

HANSER



Leseprobe

zu

Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften

von Ekbert Hering und Rolf Martin (Hrsg.)

Print-ISBN: 978-3-446-47683-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47750-6

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446476837>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Die Optik erklärt die physikalischen Eigenschaften des Lichtes und wie diese technologisch genutzt werden können. Die optischen Technologien sind zum einen **Schlüsseltechnologien**, weil sie die Grundlage von sehr vielen technischen Anwendungen sind, und zum anderen **Querschnittstechnologien**, weil sie in vielen anderen Technologien Verwendung finden. Die Optik ist aus diesen Gründen einer der ganz wichtigen, weltweit wirksamen **Innovations-** und **Erfolgstreiber**.

Das vorliegende Werk hat zwei Teile. Der **erste Teil** erklärt in den ersten sieben Kapiteln die **physikalischen Grundlagen** des Werkes, mit denen der Leser den **zweiten Teil**, die **Anwendungsbereiche** in den Kapiteln 8 bis 14, besser verstehen kann.

Der **Grundlagenteil** des Werkes hat folgende Kapitel: Nach einer **Einleitung** im ersten Kapitel werden im zweiten Kapitel die Grundlagen der **geometrischen Optik** dargestellt. Dieses Kapitel befasst sich im Wesentlichen mit der Natur des Lichtes, mit der Reflexion und Brechung von Lichtstrahlen, der Abbildung durch Linsen und Spiegel, der Berechnungsmethoden von optischen Systemen, den Abbildungsfehlern und den Grundlagen der optischen Instrumente. Das dritte Kapitel ist der **Radio-** und **Fotometrie** gewidmet. Dort werden die strahlungsphysikalischen und lichttechnischen Größen sowie die Farbmetrik behandelt. Im vierten Kapitel wird die **Wellenoptik** vermittelt. Dazu werden die elektromagnetischen Wellen vorgestellt, die Polarisation, Interferenz und Beugung besprochen sowie die Eigenschaften der Gauß'schen Strahlen erläutert. Das fünfte Kapitel widmet sich der **Quantenoptik**, d.h. den Lichtquanten (Photonen), dem Welle-Teilchen-Dualismus, der Absorption und Emission von Licht und den Grundlagen des Laser-Prinzips. Die **Optoelektronik** im sechsten Kapitel behandelt die Halbleiterbauelemente, die in der optischen Nachrichtentechnik eingesetzt werden, wie LEDs, Halbleiterlaser und die verschiedenen Spielformen der Fotodioden. Das siebte Kapitel zeigt die Eigenschaften der **Lichtwellenleiter** auf.

Im **Anwendungsteil** des Werkes werden die **wichtigsten technischen Anwendungen** der Optik behandelt. Das Kapitel 8 ist der **Beleuchtungstechnik** gewidmet. Dieses oft vernachlässigte Kapitel behandelt ausführlich die optischen Systeme zur Beleuchtung in Innen- und Außenräumen sowie die Methoden zur

Simulation und Berechnung von Beleuchtungssystemen. In einem besonderen Abschnitt sind die Effekte der Lichtverschmutzung und der biologischen Wirkung von Licht auf den Menschen beschrieben. Ganz wichtige Anwendungsbereiche sind die **Lasieranwendungen** in Kapitel 9. Neben dem Einsatz der Laser im Maschinen- und Apparatebau und der Materialbearbeitung werden die Lasereinsätze in der Kommunikationstechnik, der Biologie und Medizin sowie in Konsumgütern und der Unterhaltung vorgestellt. Kapitel 10 ist den **optischen Sensoren** und der **Messtechnik** gewidmet und Kapitel 11 der **optischen Gerätetechnik** wie Kameras, fernoptische und astronomische Geräte, Mikroskope und Optometrie. Besonderes Gewicht wurde auf die Spektralapparate und Spektrofotometer gelegt, weil diese Anwendungen in der engen Verzahnung von Theorie und Praxis in der Literatur kaum behandelt werden. Kapitel 12 behandelt die **bildgebenden Verfahren**, die vor allem in den Materialwissenschaften, der Biologie und Medizin eine wichtige Rolle spielen. In Kapitel 13 werden die Verfahren des **optischen Designs** und der **optischen Simulation** vorgestellt, mit denen komplexe optische Systeme geplant und entworfen werden können. Den **optischen Phänomenen** widmet sich Kapitel 14. Hier werden die faszinierenden Bereiche der optischen Täuschungen systematisch vorgestellt und Erklärungen versucht. In Kapitel 15 sind die wichtigsten **Normen der Optik** zusammengestellt.

Das vorliegende Buch ist als Kompendium und Nachschlagewerk für Studierende und Praktiker geschrieben. Viele Ingenieure und Naturwissenschaftler begegnen im Laufe Ihrer Karriere optischen Fragestellungen. Diese befriedigend zu beantworten und die optischen Technologien nutzbringend und erfolgreich einzusetzen, ist ebenfalls ein Ziel dieses Werkes. Seine Übersichtlichkeit und seine klaren Strukturen helfen dem Leser dabei.

Für die sachkundige und konstruktive Mitarbeit möchten wir uns bei allen Autoren herzlich bedanken. Ohne die Expertise von nahezu 20 Persönlichkeiten aus der Praxis wäre dieses Werk in seiner Praxisnähe unmöglich gewesen. Diese Autoren haben ihre Freizeit geopfert und viel Zeit investiert, um ihre Leser von den Gebieten zu begeistern, denen sie in ihrer täglichen Praxis begegnen. Möge ein Teil dieser Begeisterung der Autoren auch auf die Leser überspringen und sie motivieren, sich von der Faszination des Lichtes anstecken zu lassen, um auf diesem Gebiet innovativ und erfolgreich wirken zu können. Unser Dank gilt aber auch den Mitarbeitern des Fachbuchverlages Leipzig im Carl Hanser Verlag. Besonderen Dank schulden wir Frau Ute Eckardt und Herrn Philipp Thorwirth vom Lektorat sowie Frau Katrin Wulst, die viele unserer Bilder auf ihre drucktechnische Realisierung prüfte und entsprechend anpasste. Sie haben das Werk in allen Phasen der Entstehung motivierend, freundlich und kompetent begleitet. Ganz besonders bedanken möchten wir uns bei unseren Ehefrauen, die wieder einmal unsere Leidenschaft, gute Bücher zu schreiben, unterstützt haben, uns die nötige Zeit einräumen und auf uns oftmals verzichten mussten.

Allen Leserinnen und Lesern wünschen wir, dass sie mit dem Wissen und den Informationen dieses Taschenbuches ihre Aufgaben schnell, effizient und erfolgreich lösen können. Mögen sie aber auch von der Faszination der Optik inspiriert werden, auf diesem Gebiet innovative und Nutzen stiftende Anwendungen zu entwickeln. Für Hinweise und Verbesserungen sind wir stets dankbar.

Aalen und Köngen, im Februar 2017

EKBERT HERING

ROLF MARTIN

■ Vorwort zur zweiten Auflage

Die erste Auflage des Werkes „Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler“ hat im Markt eine hervorragende Resonanz gefunden. Von der Leserschaft, bestehend aus Studierenden und mit optischen Fragestellungen in der Praxis befassten Personen, erhielten wir große Anerkennung. Deshalb haben wir auch die Gliederung des Werkes beibehalten. Die Rückmeldungen unserer Leserschaft haben wesentliche Verbesserungen und Aktualisierungen bewirkt. Dafür möchten wir uns sehr herzlich bedanken. Wichtig war uns eine bessere Vernetzung der Grundlagen- mit den Anwendungskapiteln. Dies konnten wir durch vermehrte Querverweise in den Kapiteln sicherstellen. Sie stellen einen großen Mehrwert für die Leserinnen und Leser dar.

Einer der wichtigsten Neuerungen ist die Einführung von farbigen Darstellungen. Das Werk wurde deshalb optisch stark aufgewertet sowie pädagogisch und didaktisch einprägsamer gestaltet. Es wird Freude bereiten, das Werk zu studieren und die Strahlkraft und die Faszination des Lichtes zu spüren.

Für die ersten sieben Grundlagenkapitel hat *Rolf Martin* ein Übungsbuch mit dem Titel „Optik in Ingenieur- und Naturwissenschaften – Aufgaben und Lösungen“ entwickelt. Dort sind zu jedem Kapitel passende Aufgaben mit ausführlichen Lösungen mit Bezügen zum vorliegenden Buch zu finden. Sie ermöglichen ein tieferes Verständnis der optischen Grundlagen.

Unser Dank gilt den vielen Optik-Experten aus der Praxis, die für diese Auflage ihre Texte und Bilder aktualisiert und verbessert haben. Danken möchten wir aber auch der Geschäftsleitung des Hanser-Verlages, die uns die Einführung der Farbgebung in der Druckausgabe ermöglicht. Besonderen Dank schulden wir unserer Lektorin Natalia Silakova, die uns bei der farblichen Umsetzung und Neugestaltung der Texte stets kompetent unterstützt hat.

Wir wünschen allen Leserinnen und Lesern ein motivierendes Studium dieses Werkes, um ihre Aufgaben erfolgreich zum Wohle der Gesellschaft lösen sowie

weitere innovative Anwendungen entwickeln zu können. Gerne nehmen wir Hinweise auf neue Anwendungsgebiete sowie Vorschläge zu Verbesserung unserer Ausführungen entgegen.

