

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	17
1.1	Einleitung	17
1.2	Lichttechnische und optische Grundlagen	21
1.2.1	Das Wesen des Lichtes	21
1.2.2	Licht als spektrale und integrale Größe	21
1.2.3	Licht als Welle und Teilchen	24
1.2.4	Ausbreitung des Lichtes	25
1.2.5	Die vier Grundgrößen der Lichttechnik	28
1.2.5.1	Lichtstrom	28
1.2.5.2	Lichtstärke	29
1.2.5.3	Beleuchtungsstärke	31
1.2.5.4	Leuchtdichte	32
1.2.6	Ergänzende Grundgrößen der Lichttechnik	33
1.2.6.1	Pupillenlichtstärke	33
1.2.6.2	Zylindrische, halbzyklindrische und sphärische Beleuchtungsstärke	34
1.2.6.3	Lichtmenge Q	35
1.2.6.4	Spezifische Lichtausstrahlung M	35
1.2.6.5	Lichteinfallstärke J	35
1.2.6.6	Belichtung und Leitzahl	35
1.2.7	Strahlungsphysikalische Größen	36
1.2.8	Abgeleitete Größen	36
1.2.8.1	Stoffkennzahlen	36
1.2.8.2	Ergänzende Stoffkennzahlen	37
1.2.8.3	Wirkungsgrade	40
1.2.9	Beziehungen zwischen den Grundgrößen	41
1.2.10	Berechnung einfacher Elementarstrahler	44
1.2.10.1	Zusammenhang zwischen Lichtstärke im Maximum der Ausstrahlung und dem Lichtstrom	44
1.2.10.2	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes auf Lambertstrahler	45
1.2.10.3	Anwendung des Raumwinkelprojektionsgesetzes für Sekundär- und Primärstrahler	45
1.2.10.4	Berechnung der Beleuchtungsstärke mittels zonalem Lichtstromverfahren	46
1.2.11	Grundbegriffe der Beleuchtungsoptik	48
1.2.11.1	Geometrische Optik	49
1.2.11.2	Wellenoptik	51
1.2.11.3	Nichtabbildende Optik – Beleuchtungsoptik	55
1.3	Grundlagen der Farbmatrik	61
1.3.1	Farbreiz, CIE-Normvalenzsystem, CIE-Normfarbtafel, MACADAM-Ellipsen, Farbmischung	61
1.3.2	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farbräume, Farbdifferenzformeln	67
1.3.3	Farbwiedergabe, Farbwiedergabeindex und dessen semantische Deutung	72
1.3.4	Wahrnehmung und Präferenz der Weißpunkte	76
1.3.5	Zusammenfassung und Ausblick	77
1.4	Physiologische und psychologische Grundlagen	78
1.4.1	Aufbau des Auges	78
1.4.1.1	Optische Abbildung	78
1.4.1.2	Streulicht im Auge	79
1.4.1.3	Retina (Netzhaut)	79
1.4.2	Anpassung des Auges an die visuellen Bedingungen	82
1.4.2.1	Pupillenweite	82
1.4.2.2	Akkommodation	82

1.4.2.3	Adaptation des Auges	83
1.4.2.4	Augenbewegungen	84
1.4.3	Von der Beleuchtung beeinflusste Sehfunktionen	84
1.4.3.1	Kontrastwahrnehmung	85
1.4.3.2	Sehschärfe	91
1.4.3.3	Wahrnehmungsgeschwindigkeit	93
1.4.3.4	Hellempfindung	94
1.4.3.5	Sehfunktionen bei komplizierten Sehobjekt- und Umfeldstrukturen	95
1.4.4	Störgrößen der Beleuchtung	96
1.4.4.1	Physiologische Blendung	97
1.4.4.2	Psychologische Blendung	97
1.4.4.3	Wahrnehmen von Flimmern	99
1.4.4.4	Stroboskopeffekt	101
1.4.5	Nicht-visuelle Wirkungen von Licht	101
1.4.5.1	Anatomische Strukturen der visuellen Bahnen und Hellempfindlichkeit für Tagessehen	101
