

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Schröder / Treiber

Technische Optik

Der Onlineservice InfoClick bietet unter www.vogel-buchverlag.de nach Codeeingabe eventuell zusätzliche Informationen und Aktualisierungen. Fordern Sie für Ihr E-Book den Code unter buch@vogel-buchverlag.de an!

Kamprath-Reihe

Professor Dipl.-Phys. Gottfried Schröder
Professor Dr. Hanskarl Treiber

Technische Optik

Grundlagen und Anwendungen

11., bearbeitete und aktualisierte Auflage

Vogel Buchverlag

Prof. Dipl.-Phys. **GOTTFRIED SCHRÖDER**
Jahrgang 1928, absolvierte sein Physikstudium an der Universität Frankfurt. Nach einer 5-jährigen Industrietätigkeit übernahm er von 1960 bis 1991 die Lehrtätigkeit und Leitung des Laboratoriums für Technische Optik an der Fachhochschule Frankfurt, Fachbereich Feinwerktechnik.
Fachgebiete: Technische Optik, Lasertechnik, Technische Fotografie.

Prof. Dr. **HANSKARL TREIBER**
Jahrgang 1935, ist Professor für Technische Optik und Optoelektronik an der Fachhochschule Nürnberg. Nach dem Studium der Physik und der Nachrichtentechnik an der Technischen Universität München folgten experimentelle Arbeiten auf den Gebieten Kristalloptik und optische Messtechnik. Besonderes Anliegen ist für ihn der Technologietransfer zwischen Hochschule und Industrie, die Entwicklung von Messverfahren, Prüfgeräten und Prototypen. Aus dieser praktischen Tätigkeit entstand ein Konzept für die Vorlesung Technische Optik. Ziel ist die Vermittlung praxisrelevanter optischer Grundlagen ohne allzu hohe Anforderungen an theoretische Vorkenntnisse.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

 <http://twitter.com/vogelbuchverlag>

 www.facebook.com/vogel.buchverlag

 www.vogel-buchverlag.de/rss/buch.rss

ISBN 978-3-8343-3335-3

11. Auflage. 2014

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 1974 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Die Technische Optik umfasst optische Grundlagen und die Anwendung von optischen Bauteilen, Geräten und Verfahren bei technischen Aufgabenstellungen. Einige Beispiele zeigen, wie vielgestaltig der Anwendungsbereich ist: Optik in elektronischen Systemen, in der Nachrichten- und Reproduktionstechnik, optische Verfahren bei Massenspeichern wie DVD, bei Justieraufgaben und bei der analytischen Untersuchung von Bewegungen, Farbeindrücken und Werkstoffen.

Das Buch bietet sichere Grundlagenkenntnisse der Technischen Optik für Ingenieure, Techniker und Studenten, sowohl für die Ausbildung als auch die tägliche Praxis. Es kann auch Ingenieuren und Wissenschaftlern anderer Fachgebiete bei der Lösung optischer Fragen helfen und ist als Nachschlagewerk sehr hilfreich. Besonders erleichtert es die Verknüpfung der Grundprinzipien mit technischen Anwendungen. Das Grundkonzept entspricht der Ingenieurausbildung an Fachhochschulen, der Stoffumfang geht, systematisch bedingt, darüber hinaus.

Einen Schwerpunkt nehmen optische Bauelemente ein, wobei auch Strahlungsquellen bis hin zum Laser, Empfänger und deren Messtechnik eingeschlossen sind. Für Geräte aus speziellen Anwendungsgebieten werden nur einige wichtige Beispiele erwähnt. So wurden u.a. Interferenzverfahren und Farbmessungen aufgenommen.

Die Grundlagendarstellung beschränkt sich weitgehend auf die Optik des achsnahen Gebietes. Die Korrektur optischer Systeme, z.B. eines Fotoobjektivs, bleibt Aufgabe von Spezialisten. Mit dem vermittelten Wissen ist man aber zumindest in der Lage einen fundierten Anforderungskatalog aufzustellen.

Das didaktische Konzept baut auf einer sorgfältigen Definition der Größen und Grundbegriffe, einer durchgehend normgemäßen Bezeichnungsweise und der Verwendung des genormten, computergerechten Vorzeichensystems auf. Die Eigenschaften von Linsen, Spiegeln, Planflächen und Planplatten werden aus einer einzigen Gleichung abgeleitet: der Schnittweitengleichung für eine sphärische Fläche. Dies ermöglicht eine besonders übersichtliche, zeitsparende und computergerechte Berechnung optischer Bauelemente. Wichtige Zusammenhänge werden durch Übungsbeispiele und Lösungen erläutert.

Als Voraussetzungen beim Leser genügen mathematische Grundkenntnisse, nur in wenigen Bereichen sind Differential- und Integralrechnung unvermeidlich.

Lernziele sind: Kenntnisse über Funktion und Aufbau optischer Elemente, Befähigung zum Zusammenstellen optischer Anordnungen unter Berücksichtigung der Bündelbegrenzung, Übersicht über optische Instrumente und Verfahren.

Die jetzt schon 11. Auflage erforderte eine Reihe wesentlicher, auch formaler Änderungen. Die neue Fassung der DIN 1335 von 2003 kennt keine Querstriche über F und f mehr und sieht endlich eindeutige Formelzeichen für die Öffnungs- und Feldgrößen vor. Dank der Verfügbarkeit preiswerter Rechnerprogramme für das Design optischer Systeme ist eine manuelle außeraxiale Flächenberechnung nicht mehr notwendig. Neu aufgenommen wurden moderne Bauelemente wie diffraktive optische Elemente oder fotonische Kristalle. Die Digitalfotografie einschließlich der Beamer wurde auf Kosten der an Bedeutung verlierenden Analogtechnik in den Vordergrund gestellt.

Die Verfasser danken allen Fachkollegen, die Anregungen zur Weiterentwicklung des Inhaltes gaben. Eine Reihe von Wünschen konnte integriert werden, leider ist aber immer auf eine Begrenzung des Umfangs zu achten. Aus diesem Grund wurde auch das Wörterbuch der Fachbegriffe in Deutsch/Englisch – Englisch/Deutsch weggelassen. Es ist jedoch weiterhin mit dem kostenlosen Verlagsservice «InfoClick» verfügbar. Dieser Service bietet auch zusätzliche Informationen und Aktualisierungen zum Buch. Mit einer Codeeingabe, die Sie dem entsprechenden InfoClick-Hinweis am Inhaltsverzeichnis des Buches entnehmen können, wird der Service auf der Internetseite des Verlages aufgerufen.

Meinem Kollegen Dr. Poisel danke ich besonders für viele neue Ideen und das Korrekturlesen. Ebenso dankbar bin ich für eine Resonanz zum Buch über meine E-Mail: hanskarl.treiber@fh-nuernberg.de.

Hanau
Nürnberg

Gottfried Schröder
Hanskarl Treiber

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Optische Größen und ihre Formelzeichen	13
Vorzeichenfestlegung nach DIN 1335	17
1 Licht, Lichtausbreitung und optische Abbildung	19
1.1 Eigenschaften des Lichtes	19
1.2 Wellenoptik	19
1.2.1 Kenngrößen der Wellen	20
1.2.2 Ausbreitung von Wellen – das Prinzip von Huygens	21
1.2.3 Interferenz	21
1.2.4 Beugung	23
1.2.4.1 Beugung am Gitter	24
1.2.4.2 Beugung an einer Lochblende	25
1.2.5 Brechung	26
1.2.5.1 Übergang in ein «optisch dichteres» Medium $n' > n$	27
1.2.5.2 Übergang in ein «optisch dünneres» Medium $n' < n$	27
1.2.6 Reflexion	28
1.2.6.1 Kenngrößen der Reflexion	29
1.2.6.2 Reflexion an transparenten Medien	29
1.2.6.3 Folge von Grenzflächen	30
1.2.7 Strahlungsdurchgang durch Materie	31
1.2.8 Kohärenz	33
1.2.9 Polarisierung	37
1.3 Quantenoptik	39
1.4 Optische Abbildung	39
1.4.1 Anforderungen an Bilder	40
1.4.2 Bildarten	41
1.4.2.1 Reelle Bilder	41
1.4.2.2 Virtuelle Bilder	41
1.4.3 Gauß'sche Optik, Paraxialgebiet	42
1.4.4 Kenngrößen optischer Systeme	43
1.4.4.1 Objektseitige Kenngrößen F und f	44
1.4.4.2 Bildseitige Kenngrößen F' und f'	44
1.4.4.3 Abbildungsmaßstab	45
1.4.4.4 Vergrößerung	45
1.4.4.5 Winkelverhältnis	45
1.4.4.6 Tiefenabbildungsmaßstab	46
1.4.5 Abbildung mit optischen Systemen	46
1.4.5.1 Darstellung von optischen Systemen	46
1.4.5.2 Verschiedene Medien vor und nach dem System	46
1.4.5.3 Gleiche Medien vor und nach dem System	48
2 Abbildende Bauelemente	51
2.1 Werkstoffe	51
2.1.1 Anorganische Gläser	51
2.1.2 Organische Gläser	54
2.1.3 Kristalle	55
2.1.4 Phototrope Gläser	55
2.1.5 Reflektierende Werkstoffe	55

2.2	Planflächen, Planplatten, Reflexionsprismen und Strahlteiler	56
2.2.1	Eine reflektierende Planfläche	56
2.2.2	Eine brechende Planfläche	57
2.2.3	Planparallele Platte	58
2.2.4	Planspiegelsysteme und Reflexionsprismen	59
2.2.5	Strahlenteiler	63
2.3	Prismen mit Bündelablenkung durch Brechung	64
2.3.1	Bündelablenkung	64
2.3.2	Winkeldispersion	66
2.3.3	Prismenkeile	66
2.4	Sphärische Flächen, Linsen, mehrstufige Systeme im Gauß-Gebiet	67
2.4.1	Sphärische Fläche	67
2.4.1.1	Abbe'sche Invariante der Brechung	67
2.4.1.2	Abbildung mit einem Kugelspiegel	69
2.4.1.3	Abbildungsmaßstab einer sphärischen Fläche	69
2.4.1.4	Winkelverhältnis einer sphärischen Fläche	70
2.4.1.5	Tiefenabbildungsmaßstab einer sphärischen Fläche	70
2.4.2	Abbildung mit einer Flächenfolge	70
2.4.2.1	Übergangsgleichungen	70
2.4.2.2	Abbildungsmaßstab	71
2.4.2.3	Winkelverhältnis	71
2.4.2.4	Brennweite	71
2.5	Einzellinsen und Systeme in Luft	73
2.5.1	Dicke Linsen	73
2.5.1.1	Sonderfall Plankonvex- und Plankonkavlinen	75
2.5.1.2	Sonderfall Kugellinse	75
2.5.1.3	Weitere Sonderfälle	76
2.5.2	Dünne Linsen	76
2.5.3	Mehrstufige Systeme	77
2.5.3.1	Systemkennwerte der Kombination von zwei Teilsystemen	78
2.5.3.2	Systemkennwerte der Kombination beliebig vieler Teilsysteme	78
2.5.3.3	Afokale Systeme	79
2.5.3.4	Verminderung der Baulänge	80
2.6	Abbildungsfehler	80
2.6.1	Öffnungsfehler	81
2.6.2	Sinusbedingung	83
2.6.3	Astigmatismus und Bildfeldwölbung	84
2.6.4	Koma	85
2.6.5	Verzeichnung	85
2.6.6	Farbfehler, chromatische Aberration	86
2.6.7	Achromate und ähnliche Bauelemente	88
2.7	Linsensonderformen	90
2.7.1	Asphären	90
2.7.2	Korrektionsplatten	91
2.7.3	Torische Flächen, Zylinderlinsen	92
2.7.4	Fresnel-Linsen	93
2.7.5	Gradientenoptik	94
2.7.6	Diffraktive optische Elemente	95
2.7.7	Flüssigkeitslinsen	96
2.8	Strahlenverlauf im nicht paraxialen Gebiet	96
2.8.1	Strahldurchrechnung	96
2.8.2	Optical Design	98
2.9	Reflexminderung	99
2.9.1	Kittflächen	99
2.9.2	Vergütung	99
2.9.3	Mikrostrukturierung	101