Heubach und Köngen, im August 2023

EKBERT HERING

ROLF MARTIN

Inhalt

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Geometrische Optik	2
2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung	2
2.2 Fermat'sches Prinzip	3
2.3 Reflexion von Lichtstrahlen	4
2.3.1 Reflexion an ebenen Flächen	4
2.3.2 Reflexion an gekrümmten Flächen	6
2.4 Brechung des Lichts	10
2.4.1 Brechungsgesetz	10
2.4.2 Dispersion	12
2.4.3 Totalreflexion	15
2.4.4 Prismen	18
2.5 Brechung an gekrümmten Flächen	20
2.5.1 Asphärische Flächen	20
2.5.2 Kugelflächen	22
2.5.2.1 Vorzeichenkonvention in der technischen Optik	22
2.5.2.2 Brechung an einer Kugelfläche	23
2.6 Abbildung durch Linsen	26
2.6.1 Dünne Linsen	26
2.6.2 Dicke Linsen	36
2.6.3 Fresnel-Linsen	42
2.6.4 GRIN-Linsen	44

2.6.5	Linsen mit torischen Flächen	47
2.6.6	Linsensysteme	49
2.7	Matrixmethoden der Gauß'schen Optik	53
2.7.1	Matrizen zur Beschreibung der Strahlausbreitung	54
2.7.2	Matrizen für Linsen	57
2.7.3	Eigenschaften der Systemmatrix	61
2.7.4	Lage der Kardinalpunkte eines optischen Systems	64
2.7.5	Lage der Referenzebenen	70
2.8	Strahlbegrenzungen	71
2.8.1	Blenden und Pupillen	71
2.8.2	Kenngrößen der Strahlenbegrenzung	75
2.8.3	Feldblenden und Luken	76
2.8.4	Feldlinsen und Kondensoren	80
2.9	Abbildungsfehler	82
2.9.1	Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)	83
2.9.2	Koma (Asymmetriefehler)	89
2.9.3	Astigmatismus und Bildfeldwölbung	91
2.9.4	Verzeichnung	93
2.9.5	Chromatische Aberration (Farbfehler)	95
2.10	Optische Instrumente	98
2.10.1	Optik des menschlichen Auges	98
2.10.2	Lupen und Okulare	104
2.10.3	Mikroskope	110
2.10.4	Fernrohre	121
2.10.5	Fotoapparat	130
3	Radio- und Fotometrie	138
3.1	Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie	138
3.1.1	Grundlagen, Definitionen	138
3.1.2	Strahlungsfelder einfacher Geometrien	148
3.2	Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen und kegelförmig abstrahlenden Lichtquellen in optisch-analytischen Geräten	153
3.2.1	Abstrahl-Charakteristik verschiedener Lichtquellen	153

3.2.2	Technische Ausführung von Lampen für optisch-analytische Messgeräte	155
3.2.3	Ulbricht'sche Integrationskugel	159
3.3	Lichttechnische Größen, Fotometrie	162
3.4	Farbmetrik	167
4	Wellenoptik	180
4.1	Elektromagnetische Wellen	180
4.2	Polarisation des Lichts	185
4.2.1	Polarisationsformen	185
4.2.2	Mathematische Beschreibung des Polarisationszustands	187
4.2.3	Polarisationsoptische Komponenten	191
4.2.4	Optische Aktivität	201
4.2.5	Elektro- und magnetooptische Effekte	204
4.2.6	Anwendungen der Doppelbrechung	211
4.3	Lichtwellen an Grenzflächen	217
4.3.1	Fresnel'sche Gleichungen	217
4.3.2	Übergang vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium	221
4.3.3	Übergang vom optisch dichten ins optisch dünne Medium	223
4.3.4	Wellen in absorbierenden Medien	231
4.4	Interferenz	240
4.4.1	Zweistrahl-Interferenz	240
4.4.2	Kohärenz	243
4.4.3	Gruppengeschwindigkeit	248
4.4.4	Interferenz einander schräg durchdringender Wellen	252
4.4.5	Stehende Wellen	253
4.4.6	Interferenzen an dielektrischen Schichten	256
4.4.7	Interferenzen an dielektrischen Vielfachschichten	264
4.4.8	Interferometer	271
4.4.9	Vielstrahlinterferenzen	274
4.5	Beugung	281
4.5.1	Huygens-Fresnel'sches Prinzip	281
4.5.2	Beugung am Spalt und an der Lochblende	283

4.5.3	Auflösungsvermögen beugungsbegrenzter Instrumente	287
4.5.4	Beugung am Gitter	293
4.6	Gauß'sche Strahlen	305
4.6.1	Feldverteilung im Gauß-Strahl	305
4.6.2	Laser-Resonatoren	309
4.6.3	Durchgang Gauß'scher Strahlen durch optische Komponenten . .	311
4.7	Holografie	316
4.7.1	Aufnahme eines Hologramms und Rekonstruktion des Bildes . .	317
4.7.2	Technische Anwendungen der Holografie	325
5	Quantenoptik	329
5.1	Lichtquanten	329
5.2	Welle-Teilchen-Dualismus	334
5.3	Absorption und Emission von Licht	336
5.4	Laser	341
5.4.1	Laserprinzip	341
5.4.2	Lasertypen	347
6	Optoelektronik	351
6.1	Halbleiter-Sender	352
6.1.1	Strahlungsemission aus Halbleitern	352
6.1.2	Lumineszenzdioden (LEDs)	354
6.1.3	Laserdioden (Injektionslaser)	362
6.2	Halbleiter-Detektoren	377
6.2.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern	377
6.2.2	Gütekriterien von Detektoren	379
6.2.3	Fotowiderstand	381
6.2.4	Fotodiode	383
7	Führung von Licht in Lichtwellenleitern	392
7.1	Einleitung	392
7.2	Schichtwellenleiter	393
7.2.1	Strahlenbild	393
7.2.2	Wellenbild	396

7.3	Wellen in zylindrischen Fasern	398
7.3.1	Stufenindex-Faser	398
7.3.2	Einmodenfaser	405
7.3.3	Gradientenfaser	408
7.4	Dämpfung in Lichtwellenleitern	411
7.5	Dispersion im Lichtwellenleiter	416
7.5.1	Modendispersion	417
7.5.2	Chromatische Dispersion	422
7.6	Lichtleiter in praktischen Anwendungen	426
8	Beleuchtungstechnik	434
8.1	Einleitung	434
8.2	Lichttechnische Größen	435
8.3	Lichtquellen	439
8.3.1	Lampen	439
8.3.2	Leuchten	440
8.4	Optische Systeme zur Beleuchtung	441
8.4.1	Beleuchtung im Innenraum	441
8.4.2	Beleuchtung im Außenraum	447
8.4.3	Signalisation	453
8.4.4	Informationsträger	462
8.5	Simulation und Berechnungsprogramme	464
8.5.1	DIALux	464
8.5.2	ReluxSuite	466
8.5.3	Weitere Simulationssoftware für den Innenbereich	466
8.6	Spezielle Kapitel der Beleuchtungstechnik	467
8.6.1	Wirkung des Lichts auf den Menschen	467
8.6.2	Lichtverschmutzung	468
9	Lasieranwendungen	472
9.1	Laser in der Materialbearbeitung	473
9.1.1	Laserstrahlquellen	473
9.1.1.1	Festkörperlaser	473

9.1.1.2	Halbleiterlaser (Diodenlaser)	478
9.1.1.3	Gaslaser	479
9.1.2	Strahlqualität	482
9.1.3	Wechselwirkung Strahlung mit Materie	484
9.1.3.1	Energieströme und Wirkungsgrade	484
9.1.3.2	Einwirkdauer und Leistungsdichte	485
9.1.4	Laser-Materialbearbeitung	486
9.1.4.1	Aufwärmen zum Bearbeiten von Oberflächen	487
9.1.4.2	Schmelzen zur Behandlung von Oberflächen	488
9.1.4.3	Schmelzen zum Aufbauen und Laserformen (Urformen)	489
9.1.4.4	Wärmeleitschweißen (Schmelzen zum Fügen)	490
9.1.4.5	Tiefschweißen (Verdampfen zum Fügen)	491
9.1.4.6	Laserschneiden	491
9.1.4.7	Laserbohren	493
9.1.4.8	Lasermikrobearbeitung (Verdampfen zum Reinigen, Strukturieren und Abtragen)	494
9.2	Laser in der Kommunikationstechnik	495
9.2.1	Funktionsweise	495
9.2.2	Vor- und Nachteile	496
9.2.3	Anwendungen	497
9.3	Lasieranwendungen in Medizin und Biologie	500
9.3.1	Wechselwirkungen von Laserstrahlung mit Zellen und Gewebe	500
9.3.2	Lasieranwendungen in Diagnose und Therapie	502
9.3.3	Mikroskopische Lasieranwendungen	505
9.4	Laser bei den Konsumgütern	508
9.4.1	Laserdrucker und Laserkopierer	508
9.4.2	Laserscanner	511
9.4.3	Laserprojektor	512
9.5	Laser in der Unterhaltung	513
9.5.1	Technischer Aufbau	513
9.5.2	Projektion	515
9.5.3	Laservideo	517

9.5.4	Räumliche Strahleneffekte	517
9.5.5	Strahlensicherheit beim Audience Scanning	519
10	Optische Sensoren und Messtechnik	521
10.1	Eigenschaften optischer Sensoren	521
10.2	Optische Detektoren	522
10.2.1	Arbeit und Leistung von Lichtsignalen	522
10.2.2	Basis-Parameter von Detektoren	523
10.2.3	Fotoröhren, Fotomultiplier (PMT) und Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (SEV oder SEM)	525
10.2.4	Mikrokanalplatte (MCP: Micro Channelplate)	527
10.2.5	Festkörperdetektoren	529
10.2.6	Planck'sche Strahlung, Hintergrundstrahlung	530
10.2.7	Flächendetektoren (Array, CCD und CMOS)	532
10.2.8	Arrays und NIR-Flächendetektoren	540
10.2.9	CCD mit Bildverstärkung	541
10.2.10	CMOS-Sensoren, Active Pixel Sensoren (APS)	542
10.3	Methoden der optischen Messtechnik	544
10.3.1	Schattenprojektion	544
10.3.2	Lasertriangulation	547
10.3.3	Streifenprojektion	551
10.3.4	Fotogrammetrie	553
10.3.5	Deflektometrie	559
10.3.6	Konfokale Sensorik	563
10.3.7	Lasertracking	566
10.3.8	Individualisierte optische Messtechnik	570
10.4	Messung physikalischer Größen	572
10.4.1	Geometrische Größen	572
10.4.1.1	Abstands- und Wegsensoren	572
10.4.1.2	Winkel und Drehbewegung	584
10.4.1.3	3D-Messtechnik	585
10.4.2	Objekterfassung	592
10.4.2.1	Lichtschranke, Lichttaster	592

10.4.2.2	Laserscanner	611
10.4.2.3	Optische Identifikation	615
10.4.3	Temperaturmessung	620
10.4.4	Fotometrie	622
10.4.5	Feuchtemessung	637
10.4.5.1	Messungen im Infrarotbereich (IR)	638
10.4.5.2	Messung im nahen Infrarotbereich (NIR)	639
10.4.5.3	Messung im ultravioletten Bereich (UV-Licht)	641
10.4.5.4	Messung mit Lichtwellenleitern	641
10.4.5.5	Diodenlaserspektrometer (TDL)	643
10.4.5.6	Messung von Wassertröpfchen (Flüssigphase)	644
10.5	Anwendungsgebiete in der Medizin und Biologie	645
10.5.1	Überblick der Nachweismethoden	645
10.5.2	Oberflächenplasmonen-Resonanz (SPR)	645
10.5.3	Interne Totalreflexionsfluoreszenz (TIRF)	647
10.5.4	Lumineszenzverfahren	648
10.5.5	Colorimetrie/Fotometrie	651
10.6	Optische Sensoren in der Chemie	653
10.6.1	Einleitung	653
10.6.2	Komponenten des optischen Sensors	656
10.6.3	Detektionsprinzipien	658
10.6.4	Ausgewählte Anwendungen	660
11	Optische Gerätetechnik	662
11.1	Einleitung	662
11.2	Fotokameras	663
11.2.1	Analoge Fotokamera	663
11.2.2	Digitale Fotokamera	666
11.2.3	Kamerachips	666
11.2.4	Bauformen digitaler Kameras	668
11.2.5	Besondere Anforderungen an digitale Kameras	673
11.2.6	Zusammenfassung	675
11.3	Fernoptische Geräte	676

