

Ekkert Hering, Rolf Martin

Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler

Grundlagen und Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-44281-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-44509-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44281-8>

sowie im Buchhandel.

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 Farbmatrik 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 **Laseranwendungen** 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. Im 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 einräumten 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

Zum Geleit

Die meisten Erkenntnisse über die Welt erlangen wir durch unseren Sehsinn. Licht ist Sehen, Sehen ist Erkennen – ob es sich um kleinste Nano-Strukturen oder die Dimensionen des Universums handelt. Mikroskop und Teleskop, aber auch die Bündelung von Licht durch Laser zählen zu den wichtigsten Meilensteinen des Fortschritts der Menschheit. Und auch heute ist die Optik – vor allem in Verbindung mit Datenverarbeitung – Triebkraft für technologische Innovationen.

Unsere moderne Welt gäbe es ohne optische Verfahren nicht. Oft sind wir uns gar nicht bewusst, dass hinter einem Gerät oder einem Vorgang im täglichen Leben eigentlich Optik steckt. Smartphones gäbe es nicht ohne die optischen Lithografieverfahren, die extrem kleine Halbleiterstrukturen für Hightech-Elektronik erzeugen. Und was wäre das Internet ohne die schnelle und effiziente Datenübertragung durch lichtleitende Kabel?

Sehen bestimmt in entscheidendem Maße unser persönliches Leben. Neue optische Verfahren ermöglichen Menschen eine bessere Sehkraft nicht nur durch klassische Brillen, sondern auch durch refraktive Laserverfahren. Die Erforschung der grundlegenden Ursache von Krankheiten sowie deren Gegenmitteln und die Genforschung wären ohne mikroskopische Verfahren undenkbar.

Optik und Photonik sind laut den Vereinten Nationen weiterhin Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Sie sind ein wichtiger Wirtschafts- und Standortfaktor, sorgen für Wohlstand und Gesundheit. Zu einem besseren Verständnis und effizienteren Umgang mit dem Thema leistet dieses Buch mit seiner umfassenden Einführung in die Grundlagen der Optik und einem breiten Überblick zu modernen optischen Anwendungen einen wichtigen Beitrag.

Prof. Dr. MICHAEL KASCHKE

Vorstandsvorsitzender der Carl Zeiss AG

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Zum Geleit	7
1 Einleitung	17
2 Geometrische Optik	18
2.1 Lichtstrahlen, optische Abbildung	18
2.2 Fermat'sches Prinzip	19
2.3 Reflexion von Lichtstrahlen	20
2.3.1 Reflexion an ebenen Flächen	20
2.3.2 Reflexion an gekrümmten Flächen	21
2.4 Brechung des Lichts	26
2.4.1 Brechungsgesetz	26
2.4.2 Dispersion	27
2.4.3 Totalreflexion	30
2.4.4 Prismen	32
2.5 Brechung an gekrümmten Flächen	35
2.5.1 Asphärische Flächen	35
2.5.2 Kugelflächen	36
2.5.2.1 Vorzeichenkonvention in der technischen Optik	36
2.5.2.2 Brechung an einer Kugelfläche	37
2.6 Abbildung durch Linsen	40
2.6.1 Dünne Linsen	40
2.6.2 Dicke Linsen	48
2.6.3 Fresnel-Linsen	55
2.6.4 GRIN-Linsen	56
2.6.5 Linsen mit torischen Flächen	59
2.6.6 Linsensysteme	61
2.7 Matrixmethoden der Gauß'schen Optik	65
2.7.1 Matrizen zur Beschreibung der Strahlausbreitung	66
2.7.2 Matrizen für Linsen	68
2.7.3 Eigenschaften der Systemmatrix	72
2.7.4 Lage der Kardinalpunkte eines optischen Systems	75
2.7.5 Lage der Referenzebenen	81

