

GRUNDLAGEN DER LICHTMESSTECHNIK

VON

DR. ERICH HELBIG, JENA

MIT 131 ABBILDUNGEN UND 16 TABELLEN

2., DURCHGESEHENE AUFLAGE



LEIPZIG 1977

AKADEMISCHE VERLAGSGESELLSCHAFT

GEEST & PORTIG K.-G.

Inhalt

1.	Aufgaben und Entwicklung der Lichtmeßtechnik	13
1.1.	Aufgaben der Lichttechnik und Lichtmeßtechnik	13
1.2.	Einiges zur Entwicklung der Lichtmeßtechnik	14
2.	Physiologische Grundlagen	17
2.1.	Das menschliche Auge	17
2.1.1.	Bau des Auges	17
2.1.2.	Das abbildende System des Auges	18
2.1.3.	Die Netzhaut	19
2.1.4.	Die lichtempfindlichen Empfänger des Auges	21
2.2.	Einige für die Lichtmeßtechnik wichtige physiologische Gesetzmäßigkeiten	23
2.2.1.	Additionstheorem der Helligkeiten	23
2.2.2.	Talbotsches Gesetz	23
2.2.3.	Stiles-Crawford-Effekte	24
2.2.4.	Purkyně-Effekt	25
2.2.5.	Weber-Fechnersches Gesetz	26
3.	Strahlungsphysikalische und lichttechnische Grundgrößen und Einheiten	28
3.1.	Der Raumwinkel	28
3.2.	Die strahlungsphysikalischen Grundgrößen und Einheiten	32
3.3.	Zusammenhang zwischen den strahlungsphysikalischen und den lichttechnischen Größen	36
3.4.	Die lichttechnischen Grundgrößen und Einheiten	37
3.5.	Verschiedene Wirkungsgrade	39
3.6.	Lichttechnische Stoffkennzahlen	40
4.	Einige für die Lichtmeßtechnik wichtige Gesetzmäßigkeiten und Beziehungen	43
4.1.	Lambertsches Kosinusetz	43
4.2.	Photometrisches Entfernungsgesetz	44
4.2.1.	Entfernungsgesetz bei punktförmigen Lichtquellen	44
4.2.2.	Entfernungsgesetz bei Lichtquellen endlicher Ausdehnung	46
4.2.3.	Photometrische Grenzentfernung	47
4.3.	Einiges zur Beleuchtungsstärke	49

4.4.	Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte bei einer vollkommen diffus reflektierenden Fläche	51
4.5.	Orientierende Berechnung der Lichtstärke einer Lichtquelle aus ihrem Gesamtlichtstrom	52
4.6.	Abbesches Theorem	52
4.7.	Leuchtdichte — maßgebende Größe für den Helligkeitseindruck	53
5.	Grundsätzliches zur visuellen und physikalischen Photometrie	55
5.1.	Visuelle Meßverfahren	55
5.1.1.	Direkt-Vergleich	55
5.1.2.	Filterverfahren	56
5.2.	Vergleichsprinzipien bei visuellen Messungen	57
5.2.1.	Gleichheitsprinzip	57
5.2.2.	Kontrastprinzip	60
5.2.3.	Flimmerprinzip	60
5.3.	Beobachtungsbedingungen bei visuellen Messungen	62
5.4.	Physikalische Meßverfahren	63
5.4.1.	Grundsätzliches	63
5.4.2.	Ausschlagsverfahren	63
5.4.3.	Gleichheitsverfahren	64
5.5.	Voraussetzungen für die Verwendung physikalischer Empfänger	64
5.5.1.	Spektrale Empfindlichkeit	64
5.5.1.1.	Anpassung an die $V(\lambda)$ -Kurve durch Filter (Filtermethode)	64
5.5.1.2.	Anpassung an die $V(\lambda)$ -Kurve durch Blenden (Geometrische Methode)	65
5.5.1.3.	Verwendung von Korrekturfaktoren	65
5.5.2.	Proportionalität	66
5.5.3.	Kosinustreue Bewertung	66
5.5.4.	Konstanz der Anzeige	68
5.5.5.	Temperaturabhängigkeit	69
5.5.6.	Frequenzabhängigkeit und Trägheit	69
6.	Die Strahlungsgesetze des Schwarzen Körpers	70
6.1.	Kirchhoffsches Gesetz und Emissionsgrad	70
6.2.	Der Schwarze Strahler	72
6.3.	Plancksches Strahlungsgesetz	72
6.4.	Stefan-Boltzmannsches Gesetz	75
6.5.	Wiensches Verschiebungsgesetz	76
7.	Verteilungstemperatur, Farbtemperatur, ähnlichste Farbtemperatur, Zusammenhang zwischen Kelvin und Mired	77
7.1.	Verteilungstemperatur	77
7.2.	Farbtemperatur	78
7.3.	Ähnlichste Farbtemperatur	78
7.4.	Zusammenhang zwischen Kelvin und Mired	79

