1.8	Hochdruck-Entladungslampen .....	210
2.1.8.1	Quecksilberdampf-Hochdrucklampen .....	210
2.1.8.2	Natriumdampf-Hochdrucklampen .....	212
2.1.8.3	Halogen-Metaldampflampen .....	214
2.1.9	LED-Lampen (Retrofitlampen) .....	218
2.1.10	Allgemeine Eigenschaften und Kennwerte von Lampen .....	220
2.1.10.1	Brennstellung .....	220
2.1.10.2	Lebensdauer .....	221
2.1.10.3	Farbeigenschaften .....	224
2.1.10.4	Ausbleichen von Materialien .....	225
2.1.10.5	Energiebilanz .....	228
2.1.10.6	Lampenbezeichnungssysteme .....	228
2.1.11	Richtlinien der EU .....	230
2.1.11.1	Richtlinien und Verordnungen zum Ökodesign .....	230
2.1.11.2	Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) .....	231
2.1.11.3	Stoffverbotsrichtlinie (RoHS) .....	232
2.2	Betriebsmittel für Niedervolt-Halogenglühlampen .....	232
2.2.1	Elektromagnetische Transformatoren .....	232
2.2.2	Elektronische Transformatoren .....	234
2.3	Betriebsmittel für Entladungslampen .....	237
2.3.1	Elektromagnetische Vorschaltgeräte .....	237
2.3.1.1	Aufbau .....	237
2.3.1.2	Effizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen .....	240
2.3.2	Starter .....	241
2.3.3	Elektromagnetische Vorschaltgeräte für die Leistungsreduzierung .....	242
2.3.4	Zündgeräte .....	243
2.3.5	Kondensatoren für die Parallelkompensation .....	244
2.4	Elektronische Vorschaltgeräte .....	245
2.4.1	Allgemeine Merkmale und Eigenschaften .....	246

2.4.2	Nicht dimmbare EVGs .....	247
2.4.2.1	Nicht dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompakteuchtstofflampen .....	247
2.4.2.2	Nicht dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen .....	250
2.4.3	Dimmbare EVGs .....	251
2.4.3.1	Dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompakteuchtstofflampen .....	252
2.4.3.2	Dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen .....	257
2.4.4	Normen für EVGs .....	258
2.5	Anorganische und organische Leuchtdioden .....	258
2.5.1	Physikalisches Prinzip, Bändermodell .....	258
2.5.2	Farbiges und weißes LED-Licht, Spektren .....	262
2.5.3	Packaging, thermische Aspekte des LED-Aufbaus .....	266
2.5.4	Elektrisches und thermisches Betriebsverhalten .....	269
2.5.4.1	Erfassung der Änderung der fotometrischen und elektrischen Kenngrößen weißer LEDs .....	269
2.5.4.2	Erfassung der Änderung der farbmétrischen Kenngrößen weißer LEDs .....	271
2.5.5	Spektrale und farbmétrische Eigenschaften .....	274
2.5.5.1	Weiße LEDs von 2 700 K bis 3 000 K .....	275
2.5.5.2	Weiße LEDs von 4 000 K bis 4 800 K .....	277
2.5.6	Alterung, Lebensdauer .....	279
2.5.6.1	Alterungsaufbau und LED-Auswahl .....	279
2.5.6.2	Datenauswertung und Ergebnisse .....	279
2.5.6.3	Fehlermechanismen und Analyse .....	281
2.5.7	Dimmverfahren für anorganische Leuchtdioden und lichttechnische Aspekte .....	283
2.5.8	Physikalische Erzeugungsprinzipien von organischen Leuchtdioden .....	285
2.5.9	Lichttechnische und elektrische Eigenschaften von organischen Leuchtdioden .....	288
2.6	Betriebsmittel für Leuchtdioden .....	291
2.6.1	Betriebsgeräte .....	291
2.6.2	Steuergeräte .....	294
2.7	Lichtsteuerung und Regelung .....	295
2.7.1	Schnittstellen von Lampen und Leuchten .....	297
2.7.1.1	Schnittstelle Schalter, Taster, Relais und Schütz .....	297
2.7.1.2	Schnittstelle Dimmer .....	297
2.7.1.3	Touch-and-Dim-Schnittstelle .....	299
2.7.1.4	Analoge Schnittstelle 1–10V und 0–10V .....	299