11.4	Mikroskopie	684
11.4.1	Klassische Lichtmikroskopie	685
11.4.2	Verfahren zur Reduktion des Hintergrunds	687
11.4.3	Super Resolution Microscopy	690
11.5	Digitale Visualisierung	695
11.5.1	Displaytechnologien	695
11.5.2	Übersicht	695
11.5.3	Funktionsprinzip von LCD, OLED und E-Paper	697
11.5.4	Pixelansteuerung und elektro-optische Kurve	698
11.5.5	Zusammenfassung	700
11.5.6	Displays in optischen Geräten	700
11.5.7	Digitale Projektoren (Beamer)	700
11.5.8	Augmented Reality und Virtual Reality	701
11.5.9	Stereosysteme	704
11.5.10	Zusammenfassung	706
11.6	Optische Messgeräte	706
11.6.1	Interferometer	707
11.6.2	Shack-Hartmann-Sensoren	714
11.6.3	Autokollimatoren	715
11.6.4	Brechzahlmessung	717
11.7	Spektralapparate	718
11.7.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	718
11.7.2	Beugungsgitter	720
11.7.3	Dispersionsprismen	724
11.7.4	Filter	726
11.7.5	Polarisation	726
11.7.6	Spektrometer	728
11.7.7	Doppelspektrometer	735
11.7.8	Spektrometer für den tiefen UV- und Vakuum-UV-Bereich	736
11.7.9	Kompakte Spektrometer mit Lichtleiterkopplung	738
11.7.10	Spezielle Anforderungen der Lichtleiterkopplung	740
11.7.11	Transmissions-Spektrometer	741
11.7.12	Prismenspektrometer	741

11.7.13	Echellespektrometer	742
11.7.14	Hyperspektrale Spektrometer (Hyperspectral Imaging Spectroscopy)	742
11.7.15	Allgemeine Funktionen	743
11.8	Spektralfotometer	749
11.8.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	749
11.8.2	Absorptions- und Reflexions-Spektralfotometer	750
11.8.3	Lumineszenz-Spektroskopie: Fluoreszenz und Phosphoreszenz	755
11.8.4	Messmethoden für dynamische Lumineszenz – LifetimeMessung	759
11.8.5	Raman- und Brillouin-Spektralfotometrie	766
11.8.6	Spektrale Radiometrie	773
11.9	Optometrie	777
11.9.1	Geräte beim Augenoptiker	777
11.9.2	Geräte für die Augenheilkunde	783
11.10	Astronomische Teleskope	787
11.10.1	Einleitung	787
11.10.2	Bauformen	788
11.10.3	Amateurastronomie	789
11.10.4	Terrestrische Astronomie	791
11.10.5	Weltraumteleskope	793
12	Bildgebende Verfahren	798
12.1	Definition und Übersicht	798
12.2	Messprinzipien	800
12.3	Optische Verfahren	804
12.4	Abbildungskette und ihre Komponenten	806
12.5	Lichtquellen und Beleuchtung	807
12.6	Bildwiedergabe (Empfänger)	810
12.7	Optische Systeme nach Auflösung und Vergrößerung der optischen Abbildung	813
12.8	Objekttreue	818
12.9	Komplexität bildgebender Verfahren	821
12.10	Komplexität optischer Systeme	824

12.11	Rechenaufwand	825
12.12	Beispiele einiger bildgebender Verfahren	826
12.12.1	Computertomografie (CT) zur Werkstoffprüfung	826
12.12.2	Akustisches Mikroskop zur Untersuchung elektronischer Bauteile	828
13	Optikdesign und Simulation	830
13.1	Optikdesign	831
13.1.1	Einleitung	831
13.1.2	Apertur und Feld, Eintritts- und Austrittspupille	831
13.1.3	Bildfehler dritter Ordnung	836
13.1.4	Bewertung optischer Systeme	838
13.1.5	Optikdesign-Prozess	847
13.1.6	Optikdesign	850
13.1.7	Optimierung	866
13.1.8	Tolerierung	872
13.1.9	Spezielle Komponenten im Optik-Design	874
13.2	Optiksimulation	891
13.2.1	Einleitung	891
13.2.2	Streulichtsimulationen	892
13.2.3	Digitalisierung	900
13.2.4	Simulation äußerer Einflüsse	905
13.2.5	Wellenoptische Simulationen	907
14	Optische Phänomene	911
14.1	Definition und Erklärungsversuche	911
14.2	Geometrische Täuschungen	913
14.2.1	Längentäuschung	913
14.2.2	Krümmungstäuschung	914
14.2.3	Richtungstäuschung	914
14.2.4	Größentäuschung	915
14.3	Räumliche Täuschungen	915
14.3.1	Ambiguität	915
14.3.2	Perspektiventäuschung	918

14.4	Helligkeits- und Kontrasttäuschungen	920
14.5	Bewegungstäuschungen	921
14.6	Farbtäuschungen	922
14.7	Unmögliche Figuren, Objekte und Bilder	922
14.8	Ames-Raum	924
15	Optiknormen	927
Index	931

1

Einleitung

Die Optik befasst sich mit der Entstehung, Ausbreitung und Absorption von Licht. Das Wesen des Lichts hat bereits verschiedene Deutungen erfahren. Insbesondere die Phänomene der Interferenz und Beugung führten zur Wellentheorie des Lichts (C. HUYGENS, T. YOUNG, A. FRESNEL). Die Experimente von MALUS zur Polarisation zeigten, dass es sich um eine Transversalwelle handeln muss. Schließlich erkannte J.C. MAXWELL, dass Licht eine elektromagnetische Transversalwelle ist. Experimente im Zusammenhang mit der Absorption und Emission von Licht führten EINSTEIN zur Lichtquantenhypothese. Danach findet der Energieaustausch zwischen einem Strahlungsfeld und Materie in ganzen Quanten statt. Der Dualismus Teilchen/Welle wurde schließlich im Rahmen der Quantenelektrodynamik zu einer einheitlichen Theorie zusammengeführt (Abschnitt 5.2).

Bild 1.1 zeigt die in der Optik relevanten Wellenlängenbereiche. Das sichtbare Licht (VIS, visible spectrum) erstreckt sich von 380 nm bis 780 nm. Die zugehörigen Frequenzen betragen einige Hundert Terahertz. Die benachbarten Spektralgebiete sind die ultraviolette Strahlung (UV, 100 nm bis 380 nm) sowie die infrarote Strahlung (IR, 780 nm bis 1 mm). Insbesondere das nahe Infrarot ist von großer Bedeutung für die Optoelektronik.

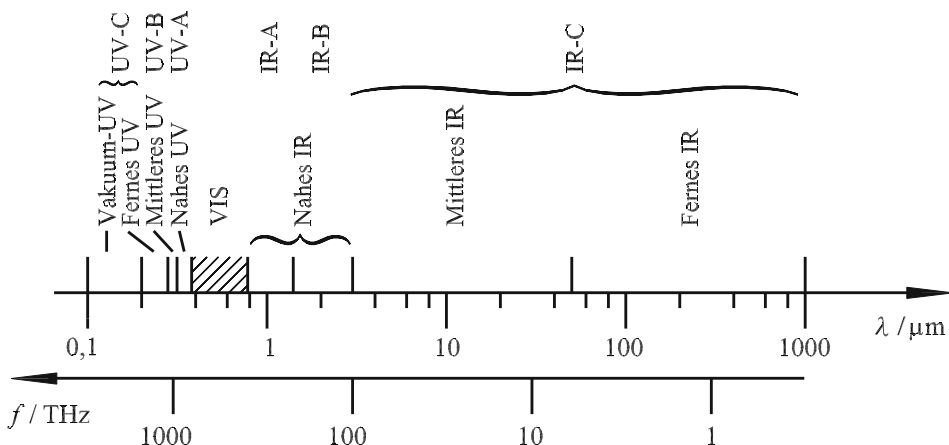


Bild 1.1 Wellenlängenbereiche und Frequenzen optischer Strahlung nach DIN 5031-7

2

Geometrische Optik

Wenn Beugungseffekte keine Rolle spielen – das ist der Fall, wenn die Objekte groß sind gegenüber der Wellenlänge –, dann kann die Ausbreitung des Lichts durch Strahlen beschrieben werden, was in der geometrischen Optik oder Strahlenoptik behandelt wird.

■ 2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung

Im homogenen und isotropen Raum sendet ein leuchtender Objektpunkt O (Bild 2.1) eine Kugelwelle aus. Strahlen sind Normalen auf den kugelförmigen Wellenflächen (Abschnitt 4.1). Sie breiten sich im homogenen Raum vom Gegenstandspunkt geradlinig aus. Werden beispielsweise durch eine Linse die Wellenflächen so transformiert, dass sie wieder auf einen Punkt zulaufen, dann konvergieren die Strahlen ebenfalls in diesem Bildpunkt O' .

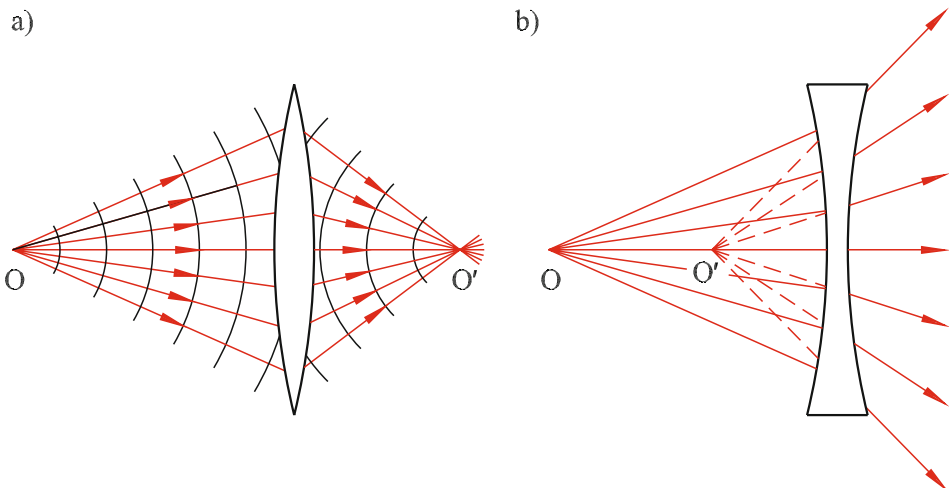


Bild 2.1 Abbildungen durch Strahlen; a) reelles, b) virtuelles Bild

Treffen sich die Strahlen wirklich wie in Bild 2.1 a) in einem Punkt, so kann das Bild beispielsweise auf einer Mattscheibe aufgefangen werden; es entsteht ein *reelles Bild*. Divergieren die Strahlen wie in Bild 2.1 b), so schneiden sich die gestrichelten rückwärtigen Verlängerungen im *virtuellen Bildpunkt* O'. Obwohl das Bild nicht real existiert, kann es ein Beobachter durchaus sehen, wenn die Augenlinse die divergierenden Strahlen wieder auf der Netzhaut zu einem reellen Bild vereinigt.