8.	Grundsätzliches über die elektrischen Voraussetzungen bei photometrischen Messungen	82
8.1.	Stromversorgung	84
8.2.	Elektrische Messungen	85
8.2.1.	Schaltung der Meßinstrumente	85
8.2.2.	Einiges zur Einregelung der Lampen auf die vorgegebenen elektrischen Werte	86
8.2.3.	Elektrische Messungen an Entladungslampen	87
9.	Lichtnormale	91
9.1.	Historische Entwicklung	91
9.2.	Verwirklichung des Schwarzen Strahlers	92
9.3.	Lichtstärke-Normallampen	95
9.4.	Lichtstrom-Normallampen	97
9.5.	Entladungslampen als Lichtstrom-Normale	97
10.	Die Schwächungsmethoden der Photometrie	99
10.1.	Anwendung des Entfernungsgesetzes	99
10.2.	Rotierende Sektoren	99
10.3.	Filter	102
10.4.	Blenden	103
10.5.	Polarisation	104
10.6.	Weitere Lichtschwächungseinrichtungen	106
11.	Grundsätzliche lichttechnische Messungen	108
11.1	Messung der Lichtstärke	108
11.1.1.	Messung auf der Photometerbank	108
11.1.2.	Messung mit visuellen transportablen Photometern	111
11.1.3.	Fehlermöglichkeiten bei der Lichtstärkemessung	115
11.1.3.1.	Fehler durch Fremdlicht	115
11.1.3.2.	Erforderliche Genauigkeit der Entfernungsablesung	115
11.1.3.3.	Weitere Fehlermöglichkeiten	116
11.1.4.	Physikalische Lichtstärkemessung	117
11.2.	Messung der Leuchtdichte	117
11.2.1.	Direkte visuelle Verfahren der Leuchtdichtebestimmung	118
11.2.2.	Geräte zur visuellen Leuchtdichtemessung	121
11.2.3.	Direkte physikalische Verfahren der Leuchtdichtebestimmung ..	123
11.2.4.	Geräte zur physikalischen Messung der Leuchtdichte	125
11.2.5.	Kalibrierung der Leuchtdichte-Meßgeräte	127
11.2.6.	Indirekte Verfahren der Leuchtdichtebestimmung	128
11.3.	Ermittlung der räumlichen Lichtverteilung	130
11.3.1.	Ermittlung der Lichtverteilung	130
11.3.2.	Darstellung der Lichtverteilung	135
11.3.3.	Automatisierung der Lichtverteilungsmessung	138
11.4.	Messung des Lichtstroms	139

