

huss

Baer, Barfuß, Seifert

Beleuchtungs- technik

Grundlagen



Deutsche Lichttechnische
Gesellschaft e.V.

4. Auflage

Baer, Barfuß, Seifert

Beleuchtungstechnik

Grundlagen

HUSS-MEDIEN GmbH · 10400 Berlin **huss**

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	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, halbzyklindrische und sphärische Beleuchtungsstärke	30
1.2.6.3	Lichtmenge Q	31
1.2.6.4	Spezifische Lichtausstrahlung M	31
1.2.6.5	Lichteinfallstärke 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 Farbmimetrik	55
1.3.1	Farbreiz, CIE-Normvalenzsystem, CIE-Normfarbtafel, MACADAM-Ellipsen	55
1.3.2	Farberscheinung, Farbumstimmung, Farb Räume, 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	Hellempfindung	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 Hellempfindlichkeit 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 Raumbegrenzungsflächen 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 Leuchtdichtequotienten 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
2	Lichtquellen und Zubehör	193
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	Kompaktleuchtstofflampen	205
2.1.5.1	Kompaktleuchtstofflampen mit Stecksockel	207
2.1.5.2	Kompaktleuchtstofflampen 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-Metaldampf lampen	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 Kompaktleuchtstofflampen	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 Kompaktleuchtstofflampen	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 farbmetrischen Kenngrößen weißer LEDs	271
2.5.5	Spektrale und farbmetrische Eigenschaften	274
2.5.5.1	Weißer LEDs von 2700 K bis 3000 K	275
2.5.5.2	Weißer LEDs von 4000 K bis 4800 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
3	Leuchten	310
3.1	Lichttechnische Leuchteneinteilung 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	Transmitoren aus klaren Materialien (Refraktoren)	321
3.2.4	Transmitoren mit diffuser Transmission	323
3.2.5	Kombinationen von diffusen Reflektoren und Transmitoren	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
4	Beleuchtung mit Tageslicht	371
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
5	Beleuchtungsanlagen im Innenraum	399
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	Lichtichtung 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
6	Beleuchtungssysteme im Außenraum	425
6.1	Anforderungen, Güteerkmale und Kenngrößen	425
6.1.1	Güteerkmale	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
7	Anhang	454
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