■ 2.2 Fermat'sches Prinzip

PIERRE FERMAT stellte ein fundamentales Extremalprinzip auf:



Ein Lichtstrahl nimmt zwischen zwei Punkten A und B den Weg, bei dem die benötigte Zeit ein Extremum (meist Minimum) ist.

In einer Anordnung nach Bild 2.2 ist die Zeit, die das Licht von A nach B benötigt,

$$t = \frac{s_1}{c_1} + \frac{s_2}{c_2} + \frac{s_3}{c_3} + \frac{s_4}{c_4} = \sum \frac{s_i}{c_i}$$

Die Lichtgeschwindigkeit c innerhalb eines Mediums ist verknüpft mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 durch die *Brechzahl* n (*Brechungsindex*)

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (2.1)$$

Damit wird die vom Licht benötigte Zeit

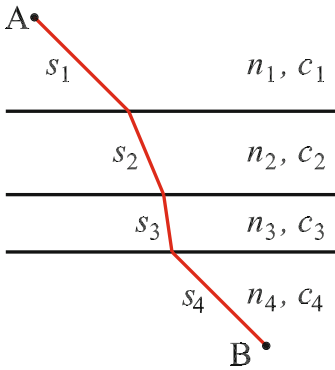
$$t = \frac{1}{c_0} (n_1 s_1 + n_2 s_2 + n_3 s_3 + n_4 s_4) = \frac{1}{c_0} \sum n_i s_i \quad (2.2)$$

Nach dem FERMAT'schen Prinzip muss gelten

$$l = \sum n_i s_i = \text{Min!} \quad (2.3)$$

l wird als *optischer Weg* bezeichnet. Wenn sich der Brechungsindex längs des Weges ändert, gilt

$$l = \int_A^B n(s) ds = \text{Min!} \quad (2.4)$$

**Bild 2.2**

Weg eines Lichtstrahls durch Schichten aus verschiedenen Medien; s_i : geometrischer Weg im Medium i ; n_i : Brechzahl des Mediums i ; c_i : Lichtgeschwindigkeit im Medium i

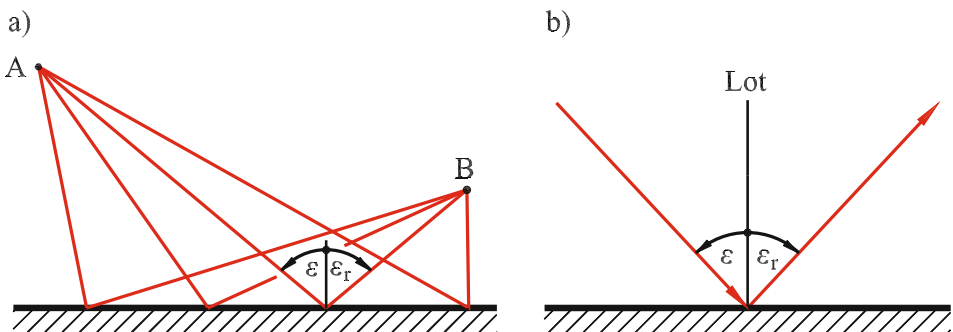
Nach FERMAT ist der Weg eines Lichtstrahls also so, dass nicht der geometrische Weg zwischen zwei Punkten ein Extremum wird, sondern der optische Weg.

Bei der Abbildung eines Objektpunktes O in einen Bildpunkt O' (Bild 2.1) gilt nach dem FERMAT'schen Prinzip, dass für alle an der Abbildung teilnehmenden Strahlen der optische Weg gleich lang sein muss.

■ 2.3 Reflexion von Lichtstrahlen

2.3.1 Reflexion an ebenen Flächen

Der Lichtweg eines Strahls, der an einer ebenen spiegelnden Fläche reflektiert wird, folgt unmittelbar aus dem FERMAT'schen Prinzip (Bild 2.3 a). Von den unendlich vielen denkbaren Lichtwegen von A nach B ist der Weg, bei dem die beiden Winkel ε und ε_r gleich sind, der kürzeste. Es gilt das *Reflexionsgesetz* (Bild 2.3 b):

**Bild 2.3** Reflexion an einer ebenen Grenzfläche



Einfallender Strahl, reflektierter Strahl sowie das Lot auf die Fläche im Auftreffpunkt liegen in einer Ebene; der Einfallswinkel ε und der Reflexionswinkel ε_r sind betragsmäßig gleich groß.

Mit den in der technischen Optik nach DIN 1335 üblichen Vorzeichen für Winkel ist $\varepsilon > 0$ und $\varepsilon_r < 0$. Damit lautet das Reflexionsgesetz:

$$\varepsilon_r = -\varepsilon \quad (2.5)$$

Bild 2.4 zeigt die Bildentstehung am ebenen Spiegel. Von den unendlich vielen Strahlen, die der Gegenstandspunkt O aussendet, treten die innerhalb des schraffierten Kegels laufenden ins Auge eines Betrachters ein. Die nach rückwärts verlängerten Strahlen ergeben den virtuellen Bildpunkt O'. Gegenstandspunkt O und Bildpunkt O' liegen also auf derselben Normalen zur Spiegelebene und haben von dieser den gleichen Abstand, sie sind „spiegelsymmetrisch“.

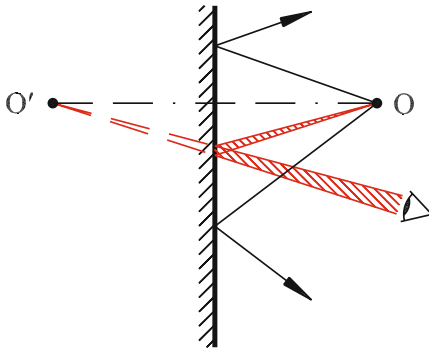


Bild 2.4
Bildentstehung am ebenen Spiegel

Technisch besonders interessant ist der *Winkelspiegel* mit einem Winkel von 90° (Bild 2.5 a). Unabhängig vom Einfallswinkel ist nach zwei Reflexionen der ausfallende Strahl parallel zum einfallenden, falls alle Strahlen in der Zeichenebene verlaufen.

Bringt man noch eine dritte Fläche senkrecht zu den beiden anderen an, so wie die Flächen in einer Würfecke, dann wird jeder beliebig einfallende Strahl nach drei Reflexionen parallel zu sich selbst reflektiert (Bild 2.5 b). Derartige *Tripel Spiegel* werden beispielsweise als Rückstrahler an Fahrzeugen eingesetzt sowie zur optischen Entfernungsmessung (Bild 10.61).

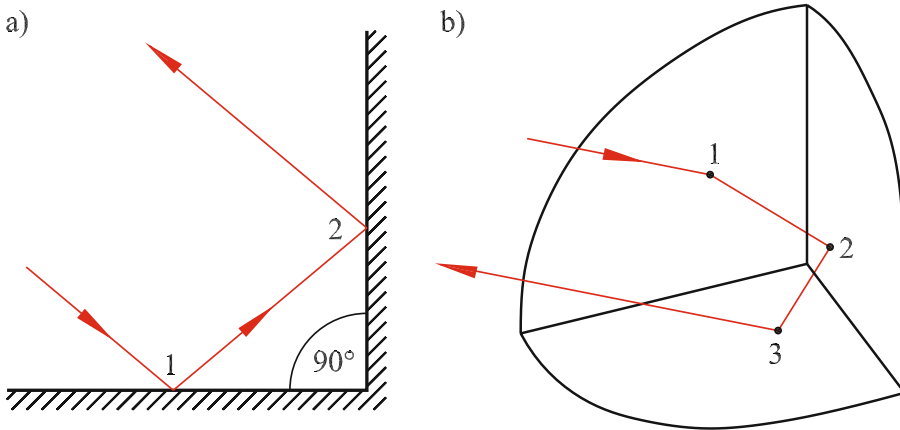


Bild 2.5 Reflexion an a) 90° -Winkelspiegel, b) Tripelspiegel

2.3.2 Reflexion an gekrümmten Flächen

Bei gekrümmten Flächen gilt das Reflexionsgesetz unverändert, wenn im Auftreffpunkt eines Strahls eine Tangentialebene und senkrecht dazu das Lot errichtet werden. Besonders interessante Eigenschaften haben Flächen in Form eines Kegelschnitts (Bild 2.6).

Der *Ellipsoidspiegel* hat zwei *Brennpunkte*. Wenn eine punktförmige Lichtquelle in einem Brennpunkt sitzt, so werden alle von ihr ausgehenden Strahlen, die den Spiegel treffen, im zweiten Brennpunkt fokussiert. Sitzt beim *Paraboloidspiegel* eine punktförmige Lichtquelle im Brennpunkt, so verlassen die Strahlen den Spiegel als Parallelbündel parallel zur *optischen Achse* (Rotationssymmetrieachse). Wegen der grundsätzlichen Umkehrbarkeit des Strahlengangs werden parallel zur optischen Achse in einen Parabolspiegel einfallende Strahlen im Brennpunkt fokussiert.

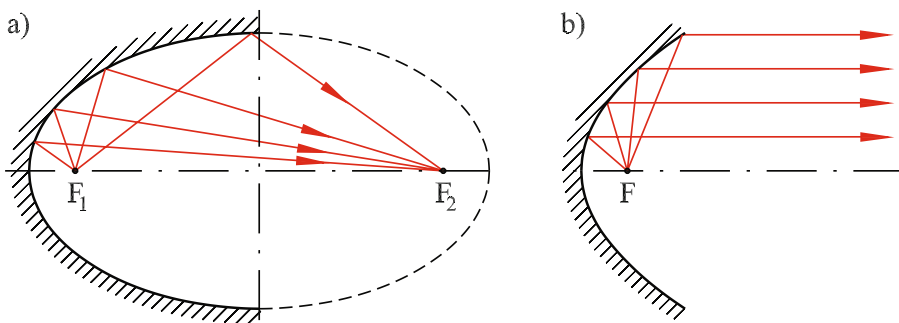


Bild 2.6 Spiegel mit Kegelschnittflächen; a) Ellipsoid, b) Paraboloid

Die größte praktische Bedeutung haben Spiegel mit kugelförmiger Fläche. Der *sphärische Hohl- oder Konkavspiegel* ist eine innen verspiegelte Kugelkalotte (Bild 2.7).