1.4.5.2	Entdeckung der intrinsisch fotosensitiven retinalen Ganglienzellen	102
1.4.5.3	Anatomische Strukturen der nicht-visuellen Bahnen und melanopische Wirkungen	103
1.4.5.4	α -opische und melanopische Bewertung von Strahlungsgrößen	103
1.4.5.5	Einfluss des Lebensalters auf die nicht-visuellen Wirkungen des Lichtes	106
1.4.5.6	Bedeutung der nicht-visuellen Wirkungen für die Beleuchtungstechnik	107
1.4.6	Fotobiologische Gefährdung des Auges	108
1.4.6.1	Schädigung durch UV-Strahlung	108
1.4.6.2	Schädigung durch IR-Strahlung	108
1.4.6.3	Blaulichtschädigung (BLH)	108
1.4.6.4	Altersbedingte Makuladegeneration (AMD)	109
1.5	Lichttechnische Berechnungen	110
1.5.1	Berechnung der ebenen Beleuchtungsstärke	110
1.5.1.1	Lichtstrommethode	111
1.5.1.2	Lichtstärkemethode	117
1.5.2	Berechnung von Raumbeleuchtungsstärken	128
1.5.2.1	Mittlere räumliche Beleuchtungsstärke (sphärische Beleuchtungsstärke) E_s	128
1.5.2.2	Halbsphärische Beleuchtungsstärke E_{hs}	128
1.5.2.3	Raumbeleuchtungsstärke E_0	128
1.5.2.4	Zylindrische Beleuchtungsstärke E_z	129
1.5.2.5	Halbzylindrische Beleuchtungsstärke E_{hz}	130
1.5.3	Berechnung der Leuchtdichte	131
1.5.3.1	Leuchtdichteberechnung der Raumbegrenzungsflächen im Innenraum	131
1.5.3.2	Leuchtdichte bei der Blendungsberechnung im Innenraum	131
1.5.3.3	Leuchtdichte in der Außenbeleuchtung	132
1.5.3.4	Gegenüberstellung von Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteberechnung	133
1.5.3.5	Festlegungen zur Beobachtungsgeometrie	134
1.5.3.6	Ermittlung und Darstellung der Leuchtdichtekoeffizienten	137
1.5.3.7	Kennzeichnung und Klassifizierung des Leuchtdichtequotienten für Straßendeckschichten	139
1.5.3.8	Bestimmung der Leuchtdichtekoeffizienten	144
1.5.3.9	Punktleuchtdichten	144
1.5.3.10	Mittlere Leuchtdichte	145
1.5.3.11	Leuchtdichtegleichmäßigkeit	145
1.5.3.12	Leuchtdichteberechnungen bei Lichtimmissionen	146
1.5.4	Lichtberechnungsprogramme	147
1.5.4.1	Rechenalgorithmen	148
1.5.4.2	Wirkungsgradmethode	149
1.5.4.3	Punkt-zu-Punkt-Verfahren	151
1.5.4.4	Rechengenauigkeiten und Toleranzen	151
1.5.4.5	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Innenraumbereich	153
1.5.4.6	Darstellung der Berechnungsergebnisse in Außenraumbereich	155
1.5.4.7	Raytracing-Verfahren	156
1.5.4.8	Lichtplanungsprogramme: Relux Desktop, DIAlux evo, sowie weitere Programme	157
1.5.4.9	Echtzeit-Lichtsimulationsprogramme	159
1.5.4.10	Virtual Reality	160
1.5.4.11	Building Information Modelling	161

1.6	Lichttechnische Messungen	163
1.6.1	Messung fotometrischer Größen	163
1.6.1.1	Grundlagen	163
1.6.1.2	Messprinzipien und Geräte	174
1.6.2	Messungen an Lampen und Leuchten	187
1.6.3	Messung an LED-Leuchten	189
1.6.3.1	Grundlegendes	189