2.7.1.5	Digitale Schnittstelle DSI/DALI .....	300
2.7.1.6	Digitale Schnittstelle DMX 512 .....	302
2.7.1.7	Digitale Netzwerkschnittstellen .....	303
2.7.1.8	Digitale Funknetzwerk-Schnittstellen .....	304
2.7.2	Steuerungssystem und Netzwerke .....	305
2.7.3	Konzepte für Steuerungen .....	308
<b>3</b>	<b>Leuchten .....</b>	<b>310</b>
3.1	Lichttechnische Leuchteinteilung und -kennziffern .....	310
3.2	Elemente der Lichtlenkung .....	312
3.2.1	Reflektoren mit spiegelnder Reflexion .....	314
3.2.2	Reflektoren mit diffuser Reflexion .....	320
3.2.3	Transmittoren aus klaren Materialien (Refraktoren) .....	321
3.2.4	Transmittoren mit diffuser Transmission .....	323
3.2.5	Kombinationen von diffusen Reflektoren und Transmittoren .....	324
3.2.6	Schatter .....	325
3.2.7	Wellenoptische Elemente der Lichtmodellierung .....	326
3.3	Leuchtenanforderungen und -prinzipien .....	327
3.3.1	Leuchtenanforderungen .....	327
3.3.2	Leuchtenprinzipien .....	329
3.3.2.1	Innen- und Außenleuchten .....	329
3.3.2.2	Scheinwerfer .....	329
3.3.2.3	Konzentratoren .....	329

3.3.2.4	Projektoren .....	330
3.3.2.5	Mikroskopbeleuchtung .....	330
3.3.2.6	Lichtsignale .....	331
3.4	Mechanische und elektrische Ausführung von Leuchten .....	333
3.4.1	Schutzklassen .....	333
3.4.2	Schutzarten .....	333
3.4.3	Brandschutzkennzeichnung an Leuchten .....	334
3.4.4	Kennzeichnung der elektromagnetischen Verträglichkeit an Leuchten .....	336
3.4.5	Weitere Kennzeichnungen an Leuchten .....	336
3.4.6	Leuchtenausführungen .....	336
3.4.6.1	Leuchten für den Innenraum .....	336
3.4.6.2	Leuchten für den Außenraum .....	348
3.4.6.3	LED-Leuchten für den Innen- und Außenraum .....	352
3.5	LED-Leuchten .....	356
3.5.1	Allgemeine Struktur von LED-Leuchten .....	356
3.5.2	Lichtverteilungssysteme .....	357
3.5.2.1	Charakteristik von LED-Lichtquellen .....	357
3.5.2.2	Reflektoren .....	357
3.5.2.3	Linsenoptik .....	357
3.5.2.4	Hybridoptik .....	358
3.5.2.5	Diffusoren .....	358
3.5.3	Absolutfotometrie von LED-Leuchten .....	358
3.5.4	LED-Leuchten-Lebensdauer .....	359
3.5.5	Thermomanagement .....	361
3.5.5.1	Wärmeübertragung .....	362
3.5.5.2	Wärmepfad durch eine LED-Leuchte .....	365
3.5.6	Leuchten für LED-Retrofitlampen .....	368
3.5.7	LED-Leuchten in der Praxis .....	369
<b>4</b>	<b>Beleuchtung mit Tageslicht .....</b>	<b>371</b>
4.1	Allgemeine Gesichtspunkte .....	371
4.2	Meteorologische Grundlagen .....	371
4.3	Anforderungen an Fenster aus psychologischer Sicht .....	381
4.4	Anforderungen an die funktionelle Beleuchtung mit Tageslicht .....	382
4.5	Tageslichttechnische Begriffe .....	382
4.6	Tageslichttechnische Grundlagen .....	385
4.7	Berechnung .....	387
4.7.1	Berechnung des Tageslichtquotienten $D$ bei seitlicher Fensteranordnung .....	387
4.7.2	Berechnung des mittleren Tageslichtquotienten $\bar{D}_{OL}$ bei Räumen mit Oberlicht .....	390
4.8	Tageslichtlenksysteme .....	392
4.9	Anmerkungen zur Tageslichtplanung .....	395
4.10	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit künstlichem Licht .....	396
<b>5</b>	<b>Beleuchtungsanlagen im Innenraum .....</b>	<b>399</b>
5.1	Anforderungen, Kriterien und Kenngrößen .....	399
5.1.1	Anforderungen an die Beleuchtungsanlage .....	400
5.1.2	Kriterien der Beleuchtung .....	400
5.1.3	Kenngrößen .....	401
5.1.3.1	Beleuchtungsstärke .....	401
5.1.3.2	Leuchtdichte .....	402
5.1.3.3	Blendung .....	402
5.1.3.4	Farbe .....	403