2.8	Strahlbegrenzungen	82
2.8.1	Blenden und Pupillen	82
2.8.2	Kenngrößen der Strahlenbegrenzung	86
2.8.3	Feldblenden und Luken	87
2.8.4	Feldlinsen und Kondensoren	90
2.9	Abbildungsfehler	93
2.9.1	Sphärische Aberration (Öffnungsfehler)	93
2.9.2	Koma (Asymmetriefehler)	99
2.9.3	Astigmatismus und Bildfeldwölbung	101
2.9.4	Verzeichnung	103
2.9.5	Chromatische Aberration (Farbfehler)	104
2.10	Optische Instrumente	107
2.10.1	Optik des menschlichen Auges	107
2.10.2	Lupen und Okulare	113
2.10.3	Mikroskope	118
2.10.4	Fernrohre	128
2.10.5	Fotoapparat	136

3 Radio- und Fotometrie 143

3.1	Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie	143
3.1.1	Grundlagen, Definitionen	143
3.1.2	Strahlungsfelder einfacher Geometrien	152
3.2	Erfassen und Transfer der Strahlung von Lampen und kegelförmig abstrahlenden Lichtquellen in optisch-analytischen Geräten	157
3.2.1	Abstrahl-Charakteristik verschiedener Lichtquellen	157
3.2.2	Technische Ausführung von Lampen für optisch-analytische Messgeräte	159
3.2.3	Ulbricht'sche Integrationskugel	162
3.3	Lichttechnische Größen, Fotometrie	165
3.4	Farbmetrik	170

4 Wellenoptik 181

4.1	Elektromagnetische Wellen	181
4.2	Polarisation des Lichts	186
4.2.1	Polarisationsformen	186
4.2.2	Mathematische Beschreibung des Polarisationszustands	187
4.2.3	Polarisationsoptische Komponenten	191
4.2.4	Optische Aktivität	200
4.2.5	Elektro- und magnetooptische Effekte	203
4.2.6	Anwendungen der Doppelbrechung	210
4.3	Lichtwellen an Grenzflächen	215
4.3.1	Fresnel'sche Gleichungen	215
4.3.2	Übergang vom optisch dünnen ins optisch dichte Medium	219
4.3.3	Übergang vom optisch dichten ins optisch dünne Medium	221
4.3.4	Wellen in absorbierenden Medien	228

4.4	Interferenz	236
4.4.1	Zweistrahl-Interferenz	236
4.4.2	Kohärenz	238
4.4.3	Gruppengeschwindigkeit	243
4.4.4	Interferenz einander schräg durchdringender Wellen	247
4.4.5	Stehende Wellen	248
4.4.6	Interferenzen an dielektrischen Schichten	251
4.4.7	Interferenzen an dielektrischen Vielfachschichten	258
4.4.8	Interferometer	264
4.4.9	Vielstrahlinterferenzen	267
4.5	Beugung	273
4.5.1	Huygens-Fresnel'sches Prinzip	273
4.5.2	Beugung am Spalt und an der Lochblende	275
4.5.3	Auflösungsvermögen beugungsbegrenzter Instrumente	280
4.5.4	Beugung am Gitter	285
4.6	Gauß'sche Strahlen	296
4.6.1	Feldverteilung im Gauß-Strahl	296
4.6.2	Laser-Resonatoren	300
4.6.3	Durchgang Gauß'scher Strahlen durch optische Komponenten	302
4.7	Holografie	307
4.7.1	Aufnahme eines Hologramms und Rekonstruktion des Bildes	307
4.7.2	Technische Anwendungen der Holografie	314

5 Quantenoptik 318

5.1	Lichtquanten	318
5.2	Welle-Teilchen-Dualismus	322
5.3	Absorption und Emission von Licht	324
5.4	Laser	329
5.4.1	Laserprinzip	329
5.4.2	Lasertypen	334

6 Optoelektronik 339

6.1	Halbleiter-Sender	340
6.1.1	Strahlungsemission aus Halbleitern	340
6.1.2	Lumineszenzdiode (LEDs)	342
6.1.3	Laserdiode (Injektionslaser)	349
6.2	Halbleiter-Detektoren	362
6.2.1	Strahlungsabsorption in Halbleitern	362
6.2.2	Gütekriterien von Detektoren	364
6.2.3	Fotowiderstand	366
6.2.4	Fotodiode	367