3	Bündelbegrenzung	103
3.1	Auswirkung der Bündelbegrenzung	103
3.2	Begrenzung des Öffnungswinkels	104
3.2.1	Öffnungsblende	104
3.2.2	Pupillen	105
3.2.3	Messgrößen der Öffnung	106
3.3	Begrenzung des Feldwinkels	107
3.3.1	Feldblende	107
3.3.2	Luken	108
3.3.3	Messgrößen des Feldes	108
3.4	Eigenschaften von Pupillen und Luken	109
3.5	Abschattblenden, Vignettierung	111
3.6	Telezentrische Systeme	112
3.7	Feldlinsen und Kondensoren	113
4	Strahlung, Lichtquellen und Empfänger	117
4.1	Bewertung der Strahlung durch Empfänger	117
4.2	Strahlung und Licht	119
4.2.1	Ausbreitung und Empfang optischer Strahlung	119
4.2.2	Raumwinkel	119
4.2.3	Größen und Einheiten der Strahlungs- und Lichttechnik	120
4.2.3.1	Strahlungsfluss und Lichtstrom	121
4.2.3.2	Strahlstärke und Lichtstärke	122
4.2.3.3	Strahldichte und Leuchtdichte	123
4.2.3.4	Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke	123
4.2.3.5	Abstandsquadratgesetz	124
4.2.3.6	Spektrale fotometrische und radiometrische Größen	124
4.3	Radiometrische und fotometrische Größen bei der Abbildung	126
4.3.1	Direkte Bestrahlung einer Empfängerfläche	126
4.3.2	Lichtstrom und Beleuchtungsstärke bei einstufiger Abbildung	127
4.3.3	Beleuchtungsstärkeabfall zum Feldrand	128
4.3.4	Bildleuchtdichte und geometrischer Fluss	129
4.4	Licht- und Strahlungsquellen	131
4.4.1	Allgemeine Eigenschaften	131
4.4.1.1	Spektrale Verteilung	131
4.4.1.2	Wirkungsgrad, Lichtausbeute	133
4.4.1.3	Strahlende Fläche, Leucht- und Strahldichte	135
4.4.1.4	Lebensdauer	135
4.4.1.5	Polarisationsgrad	135
4.4.1.6	Kohärenz	135
4.4.1.7	Frequenzverhalten	135
4.4.2	Glühlampen	136
4.4.3	Entladungslampen	139
4.4.3.1	Glimmlampen	139
4.4.3.2	Leuchtstofflampen	139
4.4.3.3	Niederdruck-Hochspannungslampen	140
4.4.3.4	Hochdruck-Hochspannungslampen	140
4.4.4	Lumineszenzdioden	141
4.4.4.1	Leuchtdioden und UV-Dioden	142
4.4.4.2	Infrarotdioden	143
4.4.5	Laser	144
4.4.5.1	Grundlagen	144
4.4.5.2	Resonator und Lasermoden	145
4.4.5.3	Eigenschaften des Lasers	147
4.4.5.4	Lasertypen	148
4.4.6	Anzeigen, Displays	150
4.4.6.1	LED-Anzeigen	151

4.4.6.2	Katodenstrahlröhren	151
4.4.6.3	Flüssigkristall-Anzeigen	151
4.4.6.4	Plasmasdisplays	152
4.5	Das Auge	152
4.5.1	Das Auge als abbildendes System	152
4.5.2	Das Auge als Strahlungsempfänger	154
4.5.3	Auflösungsvermögen	155
4.6	Fotoempfänger	155
4.6.1	Allgemeine Eigenschaften	155
4.6.2	Empfängerarten	157
4.6.3	Abbildung der Leuchfläche auf die Empfängerfläche	159
4.7	Bildempfänger	160
4.7.1	Fotoschichten	160
4.7.1.1	Allgemeine Eigenschaften	160
4.7.1.2	Empfindlichkeit und Schwärzungskurve	160
4.7.1.3	Auflösungsvermögen	161
4.7.2	Halbleiterbildempfänger	162
4.7.2.1	Chipstruktur	162
4.7.2.2	Chiptechnologie	162
4.7.2.3	Möglichkeiten der digitalen Fotografie	163
5	Faseroptik und weitere Bauelemente	165
5.1	Faseroptik	165
5.1.1	Eigenschaften der Einzelfaser	165
5.1.2	Faserbündel zur Lichtleitung	170
5.1.3	Geordnete Faserbündel zur Bildübertragung	172
5.2	Bildschirme	174
5.3	Filter und Farbteiler	176
5.3.1	Absorptionsfilter	177
5.3.2	Interferenzfilter und Farbteiler	178
5.4	Mikrooptische Bauelemente	182
5.4.1	Mikrostrukturierte Oberflächen	182
5.4.2	Digital Mirror Devices	182
6	Optische Instrumente	185
6.1	Vergrößerung und Auflösungsgrenze	185
6.1.1	Vergrößerung optischer Instrumente	185
6.1.2	Durch Beugung bedingte Grenze des Auflösungsvermögens	186
6.2	Beleuchtungssysteme, Scheinwerfer	187
6.2.1	Übersicht der Beleuchtungssysteme	187
6.2.2	Einzelheiten zum Kondensoraufbau	190
6.2.3	Scheinwerfer	192
6.3	Projektoren	194
6.3.1	Bildprojektoren	195
6.3.2	Technische Kleinprojektoren	196
6.3.3	Messprojektoren	197
6.3.4	Beamer	198
6.4	Fotografische Optik/Kameras	200
6.4.1	Schärfentiefe	200
6.4.2	Bildhelligkeit als Funktion der Aufnahmeentfernung	202
6.4.3	Objektive für fotografische Geräte	202
6.4.4	Aufnahme und Wiedergabe stereoskopischer Bilder	206
6.5	Lupen und Okulare	209
6.5.1	Vergrößerung und Bauarten der Lupen	209
6.5.2	Okulare	211
6.6	Fernrohre	212
6.6.1	Aufbau und Kenngrößen	213

6.6.2	Beobachtungsfernrohre	215
6.6.3	Kollimatoren und Autokollimationsfernrohre	215
6.6.4	Fluchtfernrohre	218
6.6.5	Weitere technische Fernrohre	221
6.7	Entfernungsmesser und Sucher	222
6.7.1	Entfernungsmesser	222
6.7.2	Sucher	226
6.8	Mikroskope	227
6.8.1	Aufbau und Vergrößerung	227
6.8.2	Auflösungsvermögen und förderliche Vergrößerung	228
6.8.3	Beleuchtungsverfahren	229
6.8.4	Objektive und Okulare	230
6.8.5	Konfokale Mikroskope	231
6.8.6	Weitere Hilfsmittel der technischen Mikroskopie	232
6.9	Bildauswertung	233
6.9.1	Methoden der Bildauswertung	233
6.9.2	Beleuchtungstechnik	233
6.9.3	Bildverarbeitung	234
6.10	Peripherie für Rechner	237
6.10.1	Optische Speichermedien	237
6.10.2	Laserdrucker	239
6.10.3	Scanner	240
7	Interferenz- und Spektralgeräte, Farben, Gitter, Holographie	241
7.1	Grundlagen der Messung mittels Interferenz	241
7.2	Interferometrische Längenmessung	243
7.3	Interferometrische Oberflächenprüfung	245
7.4	Spektralgeräte	247
7.4.1	Übersicht; Auflösungsvermögen	247
7.4.2	Spektroskope, Spektrometer, Polychromatoren und Spektrographen	248
7.4.3	Monochromatoren und Spektralfotometer	250
7.5	Farbe und Farbmessung	251
7.5.1	Grundlagen der Farbmessung	251
7.5.2	Farbmischung	252
7.5.2.1	Additive Farbmischung	252
7.5.2.2	Subtraktive Farbmischung	252
7.5.3	Kennzeichnung einer Farbe durch Maßzahlen	253
7.5.4	Farbartdarstellung im Farbdreieck	255
7.5.5	Farbmessverfahren	257
7.6	Gitter	259
7.6.1	Beugungsgitter	259
7.6.2	Weitere Anwendungen von Gittern	261
7.6.3	Moiréverfahren	262
7.6.4	Barcodes	263
7.7	Holographie	264
8	Polarisation	271
8.1	Polarisationszustände	271
8.1.1	Übersicht	271
8.1.2	Allgemeine Darstellung	271
8.1.3	Poincaré-Kugel	273
8.1.4	Stokes-Vektoren	273
8.2	Polarisationsverfahren	275
8.2.1	Übersicht	275
8.2.2	Anisotrope Medien; Doppelbrechung	275
8.2.3	Optische Aktivität	278
8.3	Bauelemente der Polarisation	279

8.3.1	Polarisatoren	279
8.3.2	Verzögerungsplatten	280
8.3.3	Viertelwellenplatte	282
8.3.4	Depolarisatoren	283
8.4	Anwendungen der Polarisation	283
8.4.1	Spannungsoptik	283
8.4.2	Weitere Anwendungsbeispiele	285
9	Messung optischer Kenngrößen	287
9.1	Krümmungsradien	287
9.2	Brennweiten	288
9.3	Schnittweiten und Hauptpunktlagen	289
9.4	Pupillendurchmesser	290
9.5	Übertragungsfunktion optischer Systeme	291
Formelsammlung		295
1	Allgemeine Formeln	295
2	Abbildung im Gauß'schen Bereich	298
3	Bündelbegrenzung	303
4	Abbildungsqualität	305
5	Parameter von Licht- und Strahlungsquellen	306
6	Eigenschaften optischer Systeme	309
7	Optische Instrumente	310
8	Optoelektronik	312
9	Näherungsformeln zur Berechnung von Linsendaten	314
10	Bildkonstruktion	316
Abkürzungen aus der technischen Optik, Elektronik, Datentechnik		319
Auswahl einiger DIN-Normen		325
Literaturverzeichnis		327
Stichwortverzeichnis		331

Optische Größen und ihre Formelzeichen

Bezeichnungen in der Technischen Strahlenoptik nach DIN 1335

Objektseite: Alle objektseitigen (gegenstandsseitigen, dingseitigen) Größen werden nach der Neufassung der Norm ohne Querstrich geschrieben; also f und F statt \bar{f} , \bar{F} .

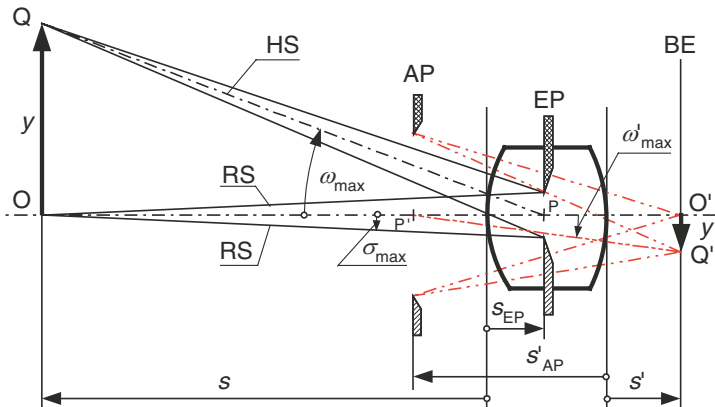
Bildseite: Alle bildseitigen Größen werden mit Hochstrich geschrieben z.B. f' , y' , a' , F' , H' . In der technischen Optik ist es üblich, Strecken wie a , f usw. in mm anzugeben. Die Einheit darf ähnlich wie in technischen Zeichnungen weggelassen werden.