Fällt ein weit geöffnetes paralleles Strahlenbündel in einen Hohlspiegel, so treffen sich nicht alle Strahlen in einem Brennpunkt wie beim Paraboloidspiegel. Verlaufen jedoch die Strahlen relativ nahe an der optischen Achse, sogenannte *Paraxialstrahlen*, so werden mit guter Näherung alle im Brennpunkt fokussiert. Für kleine Winkel ε (Bild 2.7) wird die *Brennweite*

$$f' = \frac{r}{2} \quad (2.6)$$

Nach den Vorzeichenregeln der technischen Optik in DIN 1335 (s. Abschnitt 2.5) sind die vom Scheitel S aus nach links gerichteten Strecken negativ, d.h. $f' < 0$, $r < 0$.

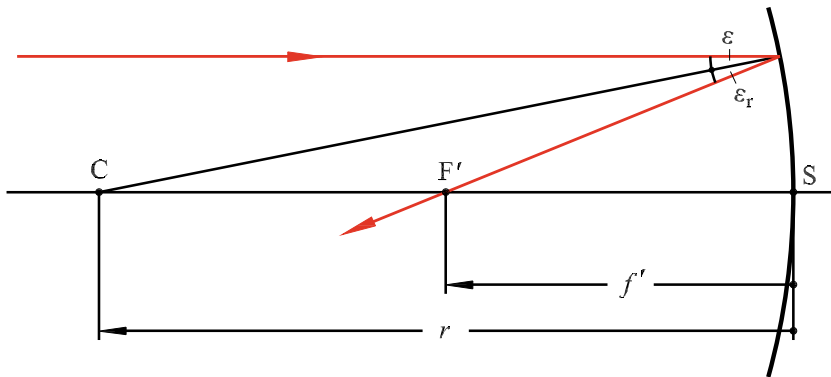


Bild 2.7 Reflexion eines paraxialen Strahls parallel zur optischen Achse CS am Hohlspiegel; C: Krümmungsmittelpunkt, F': Brennpunkt, S: Scheitel, f' : Brennweite, r : Krümmungsradius

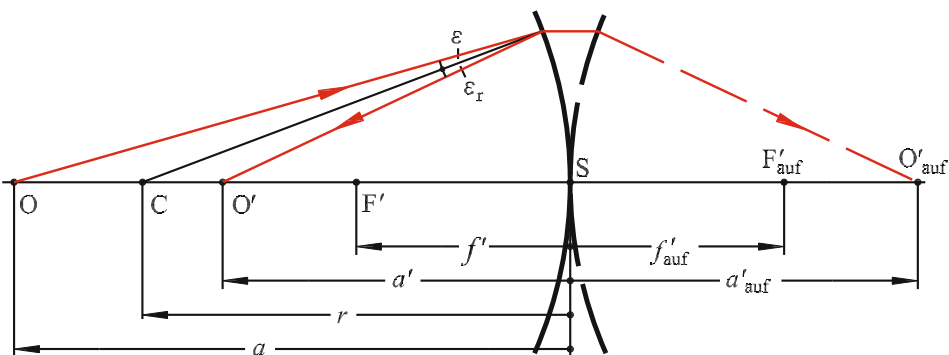


Bild 2.8 Abbildung eines Objektpunktes O auf der optischen Achse eines Hohlspiegels, $r < 0$, $f' < 0$. Rechts ist gestrichelt der aufgefaltete Strahlengang gezeichnet

Die Abbildung eines leuchtenden Objektpunktes auf der optischen Achse eines Hohlspiegels ist in Bild 2.8 dargestellt. Um den Bildpunkt O' zu finden, genügt es, wenn zwei von O ausgehende Strahlen verfolgt werden. An ihrem Schnittpunkt liegt der Bildpunkt O' . Einer dieser Strahlen ist die optische Achse selbst, der andere wird gemäß Reflexionsgesetz konstruiert. Eine kurze trigonometrische Rechnung zeigt, dass bei kleinen Winkeln ε , also bei der Verwendung von paraxialen Strahlen, Gegenstandsweite a und Bildweite a' mit der Brennweite f' verknüpft sind durch die *Abbildungsgleichung des Hohlspiegels*:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (2.7)$$

Beim Durchrechnen von Strahlengängen ist es häufig zweckmäßig, zum *aufgefalteten Strahlengang* überzugehen. Dabei wird der aufgefaltete Bildpunkt O'_{auf} symmetrisch zu O' hinter dem Spiegel gezeichnet. Bei *Auffaltung* gilt die Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{a'_{\text{auf}}} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'_{\text{auf}}} \quad \text{mit} \quad f'_{\text{auf}} = -\frac{r}{2} = -f' > 0 \quad (2.8)$$

Bei der Abbildung eines ausgedehnten Gegenstandes, dargestellt als Pfeil OP in Bild 2.9, genügt es, zwei ausgewählte Strahlen von der Pfeilspitze aus zu verfolgen. Dabei wird ausgenutzt, dass Strahlen parallel zur optischen Achse (z -Achse) nach der Reflexion am Spiegel durch den Brennpunkt gehen und umgekehrt. Für achsennahe Strahlen (*Paraxialstrahlen*) erfolgt die Reflexion praktisch an der y -Achse. Ein dritter Strahl von der Pfeilspitze zum Scheitel S wird unter dem gleichen Winkel relativ zur z -Achse reflektiert. Der Zusammenhang zwischen Objektgröße y und Bildgröße y' folgt direkt aus den Strahlensätzen. Der *Abbildungsmaßstab* bzw. die *Lateralvergrößerung* beträgt

$$\beta' = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} \quad (2.9)$$

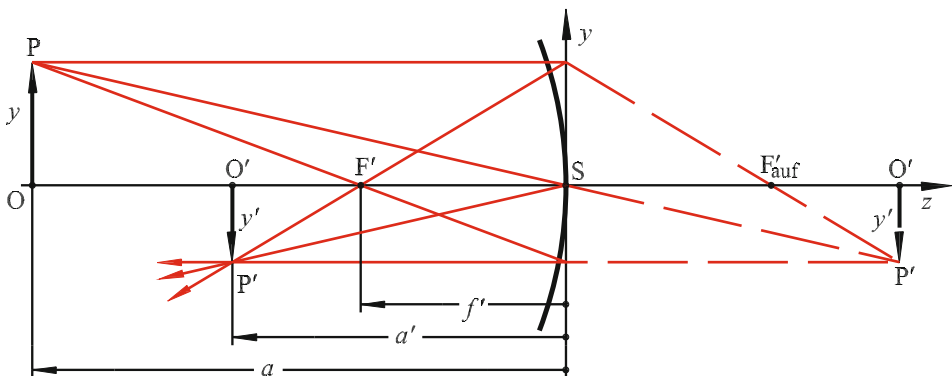


Bild 2.9 Abbildung eines ausgedehnten Gegenstandes durch einen Hohlspiegel mittels Paraxialstrahlen. Der aufgefaltete Strahlengang ist gestrichelt

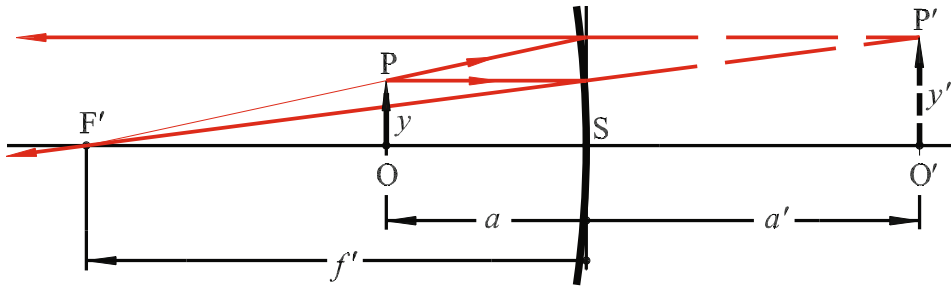


Bild 2.10 Abbildung eines Gegenstandes innerhalb der Brennweite des Hohlspiegels. Das Bild ist virtuell, aufrecht und vergrößert

Mithilfe der Abbildungsgleichung ergibt sich

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{f'}{f' - a} = \frac{1}{1 - a/f'} \quad (2.10)$$

Wenn der Gegenstand zwischen Brennpunkt und Scheitel steht, entsteht ein virtuelles Bild (Bild 2.10).

Je nach Abstand des Gegenstandes vom Spiegel ergeben sich die in Tabelle 2.1 zusammengestellten Verhältnisse.

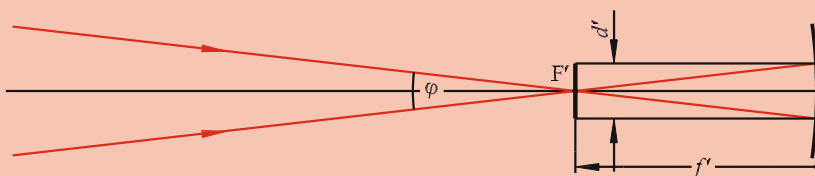
Tabelle 2.1 Abbildungsverhältnisse beim Hohlspiegel

Gegenstandsweite	Bildweite	Abbildungsmaßstab	Bildart
$ a > 2 f' $	$ f' < a' < 2 f' $	$-\beta' < 1$	umgekehrt, reell
$a = 2f'$	$a' = 2f'$	$-\beta' = 1$	umgekehrt, reell
$2 f' > a > f' $	$ a' > 2 f' $	$-\beta' > 1$	umgekehrt, reell
$a = f'$	$a' = \infty$	$\beta' = \pm \infty$	Bild im Unendlichen
$ a < f' $	$a' > 0$	$\beta' > 1$	aufrecht, virtuell



Beispiel 2.1

Mit einem Hohlspiegel von 10 m Krümmungsradius soll ein Bild der Sonne erzeugt werden. Wo befindet sich das Bild und wie groß ist es, wenn die Sonne von der Erde aus unter einem Sehwinkel von $\varphi = 32'$ erscheint?



Die Sonne ist praktisch unendlich weit entfernt. Dadurch entsteht ihr Bild in der Brennebene des Spiegels, d. h. 5 m vor dem Spiegel. Strahlen, die vom Sonnenrand durch den Brennpunkt gehen, werden nach der Reflexion am Spiegel zu achsenparallelen Strahlen und bestimmen dadurch die Größe des Bildes. Für den Bilddurchmesser ergibt sich

$$d' = |f'| \cdot \varphi = 5 \text{ m} \cdot 9,31 \cdot 10^{-3} \text{ rad} = 46,6 \text{ mm}$$

Beim *sphärischen Wölb- oder Konvexspiegel* ist die Außenseite einer Kugelkalotte verspiegelt. Die Abbildungsgleichungen für den Hohlspiegel behalten ihre Gültigkeit, lediglich die Brennweite und der Krümmungsradius werden jetzt positiv:

$$f' = \frac{r}{2} \quad \text{mit } r > 0 \quad (2.11)$$

Das Bild ist beim Wölbspiegel immer aufrecht, verkleinert und virtuell (Bild 2.11). Er wird gerne benutzt als Rückspiegel beim Kraftfahrzeug. Der Wölbspiegel macht zwar verkleinerte Bilder der Umwelt, besitzt aber ein großes Gesichtsfeld.