7 Führung von Licht in Lichtwellenleitern 376

7.1	Einleitung	376
7.2	Schichtwellenleiter	377
	7.2.1 Strahlenbild	377
	7.2.2 Wellenbild	379
7.3	Wellen in zylindrischen Fasern	382
	7.3.1 Stufenindex-Faser	382
	7.3.2 Einmodenfaser	388
	7.3.3 Gradientenfaser	391
7.4	Dämpfung in Lichtwellenleitern	394
7.5	Dispersion im Lichtwellenleiter	398
	7.5.1 Modendispersion	399
	7.5.2 Chromatische Dispersion	404
7.6	Lichtleiter in praktischen Anwendungen	408

8 Beleuchtungstechnik 415

8.1	Einleitung	415
8.2	Lichttechnische Größen	416
8.3	Lichtquellen	420
	8.3.1 Lampen	420
	8.3.2 Leuchten	421
8.4	Optische Systeme zur Beleuchtung	422
	8.4.1 Beleuchtung im Innenraum	422
	8.4.2 Beleuchtung im Außenraum	427
	8.4.3 Signalisation	433
	8.4.4 Informationsträger	442
8.5	Simulation und Berechnungsprogramme	443
	8.5.1 DIALux	443
	8.5.2 ReluxSuite	445
	8.5.3 Weitere Simulationssoftware für den Innenbereich	445
8.6	Spezielle Kapitel der Beleuchtungstechnik	446
	8.6.1 Wirkung des Lichts auf den Menschen	446
	8.6.2 Lichtverschmutzung	447

9 Laseranwendungen 450

9.1	Laser in der Materialbearbeitung	450
	9.1.1 Laserstrahlquellen	450
	9.1.1.1 Festkörperlaser	451
	9.1.1.2 Halbleiterlaser (Diodenlaser)	455
	9.1.1.3 Gaslaser	456
	9.1.2 Strahlqualität	459
	9.1.3 Wechselwirkung Strahlung mit Materie	460
	9.1.3.1 Energieströme und Wirkungsgrade	460
	9.1.3.2 Einwirkdauer und Leistungsdichte	462

9.1.4	Laser-Materialbearbeitung	463
9.1.4.1	Aufwärmen zum Bearbeiten von Oberflächen	463
9.1.4.2	Schmelzen zur Behandlung von Oberflächen	464
9.1.4.3	Schmelzen zum Aufbauen und Laserformen (Urformen) ..	465
9.1.4.4	Wärmeleitschweißen (Schmelzen zum Fügen)	466
9.1.4.5	Tiefschweißen (Verdampfen zum Fügen)	467
9.1.4.6	Laserschneiden	467
9.1.4.7	Laserbohren	468
9.1.4.8	Lasermikrobearbeitung (Verdampfen zum Reinigen, Strukturieren und Abtragen) ..	469
9.2	Laser in der Kommunikationstechnik	471
9.2.1	Funktionsweise	471
9.2.2	Vor- und Nachteile	471
9.2.3	Anwendungen	472
9.3	Laseranwendungen in Medizin und Biologie	474
9.3.1	Wechselwirkungen von Laserstrahlung mit Zellen und Gewebe	474
9.3.2	Laseranwendungen in Diagnose und Therapie	476
9.3.3	Mikroskopische Laseranwendungen	480
9.4	Laser bei den Konsumgütern	483
9.4.1	Laserdrucker und Laserkopierer	483
9.4.2	Laserscanner	485
9.4.3	Laserprojektor	486
9.5	Laser in der Unterhaltung	487
9.5.1	Technischer Aufbau	487
9.5.2	Projektion	490
9.5.3	Laservideo	491
9.5.4	Räumliche Strahleneffekte	491
9.5.5	Strahlensicherheit beim Audience Scanning	493