A	Auflösungsvermögen	
A_i	Konstanten der Dispersionsformel	
a	Objektweite	Objektabstand zur Hauptebene H
a'	Bildweite	Bildabstand zur Hauptebene H'
a_s	Bezugssehweite	$a_s = -250$ mm
AL	Austrittsluke	auch Durchmesser der Austrittsluke
AP	Austrittspupille	auch Durchmesser der Austrittspupille
BE	Bildebene	
C	Krümmungsmittelpunkt	
C	Krümmung	$C = 1/r$
c	Lichtgeschwindigkeit	$c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s
D	Brechwert	Kehrwert der Brennweite in m
D	optische Dichte	
d	Flächenabstand	Abstand von Flächenscheiteln (Linsendicke, Luftabstand)
d	Plattendicke	
E_e	Bestrahlungsstärke	Irradiance
E_v	Beleuchtungsstärke	Illuminance
E	Elektrische Feldstärke	
EL	Eintrittsluke	auch Durchmesser der Eintrittsluke
EP	Eintrittspupille	auch Durchmesser der Eintrittspupille
f	objektseitige Brennweite	Abstand Hauptpunkt H – Brennpunkt F: früher \bar{f}
f'	bildseitige Brennweite	Abstand Hauptpunkt H' – Brennpunkt F'
F	objektseitiger Brennpunkt	Strahlen, die von F ausgehen (Positivsystem) oder nach F zielen (Negativsystem), verlassen das System achsparallel: früher \bar{F}
F'	bildseitiger Brennpunkt	achsparallele Strahlen werden in den Punkt F' abgelenkt (Positivsystem) oder divergieren von F' (Negativsystem).
FB	Feldblende	auch Durchmesser der Feldblende
G	geometrischer Fluss	Etendue
g	Gitterkonstante	
H_v	Belichtung	light exposure
H	objektseitiger Hauptpunkt	Bezugspunkt für a und f
H'	Bildseitiger Hauptpunkt	Bezugspunkt für a' und f'

HS	Hauptstrahl	Strahl QP vom Objektpunkt zur Mitte der Eintrittspupille
h	Einfallshöhe, Durchstoßhöhe	Abstand eines Punktes von der optischen Achse
I, G	Einfallspunkt	außeraxialer Punkt auf einer Bauelementeoberfläche
I_e	Strahlstärke	radiant intensity
I_v	Lichtstärke	luminous intensity
i	Interstitium	Abstand $HH' = KK'$
J	Intensität	allgemein für fotometrische und radiometrische Größen
k	Anzahl, Anzahl der Reflexionen	
k	Blendenzahl	Kenngroße für die Öffnung
K	fotometrisches Strahlungsäquivalent	
K	objektseitiger Knotenpunkt	K und K' sind das Punktepaar, für das das Winkelverhältnis $\gamma' = +1$ ist
K'	bildseitiger Knotenpunkt	
L_e	Strahldichte	radiance
L_v	Leuchtdichte	luminance
l_k	Kohärenzlänge	
l_n	Ausdehnung des Nahfeldes	
M	Modulation	Hell-Dunkel-Kontrast
N	Wellenanzahl	
N	Anzahl der Gitterlinien	
m	Ordnungszahl	Kennziffer für Beugungsordnung
n	Brechzahl, Brechungskoeffizient, Brechungsindex	
N	Wellenanzahl	
NA	numerische Apertur	früher A
O, Q	Objektpunkte	O auf der optischen Achse; Q außerhalb der Achse (früher P)
O', Q'	Bildpunkte	O' auf der optischen Achse; Q' außerhalb der Achse
ÖB	Öffnungsblende	auch Durchmesser der Öffnungsblende
OE	Objektebene	
P	Polarisationsgrad	
P, P'	Mitte der Pupillen	Achspunkt von Eintritts- und Austrittspupille
r	Krümmungsradius	Strecke SC
R	Ortsfrequenz	Anzahl der Linienpaare pro mm
R	Amplitudenreflexionsgrad	
RS	Randstrahl	Strahl von Lukenmitte zur Eintrittspupille
S	Scheitelpunkt	
S	Stokes-Vektoren	
$S(\lambda)$	Strahlungsfunktion	für die Farbmessung
s	Objektschnittweite	Abstand des Objektpunktes vom zugehörigen Linsenscheitel
s	Empfindlichkeit von Empfängern	
s'	Bildschnittweite	Abstand des Bildpunktes vom zugehörigen Linsenscheitel

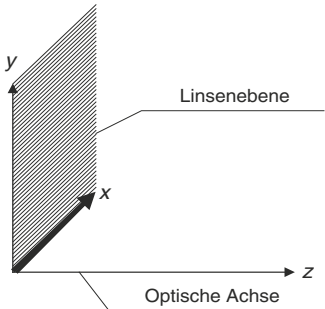
S	Scheitel	Scheitel einer gekrümmten Fläche
T	Modulationsübertragungsfaktor	
T	thermodynamische Temperatur	absolute Temperatur
T_f	Farbtemperatur	
t	Zeit	
t	optische Tubuslänge	Abstand der Brennpunkte
u'	erlaubte Unschärfe	Durchmesser des Unschärfenkreises
V	Verzeichnung	
$V(\lambda)$	Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des Auges	
v	Parallelversatz	
X	Eingangsgröße	bei Empfängern
x, y, z	Normfarbwertanteile	
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Normspektralwerte	
Y	Ausgangsgröße	bei Empfängern
y	Objekthöhe	Abstand eines Objektpunktes von der optischen Achse
y'	Bildhöhe	Abstand eines Bildpunktes von der optischen Achse
Z	Dämmerungszahl	
z	Objektstand	Abstand FO (Newton'sche Koordinaten)
z'	Bildabstand	Abstand F'O' (Newton'sche Koordinaten)
α	Prismenwinkel	brechender Winkel eines Prismas
α	Spiegelwinkel	Winkel zwischen zwei Spiegelflächen
α	Absorptionsgrad	
α_i	Reinabsorptionsgrad	
α'	Tiefenabbildungsmaßstab	
β	Beugungswinkel	
β'	Abbildungsmaßstab	lateraler Abbildungsmaßstab, Verhältnis von Strecken
$\beta(\lambda)$	Leuchtdichtefaktor	
Γ'	Vergrößerung	Bildwinkel mit/Bildwinkel ohne optisches Gerät
γ	Gammawert von Fotoempfängern	
γ'	Winkelverhältnis	Verhältnis von Bild- zu Objektwinkel
δ	Ablenkung, Ablenkwinkel	Winkel zwischen einfallendem und austretendem Strahl
δ	Gangunterschied	
ε	Einfallswinkel	Winkel relativ zum Lot auf die Fläche
ε'	Austrittswinkel	Winkel relativ zum Lot auf die Fläche
ε_g	Grenzwinkel der Totalreflexion	
ε_p	Brewster-Winkel	
η_e	Strahlungsausbeute	
η_v	Lichtausbeute	
ϑ	Drehwinkel	
κ	Zählgröße	$\kappa = 1; 2; 3 \dots$
λ	Wellenlänge	
λ_0	Wellenlänge im Vakuum	falls keine Verwechslung möglich, wird Index 0 weggelassen

v	Abbé'sche Zahl	Glaskenngröße
ν	Strahlungsfrequenz	in Physikbüchern oft f
ϱ	Reflexionsgrad	Leistungsreflexionsgrad im Gegensatz zu R
σ	Planck-Konstante	
σ	mechanische Spannung	
σ	objektseitiger Öffnungswinkel	Winkel der von O ausgehenden Strahlen gegen die optische Achse
σ_{\max}	betragsmäßig größter objektseitiger Öffnungswinkel	Winkel des von O ausgehenden Randstrahls RS gegen die optische Achse, verantwortlich für die Lichtstärke
σ'	bildseitiger Öffnungswinkel	Winkel der nach O' laufenden Strahlen gegen die optische Achse
σ'_{\max}	betragsmäßig größter bildseitiger Öffnungswinkel	Winkel des nach O' zielenden Randstrahls RS gegen die optische Achse
τ	Transmissionsgrad	
τ_i	Reintransmissionsgrad	
Φ_e	Strahlungsfluss	radiant flux
Φ_v	Lichtstrom	luminous flux
φ	Halbwertswinkel	Bei φ ist die Lichtstärke einer Quelle auf 50% gefallen.
φ	Zentriwinkel der Normalen	Winkel zwischen der Flächennormalen und der optischen Achse
φ_0	Nullphasenwinkel	
$\varphi(\lambda)$	Farbreizfunktion	für die Farbmessung
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebungswinkel	Phasenwinkeldifferenz von zwei Wellen
Ω	Raumwinkel	
Ω_0	Einheitsraumwinkel	$\Omega_0 = 1 \text{ rad}$
ω	Kreisfrequenz	Winkelgeschwindigkeit
ω_{\max}	objektseitiger Feldwinkel	für die erlaubte Objektgröße verantwortlicher Winkel
ω'_{\max}	bildseitiger Feldwinkel	für die erlaubte Bildgröße verantwortlicher Winkel
\sim	Tilde	Die Tilde markiert Größen weit außerhalb der optischen Achse, meist verknüpft mit Abweichungen von der Gauß'schen Näherung.



Vorzeichenfestlegung nach DIN 1335

Alle Längen werden auf markante Punkte wie Scheitel, Hauptpunkte oder Brennpunkte des jeweils betrachteten optischen Elements oder Systems bezogen. Bei den folgenden Angaben bedeuten (-) einen negativen und (+) einen positiven **Zahlenwert**. Strecken werden grundsätzlich in mm angegeben, die Einheit darf hier ausnahmsweise weggelassen werden. Hat z.B. die objektseitige Brennweite $f_{(-)}$ einer Sammellinse den Zahlenwert 15 mm, so schreibt man $f = -15$.

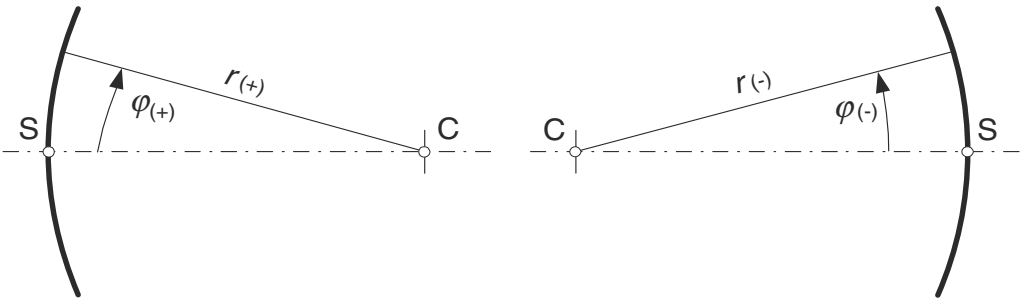


positive Lichtrichtung

Bei Reflexion gilt wegen der Strahlenumkehr $n' = -n$

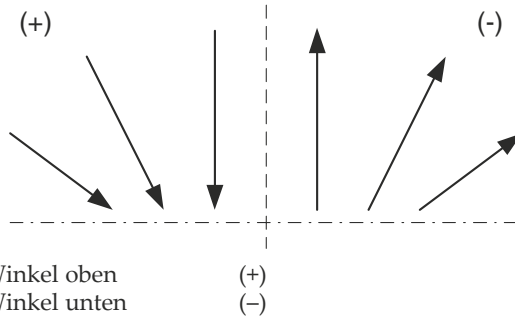
Bei Spiegeln läuft das Licht nach der Norm und auch in diesem Buch «vor einer etwaigen Reflexion» vereinbarungsgemäß immer von links nach rechts. Bei einer Reihe von Optikdesign-Programmen wird jedoch als positiv die Richtung nach der Reflexion gewählt.