11.4.1.	Bestimmung des Lichtstroms aus der räumlichen Lichtverteilung	139
11.4.1.1.	Numerische Ermittlung des Lichtstroms	142
11.4.1.2.	Graphische Ermittlung des Lichtstroms	143
11.4.2.	Messung des Lichtstroms mit der Ulbrichtschen Kugel	146
11.4.2.1.	Grundsätzliches	146
11.4.2.2.	Meßverfahren mit der Ulbrichtschen Kugel	148
11.4.2.3.	Fehlereinflüsse	149
11.4.2.4.	Automatisierung der Lichtstrommessung	154
11.5.	Messung der Beleuchtungsstärke	154
11.5.1.	Allgemeines	154
11.5.2.	Physikalische Messung der Beleuchtungsstärke	155
11.5.3.	Handelsübliche und in der Literatur beschriebene Geräte	155
11.5.4.	Einige Gesichtspunkte zur Beleuchtungsstärkemessung	157
11.6.	Messung der Verteilungstemperatur	158
11.6.1.	Bestimmung der Verteilungstemperatur durch Vergleich von Farbeindrücken	158
11.6.2.	Beispiele zur Ermittlung der Verteilungstemperatur durch Vergleich von Farbeindrücken	159
11.6.2.1.	Ermittlung von Verteilungstemperaturen unter 2856 K	159
11.6.2.2.	Ermittlung von Verteilungstemperaturen über 2856 K	160
11.6.3.	Bestimmung der Verteilungstemperatur aus dem Verhältnis der Strahlungsleistungen in zwei Wellenlängenbereichen	161
11.6.3.1.	Theoretische Betrachtungen	161
11.6.3.2.	Physikalische Messung der Verteilungstemperatur	162
11.6.3.2.1.	Meßverfahren mit einem Empfänger	162
11.6.3.2.2.	Meßverfahren mit zwei Empfängern	163
11.6.3.2.3.	Weitere Meßverfahren	165
11.6.4.	Kalibrierung der Verteilungstemperatur-Meßgeräte	166
11.6.4.1.	Experimentelle Kalibrierung	166
11.6.4.2.	Rechnerische Kalibrierung	166
11.7.	Messung der Lichtmenge	167
11.7.1.	Ermittlung der Lichtmenge aus der Lichtstrom-Zeit-Charakteristik bzw. der photographischen Wirkung	167
11.7.2.	Photoelektrische Verfahren der Lichtmengenbestimmung	168
12.	Spezielle lichttechnische Messungen	171
12.1.	Messung lichttechnischer Stoffkennzahlen	171
12.1.1.	Allgemeines	171
12.1.2.	Messungen in der Ulbrichtschen Kugel bei gerichtetem Lichteinfall	171
12.1.2.1.	Meßanordnung	171
12.1.2.2.	Messung des Reflexionsgrades bei gerichtetem Lichteinfall	173
12.1.2.3.	Messung des Transmissionsgrades bei gerichtetem Lichteinfall	173
12.1.3.	Messungen in der Ulbrichtschen Kugel bei diffusem Lichteinfall	174
12.1.3.1.	Messung des Reflexionsgrades ρ_{dif}	174
12.1.3.2.	Messung des Transmissionsgrades τ_{dif}	174
12.1.4.	Messung des Reflexionsgrades nach dem Taylorschen Verfahren	175
12.1.5.	Messung des Reflexionsgrades bei spiegelnder Reflexion	176
12.1.6.	Messung des Transmissionsgrades bei nicht streuenden Medien	177