10 Optische Sensoren und Messtechnik494

10.1	Eigenschaften optischer Sensoren	494
10.2	Optische Detektoren	495
10.2.1	Arbeit und Leistung von Lichtsignalen	495
10.2.2	Basis-Parameter von Detektoren	495
10.2.3	Fotoröhren, Fotomultiplier (PMT) und Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (SEV oder SEM)	497
10.2.4	Mikrokanalplatte (MCP: Micro Channelplate)	499
10.2.5	Festkörperdetektoren	500
10.2.6	Planck'sche Strahlung, Hintergrundstrahlung	502
10.2.7	Flächendetektoren (Array, CCD und CMOS)	503
10.2.8	Arrays und NIR-Flächendetektoren	510
10.2.9	CCD mit Bildverstärkung	511
10.2.10	CMOS-Sensoren, Active Pixel Sensoren (APS)	512
10.3	Methoden der optischen Messtechnik	513
10.3.1	Schattenprojektion	514

10.3.2	Lasertriangulation	517
10.3.3	Streifenprojektion	519
10.3.4	Fotogrammetrie	521
10.3.5	Deflektometrie	527
10.3.6	Konfokale Sensorik	530
10.3.7	Lasertracking	533
10.3.8	Individualisierte optische Messtechnik	537
10.4	Messung physikalischer Größen	538
10.4.1	Geometrische Größen	538
10.4.1.1	Abstands- und Wegsensoren	538
10.4.1.2	Winkel und Drehbewegung	549
10.4.1.3	3-D-Messtechnik	550
10.4.2	Objekterfassung	556
10.4.2.1	Lichtschranke, Lichttaster	556
10.4.2.2	Laserscanner	574
10.4.2.3	Optische Identifikation	577
10.4.3	Temperaturmessung	581
10.4.4	Fotometrie	583
10.4.5	Feuchtemessung	596
10.4.5.1	Messungen im Infrarotbereich (IR)	597
10.4.5.2	Messung im nahen Infrarotbereich (NIR)	598
10.4.5.3	Messung im ultravioletten Bereich (UV-Licht)	599
10.4.5.4	Messung mit Lichtwellenleitern	600
10.4.5.5	Diodenlaserspektrometer (TDL)	601
10.4.5.6	Messung von Wassertröpfchen (Flüssigphase)	602
10.5	Anwendungsgebiete in der Medizin und Biologie	603
10.5.1	Überblick der Nachweismethoden	603
10.5.2	Oberflächenplasmonen-Resonanz (SPR)	603
10.5.3	Interne Totalreflexionsfluoreszenz (TIRF)	605
10.5.4	Lumineszenzverfahren	606
10.5.5	Colorimetrie/ Fotometrie	608
10.6	Optische Sensoren in der Chemie	610
10.6.1	Einleitung	610
10.6.2	Komponenten des optischen Sensors	612
10.6.3	Detektionsprinzipien	614
10.6.4	Ausgewählte Anwendungen	616

11 Optische Gerätetechnik

11.1	Einleitung	618
11.2	Fotokameras	619
11.2.1	Analoge Fotokamera	619
11.2.2	Digitale Fotokamera	621
11.2.3	Kamerachips	622
11.2.4	Bauformen digitaler Kameras	623
11.2.5	Besondere Anforderungen an digitale Kameras	627
11.2.6	Zusammenfassung	629