- Strecken**
- links des Bezugspunktes (-)
 - rechts des Bezugspunktes (+)
 - Bezug für s und s' : Scheitelpunkte $S_1, S_2 \dots$
 - Bezug für a und a' : Hauptebenen H und H'
 - Bezug für z und z' : Brennpunkte F und F'
 - Bezug für r : Scheitelpunkte $S_1, S_2 \dots$
 - Unter der Bezugsachse (-)
 - Über der Bezugsachse (+)

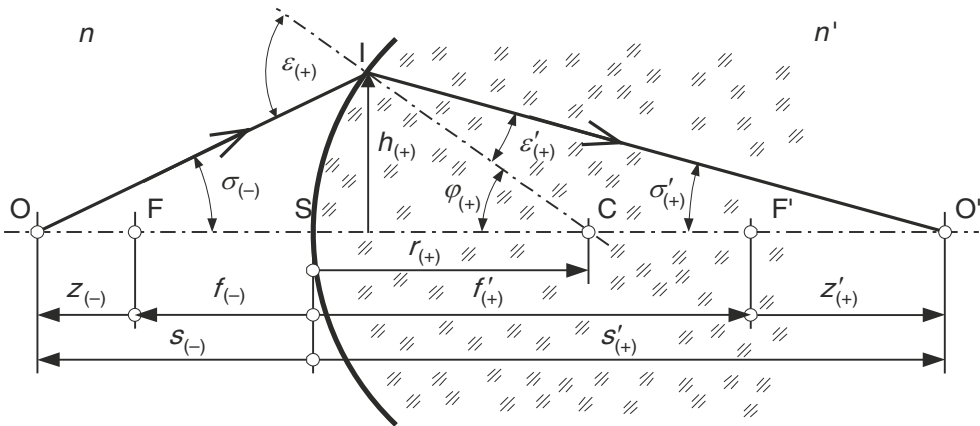


- Winkel**
- φ Vorzeichen abgeleitet aus $\tan \varphi = h/r$
 - σ, σ' Vorzeichen abgeleitet aus $\tan \sigma = h/s$
 - ω, ω' Vorzeichen abgeleitet aus $\tan \omega = y/z$
 - δ Um das Vorzeichen des Ablenkwinkels zu erhalten, dreht man den einfallenden Strahl auf dem kürzesten Weg in Richtung des austretenden Strahls. Bei Linksdrehung ist δ positiv, bei einer Rechtsdrehung negativ.
 - $\varepsilon, \varepsilon'$ Für ε und ε' existieren in der Literatur unterschiedliche Vorzeichenregeln. Hier wird die Beziehung $\varphi = \sigma + \varepsilon = \sigma' + \varepsilon'$ (Bild Seite 18) verwendet. Bei Reflexion und Brechung gilt eine analoge Definition für δ . Bezugsachse ist hier das Lot auf die Bezugsfläche. Bei der Reflexion haben ε und ε' unterschiedliche Vorzeichen, bei der Brechung sind sie gleich.

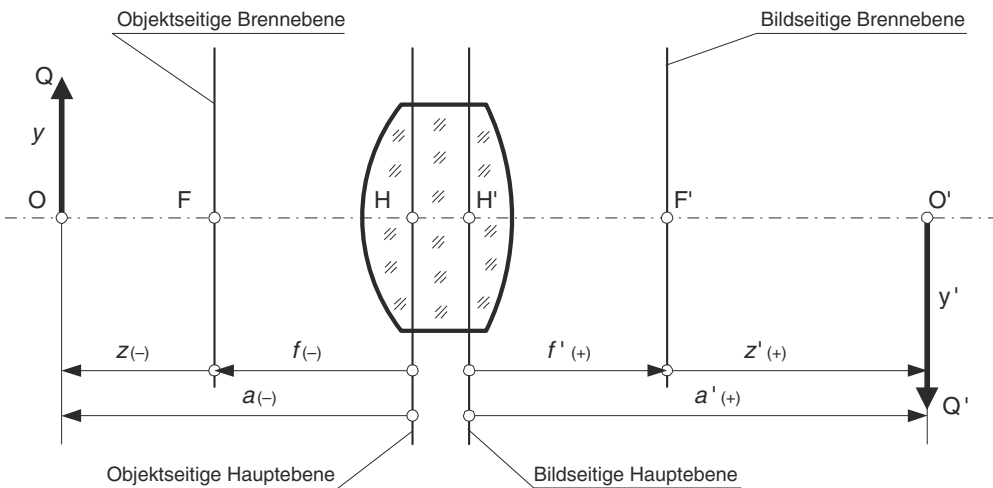
Faustregel für die Vorzeichen von Winkeln



Vorzeichen im System



Die Vorzeichen in den Klammern geben die Vorzeichen der **Zahlenwerte** an.



1 Licht, Lichtausbreitung und optische Abbildung

1.1 Eigenschaften des Lichtes

Licht ist eine der vielen Erscheinungsformen der Energie. Bestrahlte Flächen erwärmen sich, eine beleuchtete Solarzelle gibt elektrische Leistung ab, fotografische Emulsionen werden chemisch verändert. Die Frage allerdings, in welcher Form die Energie im Licht gespeichert ist, lässt sich nicht mehr elementar beantworten. Je tiefer die physikalische Forschung in atomare Bereiche vordringt, desto schwerer wird eine absolute und eindeutige Beschreibung der Naturphänomene. Einen Ausweg bietet eine anschauliche Beschreibung, ein Modell. Neue wissenschaftliche Erkenntnisse führen dann nur zu einer Modifikation des Modells.

Bei Beugungs- und Überlagerungserscheinungen hat sich das Wellenbild bewährt. Präzisionslängenmessung unter Verwendung der Lichtwellenlänge, Vergütung von Objektiven oder die Holographie gehören zu diesem Themenkreis. Atomare optoelektronische Phänomene dagegen widersprechen dem Wellenbild und lassen sich nur mit einem Teilchen- oder Quantenmodell veranschaulichen. Beispiele dafür sind die Abhängigkeit der Emissionswellenlänge einer Leuchtdiode vom Bandabstand des Halbleitermaterials oder die Elektronenablösung bei Bestrahlung.

Beim Licht gibt es demnach kein Modell, das alle experimentell festgestellten Eigenschaften gleichzeitig beschreibt. Und das ist nicht nur beim Licht so: Nach heutiger Auffassung ist **jedem** bewegten Teilchen, z.B. einem Elektron oder Neutron, eine Führungswelle zugeordnet. Umgekehrt gehört zu jeder Welle ein Elementarteilchen; Welle und Teilchen sind also miteinander verkoppelt und gleichberechtigt. Diese Erkenntnis nennt man **Welle-Teilchen-Dualismus**.

1.2 Wellenoptik

Das Wellenmodell ist von Vorteil, wenn viele Lichtquanten zusammenwirken, also bei hohen Intensitäten. Da der technische Einsatz des Lichtes im Normalfall hohe Intensitäten erfordert, wird meist mit dem Wellenmodell gearbeitet.

Die optische Strahlung lässt sich als elektromagnetische Welle, charakterisiert durch ihre **Vakuumwellenlänge** λ_0 beschreiben. Der sichtbare Bereich geht von $\lambda_0 = 380 \dots 780$ nm. Streng genommen darf nur diese Strahlung als Licht, kurz VIS oder v (englisch: visible), bezeichnet werden. Die zugeordneten Farben werden bei der spektralen Zerlegung des Tageslichtes sichtbar und heißen daher **Spektralfarben**. Die Grenzen der einzelnen Spektralfarben können nicht exakt definiert werden, da Farbzeichnungen wie «gelbgrün» oder «rot» zu unscharf sind.

Monochromatische Strahlung ($\Delta\lambda \rightarrow 0$) wird als gesättigte Farbe empfunden. Als ungefähre Bereichsgrenzen werden folgende Werte angegeben:

violett	380...424 nm
blau	424...486 nm
blaugrün	486...517 nm
grün	517...527 nm
gelbgrün	527...575 nm
gelb	575...585 nm
orange	585...647 nm
rot	647...780 nm

An den sichtbaren Bereich (VIS) schließen sich die ultraviolette (UV) und die infrarote (IR) Strahlung an (Bild 1.2.1). Das UV-Gebiet wird nach DIN 5031 Teil 7 in die Abschnitte UV-A (315...380 nm), UV-B (280...315 nm) und UV-C (100...280 nm); das IR-Gebiet in IR-A (780 nm...1,4 μm), IR-B (1,4...3 μm) und IR-C (3 μm ...1 mm) gegliedert. Bedeutung gewinnt neuerdings der Terahertz-Bereich mit Wellenlängen von 30 μm bis 3 mm. Der UVA-Bereich wird wegen der potentiellen Gefährdung der Augen heute meist bis 400 nm

ausgedehnt; in einigen Publikationen wird jedoch nach wie vor 380 nm verwendet.

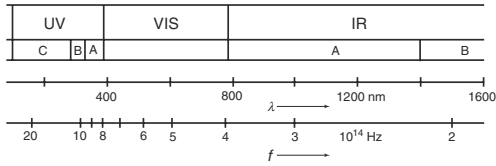


Bild 1.2.1 Wellenlängenbereiche in der Umgebung der sichtbaren Strahlung

Die optische Strahlung umfasst die Bereiche UV – VIS – IR. Der sichtbare Bereich (VIS) erstreckt sich von $\lambda_0 = 380 \dots \lambda_0 = 780$ nm.

Bild 1.2.2 zeigt den sichtbaren Spektralbereich. Regt man Gase oder Dämpfe durch elektrische Entladung zum Leuchten an, so werden oft sehr schmale Spektralbereiche, die **Spektrallinien**, emittiert. Einige der von den angegebenen Elementen emittierten Spektrallinien sind in Bild 1.2.2 zusammen mit der üblichen Linienbezeichnung eingetragen. Quecksilberdampf (Hg) z.B. sendet eine gelbgrüne Spektrallinie der Wellenlänge $\lambda_0 = 546,1$ nm aus, die man als «e-Linie» bezeichnet. Andere Lichtquellen, z.B. die Sonne, Weißlichtdioden oder Glühlampen, emittieren ein **kontinuierliches Spektrum**. Ist dabei kein Spektralbereich bevorzugt, so bewertet das Auge die Strahlung als **ungesättigte Farbe**, etwa als weißes, gelbliches oder bläuliches Licht.

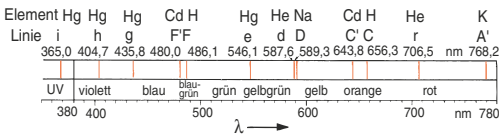


Bild 1.2.2 Spektralfarben und Spektrallinien

1.2.1 Kenngrößen der Wellen

Für alle Wellenarten gelten die gleichen, in den Lehrbüchern der Physik behandelten Grundgesetze [1.1]. Hier werden nur die für die Optik relevanten Ergebnisse zusammengefasst.