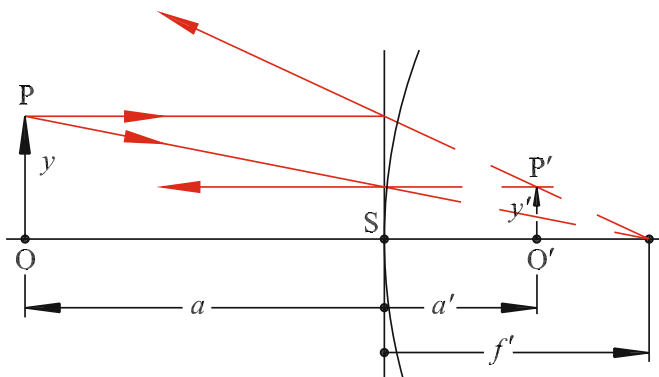


Bild 2.11 Bildentstehung beim Wölbspiegel. Das Bild ist virtuell, aufrecht und verkleinert

■ 2.4 Brechung des Lichts

2.4.1 Brechungsgesetz

Wenn eine Lichtwelle schief auf eine Grenzfläche zuläuft, die Medien mit verschiedenen Phasengeschwindigkeiten trennt, dann ändert die Welle ihre Laufrichtung (Bild 2.12). Dadurch ändert sich auch die Richtung der Lichtstrahlen, sie werden gebrochen. Die Richtungsänderung kann sowohl mit der Methode der HUYGENS'schen

Index

A

- Abbe-Diagramm 13
- Abbe'sche Invariante 24
- Abbe-Zahl 12, 862, 882
- Abbildung, projektive 802
- Abbildungsfehler 82
- Abbildungsgleichung 31
 - des Hohlspiegels 8
- Abbildungskette 810
- Abbildungsmaßstab 8, 834
- Abbildungsqualität 844, 847ff., 852, 868, 892, 905
- A,B,C,D-Matrix 54
- Aberration
 - axial chromatische 861
 - chromatische 837
 - sphärische 837f., 850
 - Wellen- 837
- ABg-Modell 899
- absolutes Messverfahren 582
- Absorption von Licht 336
- Abstandssensor
 - Triangulation 576
- Abtastung, fotoelektrisch 581
- Achromasiebedingung 862f.
- Achromat 848, 862, 882
- Achromatisierung 862
- Adaptive Correction Method (ACM) 870
- afokales System 52
- Airy-Funktion 277
- Airysche Beugungsscheibe 286
- Akkommodation 100
- akustisches Mikroskop 828
- Akzeptanzwinkel 17
- Ames-Raum 924f.
- Ampel 453
- Analysator 194
- Analyse
 - pektralradiometrische 775
 - spektralradiometrische 775
- Anamorphose
 - Zylinder- 919
- annulare Blende 808
- Ansatz, paraxialer 847
- Apertur 719 f., 834 ff., 844 ff., 864 f.
- Aperturblende 71, 835
- Aperturkoordinate 837
- Array-Detektoren 532
- Asphäre 848, 874 ff., 890 f.
- Asphärenkoeffizient 869, 875, 878
- asphärische Fläche 20
- Astigmatismus 837, 854, 864 f., 876, 890
- Asymmetriefehler 852
- ATR Attenuated total reflectance (ATR)-Spektroskopie 645
- Audience Scanning, Laser in der Unterhaltung 518
- Aufbauten, Transmissions- 719
- Auffaltung 8
- Auflösung 719 f., 798 ff., 807f., 828
 - Sensor 573
- Auflösungsgrenze, Sensor 573
- Auflösungsvermögen 114
 - beugungsbegrenzter Instrumente 287
 - des Mikroskops 290
 - eines Gitters 300

Aufweitungsoptik 455
 Augenschutz, Normen 930
 Ausbreitungskonstante 396
 Austrittsluke 77
 Austrittspupille (AP) 73, 835 f., 892, 907
 Auswertung
 – modellbasiert 800
 Autokollimationsoptik 575
 Avalanche-Dioden 532
 axiale chromatische Aberration 861
 Azimutwinkel 895

B

Babinetsches Theorem 285
 Bayer-Pattern 635
 Beleuchtung 798, 807 ff.
 – Fassaden 447
 – Klassen 447
 – schiefe 808
 – Straßen 447
 Beleuchtungsstärke 164
 Belichtung 164
 Benham-Scheibe 922
 Bessel-Verfahren 41
 Bestrahlungsstärke 142
 Beugung 281
 – am Doppelspalt 295
 – am Gitter 293
 – an einer Lochblende 286
 – kaskadierte 907
 Beugungseffizienz 883 ff.
 Beugungsgitter 298, 719 f.
 Beugungsordnung 880 ff., 893
 Beugungswinkel 880
 Bewegungstäuschung 921
 Bezugssehweite 100
 biaxiale Optik 575
 Bidirectional Scattering Distribution
 Function (BSDF) 894
 Bildfehler 836 ff., 850, 859, 864 f., 891
 Bildfeldkorrektur 719
 Bildfeldkrümmung 837, 864 f.
 bildgebende Verfahren 798, 829
 Bildqualität 807
 Bildraum 834 f., 838
 Bildverarbeitung, Time of flight (TOF)
 809
 Bildweite 27
 Bildwiedergabe 810
 Biosensoren 660
 Bitrate-Länge-Produkt 418
 Blaze-Profil 886 f.
 Blende 71
 – annulare 808
 Blendenlage 858, 864 f.
 Blendenzahl 75
 Blendung 450
 – physiologisch 438
 – psychologisch 438
 Blendungswert GR 450
 Blindbereich, Sensor 575
 Bouguer-Lambert'sches Gesetz 411, 637
 Bouguer-Lambertsches Gesetz 342
 Brechkraft 851, 854, 857 ff., 862 f.,
 879 ff.
 – der dicken Linse 37
 Brechungsgesetz 10
 Brechungsindex 3, 719
 Brechzahl 3
 Brechzahlmessung 717
 Bremsstrahlen 808
 Brennpunkt 28
 Brennweite 28, 850, 858 ff.
 Brennweitenbestimmung nach Bessel 41
 Brillouin-Spektrometer 773
 BSDF 894 ff.

C

Candela 165
 CCD-Detektor 532
 Charge Coupled Device (CCD) 576
 Chemosensoren 660
 chromatische Längsaberration 837, 865
 chromatische Queraberration 837, 865
 CIE-Lab-Farbraum 623
 CMOS-Detektor 532
 CMYK-Farbraum 625
 CO₂-Laser 805

Code Aster-Programm 906
 Codenummer 14
 CODEV®-Optikprogramm 906, 909
 Colorimetrie 645
 Colour Rendering Index (CRI) 450
 Computertomografie (CT) 800, 826
 COMSOL Multiphysics®-Optikprogramm 906
 Constraint 869
 Cooke-Triplet 67, 836, 854, 857ff., 869
 CO₂-Gaslaser 479
 CO₂-Laser 809
 cutoff frequency 844

D

Damped Least Square Method (DLS) 871
 Dämpfung in Lichtwellenleitern 411
 Dämpfungskoeffizient 412
 Dämpfungsterm 871
 Defokussierung 808
 Depth of Field (DOF) 801
 Desensitivierung 873
 Design to cost 873
 Detektionsprinzipien 658
 Detektionsvermögen 531
 Detektor 719
 – Array- 532
 – CCD- 532
 – CMOS 532
 – Flächen- 532, 719
 – Zeilen 719
 Detektormaterial 530
 Dichteschwankung 803
 Difference Frequency Mixing (DFM) 809
 diffraktive Optik 880ff.
 diffraktives Element 882
 diffraktive Struktur 888
 diffraktiv optische Komponente (DOE) 879
 diffraktiv optisches Bauelement (DOE)
 – geblaztes 884
 Dioden, Avalanche- 532
 Diodenlaser 478

Diodenlaserspektrometer (TDL) 643
 Dioptrie 28
 Dispersion 12, 718ff.
 – extreme 881
 – im Lichtwellenleiter 416
 Display-Messtechnik 625
 Divergenzwinkel 308
 Doppelbrechung 195
 Doppel-Gauß-Objektiv 854, 859
 Doppelspalt 246
 dünne Linsen 26

E

Ebene
 – meridional 854
 – sagittal 854
 Echellespektrometer 773
 Edlén-Formel 717
 Effizienz, optische 885
 Eindringtiefe 803, 828
 Einfall, streifender 793
 Eintrittsluke 77
 Eintrittspupille (EP) 72, 835f.
 elektromagnetische Wellen 802ff.
 Element
 – diffraktives 882
 – fokussierendes 880
 elliptische Polarisation 185
 Emissionen radioaktiver Substanzen 799
 Emissionsgrad 147
 Energiedichte 183
 Energie-Effizienzfaktoren 448
 Energiesparlampe 440
 Energiestromdichte 183
 Entladungslampe 440
 Escape-Funktion 871
 Escher Treppauf – Treppab 923
 Étendue 153
 Euludat-Format 443
 evaneszentes Feld 397
 Excimerlaser 479, 808
 extreme Dispersion 881f.
 Extrem-Ultraviolett (EUV) 799, 808
 Eyebox 810

F

Fabry-Perot-Interferometer 276
 Fabry-Perot-Laser 363
 Falschfarbendarstellung 445
 Faraday-Effekt 204
 Farben
 – Pantone 634
 – RAL- 634
 Farbfilter Sensoren 634
 Farbkorrektur 636
 Farblängsfehler 848, 859 ff.
 Farbmessung 177
 Farbmetrik 167
 Farbmodell 623
 – RGB- 623
 Farbquerfehler 864
 Farbraum
 – CIE-Lab- 623
 – CMYK- 625
 – Lab- 623
 – LCh- 624
 – Luv- 624
 Farbreizfunktion 169
 Farbsysteme 634
 Farbtafel 171
 Farbtäuschung 922
 Farbton (Hue) 625
 Farbwiedergabeindex 178
 Farbwiedergabewert R_a 450
 Faserlaser 476
 Fehler
 – Asymmetrie- 852
 – Farblängs- 860
 – Farbquer- 864
 – Öffnungs- 850
 – Perspektive 801
 – Telezentrie- 801
 Fehlsichtigkeit 777
 Feld 834 ff., 846 ff., 857, 864 f., 908
 Feldblende 76
 Feldlinse 80
 Feldwinkel 77, 833 ff., 850, 859 f.
 Fermat'sches Prinzip 3
 Fernfeldnäherung 907