11.3	Fernoptische Geräte	630
11.4	Mikroskopie	637
11.4.1	Klassische Lichtmikroskopie	637
11.4.2	Verfahren zur Reduktion des Hintergrunds	639
11.4.3	Super Resolution Microscopy	642
11.5	Digitale Visualisierung	647
11.5.1	Displaytechnologien	647
11.5.2	Übersicht	647
11.5.3	Funktionsprinzip von LCD, OLED und E-Paper	648
11.5.4	Pixelansteuerung und elektro-optische Kurve	650
11.5.5	Zusammenfassung	651
11.5.6	Displays in optischen Geräten	651
11.5.7	Digitale Projektoren (Beamer)	651
11.5.8	Augmented Reality und Virtual Reality	652
11.5.9	Stereosysteme	654
11.5.10	Zusammenfassung	656
11.6	Optische Messgeräte	657
11.6.1	Interferometer	657
11.6.2	Shack-Hartmann-Sensoren	663
11.6.3	Autokollimatoren	665
11.6.4	Brechzahlmessung	666
11.7	Spektralapparate	667
11.7.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	667
11.7.2	Beugungsgitter	669
11.7.3	Dispersionsprismen	672
11.7.4	Filter	674
11.7.5	Polarisation	674
11.7.6	Spektrometer	675
11.7.7	Doppelspektrometer	681
11.7.8	Spektrometer für den tiefen UV- und Vakuum-UV-Bereich	683
11.7.9	Kompakte Spektrometer mit Lichtleiterkopplung	685
11.7.10	Spezielle Anforderungen der Lichtleiterkopplung	686
11.7.11	Transmissions-Spektrometer	687
11.7.12	Prismenspektrometer	687
11.7.13	Echellespektrometer	688
11.7.14	Hyperspektrale Spektrometer (Hyperspectral Imaging Spectroscopy)	688
11.7.15	Allgemeine Funktionen	688
11.8	Spektralfotometer	694
11.8.1	Einleitung, Definitionen und Nomenklatur	694
11.8.2	Absorptions- und Reflexions-Spektralfotometer	695
11.8.3	Lumineszenz-Spektroskopie: Fluoreszenz und Phosphoreszenz	699
11.8.4	Messmethoden für dynamische Lumineszenz - Lifetime-Messung	703
11.8.5	RAMAN- und BRILLOUIN-Spektralfotometrie	709
11.8.6	Spektrale Radiometrie	715

11.9	Optometrie.	718
11.9.1	Geräte beim Augenoptiker.	718
11.9.2	Geräte für die Augenheilkunde.	724
11.10	Astronomische Teleskope	728
11.10.1	Einleitung	728
11.10.2	Bauformen.	728
11.10.3	Amateurastronomie	729
11.10.4	Terrestrische Astronomie	730
11.10.5	Weltraumteleskope.	733

12 Bildgebende Verfahren736

12.1	Definition und Übersicht.	736
12.2	Messprinzipien.	738
12.3	Optische Verfahren.	742
12.4	Abbildungskette und ihre Komponenten.	743
12.5	Lichtquellen und Beleuchtung	744
12.6	Bildwiedergabe (Empfänger).	746
12.7	Optische Systeme nach Auflösung und Vergrößerung der optischen Abbildung	749
12.8	Objekttreue	754
12.9	Komplexität bildgebender Verfahren	756
12.10	Komplexität optischer Systeme.	758
12.11	Rechenaufwand.	759
12.12	Beispiele einiger bildgebender Verfahren	760
12.12.1	Computertomografie (CT) zur Werkstoffprüfung	760
12.12.2	Akustisches Mikroskop zur Untersuchung elektronischer Bauteile	762

13 Optikdesign und Simulation764

13.1	Optikdesign.	764
13.1.1	Einleitung	764
13.1.2	Apertur und Feld, Eintritts- und Austrittspupille.	765
13.1.3	Bildfehler dritter Ordnung	770
13.1.4	Bewertung optischer Systeme.	772
13.1.5	Optikdesign-Prozess.	779
13.1.6	Optikdesign.	781
13.1.7	Optimierung	796
13.1.8	Tolerierung	802
13.1.9	Spezielle Komponenten im Optik-Design.	803
13.2	Optiksimulation	819
13.2.1	Einleitung	819
13.2.2	Streulichtsimulationen	820
13.2.3	Digitalisierung	827
13.2.4	Simulation äußerer Einflüsse	831
13.2.5	Wellenoptische Simulationen	832