Eine periodische Störung in einem Raumpunkt, z.B. die Änderung der elektromagnetischen **Feldstärke** $\hat{E} = \hat{E} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0)$, wird als

Schwingung bezeichnet. Ihre Kenngrößen sind die **Amplitude** \hat{E} , die **Kreisfrequenz** ω und der **Nullphasen-Winkel** φ_0 . **Kreisfrequenz** ω und Frequenz ν sind durch die Beziehung $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$ verknüpft. Das Zeichen ν wird in der Optik für die Frequenz verwendet, um Verwechslungen mit der Brennweite f zu vermeiden. Die **Schwingungsdauer** $T = 1/\nu$ ist die Zeitdifferenz zwischen 2 gleichen, aufeinanderfolgenden Phasen.

Eine Störung breitet sich mit der Phasengeschwindigkeit c in alle verfügbaren Richtungen des Raumes aus. Dieses Phänomen wird als Welle bezeichnet.

Eine Welle ist die zeitlich und räumlich veränderliche Ausbreitung einer Störung.

Die Phasengeschwindigkeit der Lichtwelle ist im Vakuum für alle Farben gleich. Sie wird **Vakuumlichtgeschwindigkeit** genannt und hat den Wert $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, also rund $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Die Wellenlänge λ ist durch folgende Beziehung festgelegt:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (\text{Gl. 1.2.1})$$

Im Bereich der Spektroskopie wird auch die Wellenzahl $k = 1/\lambda$ verwendet. In durchsichtigen Medien ist die Phasengeschwindigkeit geringer als im Vakuum und sowohl vom Material als auch von der Wellenlänge abhängig. Diese Abhängigkeit wird als **Dispersion** bezeichnet.

$$c = \frac{c_0}{n} = \frac{\nu \lambda_0}{n} \quad (\text{Gl. 1.2.2})$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c_0}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$$

n ist eine Materialkenngröße, die **Brechzahl**. Optische Gläser haben je nach Sorte und Wellenlänge Brechzahlen zwischen 1,4...2, Infrarotmaterialien erreichen Werte über 4. Bei Literaturangaben achte man auf den Bezug: In der physikalischen Literatur wird meist auf Vakuum, in der Chemie auf Normluft bezogen. Die meisten Datenblätter etwa von Schott, Corning oder Hoya beziehen die Brechzahlen auf Vakuum. Dann hat die Brech-

zahl im Vakuum den Wert 1; in Normluft (20 °C, 1 013 hPa) weicht er mit $n = 1,0003$ nur geringfügig davon ab.

Die Brechzahl n eines Mediums ist der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit im Medium.

Parallel mit der Phasengeschwindigkeit wird auch die Wellenlänge in Medien kleiner, die Lichtfrequenz dagegen bleibt konstant (Bild 1.2.3). Spricht man in der Praxis von Wellenlänge, ist üblicherweise immer die Vakuumwellenlänge gemeint; anstelle von λ_0 schreibt man λ ohne Index. Solange keine Verwechslungsgefahr besteht, wird auch in den folgenden Abschnitten so verfahren.

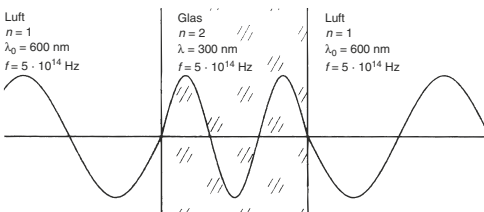


Bild 1.2.3 Abhängigkeit der Wellenlänge von der Brechzahl des Mediums

Die elektromagnetische Welle ist eine Transversalwelle, d.h., elektrische und magnetische Feldstärke stehen auf der Ausbreitungsrichtung (z -Richtung) senkrecht. Die von der Ausbreitungsrichtung und der elektrischen Feldstärke aufgespannte Ebene ($E - z$) wird als **Schwingungsebene** bezeichnet, die von der Ausbreitungsrichtung und der magnetischen Feldstärke aufgespannte Ebene ($H - z$) wird Polarisations-ebene genannt. Prinzipiell gibt es beliebig viele mögliche Schwingungsebenen im Raum. Wird eine spezielle Ebene bevorzugt, spricht man von **Polarisation** (Abschnitt 1.2.9 und Kapitel 8).

1.2.2 Ausbreitung von Wellen – das Prinzip von HUYGENS

Für die Ausbreitung von Wellen gilt das Prinzip von HUYGENS:

Jeder Punkt einer Wellenfläche stellt ein neues Wellenzentrum dar, von dem Kugelwellen ausgehen, die **Elementarwellen** genannt werden.

Bild 1.2.4 zeigt zwei Beispiele für den Einsatz des Prinzips von HUYGENS in einem beliebig ausgedehnten Raum.

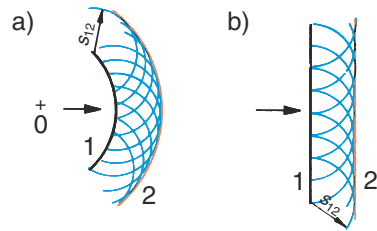


Bild 1.2.4 Ausbreitung einer Kugelwelle und einer ebenen Welle ohne Hindernisse

Die auf der Wellenfront 1 entstehenden Kugelwellen interferieren und bilden die neue Wellenfront 2. Die im Zeitintervall Δt zurückgelegte Wegstrecke beträgt $s_{12} = c \cdot \Delta t$; Wellenfront a) bleibt daher eine Kugelwelle, b) eine ebene Wellenfront. Dieser Erhalt der Wellenform gilt im ausgedehnten Raum und angenähert noch dann, wenn Hindernisse nicht sehr viel größer als die Wellenlänge sind.

1.2.3 Interferenz

Treffen in einem Raumpunkt zwei oder mehrere Wellen mit gleicher Schwingungsebene und zumindest ähnlicher Frequenz zusammen, so überlagern sie sich zu einer resultierenden Welle; man spricht von Interferenz. Maßgebend für das Ergebnis der Überlagerung ist ihre gegenseitige Phasenlage, die zahlenmäßig als **Phasenverschiebungswinkel** $\Delta\varphi$ oder als **örtlicher Versatz** Δz angegeben wird. Einem Phasenverschiebungswinkel $\Delta\varphi = 2\pi$ entspricht der örtliche Versatz $\Delta z = \lambda$. Daraus folgt mit $\lambda = \lambda_0/n$:

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta z} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi n}{\lambda_0}$$

Die den Phasenverschiebungswinkel $\Delta\varphi = 2\pi n \Delta z/\lambda_0$ bestimmende Größe $n \cdot \lambda z$ ist die

Differenz der «optischen Weglängen» $n \cdot z$. Denkt man sich die geometrische Weglänge z aus einzelnen Wellenlängen λ zusammengesetzt, so erhält man ihre Anzahl aus $N = z/\lambda = n \cdot z/\lambda_0$; es gilt demnach $z \cdot n = N \cdot \lambda_0$.

Das Produkt aus geometrischer Weglänge und Brechzahl heißt **optische Weglänge**.

In gleichen optischen Weglängen sind bei gleicher Frequenz gleich viele Wellenlängen enthalten.

Bei der Überlagerung optischer Wellenzüge treten nicht nur Phasenverschiebungen infolge der Wegdifferenzen auf, sondern bei Reflexion an einem Medium mit größerer Brechzahl eine zusätzliche Phasenverschiebung bis zu 180° . Dieser Phasensprung hängt vom Einfallswinkel, von der Einfallsebene und vom Material ab. Bei senkrechtem Auftreffen der Strahlung auf Nichtleiter beträgt der Phasensprung $180^\circ = \pi$; bei Metallen gelten die 180° bei allen Winkeln. In der Praxis treffen die Wellen häufig nahezu senkrecht auf; dieser Fall wird in den folgenden Abschnitten vorausgesetzt. Bezeichnet man die Anzahl von Reflexionen an Medien größerer Brechzahl mit k , so gilt bei senkrechtem Einfall und bei Metallen $\Delta\varphi = 2\pi n \Delta z/\lambda_0 + k\pi$ und nach Multiplikation mit $\lambda_0/(2\pi)$:

$$\frac{\lambda_0}{2\pi} \Delta\varphi = n\Delta z + k \frac{\lambda_0}{2} = \delta \quad (\text{Gl. 1.2.3})$$

Bei schiefem Einfall lässt sich der Phasensprung aus den Fresnel'schen Gleichungen berechnen, Gl. 1.2.3 ist dann entsprechend zu modifizieren.

Der durch Gl. 1.2.3 definierte Gangunterschied δ stellt die effektive optische Wegdifferenz von 2 Wellenzügen unter Berücksichtigung von Phasensprüngen dar und ist die für alle Interferenzerscheinungen maßgebliche Größe. Der allgemeinen optischen Praxis folgend wird, falls keine Verwechslungen möglich sind, in den nachstehenden Abschnitten die Vakuumwellenlänge mit λ anstelle von λ_0 bezeichnet.

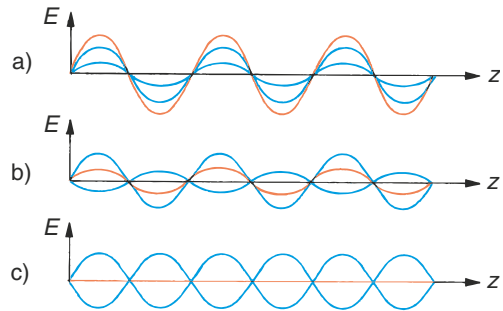


Bild 1.2.5 Konstruktive Interferenz (a) und destruktive Interferenz (b, c).

Praktisch wichtig ist der in Bild 1.2.5 gezeigte Fall der Interferenz von 2 Wellen gleicher Wellenlänge und Schwingungsebene. Sind beide Wellen wie in Bild 1.2.5a (blau markiert) gleichphasig oder beträgt ihr Phasenverschiebungswinkel ein Vielfaches von 2π , also $\Delta\varphi = k \cdot 2\pi$ ($k = 0; 1; 2 \dots$), so steigt die Amplitude der resultierenden rot markierten Welle (**konstruktive Interferenz**). Sind beide Wellen wie in den Bildern 1.2.5b und c gegenphasig, ist also $\Delta\varphi = (2k + 1) \cdot \pi$, so wird die resultierende Amplitude kleiner, bei gleichen Amplituden der interferierenden Wellen sogar 0 (**destruktive Interferenz**). Mit Gl. 1.2.3 ergeben sich die Interferenzkriterien:

Bedingung für Überlagerungsmaxima
(**Konstruktive Interferenz**) $\delta = k \lambda$

Bedingung für Überlagerungsminima

(**Destruktive Interferenz**) $\delta = \frac{\lambda}{2} + k \lambda$

(Gl. 1.2.4)

Um einen definierten Gangunterschied zu realisieren, wird ein Bündel in 2 Komponenten zerlegt und nach Einfügen einer Wegdifferenz wieder vereinigt (Abschnitt 1.2.8). Eine zweite Möglichkeit, die man bei Phasenkontrastgittern einsetzt, ist die Erzeugung des Gangunterschiedes durch Materialien unterschiedlicher Dicke und/oder Brechzahl (Bild 1.2.5a).