5.1.3.5	Lichtrichtung und Schattigkeit .....	404

5.1.3.6	Flimmern .....	404
5.1.3.7	Kontrastwiedergabefaktor .....	405
5.2	Richtlinien .....	405
5.2.1	Arbeitsplätze Innenraum .....	406
5.2.2	Not- und Sicherheitsbeleuchtung .....	406
5.3	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit künstlichem Licht .....	407
5.4	Planung .....	408
5.4.1	Planungsablauf .....	408
5.4.2	Beleuchtungskonzepte .....	410
5.4.3	Beleuchtungsarten .....	411
5.4.3.1	Direktbeleuchtung .....	411
5.4.3.2	Direkt-Indirektbeleuchtung .....	411
5.4.3.3	Indirekte Allgemeinbeleuchtung .....	412
5.4.3.4	Weitere Beleuchtungskonzepte .....	413
5.4.4	Lichtberechnungsmethoden .....	413
5.4.4.1	Radiosity Algorithmus .....	413
5.4.4.2	Backward Raytracing .....	415
5.5	Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Energieeffizienz .....	417
5.5.1	Wirtschaftlichkeit von Beleuchtungsanlagen .....	417
5.5.1.1	Simple-Payback-Methode .....	418
5.5.1.2	Life-Cycle-Cost-Methode .....	418
5.5.1.3	Berechnungsbeispiel .....	419
5.5.2	Umweltverträglichkeit von Beleuchtungsanlagen .....	420
5.5.3	Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen .....	421
5.6	Weitere Gebiete .....	422
5.6.1	Dynamische Beleuchtung .....	422
5.6.2	Wahrnehmungsbasierte Planung .....	423
<b>6</b>	<b>Beleuchtungssysteme im Außenraum .....</b>	<b>425</b>
6.1	Anforderungen, Gütemerkmale und Kenngrößen .....	425
6.1.1	Gütemerkmale .....	425
6.1.1.1	Leuchtdichte $L$ .....	425
6.1.1.2	Visibility Level .....	427
6.1.1.3	Beleuchtungsstärke .....	428
6.1.1.4	Gleichmäßigkeit .....	429
6.1.1.5	Randbeleuchtungsstärkeverhältnis EIR .....	430
6.1.1.6	Blendung TI, G, D, GR, RG .....	430
6.1.2	Begriffe und Definitionen .....	433
6.1.3	Normen und Richtlinien .....	434
6.1.3.1	Straßenbeleuchtung .....	434
6.1.3.2	Tunnelbeleuchtung .....	435
6.1.3.3	Arbeitsplätze im Außenraum .....	435
6.1.3.4	Nicht überdachte Sportstätten .....	435
6.1.3.5	Architekturbeleuchtung .....	436
6.2	Planung .....	436
6.2.1	Planungsablauf .....	436
6.2.2	Allgemeines zur Lichtplanung .....	437
6.2.2.1	Wirkungsgradverfahren zur Lichtstromermittlung .....	437
6.2.2.2	Fahrbahnbelag .....	437
6.2.2.3	Optische Führung .....	438
6.2.2.4	Lichtgestaltung und Modellierung .....	438
6.2.3	Straßenbeleuchtung .....	439
6.2.3.1	Auswahl der Beleuchtungsklassen .....	440
6.2.3.2	M-Klassen .....	440
6.2.3.3	P-Klassen .....	441

6.2.3.4	C-Klassen .....	441
6.2.3.5	Fußgängerüberwege und Fußgängerquerungshilfen .....	441
6.2.4	Tunnelbeleuchtung .....	443
6.2.4.1	Kurze Tunnel und Unterführungen .....	443
6.2.4.2	Lange Tunnel .....	444
6.2.5	Arbeitsplätze im Außenraum .....	446
6.2.5.1	Besonderheiten .....	446
6.2.5.2	Beleuchtung von Werksstraßen .....	447
6.2.5.3	Beleuchtung von Lagerplätzen .....	447
6.2.5.4	Beleuchtung von Parkplätzen .....	448
6.2.6	Nicht überdachte Sportstätten .....	448
6.2.6.1	Fußballplätze .....	450
6.2.6.2	Tennisplätze .....	450
6.2.7	Architekturbeleuchtung .....	451
6.2.7.1	Anstrahlungen .....	451
6.2.7.2	Masterplan .....	452
6.3	Nachhaltige Beleuchtung .....	452
<b>7</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>454</b>
7.1	Anhang Formelzeichen .....	454
7.2	Messprotoll Beispiel .....	458
7.3	Lichtströme von Lichtquellen .....	460
7.4	DMX-Adressen und -Anschluss .....	461
7.5	Kabelhinweis .....	463
Literatur .....	465	
Bildquellen .....	482	
Autoren .....	485	
Register .....	488	