14 Optische Phänomene837

14.1 Definition und Erklärungsversuche 837

14.2 Geometrische Täuschungen 839

 14.2.1 Längentäuschung 839

 14.2.2 Krümmungstäuschung 840

 14.2.3 Richtungstäuschung 840

 14.2.4 Größentäuschung 840

14.3 Räumliche Täuschungen 841

 14.3.1 Ambiguität 841

 14.3.2 Perspektiventäuschung 843

14.4 Helligkeits- und Kontrasttäuschungen 845

14.5 Bewegungstäuschungen 846

14.6 Farbtäuschungen 846

14.7 Unmögliche Figuren, Objekte und Bilder 847

14.8 Ames-Raum 849

15 Optiknormen851

Sachwortverzeichnis854

Die Grundlagen der Wirkungsweise von Lasern sind in Abschnitt 5.4 ausführlich behandelt worden. Im Folgenden wird gezeigt, wie wichtig der Laser in vielen Bereichen geworden ist und welche Anforderungen der Laser zu erfüllen hat. Bild 9.1 zeigt die wichtigsten Anwendungsfelder für Laser. Es ist erkennbar, dass der Laser in fast allen Bereichen wie der Materialverarbeitung und Fertigungstechnik, der Messtechnik und Analytik, der Kommunikationstechnik, der Medizin, der Biologie, der Konsumgüter und der Unterhaltung eine wichtige Stellung einnimmt.

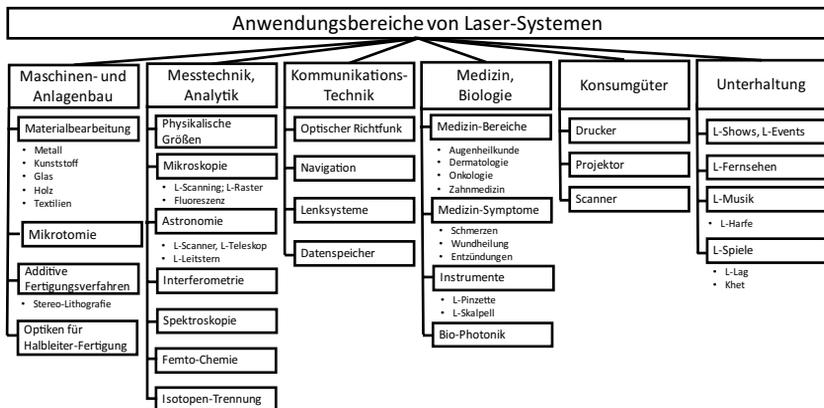


Bild 9.1 Übersicht Anwendungsfelder von Lasersystemen

■ 9.1 Laser in der Materialbearbeitung

Zunächst folgen grundlegende Informationen zu den Laserstrahlquellen, der Strahlqualität und der Wechselwirkung zwischen Laser und Material. Anschließend werden in Abschnitt 9.1.4 die Verfahren der Materialbearbeitung mit Laser im detailliert vorgestellt.

9.1.1 Laserstrahlquellen

Jeder Laser besitzt ein *aktives Medium*, in welchem eine *Besetzungsinversion* stattfindet (Abschn. 5.4.1). Die große Vielfalt an unterschiedlichen laseraktiven Materialien ermöglicht den Einsatz einer für das jeweilige Arbeitsgebiet angepassten Laserstrahlquelle. In der Lasermaterialbearbeitung sind insbesondere die Eigenschaften hohe

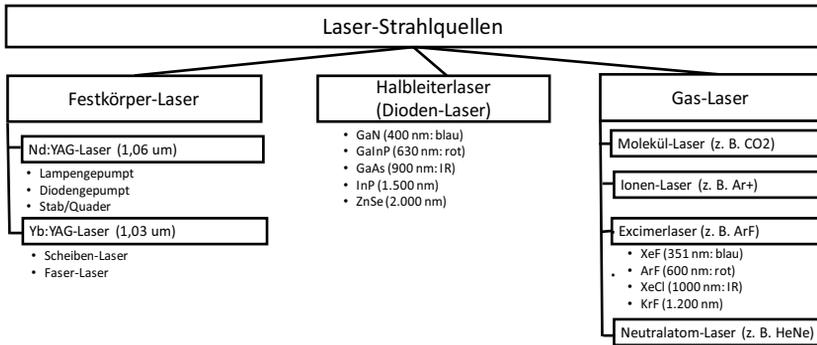


Bild 9.2 Übersicht Strahlquellen für Laser

Laserleistung, gute Strahlqualität und gute Verfügbarkeit wichtig. In Bild 9.2 ist eine Übersicht dieser Strahlquellen dargestellt.