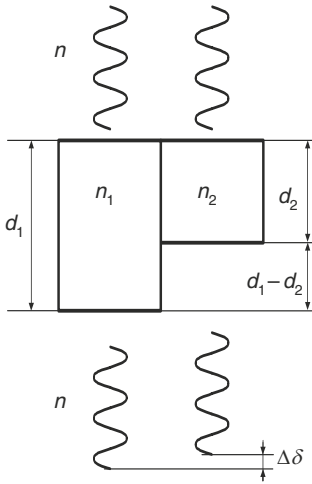


Bild 1.2.5a Phasenkontrast

Beim durchgehenden Licht sind keine Phasensprünge zu berücksichtigen. Daher gilt in einem Medium der Brechzahl n :

$$\Delta\delta = |d_2 \cdot n_2 + (d_1 - d_2) \cdot n - d_1 \cdot n_1| \quad (\text{Gl. 1.2.5})$$

Bei gleich dicken Platten ist $d_2 = d_1 = d$, folglich $\Delta\delta = |d \cdot (n_2 - n_1)|$; falls $n_1 = n_2$ und $n = 1$, unterschiedlich dicke Platten gleichen Materials in Luft, gilt $\Delta\delta = |(d_1 - d_2) \cdot (n_1 - 1)|$.

1.2.4 Beugung

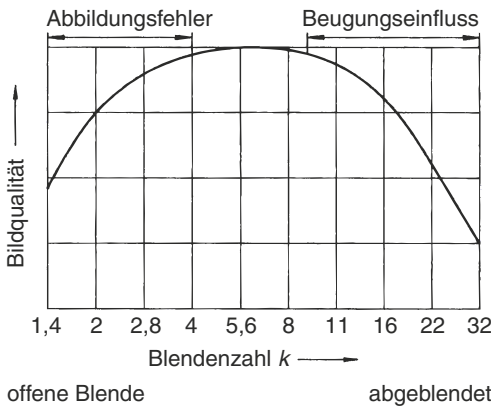


Bild 1.2.6 Abhängigkeit der Bildqualität von der Öffnung eines Objektivs

Bild 1.2.6 zeigt qualitativ die Bildqualität eines Fotoobjektivs als Funktion der Blendenzahl. Da die geometrisch-optischen Abbildungsfehler bei voller Öffnung am größten sind (Abschnitt 2.6), steigt die Qualität zunächst erwartungsgemäß mit dem Abblenden. Von Blende 11 an nimmt sie jedoch wieder ab, obwohl der Einfluss der Abbildungsfehler weiterhin sinkt. Ursache für diesen Qualitätsverlust ist die Beugung, die nach Gl. 1.2.8 mit abnehmendem Durchmesser der beugenden Öffnung ansteigt. Die in der geometrischen Optik zunächst vernachlässigte Beugung spielt also in der Praxis eine wesentliche Rolle.

Ganz allgemein wird der Leistung optischer Geräte durch die Wellennatur des Lichtes, durch Interferenz und Beugung eine unüberwindbare Schranke gesetzt. Andererseits bilden wellenoptische Erscheinungen die Grundlage für das Beugungsgitter, für die Entspiegelung von Linsen und für viele hochgenaue Messmethoden. Die Begriffe Beugung und Interferenz sind eng miteinander verknüpft. Bei der Behandlung wellenoptischer Phänomene wird jedoch oft die eine oder andere Komponente besonders herausgestellt.

Sobald, wie z.B. in Bild 1.2.7, die Abmessung der Hindernisse in die Größenordnung der Wellenlänge kommt, wird die Ausbreitung der Welle stark vom Hindernis beeinflusst.

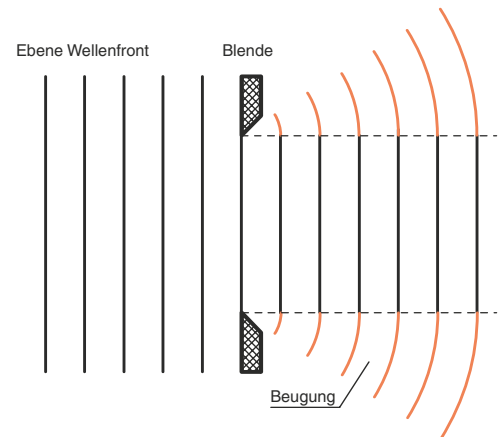


Bild 1.2.7 Ebene Wellenfront an einem Hindernis

Auch hier entstehen innerhalb der Blende Kugelwellen, die im zentralen Bereich wieder eine ebene Wellenfront ergeben. Am Rand der Öffnung haben die Elementarwellen jedoch keine kompensierenden Nachbarn und dringen in den **geometrisch-optischen Schattenraum** ein. Dieser Beugungseffekt ist umso größer, je kleiner der Blendendurchmesser wird. Er ist dafür verantwortlich, dass die Bilder von Kameras bei starkem Abblenden unscharf werden. Durch eine Blende mit dem Durchmesser weniger Wellenlängen wird eine ebene Welle in eine Kugelwelle umgeformt.

Das Eindringen von Wellen in geometrisch-optische Schattenräume, bedingt durch die Interferenz von Elementarwellen bei begrenzten Wellenflächen, bezeichnet man als **Beugung**.

Sind die Abmessungen von Hindernissen sehr viel größer als die Wellenlänge, breitet sich das Licht im homogenen Medium geradlinig aus. Dies ist der Bereich der geometrischen Optik mit umkehrbaren Strahlengängen. Kommen die Abmessungen der Hindernisse dagegen in die Größenordnung der Wellenlänge, so wird das Licht von der ursprünglichen Richtung weggebeugt und tritt in den geometrisch-optischen Schattenraum ein.

Für die Technische Optik sind 2 Fälle von besonderer Bedeutung

- die Beugung am Gitter und
- die Beugung an einer Lochblende.

1.2.4.1 Beugung am Gitter

Optische Gitter sind alle örtlich periodischen Strukturen – meist parallele Linien in konstanten Abständen –, die auf Amplitude (**Amplitudengitter**) oder Phase (**Phasengitter**) der Lichtstrahlung einwirken. Der Abstand von 2 benachbarten gleichartigen Linien ist die **Gitterkonstante** g . Der Kehrwert $R = 1/g$ heißt Ortsfrequenz des Gitters: g wird in mm^{-1} («Linienpaare/mm») angegeben. An den Gitter-

strukturen wird die auftreffende Welle gebeugt. Die an den zahlreichen gleichen Gitterlinien abgelenkten Wellen überlagern sich (Vielstrahlinterferenz) und geben dadurch in bestimmten Richtungen Intensitätsmaxima. Bild 1.2.8 zeigt in vereinfachter Weise am Beispiel eines Amplitudengitters, in welchen Richtungen Beugungsmaxima auftreten.

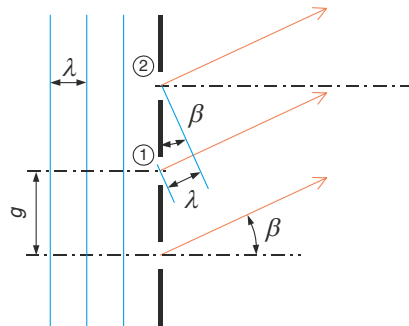


Bild 1.2.8 Beugung am Gitter bei senkrechtem Auftreffen einer ebenen Welle

Fällt eine parallele Wellenfront senkrecht auf die engen Spalte, so bilden sich in den Spaltöffnungen Kugelwellen aus. Ist Welle 1 gerade um eine Wellenlänge weiter gelaufen wenn Welle 2 angeregt wird, so ist der Phasenverschiebungswinkel $\Delta\varphi = 2\pi$, die beiden Wellen überlagern sich konstruktiv. In allen anderen Richtungen ist der Phasenverschiebungswinkel ungleich 2π , so dass in Richtung β maximale Intensität herrscht. Ähnliches gilt für $\Delta\varphi = 4\pi$, allgemein für $\Delta\varphi = m \cdot 2\pi$ mit $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$. Dann gilt allgemein für die Winkel unter denen Intensitätsmaxima auftreten:

$$\sin \beta_{\max} = \frac{m \cdot \lambda}{g} \quad (\text{Gl. 1.2.6})$$

Die Wellen treten jeweils aus der gesamten Gitterfläche aus. Die **Ordnungszahl** m kennzeichnet die **Beugungsordnung**; $m = 0$ steht für die ungebeugte Welle.

In Bild 1.2.9 sind für Transmissions- und Reflexionsgitter zu der jetzt schief unter dem Winkel ε einfallenden Welle (blau) die Richtungen der Beugungsmaxima für $m = 0, \pm 1$ und ± 2 (rot) dargestellt. Für die zugehöri-

gen gegenüber der Gitternormalen gemessenen **Beugungswinkel** β_m gilt die (1.2.6.) entsprechende Gittergleichung

$$\sin \beta_{\max} = \frac{m \cdot \lambda}{g} + \sin \varepsilon \quad (\text{Gl. 1.2.7})$$

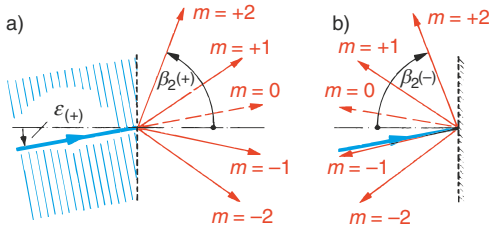


Bild 1.2.9 Beugung am Gitter bei schiefem Auftreffen einer ebenen Welle in Transmission (a) und Reflexion (b)

Beispiel
 Ein HeNe-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) mit aufgeweitetem Parallelbündel strahlt unter $\varepsilon = +10^\circ$ auf ein Gitter mit 600 Linienpaaren/mm. In der 1. und 2. Beugungsordnung erhält man folgende Beugungswinkel (Bild 1.2.9):
Transmissionsgitter:
 $m = +1 \Rightarrow \beta_1 = 33,60^\circ$; $m = +2 \Rightarrow \beta_2 = 68,95^\circ$;
 $m = -1 \Rightarrow \beta_{-1} = -11,90^\circ$; $m = -2 \Rightarrow \beta_{-2} = -35,87^\circ$
Reflexionsgitter:
 gleiche Werte mit umgekehrtem Vorzeichen.

Aus der Gittergleichung folgt die lineare Zunahme von $\sin \beta$ mit λ , (Dispersion): Jede Beugungsordnung außer $m = 0$ enthält ein **Spektrum**, das bei Beleuchtung des Gitters mit einem Weißlicht-Parallelbündel in der Brennebene eines Objektivs aufgefangen werden kann und dessen Breite mit m zunimmt. Die Spektren können sich teilweise überlappen, da es für $\sin \beta$ nur auf das Produkt $m \cdot \lambda$ ankommt. Anstelle der in den Bildern 1.2.8 und 1.2.9 gezeigten Amplitudengitter werden oft Phasengitter (Abschnitt 1.2.3) und geblazte Reflexionsgitter (Abschnitt 7.6.1) eingesetzt, da sie weniger Verluste aufweisen.

1.2.4.2 Beugung an einer Lochblende

In Bild 1.2.10 trifft eine ebene Welle auf eine Lochblende vom Durchmesser d . Das durchtretende Licht wird auf einem Bildschirm aufgefangen, auf dem die Intensität als Funktion der Ortskoordinate y dargestellt ist. Ohne Beugung hätte die Intensität am Bildschirm den rot gezeichneten rechteckigen Verlauf. Bedingt durch die Interferenz der in der Kreisöffnung angeregten Elementarwellen, die Randwellen sind rot und blau markiert, entsteht ein Beugungsbild, das **Beugungs- oder Airy-Scheibchen**. Es besteht aus konzentrischen hellen und dunklen Beugungsringen, deren Durchmesser ansteigt, wenn d kleiner gewählt wird.