Feuchtemessung 637
 – LWL Lichtwellenleiter 641
 – NIR Nahes Infrarot 639
 – UV Ultraviolett 641
 Filter
 – Normen 930
 Finite-Elemente (FEM)-Optik-Programme 906
 first order layout 847f.
 Fisheye 860
 Flächendetektor 532, 719
 Flächenformen 874
 Fließinjektionsanalyse (FIA) 657
 Flimmerfarben, musterinduzierte 922
 Fluoreszenzmikroskopie 808
 Fluoreszenz-Spektroskop 772
 F-Number 76
 Fokuslänge 718
 fokussierendes Element 880, 888
 Fotoeffekt 377
 fotoelektrische Abtastung 581
 Fotogrammetrie 859, 906
 Fotometrie 138, 645
 fotometrische Grenzentfernung 140
 fotometrisches Entfernungsgesetz 142
 fotometrisches Grundgesetz 142
 fotometrisches Strahlungsäquivalent 164
 Fotoobjektiv, Weitwinkel- 838
 Fourier-Transformation 844, 907f.
 Fraunhofer-Integral 908
 Fraunhofer-Linien 13
 Fraunhofer-Näherung 907
 Freiformfläche 874, 879, 890 f.
 Freiraumausbreitung 907
 Fresnel-Linse 885
 Fresnel'sche Gleichungen 217
 Fresnelsches Parallelepiped 226
 Fresnelsche Zonenplatte 318
 Funktion, Escape- 871

G

Gasentladungslampe 440
 Gaslaser 479

Gauß'sche Optik 24
 Gauß'sche Strahlen 305
 Gaußsche Strahlen 908
 Gauß'sche Linsengruppen 859
 Gauß'sche Normalengleichung 870
 geblaztes diffractives optisches Element
 (DOE) 884
 Gegenstandsweite 27
 geometrische Optik 2
 Gesetz von Malus 195
 Gitter-Dispersion 301
 Gitterfunktion 294
 Gittergleichung 721
 Gitterkoppler 658
 Gitterspektrometer 720
 Glan-Thompson-Prisma 198
 Glare Rating (GR) 450
 Glassorten 14
 globales Optimierungsverfahren 871
 Glühlampe 440
 gonioskopisches Messverfahren 633
 Gradientenfaser 408
 Gradientenindex 869, 889 f.
 Gradientenvektor 889
 Graugrade 637
 Grauwertverschiebung 574
 Gravitationsfeldmessung 798
 grazing incidence 793
 Grenzflächenübergang 907 f.
 Grenzfrequenz 844 ff.
 Grenzwinkel der Totalreflexion 15
 GRIN-Linse 890 f., 905
 Größenkonstanz 925
 Größentäuschung 925
 Gruppengeschwindigkeit 248
 Güteermkmale 447

H

Halbleiter-Detektoren 377
 Halbleiterlaser 366, 478
 Halbwellenplatten 200
 Halogen-Glühlampe 440
 Halogen-Metaldampf 440
 Hauptstrahl 74, 833 ff., 852

Heisenbergsche Unschärferelation 801
 Helligkeit (Brightness) 625
 Helligkeits-Täuschung 920
 Helmholtz-Gleichung 907
 Helmholtz-Lagrange-Invariante 26
 Hermann-Gitter 920 f.
 Hintergrundstrahlung 530
 Höhenrelief 802
 Hohlgesichter 920
 Hohlraumstrahler 145
 Hohlspiegel 7
 Hubble-Space-Teleskop 794
 Huygens-Fresnelsches Prinzip 281
 Hybridelement 880 ff.
 Hygenschches Prinzip 907

I

ideales Punktbild (*PSF*) 808
 imaging correction 719
 Indexellipsoid 197
 infrarote Strahlung 1
 Infrarothygrometer 638
 Infrarot (IR) 809
 Injektionslaser 362
 inkrementales Messverfahren 582
 Intensität 183
 Interferenz 809
 Interferenzbedingungen 242
 Interferenzen 240
 Interferenzfilter 279
 Interferenzholografie 325
 Interferenzmuster, parasitär 809
 Interferenzspektroskopie, reflektometrisch 659
 Interferometrie, Weißlicht 809
 interferometrische Längenmessung 580
 Invariante der Brechung 12
 Inzidenz, senkrechte 880
 Inzidenzwinkel 850 ff., 859, 873, 897 f.
 Ionenstrahlen 799
 IR, Feuchtebestimmung 638
 IR-Spektroskopie 645

J

Jones-Matrix 188
 Jones-Vektor 187

K

Kardinalpunkte 64
 kaskadierte Beugung 907
 Kaustik 850
 Kegelschnitt 875
 Kellner-Okular 109
 Kennlinie, Sensor 573
 Kernspin 799
 Kerr-Effekt 206, 210
 Kirchhoffsches Beugungsintegral 907
 Knotenpunkt 65
 Kohärenz 243, 808 f.
 Kohärenz-Gating 809
 Kohärenzgrad 246
 Kohärenzlänge 243
 Kohärenzzeit 243
 Koma 837 f., 852 ff., 859, 864 f., 873, 876, 890
 Komponenten
 – optisch diffraktiv (DOE) 879
 Kondensator 80
 Konkavspiegel 7
 Kontrastfunktion 844
 Kontrasttäuschung 920
 Konuswinkel 718
 Korrektur, Bildfeld 719
 korrelative Mikroskopie 804

L

Lab-Farbraum 623
 Lambert-Beer'sches Gesetz 637
 Lambert-Bouguersches Gesetz 233
 Lambert-Strahler 141, 895 f.
 Lambert'sche Reflexionscharakteristik 600
 Lampe 439
 Längenmessung, interferometrisch 580
 Längsaberration, chromatische 837

Laser 341
 – CO₂-Gas 479
 – Dioden 478
 – Excimer 479
 – Faser 476
 – Gas 479
 – Halbleiter 478
 – Quantenkaskaden 809
 – Scheiben 475
 – Slab 475
 Laserbedingungen 342
 Laser-Chirp 375
 Laserdioden 362
 Laser-Resonatoren 309
 Lasertypen 347
 Laufzeitunterschied 798, 803
 LCD
 – Schwellwert 633
 LCh-Farbraum 624
 LED 354, 440, 774
 Leistung, reale optische 872
 Leuchtdichte 164, 450
 Leuchte 439
 Leuchtenkatalog 465
 Leuchtenstückliste 445
 Leuchtenverteilung 444
 Leuchtstofflampe 440
 Licht
 – Immission 470
 – Therapie 468
 – Verschmutzung 468
 – Wirkung auf Menschen 467
 Lichtaustrittsfläche 443
 Lichtdruck 332
 lichtelektrischer Effekt 330
 Lichtlaufzeitmessung 573
 Lichtleiter 719
 Lichtleitwert 719
 Lichtquanten 329
 Lichtquelle 439, 807 f.
 – Halogen 454
 – LED 454
 – unkorreliert 808
 Lichtsignalanlage 453
 Lichtstärke 164, 720

Lichtstärkeverteilung 443
 Lichtstrom 164, 443
 Lichttaster 600
 Lichtwellenleiter 16
 – Normen 929
 Light Emitting Diode 440
 Lineare Polarisation 185
 Lingelbach und Schraufsches
 Scintillating-grid 920
 Linsendurchbiegung 854, 865
 Linsenformen 31
 Linsengruppen, Gauß'sche 859
 Linse, refraktive 881
 Lithografie 808f.
 Lithografieobjektiv 838, 849, 869
 Littrow-Aufbau 721
 Lokalisation 801
 Lorentz-Profil 338
 LP-Moden 399
 Luken 77
 Luminanz 623
 Lumineszenz 645
 Lumineszenzdiode 354
 Luminosität 719
 Luv-Farbraum 624
 LWL (Lichtwellenleiter), Feuchtemessung
 641

M

Mach-Zehnder-Chip 658
 Mach-Zehnder-Interferometer 273
 Magnetresonanztomografie (MRT)
 798 ff.
 Marechal-Kriterium 844
 Markersubstanzen 645
 Matrixmethoden der Gaußschen Optik
 53
 Matrizen für Linsen 57
 Maxwell-Gleichungen 888, 907f.
 Melanopsin 467
 Melatonin 467
 Meridionalebene 854
 Meritfunktion 868 ff., 879
 Messgenauigkeit 807

Messtechnik
 – Display- 625
 Messung
 – Brechzahl 717
 – Feuchte- 637
 – Multianalyt- 660
 Messverfahren
 – absolutes 582
 – gonioskopisches 633
 – inkremental 582
 Methode
 – adaptive Korrections- (ACM) 870
 – Damped Least Square (DLS) 871
 – Sattelpunkt- 872
 Mikroskop, Scanning Electron (SEM)
 804
 Mie-Streuung 637, 644
 Mikroskop 110, 838
 – akustisches 828
 – Fluoreszenz 808
 Mikroskopie
 – korrelative 804
 Mikroskopobjektiv 846
 Modell, ABg- 899
 modellbasierte Auswertung 798 ff.
 Modendispersion 417
 Modenkopplung 349
 Modulation Transfer Function (MTF) 360
 Modulation Transfer Function (MTF)
 844 ff.
 Moiré-Effekt 904
 Monochromator 719
 MTF 844 ff., 903 f.
 Multianalytmessung 660
 musterinduzierte Flimmerfarben 922

N

Nahfeldmikroskopie 230
 NASTRAN-Optikprogramm 906
 Natriumdampflampe 440
 Newton'sche Abbildungsgleichung 31
 NIR (Nahes Infrarot) 639
 – Feuchtemessung 639
 Normalengleichung, Gauß'sche 870

Normen

- Augenschutz 930
 - Filter 930
 - Optik 927
 - Optikfertigung 928
 - optische Bauelemente 928
 - Optoelektronik 929
 - Radio- und Fotometrie 929
- Normvalenzsystem 169
numerische Apertur 17, 801
Nyquist-Frequenz 904

O

Oberflächenplasmonenresonanz (SPR),
Surface Plasmon Resonance 645,
658

Oberflächenrauigkeit 893, 897f.

Objektfeld 833 f., 837

Objekthöhe 834 f., 848

Objektiv

- Doppel-Gauß- 859
- Lithografie- 838, 849
- Petzval 858
- Weitwinkel-Foto- 838

Objektpunkt 833 f., 837, 864, 874

Objektraum 834 f.

Observable 798 ff.

Öffnungsfehler 850

Öffnungszahl 859 f.

OLED 440

Optical Coherence Tomography (OCT)
809

Optik

- Autokollimations 575
- biaxial 575
- diffraktive 880

Optikdesign 836 ff., 847 ff., 868, 871,
874 ff., 889 ff., 903 ff.