1.6.3.2	Einflussgrößen bei der Messung	190
1.6.3.3	Richtlinien für die Messtechnik an LED-Quellen	191
1.6.4	Messunsicherheiten	191
1.6.5	Messung an Beleuchtungsanlagen	195
1.6.5.1	Innenraumbelichtung	196
1.6.5.2	Außenbeleuchtung	199
2	Lichtquellen und Zubehör	205
2.1	Lampen	205
2.1.1	Übersicht zur Lichterzeugung	205
2.1.2	Glühlampen	207
2.1.3	Halogenglühlampen	210
2.1.4	Leuchtstofflampen	212
2.1.4.1	Leuchtstofflampen mit den Durchmessern 38 mm (T12) und 26 mm (T8)	213
2.1.4.2	Leuchtstofflampen mit 16 mm Durchmesser (T5)	216
2.1.4.3	Leuchtstofflampen mit 7 mm Durchmesser (T2)	217
2.1.5	Kompaktleuchtstofflampen	217
2.1.5.1	Kompaktleuchtstofflampen mit Stecksockel	219
2.1.5.2	Kompaktleuchtstofflampen mit Schraubsockel	220
2.1.6	Induktionslampen	221
2.1.7	Natriumdampf-Niederdrucklampen	221
2.1.8	Hochdruck-Entladungslampen	222
2.1.8.1	Quecksilberdampf-Hochdrucklampen	222
2.1.8.2	Natriumdampf-Hochdrucklampen	224
2.1.8.3	Halogen-Metalllampen	226
2.1.9	LED-Lampen (Retrofitlampen)	230
2.1.10	Allgemeine Eigenschaften und Kennwerte von Lampen	234
2.1.10.1	Brennstellung	234
2.1.10.2	Lebensdauer	234
2.1.10.3	Farbeigenschaften	237
2.1.10.4	Ausbleichen von Materialien	238
2.1.10.5	Energiebilanz	241
2.1.10.6	Lampenbezeichnungssysteme	241
2.1.11	Richtlinien der EU	243
2.1.11.1	Richtlinien und Verordnungen zum Ökodesign	243
2.1.11.2	Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE)	244
2.1.11.3	Stoffverbotsrichtlinie (RoHS)	245
2.2	Betriebsmittel für Niedervolt-Halogenglühlampen	245
2.2.1	Elektromagnetische Transformatoren	245
2.2.2	Elektronische Transformatoren	247
2.3	Betriebsmittel für Entladungslampen	250
2.3.1	Elektromagnetische Vorschaltgeräte	250
2.3.1.1	Aufbau	250
2.3.1.2	Effizianzforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen	253
2.3.2	Starter	254
2.3.3	Elektromagnetische Vorschaltgeräte für die Leistungsreduzierung	255
2.3.4	Zündgeräte	256
2.3.5	Kondensatoren für die Parallelkompensation	258
2.4	Elektronische Vorschaltgeräte	258
2.4.1	Allgemeine Merkmale und Eigenschaften	259
2.4.2	Nicht dimmbare EVGs	260

2.4.2.1	Nicht dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen	260
2.4.2.2	Nicht dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen	263
2.4.3	Dimmbare EVGs	264
2.4.3.1	Dimmbare EVGs für Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen	264
2.4.3.2	Dimmbare EVGs für Hochdruck-Entladungslampen	270
2.4.4	Normen für EVGs	270
2.5	Anorganische und organische Leuchtdioden	270
2.5.1	Physikalisches Prinzip, Bändermodell	271
2.5.2	Farbiges und weißes LED-Licht, Spektren	274
2.5.3	Packaging, thermische Aspekte des LED-Aufbaus	278
2.5.4	Elektrisches und thermisches Betriebsverhalten	281
2.5.4.1	Erfassung der Änderung der fotometrischen und elektrischen Kenngrößen weißer LEDs	282