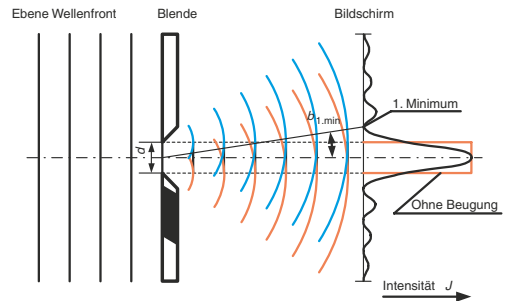


Bild 1.2.10 Beugung an einer Kreisblende

Bei Beugungsfiguren unterscheidet man das **Fernfeld** und das **Nahfeld** (Bild 1.2.11).

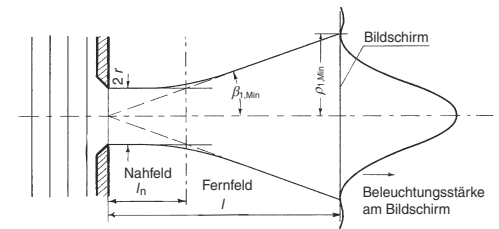


Bild 1.2.11 Trennung von Nah- und Fernfeld

Nach Bild 1.2.11 ist $\tan \beta_{1, \min} = r/l_n$ und nach Gl. 1.2.8 $\sin \beta_{1, \min} = 1,22 \cdot \lambda/(2r)$. Damit wird die Ausdehnung l_n des Nahfeldes für kleine Winkel

$$l_n \approx 1,64 \cdot \frac{r^2}{\lambda}$$

Tabelle 1.2.1 Helligkeitsverteilung im Beugungsscheibchen

	0. Maximum (Mitte)	1. Minimum (1. dunkler Ring)	1. Maximum (1. heller Ring)	2. Minimum (2. dunkler Ring)	2. Maximum (2. heller Ring)
Relative Intensität	100%	0	1,75%	0	0,42%
Leistungsanteile	im zentralen Kreis 83,8%		im 1. Ring 7,2%		im 2. Ring 2,8%

Während die Ermittlung der Strukturen im Nahfeld hohen mathematischen Aufwand erfordert, lässt sich das Fernfeld ähnlich wie die Beugung am Gitter berechnen. Die Auswertung ist in Tabelle 1.2.1 aufgelistet.

Die in Tabelle 1.2.1 angegebene Intensitätsverteilung mit 83,8% der optischen Leistung im zentralen Maximum rechtfertigt es, den Radius des ersten dunklen Rings als **Radius des Beugungsscheibchens** zu definieren. Dieser Radius steigt mit dem Abstand Blende-Bildschirm und dem Winkel $\beta_{1,\min}$. Für diesen Winkel, unter dem das erste Beugungsminimum entworfen wird, gilt:

$$\sin \beta_{1,\min} = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{Gl. 1.2.8})$$

1.2.5 Brechung

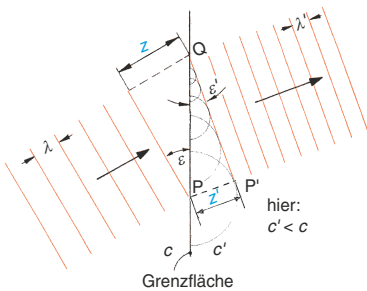


Bild 1.2.12 Brechung an der Grenzfläche zweier Medien

In Bild 1.2.12 trennt eine senkrecht zur Zeichenebene verlaufende **Grenzfläche** 2 Medien mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit c und c' .

Trifft eine Welle unter dem Winkel ϵ auf diese Grenzfläche, so wird ein Teil der Wel-

lenenergie reflektiert; der Rest dringt in das Medium mit c' ein, wobei im allgemeinen **Brechung** erfolgt: die Ausbreitungsrichtung der Welle ändert sich. In Bild 1.2.12 hat ein Stück einer ebenen Wellenfläche die Grenzfläche bei P erreicht. Hier beginnt die Ausbreitung einer Elementarwelle nach rechts mit der Geschwindigkeit c' . Hat nun die Wellenfläche in der Zeit $t = z/c$ die Grenzfläche bei Q erreicht, so hat sich die Elementarwelle wegen $t' = t$ bei P um den Radius $z' = c' \cdot t' = c' \cdot z/c$ ausgebreitet. Aus allen Elementarwellen von P bis Q folgt nach dem Huygens-Prinzip die neue Wellenfläche P'Q. Mit den Winkelfunktionen $\sin \epsilon = z/PQ$ und $\sin \epsilon' = z'/PQ$ ergibt sich das **Brechungsgesetz**

$$\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{z}{z'} = \frac{t \cdot c}{t' \cdot c'} = \frac{c}{c'}$$

Mit Gleichung Gl. 1.2.2, $c = c_0/n$ folgt:

$$\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{n'}{n} \quad \text{oder} \quad n \cdot \sin \epsilon = n' \cdot \sin \epsilon' \quad (\text{Gl. 1.2.9})$$

Die Größe $n \cdot \sin \epsilon$ bleibt beim Übergang in anderes Medium konstant (**Invariante der Brechung**).

Die Größe ϵ wird als **Einfallswinkel**, ϵ' als **Austrittswinkel** oder **Brechungswinkel** bezeichnet. Sie sind als Winkel zwischen Wellenfront und Grenzfläche oder mit gleichem Ergebnis zwischen Ausbreitungsrichtung und Lot zur Grenzfläche (**Einfallslot**) definiert.

! Einfallswinkel ε und Brechungswinkel ε' werden gegenüber dem Einfallslot gemessen.

Bei kleinen Winkeln darf man die Näherung $n \cdot \varepsilon \approx n' \cdot \varepsilon'$ verwenden. Dabei wird der Fehler bei $n = 1$; $n' = 1,5$ und $\varepsilon = 20^\circ$ kleiner 1,2%.

Bei isotropen Medien läuft der gebrochene Strahl in der gleichen Ebene weiter wie der einfallende Strahl. Diese Ebene wird auch als **Einfallsebene** bezeichnet und vom einfallenden und dem Lot auf die Grenzfläche aufgespannt. In anisotropen Medien kann sich die Schwingungsebene des gebrochenen Strahls von der des einfallenden unterscheiden.

1.2.5.1 Übergang in ein «optisch dichteres» Medium $n' > n$

Als «optisch dichteres» Medium wird aus historischen Gründen ein Medium mit höherer Brechzahl bezeichnet. Ist das Medium homogen, so breitet sich eine ebene Lichtwelle geradlinig aus. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der reflektierte Anteil in den Bildern 1.2.13 und 1.2.14 weggelassen. Aus Gl. 1.2.9 folgt:

$$\sin \varepsilon' = \frac{n}{n'} \sin \varepsilon \quad \text{und mit } n' > n \quad \varepsilon' \leq \varepsilon$$

Beim Übergang in ein optisch dichteres Medium sind folgende Fälle möglich:

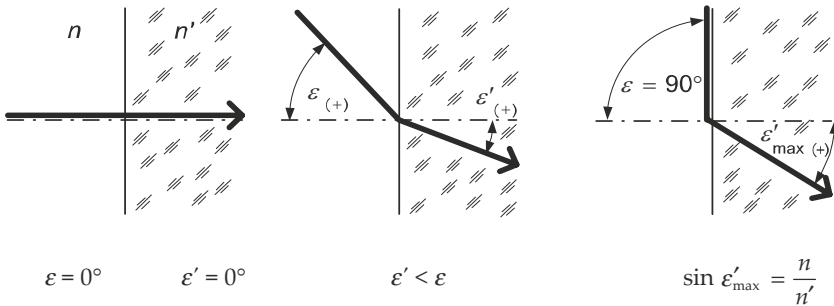


Bild 1.2.13 Übergang einer Lichtwelle in ein optisch dichteres Medium

Ein Brechungswinkel $\varepsilon' > \varepsilon'_{\max}$ ist nicht möglich.

$$\sin \varepsilon' = \frac{n}{n'} \sin \varepsilon \quad \text{und mit } n' < n \quad \varepsilon' \geq \varepsilon$$

1.2.5.2 Übergang in ein «optisch dünneres» Medium $n' < n$

Das «optisch dünnere» Medium ist ein Medium mit geringerer Brechzahl. Wie beim optisch dichteren Medium gilt:

Beim Übergang in ein optisch dünneres Medium sind folgende Fälle möglich:

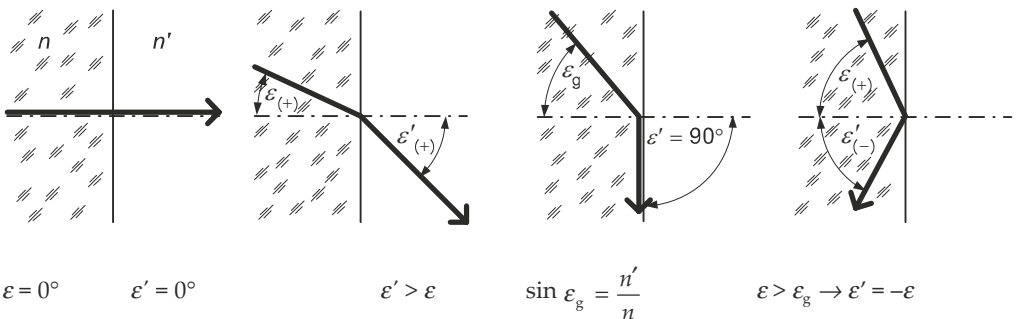


Bild 1.2.14 Übergang einer Lichtwelle in ein optisch dünneres Medium

Geht ein Lichtstrahl vom optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium über, so wird er vom Einfallslot weg gebrochen.

Da ϵ' immer größer ist als ϵ , gibt es einen Winkel ϵ_g , bei dem $\epsilon' = 90^\circ$ wird. Versucht man, das Brechungsgesetz für Winkel $>\epsilon_g$ anzuwenden, so wird der $\arcsin \epsilon' > 1$, was nicht definiert ist. Die Welle kann also nicht ins optisch dünnere Medium gelangen. Da aber im transparenten Material keine Leistung verloren gehen kann, wird die Welle vollständig, also zu 100%, reflektiert. Der Vorgang wird daher **Totalreflexion** genannt und es gilt $\epsilon' = -\epsilon$.

Zur Ermittlung von ϵ_g setzt man $\epsilon' = 90^\circ$ und erhält den **Grenzwinkel der Totalreflexion** aus $n \cdot \sin \epsilon_g = n' \cdot \sin 90^\circ$:

$$\sin \epsilon_g = \frac{n'}{n} \quad \epsilon_g = \arcsin \frac{n'}{n} \quad (\text{Gl. 1.2.10})$$

Beispiel

Für $n = 1,52$ und $n' = 1$ (Glas/Luft) ergibt sich $\epsilon_g = 41,1^\circ$; ein z.B. unter $\epsilon = 45^\circ$ einfallender Strahl wird total reflektiert.

Im Allgemeinen treten an einer Grenzfläche Reflexion und Brechung gemeinsam auf, die einfallende Energie wird abhängig von der Materialpaarung aufgeteilt. Totalreflexion erfordert Lichteinfall vom optisch dichteren Medium her und Überschreiten des Grenzwinkels ϵ_g .

Untersucht man den Vorgang genauer, erhebt sich die Frage, woher das Licht weiß, dass sich jenseits der Grenzfläche ein entsprechend niederbrechendes Material befindet. Tatsächlich dringt das Licht geringfügig ins optisch dünnere Medium ein, klingt dort aber nach einer Exponentialfunktion auf einer Wegstrecke von wenigen Wellenlängen ab. Diese **evaneszente Welle** hat in der optischen Nachrichtenübertragung und der Sensorik große Bedeutung.