Optikfertigung, Normen 928

Optiknormen 927

Optikprogramm 906

Optiksimulation 891 f., 908

Optimierung 847 ff., 852, 868 ff., 876,
879

optische Abbildung 2

optische Aktivität 201

optische Bauelemente, Normen 928

optische Berechnung, Hybridmethoden
909

optische Effizienz 885 ff.

optische Geräte, Normen 928

optische Komponenten (DOE), diffraktiv
879

optische Normen

- Augenschutz 930
 - Beleuchtung 927
 - Filter 930
 - Lichtwellenleiter 929
 - Optikfertigung 928
 - optische Bauelemente 928
 - optische Geräte 928
 - Optoelektronik 929
 - Radio- und Fotometrie 929
- optische Performance 872 f., 905 f.
optische Phänomene
- Ames-Raum 924
 - Benham-Scheibe 922
 - Bewegungstäuschung 921
 - Escher Treppauf - Treppab 923
 - Farbtäuschung 922
 - Helligkeits-Täuschung 920
 - Hermann-Gitter 920
 - Hohlgesichter 920
 - Kontrast-Täuschung 920
 - Lingelbach und Schraufsches
Scintillating-grid 920
 - musterinduzierte Flimmerfarben 922
 - Penrose-Dreieck 923
 - Penrose-Treppe 923
 - Pinna'sche Täuschung 921
 - Schuster, unmögliches Tor 924
 - Shepard, Elefant mit vier Füßen 924
 - unmögliche Objekte 922
 - Zylinderanamorphose- 919
- optischer Weg 3, 21, 836
optische Simulationsrechnung 906
optische Täuschungen 922
Optoelektronik 351
- Normen 929

Optometrie 777
 Ordnungen, spektrale 720
 Organic Light Emitting Diode (OLED)
 440
 Orthogonalitätsrelation 877f.

P

Pantone-Farben 634
 parasitäre Interferenzmuster 809
 paraxialer Ansatz 847
 Paraxialstrahlen 7
 Pegel 412
 Penrose-Dreieck 923
 Penrose-Treppe 923
 Performance, optische 905
 Perspektiven-Fehler 801
 Petzval-Krümmung 859
 Petzval-Objektiv 858
 Phoropter 779
 Photonen 330
 Photonendrehimpuls 333
 Photonenimpuls 332
 Pinna'sche Täuschung 921
 Planck'sches Strahlungsgesetz 145
 Plancksches Strahlungsgesetz 339, 530
 Pockels-Effekt 206
 POF-Fasern 415
 Polarisierung 185
 Polarisationsdrehung 189
 Polarisationsgrad 194
 Polarisationszustand 187
 Polarisator 189
 Polychromator 719
 Power Spectral Density (PSD) 896
 Poyntingscher Vektor 184
 Prisma 18
 projektive Abbildung 801f.
 PSD-Halbleiter (Position Sensitive
 Detector) 576
 psychologische Blendung *UGR* 438
 Pulslaufzeitverfahren
 – Sensor 578
 Punktbild 891f., 907
 – ideales (*PSF*) 808

Pupille 71
 Pupillensampling 846
 Purkinje-Effekt 162
 python 907

Q

Q-Asphäre 876 ff.
 Quantenkaskadenlaser 809
 Quecksilberdampf 440
 Queraberration 837f., 864
 – chromatische 837

R

Radarstrahlung 799
 Radiometrie 138
 – spektrale 773
 Radio- und Fotometrie, Normen 929
 RAL-Farben 634
 Ramsden-Okular 109
 Raumhöhe 444
 Raumwinkel 140, 718
 Rayleigh-Kriterium 288
 Rayleigh-Länge 307
 Rayleigh-Linie 772f.
 Rayleigh-Rice-Störungstheorie 897
 Rayleigh-Streuung 413
 Raytracing 889, 892, 907ff.
 reale optische Leistung 872
 reelles Bild 3
 Reflektometrie 645, 659
 reflektometrische Interferenzspektro-
 skopie (RIFS) 659
 Reflexion
 – an ebenen Flächen 4
 – Lichtstrahl 4
 – Schleier 450
 – spekulare 893
 Reflexionscharakteristik, Lambertsche
 600
 Reflexionsgesetz 4
 Reflexionsgrad 220
 – von Metallen 236
 refraktive Linse 881

Refraktometrie 659, 778
 Rekombination 352
 relative Öffnung 76
 ReluxSuite 466
 Remissionsgrad, Lichtschanke 600
 Rendering 3D 445
 Resonant Mirror 658
 RGB-Farbmodell 623
 RMS-Wert 844 ff., 877, 898
 Röntgenstrahlung 799, 808
 Röntgenteleskop 793

S

Sagittalebene 853 f.
 Sammellinse 28
 Sattelpunktmethode 872
 Sättigung (Saturation) 625
 Satz von Malus 837
 Scanning, Audience- 518
 Scanning Electron Microscope (SEM) 804
 Schärfentiefe 801
 Scheibenlaser 475
 schiefe Beleuchtung 808
 Schleierleuchtdichte 450
 Schuster Unmögliches Tor 924
 schwarzer Strahler 145
 Schwellenwerterhöhung TI 450
 Schwellwert, LCD 633
 Scintillating-grid, Lingelbach und Schraufsches 920
 Sehfeldzahl 109
 Sehleistung 777 ff.
 Sehtest 778
 sekundäres Spektrum 861 ff.
 Sellmeier-Gleichung 13
 senkrechte Inzidenz 880
 Sensor
 – Bio- 660
 – Chemo- 660
 – Farbfilter 634
 Sensorkennlinie 573
 Shepard, Elefant mit vier Füßen Shepard 924
 sichtbares Licht 1, 799
 sichtbares nahes Infrarot (VIS-NIR: Visible Near Infra Red) 808
 Signal
 – Flächenhomogenität 455
 – Lichtstärke 455
 – Straßenverkehr 455
 Signaldynamik, Spektrometer 775
 Signalisation 453
 Signalleuchte, Fahrzeug 455
 Simulated Annealing 872
 Simulation
 – Optik 873, 891 ff., 905, 908
 – Streulicht- 892
 Skriptsprache 907
 Slablaser 475
 Smart City Lights 453
 Smooth Surface Limit (SSL) 897
 Snellius'sches Brechungsgesetz 12
 Snelliussches Brechungsgesetz 891, 908
 Sonografie 798 ff., 803
 Speckle 809
 Spektralapparate 718
 spektrale Ordnung 720
 spektrale Radiometrie 773
 spektralradiometrische Analyse 775
 Spektrometer 718 f.
 – Brillouin- 773
 – Diodenlaser 643
 – Gitter 720
 – Signaldynamik 775
 Spektroskopie
 – ATR (attenuated total reflectance) 645
 – IR- 645
 – reflektometrische Interferenz (RfS) 659
 Spektrum, sekundäres 863
 spekulare Reflexion 893
 spezifische Ausstrahlung 139
 sphärische Aberration 83, 837 f., 850 ff., 863 ff., 875
 spontane Emission 337
 Spurenanalytik 660

- Stefan-Boltzmann'sches Gesetz 146
 stimulierte Emission 337
 Störlicht 893
 Strahldichte 142
 Strahlen
 – Brems- 808
 – Extrem-Ultra-Violett (EUV) 808
 – Ionen- 799
 – Synchrotron- 808
 – Ultraviolett (UV)- 808
 Strahlparameterprodukt 308
 Strahlquellen 799
 Strahlstärke 141
 Strahlung
 – Extrem-Ultraviolett (EUV)- 799
 – Infrarot (IR)- 799
 – Radar- 799
 – Röntgen- 799
 – sichtbares Licht (VIS) 799
 strahlungsphysikalische Größen 138
 Straßenlaterne, intelligente 453
 Strehl'sche Definitionshelligkeit
 843 ff.
 streifender Einfall 793
 Streulicht 720
 Streulichtprobleme 893
 Streulichtsimulationen 892
 Streuung, Mie- 637
 Struktur
 – binäre 886
 – Blaze- 886
 – diffraktive 888
 Stufenindex-Faser 398
 Substanzen, Emissionen radioaktiver
 799
 Surface Plasmon Resonance (SPR)
 658
 Symmetrieprinzip 838, 859, 865
 Synchrotronstrahlung 808
 Systemmatrix 61
- T**
- Taper 432
 Teilchenstrahlung 799
- Teleskop
 – Hubble-Space 794
 – Röntgen 793
 – Weltraum 793
 Telezentriablende 802
 Telezentriefehler 801
 Temperaturstrahler 145, 439
 Terahertz Difference Frequency Mixing
 (DFM) 809
 TE-Welle 217
 Threshold Increment (TI) 450
 Time of flight (TOF)-Imaging 809
 TIS-Wert 895 ff.
 TM-Welle 217
 Toleranzwerte 873
 Tolerierung 847 ff., 872 f.
 Tomografie
 – Computer (CT) 800
 – Magnetresonanz (MRT) 798
 – Optical Coherence (OCT) 809
 Total Integrated Scatter (TIS) 895
 Totally Internal Reflection Fluorescence
 (TIRF) 645, 660
 Totalreflexion 15
 Totalreflexionsfluoreszenz 645
 Tracer 799
 Transducer 645, 828 f.
 Transmissionsaufbau 719
 Transmissionsfaktor 719
 Transmissionsgrad 220
 Triangulation 573
 – Abstandssensor 576
 Tubuslänge 111
 Tunnelstrom 799
- U**
- Ulbrichtkugel 773 ff.
 Ultraschall 799
 ultraviolette Strahlung 1
 Ultraviolett (UV)-Strahlen 808
 Unbuntpunkt 624
 Unified Glare Rating 438
 unkorrelierte Lichtquelle 808
 unmögliche Objekte 922

Unschärferelation 335
Untersuchung, Ultraschall 798
UV (Ultraviolett), Feuchtemessung 641

V

Verfahren
– bildgebende 798
– globales Optimierungs- 871
verflochtener Strahlengang 82
Verkehr
– Fluss 453
– Sicherheit 453
Verschmutzung, Licht 468
Verzeichnung 802, 837f., 858 ff., 864 f.,
875 f., 890
Verzeichnungsfehler 801
Verzögerungsplatten 189
Vielstrahlinterferenzen 274
Viertelwellenplatten 200
Vignettierung 77, 846
virtuelles Bild 3
Visible Near Infra Red (VIS-NIR) 808
Visus 778

W

Wartungsfaktor (*MF*) 439, 451
Weg, optischer 836
Weißabgleich 636

Weißlichtinterferometrie 809
Weitwinkelobjektiv 838, 860
Welle
– elektromagnetische 804
Wellenaberration 837
Wellenfront 837, 844 ff., 898
Wellenfrontabweichung 837
Wellenlängenbereiche 1
Wellenlängenwandler 810
Wellenoptik 180
Wellenwiderstand 184
Wellenzahl 181
Welle-Teilchen-Dualismus 334
Weltraumteleskop 793 ff.
Wiedergabequalität 720
Wiederholgenauigkeit, Sensor 573
Wien'sches Verschiebungsgesetz 146
Winkelspiegel 5
Wölb- oder Konvexspiegel 10
Wollaston-Prisma 199
Workplane 442

Z

Zeilen-Detektor 719
Zerstreuungslinse 30
zirkulare Polarisation 185
Zweilinser 859
Zylinderanamorphose 919