2.5.4.2	Erfassung der Änderung der farbmetrischen Kenngrößen weißer LEDs	284
2.5.5	Spektrale und farbmetrische Eigenschaften	287
2.5.5.1	Weißer LEDs von 2700K bis 3000K	288
2.5.5.2	Weißer LEDs von 4000K bis 4800K	291
2.5.5.3	Melanopische Wirksamkeit weißer LEDs von 2700K bis 6500K	292
2.5.6	Alterung, Lebensdauer	293
2.5.6.1	Alterungsaufbau und LED-Auswahl	293
2.5.6.2	Datenauswertung und Ergebnisse	293
2.5.6.3	Fehlermechanismen und Analyse	295
2.5.7	Dimmverfahren für anorganische Leuchtdioden und lichttechnische Aspekte	297
2.5.8	Physikalische Erzeugungsprinzipien von organischen Leuchtdioden	300
2.5.9	Lichttechnische und elektrische Eigenschaften von organischen Leuchtdioden	302
2.6	Betriebsmittel für Leuchtdioden	305
2.6.1	Betriebsgeräte	306
2.6.2	Steuergeräte	310
3	Leuchten	311
3.1	Lichttechnische Anforderungen an Leuchten	311
3.1.1	Leuchtenanforderungen	311
3.1.2	Lichttechnische Leuchteneinteilung und -kennziffern	313
3.1.3	Ermittlung des Leuchtenlichtstroms für Leuchten mit Lampen- oder LED-Bestückung	315
3.2	Lebensdauer von Leuchten	315
3.2.1	Lebensdauer von Leuchten mit konventioneller Bestückung	316
3.2.2	Lebensdauer von Leuchten mit LED-Bestückung	316
3.2.2.1	Spezielle Einflussfaktoren auf die wirtschaftliche Nutzlebensdauer von LED-Leuchten	317
3.2.2.2	Lebensdauerdefinition von LED-Leuchten (LxBy, LxCy etc.)	318
3.3	Elemente der Lichtlenkung	319
3.3.1	Reflektoren	321
3.3.1.1	Reflektoren mit spiegelnder Reflexion	321
3.3.1.2	Spiegelreflektoren für LED	325
3.3.1.3	Reflektoren mit diffuser Reflexion	326
3.3.2	Transmittoren aus klaren Materialien (Refraktoren)	328
3.3.2.1	LED-Linsen	328
3.3.2.2	Miniaturisierte Optik	329
3.3.2.3	Mikrooptik	330
3.3.3	Schatter	330
3.3.4	Transmittoren mit diffuser Transmission	331
3.3.5	Kombinationen von spiegelnden Reflektoren und klaren Transmittoren (Hybridoptik)	333
3.3.6	Kombinationen von diffusen Reflektoren und Transmittoren	333
3.3.7	Wellenoptische Elemente der Lichtmodellierung	334
3.3.8	Lichtleiter	335
3.4	Prinzipien des Leuchtenaufbaus	337
3.4.1	Innen- und Außenleuchten mit konventioneller Bestückung	337
3.4.1.1	Scheinwerfer	337
3.4.1.2	Konzentratoren	338

3.4.1.3	Projektoren	338
3.4.1.4	Mikroskopbeleuchtung	339
3.4.1.5	Lichtsignale	340
3.4.1.6	Konventionelle Leuchten mit LED-Retrofit-Lampen	341
3.4.2	Innen- und Außenleuchten mit integrierter LED Bestückung	342
3.5	Mechanische und elektrische Ausführung von Leuchten	343
3.5.1	Schutzklassen	343
3.5.2	Schutzarten	343
3.5.3	Brandschutzkennzeichnung an Leuchten	345
3.5.4	Kennzeichnung der elektromagnetischen Verträglichkeit an Leuchten	346
3.5.5	Weitere Kennzeichnungen an Leuchten	346
3.6	Thermomanagement von LED-Leuchten	347