12.1.7.	Messung des Leuchtdichtefaktors	177
12.1.8.	Ermittlung der Streuindikatrix, des Halbwertswinkels und des Streuvermögens	177
12.2.	Messung der Durchlässigkeit optischer Systeme	179
12.2.1.	Allgemeines	179
12.2.2.	Messung der Durchlässigkeit unter Verwendung einer Ulbricht- schen Kugel	180
12.2.3.	Bestimmung des Transmissionsgrades von Objektiven mittels zweier Leuchtdichtemessungen	181
12.2.4.	Messung des Transmissionsgrades von Optiken mit Hilfe eines Kollimators	182
12.3.	Lichttechnische Messungen an Bildwerfern	183
12.3.1.	Berechnung des Nutzlichtstroms	183
12.3.2.	Messung des Nutzlichtstroms	185
12.4.	Lichttechnische Messungen an Scheinwerfern	186
12.4.1.	Lichtstärke	186
12.4.2.	Lichtverteilung	188
12.4.3.	Streuung	190
12.4.4.	Nutzlichtstrom	192
12.4.5.	Leuchtenwirkungsgrad, Nutzwirkungsgrad, Bündelungsgrad ...	192
12.4.6.	Mindestabstand bei der Ermittlung der Lichtstärke	192
13.	Photographische Photometrie	194
14.	Grundbegriffe der Farbvalenzmetrik	196
14.1.	Farbreiz, Farbempfindung, Farbvalenz	196
14.2.	Farbmerkmale	197
14.3.	Die trichromatischen Farbmaßzahlen	198
14.4.	Der Begriff der Helligkeit	202
14.5.	Die geometrische Darstellung der Farben	204
14.5.1.	Darstellung im Farbenraum	204
14.5.2.	Darstellung in der Farbtafel	205
14.6.	10°-Normvalenz-System	208
14.7.	Helmholtz-Farbmaßzahlen	210
14.8.	Maßzahlen der DIN-Farbenkarte	212
14.9.	Farbmeßverfahren	214
14.9.1.	Spektralverfahren	214
14.9.1.1.	Spektralphotometrische Messung	215
14.9.1.2.	Valenzmetrische Auswertung	215
14.9.1.3.	Auswahlordinatenverfahren	218
14.9.2.	Dreibereichsverfahren	219
14.9.3.	Gleichheitsverfahren	220
15.	Eigenschaften der in der Lichtmeßtechnik verwendeten physika- lischen Empfänger	221
15.1.	Photozellen	221
15.1.1.	Strom-Spannungs-Kennlinie	222

15.1.2.	Spektrale Empfindlichkeit	224
15.1.3.	Gesamtempfindlichkeit	229
15.1.4.	Proportionalität	229
15.1.5.	Kosinusabhängigkeit	231
15.1.6.	Örtliche und zeitliche Konstanz	231
15.1.7.	Temperaturabhängigkeit	232
15.1.8.	Frequenzabhängigkeit	232
15.2.	Photoelemente	234
15.2.1.	Aufbau und Wirkungsweise	234
15.2.2.	Spektrale Empfindlichkeit	235
15.2.3.	Gesamtempfindlichkeit	237
15.2.4.	Proportionalität	237
15.2.5.	Kosinusabhängigkeit	240
15.2.6.	Örtliche und zeitliche Konstanz	241
15.2.7.	Temperaturabhängigkeit	244
15.2.8.	Frequenzabhängigkeit	245
15.3.	Photovervielfacher	246
15.3.1.	Aufbau und Wirkungsweise	246
15.3.2.	Spektrale Empfindlichkeit	247
15.3.3.	Gesamtempfindlichkeit	247
15.3.4.	Dunkelstrom	248
15.3.5.	Proportionalität	248
15.3.6.	Kosinusabhängigkeit	249
15.3.7.	Örtliche und zeitliche Konstanz	249
15.3.8.	Temperaturabhängigkeit	250
15.3.9.	Frequenzabhängigkeit	250
16.	Einiges über die Einrichtung eines lichttechnischen Laboratoriums	251
16.1	Räume und Einrichtungen	251
16.2.	Photometrische Geräte	254
16.3.	Elektrische Einrichtungen	256
16.3.1.	Stromversorgung	256
16.3.2.	Elektrische Meßinstrumente	256
16.4.	Brenndauerversuche	257
17.	Tabellen	261
18.	Zusammenstellung einiger lichttechnischer Begriffe in Deutsch, Englisch, Französisch und Russisch	282
19.	Literatur	291
19.1.	Seit 1930 erschienene Bücher über Lichttechnik, Lichtmeßtechnik und Farbvalenzmetrik	291
19.2.	Im Text zitierte Literatur	295
Namenregister		316
Sachregister		317