1.2.6 Reflexion

Eine Fläche reflektiert entsprechend ihrem Reflexionsgrad (Abschnitt 1.2.6.1) einen Teil der auftretenden Strahlung. Raue Oberflächen reflektieren diffus nach allen Seiten (Bild 1.2.15). Im Idealfall, der von seidenmatten Flächen gut realisiert wird, entspricht die Winkelverteilung der reflektierten Strahlung dem Lambert'schen Kosinusetz (Abschnitt 4.2.3.2).

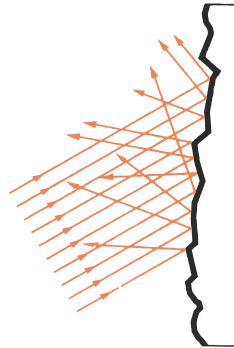


Bild 1.2.15 Diffuse Reflexion

Bei glatten Oberflächen liegen einfallender Strahl, reflektierter Strahl und Einfallslot in einer Ebene. Der Winkel ϵ' , unter dem der Strahl relativ zum Einfallslot zurückgeworfen wird, gehorcht dem Reflexionsgesetz (Bild 1.2.16):

$$\epsilon' = -\epsilon \quad (\text{Gl. 1.2.11})$$

Das Reflexionsgesetz ist unabhängig von der Wellenlänge. Die Winkel werden grundsätzlich relativ zum Lot auf die betrachtete Fläche angegeben.

Hier sieht man wie wichtig die oft ungeliebten Vorzeichenregeln sind. Beim Reflexionsge-

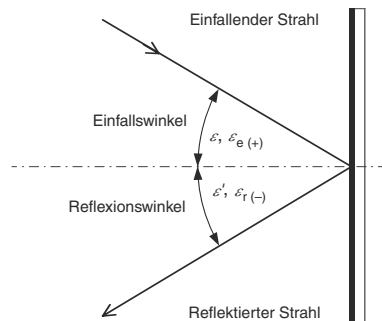


Bild 1.2.16 Reflexion an ebenen Flächen

setz, geschrieben in der klassischen Form $\varepsilon' = \varepsilon$, würde jedes optische Rechenprogramm die Strahlung unverändert weiterschicken. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass optische Designprogramme keinen eigenen Formelsatz für die Reflexion benötigen. Setzt man im Brechungsgesetz $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$ die Beziehung $n' = -n$ ein, so folgt $\sin \varepsilon = -\sin \varepsilon'$, also das Brechungsgesetz $\varepsilon' = -\varepsilon$. Vor und nach der Reflexion läuft die Welle im gleichen Medium, das negative Vorzeichen von n' folgt logisch aus der Umkehr der Strahlenrichtung.

1.2.6.1 Kenngrößen der Reflexion

Die folgenden Kennwerte gelten sowohl für radiometrische, in $W, W/m^2$ usw. angegebene Größen als auch für fotometrische, mit dem Auge bewertete Größen, die in Lumen (lm), lm/m^2 usw. angegeben werden. Hier werden die fotometrischen Größen verwendet.

Die Stärke der Reflexion wird durch den **Reflexionsgrad** ϱ festgelegt.

$$\varrho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} \quad (\text{Gl. 1.2.12})$$

mit:

Φ_r reflektierter Lichtstrom

Φ_0 auftreffender Lichtstrom

Da Lichtströme durch ihre Leistung charakterisiert werden, ist ρ der Leistungsreflexionsgrad; der teilweise angegebene **Amplitudenreflexionsgrad** R ist definiert mit $R = E_r/E_0$.

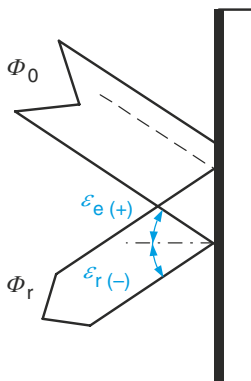


Bild 1.2.17
Reflexion an einer ebenen Fläche

Der Reflexionsgrad hängt vom reflektierenden Werkstoff, von der Wellenlänge, dem Ein-

fallswinkel, dem Polarisationsgrad und bei dünnen Schichten von der Schichtdicke ab.

1.2.6.2 Reflexion an transparenten Medien

Tritt Strahlung von einem Medium mit der Brechzahl n in ein anderes Medium mit der Brechzahl n' über, so wird ein Teil des Lichtstroms gebrochen, ein anderer von Brechzahlunterschied und Polarisation abhängiger Anteil reflektiert. Der Reflexionsgrad wird durch die **Fresnel'schen Gleichungen** angegeben. Linear polarisiertes Licht mit der Schwingungsebene (E -z) parallel zur Einfallsebene (z -Lot auf Trennfläche) wird mit dem Index p, π , oder \parallel charakterisiert, steht die Schwingungsebene senkrecht zur Einfallsebene, lautet der Index s, σ oder \perp . Die Fresnel'schen Formeln Gl. 1.2.13 und Gl. 1.2.14 werden der Übersicht wegen mit den Variablen ε und ε' geschrieben. Man kann, weit komplizierter, auch $\varrho(n, n')$ angeben, da sich ε und ε' mit Hilfe des Brechungsgesetzes Gl. 1.2.9 in n und n' überführen lassen.

$$\varrho_{\parallel} = \left(\frac{\tan(\varepsilon - \varepsilon')}{\tan(\varepsilon + \varepsilon')} \right)^2 \quad (\text{Gl. 1.2.13})$$

$$\varrho_{\perp} = \left(\frac{\sin(\varepsilon - \varepsilon')}{\sin(\varepsilon + \varepsilon')} \right)^2 \quad (\text{Gl. 1.2.14})$$

Bild 1.2.18 zeigt die Reflexionsgrade in beiden Schwingungsebenen für den Fall $n = 1$ und $n' = 2$ als Funktion von ε . Während die Intensität der senkrecht zur Einfallsebene schwingenden Komponente mit steigendem ε sofort größer wird, nimmt der Reflexionsgrad der parallel zur Einfallsebene schwingenden Komponente zunächst ab, wird beim **Brewster-Winkel** ε_p genau 0 und steigt danach steil an. Nach Gl. 1.2.13 wird ε dann 0, wenn $\tan(\varepsilon + \varepsilon') \rightarrow \infty$ geht, wenn also $\varepsilon + \varepsilon' = 90^\circ$ ist. Bei $\varepsilon = \varepsilon_p$ stehen der reflektierte und der gebrochene Strahl senkrecht aufeinander. Aus dem Brechungsgesetz $n \cdot \sin \varepsilon = n' \cdot \sin \varepsilon'$ folgt für $\varepsilon'_p = 90^\circ - \varepsilon_p$ die Beziehung $\sin \varepsilon / \sin \varepsilon' = \sin \varepsilon_p / \sin(90^\circ - \varepsilon_p) = \sin \varepsilon_p / \cos \varepsilon_p = \tan \varepsilon_p$ und somit das Brewster'sche Gesetz:

$$\tan \varepsilon_p = \frac{n'}{n} \quad (\text{Gl. 1.2.15})$$

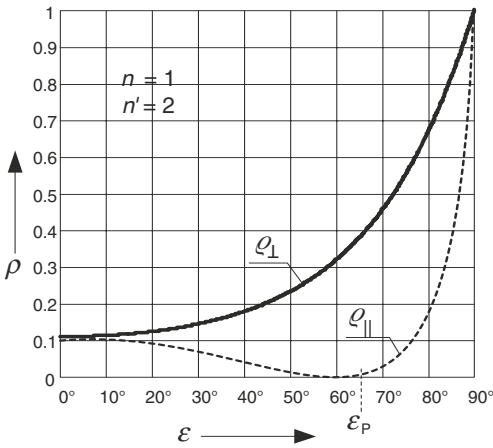


Bild 1.2.18 Reflexionsgrad als Funktion des Einfallswinkels bei linear polarisiertem Licht

Beim Übergang in ein optisch dünneres Medium läuft ϵ nur bis zum Grenzwinkel der Totalreflexion.

Der Reflexionsgrad von unpolarisiertem Licht, bei dem alle Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung gleich häufig vorkommen, beträgt:

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\epsilon - \epsilon')}{\sin^2(\epsilon + \epsilon')} + \frac{\tan^2(\epsilon - \epsilon')}{\tan^2(\epsilon + \epsilon')} \right) \quad (\text{Gl. 1.2.16})$$

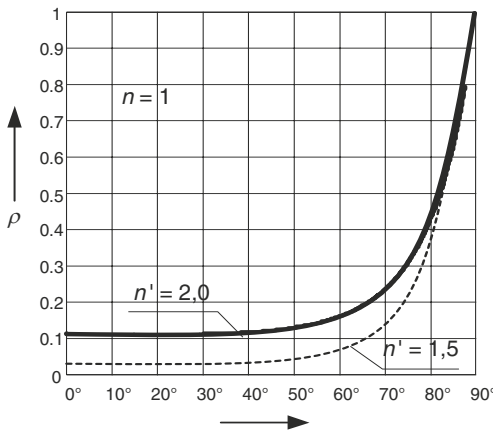


Bild 1.2.19 Reflexionsgrad als Funktion des Einfallswinkels bei unpolarisiertem Licht

Wie man aus Bild 1.2.19 sieht, ist der Reflexionsgrad bis zu ca. 30° weitgehend unabhängig vom Einfallswinkel. Setzt man in Gl. 1.2.16 die für kleine Winkel erlaubte Näherung $\sin \epsilon \approx \epsilon$ und $\tan \epsilon \approx \epsilon$ sowie $n \cdot \epsilon \approx n' \cdot \epsilon'$ ein, so folgt die Näherung:

$$\rho \approx \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 \quad (\text{Gl. 1.2.17})$$

Für die meisten Anwendungen ist der für kleine Einfallswinkel berechnete Reflexionsgrad ausreichend genau. Bei $n = 1$, $n' = 1,5$ und $\epsilon = 20^\circ$ beträgt die Abweichung gegenüber dem senkrechten Einfall nur 0,7%. Ohne Kenntnis der Glasbrechzahl kann man bei Glas-Luft-Flächen im Mittel mit einem Reflexionsgrad von 4...6% rechnen.

1.2.6.3 Folge von Grenzflächen

Bei einer Folge von Grenzflächen wird Licht an jeder Grenzfläche reflektiert. Auch das reflektierte Licht wird wieder zurückgeworfen (rote Pfeile in Bild 1.2.20) und man spricht von Mehrfachreflexion. Betrachtet man k gleiche Übergänge, so kann man den Lichtverlust ohne Mehrfachreflexion wie folgt bestimmen:

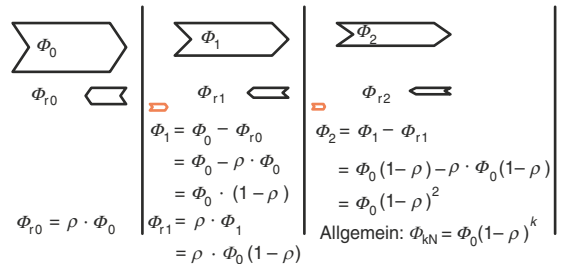


Bild 1.2.20 Reflexion an k -gleichen Flächen: Rote Pfeile deuten Mehrfachreflexion an

Vom auftretenden Lichtstrom Φ_0 tritt nach k gleichen Brechzahlübergängen der Nutzlichtanteil Φ_{kN} aus dem optischen System aus.