3.6.1	Wärmeübertragung	347
3.6.2	Wärmepfad durch die Leuchte	351
3.7	Leuchtenausführungen	354
3.7.1	Leuchten für den Innenraum	354
3.7.1.1	Lineare und Flächenleuchten	355
3.7.1.2	Downlights	362
3.7.1.3	Arbeitsplatzleuchten	363
3.7.1.4	Strahlerleuchten	363
3.7.1.5	Hochleistungsleuchten	365
3.7.1.6	Funktionale Lichtlinien	366
3.7.1.7	Sicherheitsleuchten	367
3.7.1.8	Leuchten mit Lichtleitertechnik	367
3.7.2	Leuchten für den Außenraum	370
3.7.2.1	Straßenleuchten	370
3.7.2.2	Scheinwerfer	372
4	Lichtsteuerung, Regelung und Management	375
4.1	Anforderungen und Anwendungen	375
4.2	Steuerung und Regelung	376
4.2.1	Datennetzwerke	378
4.3	Analoge drahtgebundene Schnittstellen	383
4.3.1	Schnittstelle Schalter, Taster, Relais und Schütz	383
4.3.1.1	Schnittstelle Dimmer	384
4.3.2	Analoge Schnittstelle 1–10V und 0–10V (Drahtgebunden)	386
4.3.3	Touch-and-Dim-Schnittstelle	387
4.4	Drahtgebundene Digitale Schnittstellen	388
4.4.1	Digitale Schnittstelle DSI, DALI und DALI 2	388
4.4.2	Digitale Schnittstelle DMX 512	391
4.4.3	Digitale Schnittstelle Powerline	393
4.4.4	Digitale Schnittstelle Ethernet und Power Over Ethernet PoE	394
4.5	Drahtlose Schnittstellen	396
4.5.1	Bluetooth	401
4.5.2	Zigbee	409
4.5.3	Multi-Protokoll Zigbee 3.0 + Bluetooth Low Energy	416
4.5.4	W-LAN/Wi-Fi	417
4.5.5	Proprietäre Funkschnittstellen	423
4.6	Optische drahtlose Kommunikation	425
4.7	Industrial Ethernet, Feldbus und Gebäudemanagement	432
4.7.1	KNX in der Gebäudetechnik	437
4.7.2	Weitere Netzwerke der Gebäudetechnik	438
4.8	Sensorik und Anwendungen	439
4.9	Konzepte für Steuerungen	442

5	Beleuchtung mit Tageslicht	445
5.1	Allgemeine Gesichtspunkte	445
5.2	Meteorologische Grundlagen	447
5.3	Anforderungen an Fenster aus psychologischer Sicht	455
5.4	Anforderungen an die funktionelle Beleuchtung mit Tageslicht	456
5.5	Tageslichttechnische Begriffe	456
5.6	Tageslichttechnische Grundlagen	462
5.7	Berechnung	464
5.7.1	Berechnung des Tageslichtquotienten D bei seitlicher Fensteranordnung	464
5.7.2	Berechnung des mittleren Tageslichtquotienten \bar{D}_{0L} bei Räumen mit Oberlicht	467
5.8	Tageslichtlenksysteme, Sonnen- und Blendschutz	469
5.9	Anmerkungen zur Tageslichtplanung	472
5.10	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit elektrischem Licht	474
6	Beleuchtungsanlagen im Innenraum	476
6.1	Anforderungen, Kriterien und Kenngrößen	476
6.1.1	Anforderungen an die Beleuchtungsanlage	477
6.1.2	Kriterien der Beleuchtung	477
6.1.3	Kenngrößen	478
6.1.3.1	Beleuchtungsstärke	478
6.1.3.2	Leuchtdichte	479
6.1.3.3	Blendung	479
6.1.3.4	Farbe	480
6.1.3.5	Lichtrichtung und Schattigkeit	481
6.1.3.6	Flimmern	482
6.1.3.7	Kontrastwiedergabefaktor	483
6.2	Richtlinien	483
6.2.1	Arbeitsplätze im Innenraum	483
6.2.2	Not- und Sicherheitsbeleuchtung	484
6.3	Kombination von Tageslichtbeleuchtung und Beleuchtung mit künstlichem Licht	484
6.4	Planung	486
6.4.1	Planungsablauf	486
6.4.2	Beleuchtungskonzepte	488
6.4.3	Beleuchtungsarten	489
6.4.3.1	Direktbeleuchtung	489
6.4.3.2	Direkt-Indirektbeleuchtung	489
6.4.3.3	Indirekte Allgemeinbeleuchtung	490
6.4.3.4	Weitere Beleuchtungskonzepte	491
6.4.4	Lichtberechnungsmethoden	491
6.4.4.1	Radiosity	491
6.4.4.2	Backward Raytracing	493
6.5	Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Energieeffizienz	495
6.5.1	Wirtschaftlichkeit von Beleuchtungsanlagen	495
6.5.1.1	Simple-Payback-Methode	496
6.5.1.2	Life-Cycle-Cost-Methode	496
6.5.1.3	Berechnungsbeispiel	497
6.5.2	Umweltverträglichkeit von Beleuchtungsanlagen	498
6.5.3	Energieeffizienz von Beleuchtungsanlagen	499
6.6	Weitere Gebiete	500
6.6.1	Dynamische Beleuchtung	500
6.6.2	Wahrnehmungsbasierte Planung nach Cuttle	501
6.6.3	Lichtqualität	502

7	Beleuchtungssysteme im Außenraum	504
7.1	Anforderungen, Gütemerkmale und Kenngrößen	504
7.1.1	Gütemerkmale	504
7.1.1.1	Leuchtdichte L_v	504
7.1.1.2	Visibility Level	506
7.1.1.3	Beleuchtungsstärke	507
7.1.1.4	Gleichmäßigkeit	508
7.1.1.5	Randbeleuchtungsstärkeverhältnis EIR	509
7.1.1.6	Blendung f_{TI} , G, D, GR, RG	509
7.1.2	Begriffe und Definitionen	512
7.1.3	Normen und Richtlinien	514
7.1.3.1	Straßenbeleuchtung	514
7.1.3.2	Tunnelbeleuchtung	515
7.1.3.3	Arbeitsplätze im Außenraum	515
7.1.3.4	Nicht überdachte Sportstätten	516
7.1.3.5	Architekturbeleuchtung	516
7.2	Planung	516
7.2.1	Planungsablauf	516
7.2.2	Allgemeines zur Lichtplanung	517
7.2.2.1	Wirkungsgradverfahren zur Lichtstromermittlung	517
7.2.2.2	Fahrbahnbelag	518
7.2.2.3	Optische Führung	519
7.2.2.4	Lichtgestaltung und Modellierung	519
7.2.3	Straßenbeleuchtung	519
7.2.3.1	Auswahl der Beleuchtungsklassen	520
7.2.3.2	M-Klassen	520
7.2.3.3	P-Klassen	520
7.2.3.4	C-Klassen	521
7.2.3.5	Platzierung von Leuchten in der Straßenbeleuchtung	521
7.2.3.6	Fußgängerüberwege und Fußgängerquerungshilfen	524
7.2.4	Tunnelbeleuchtung	525
7.2.4.1	Kurze Tunnel und Unterführungen	525
7.2.4.2	Lange Tunnel	526
7.2.5	Arbeitsplätze im Außenraum	528
7.2.5.1	Besonderheiten	528
7.2.5.2	Beleuchtung von Werksstraßen	530
7.2.5.3	Beleuchtung von Lagerplätzen	530
7.2.5.4	Beleuchtung von Parkplätzen	530
7.2.6	Nicht überdachte Sportstätten	530
7.2.6.1	Fußballplätze	531
7.2.6.2	Tennisplätze	531
7.2.7	Architekturbeleuchtung	533
7.2.7.1	Anstrahlungen	533
7.2.7.2	Masterplan	534
7.3	Nachhaltige Beleuchtung	535
8	Anhang	536
8.1	Anhang Formelzeichen	536
8.2	Messprotoll Beispiel	538
8.3	Lichtströme von Lichtquellen	540
8.4	DMX-Adressen und -Anschluss	541
8.5	Kabelhinweis	543
	Literatur	545
	Autoren	564
	Bildquellen	568
	Register	569