9.1.1.1 Festkörperlaser

Der erste funktionsfähige Laser (T. H. MAIMAN, 1954) bestand aus einem Rubinstab als laseraktives Material. Er wurde mit einer Blitzlampe gepumpt und emittierte Strahlung im sichtbaren, roten Wellenlängenbereich. Im Jahre 1961 wurde der erste Festkörperlaser, ein Nd-Glaslaser gebaut.

Die Festkörperlaser haben eine universelle Bedeutung in der Fertigungstechnik erlangt. Die Strahleigenschaften reichen von ultrakurzen Pulsen im fs-Bereich (femto: 10^{-15}) bis hin zu sehr hohen Leistungen (z. B. 20 kW bis 30 kW) im kontinuierlichen Dauerbetrieb. Das *laseraktive Material* der meisten Festkörperlaser emittiert Strahlung im *IR-Bereich*. Durch Frequenzverdopplung bzw. -verdreifachung können auch der VIS- (sichtbare) und der UV-Bereich emittiert werden. Das *aktive Material* setzt sich aus dotierten Gläsern oder Kristallen zusammen. Als laseraktive Dotierung werden Elemente der Seltenen Erden (z. B. Neodym, Nd, und Ytterbium, Yb) verwendet.

Lampengepumpter Nd:YAG-Stablaser

Der Stablaser besteht aus einem mit Neodym (Nd) dotierten Kristall aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), das mit Nd:YAG abgekürzt wird (Bild 9.3). Weil bei diesem Lasertyp nur 3 % bis 5 % des eingesetzten Energiestroms für die Blitzlampen in Strahlungsleistung des Laserlichts umgewandelt wird, ist das geeignete Kühlkonzept mit koaxial verlaufenden Kühlwasserleitungen wichtig für den reibungslosen Betrieb des Resonators.

Diodengepumpter Nd:YAG-Laser

Ein Diodenlaser ersetzt die Blitzlampe (Bild 9.4). Dadurch wird ein deutlich höherer Wirkungsgrad erzielt, weil mit der selektiven Strahlungsleistung des Diodenlasers sehr effizient gepumpt werden kann. Weitere Vorteile sind: geringere thermische

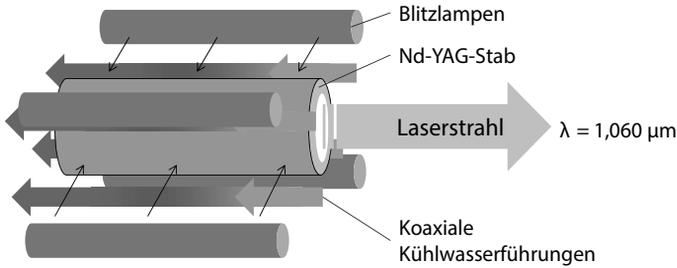


Bild 9.3 Aufbau des lampengepumpten Nd:YAG-Stablasers

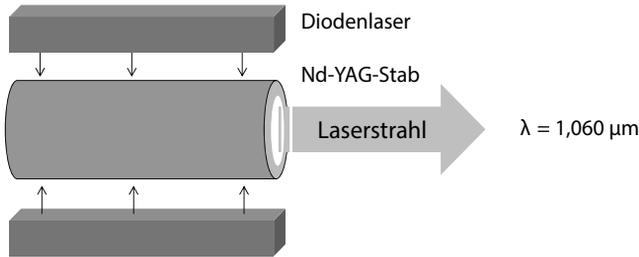


Bild 9.4 Aufbau des Diodenlaser-gepumpten Nd:YAG-Stablasers

Belastung, Verbesserung der Strahlqualität und geringere Servicekosten durch die wesentliche längere Lebensdauer der Dioden.

Slab laser

Beim Slab laser (*Slab*: Quader mit einer Dicke von mehreren Millimetern) wird das Resonatorvolumen in Form eines flachen Quaders ausgebildet (Bild 9.5). Die starke Vergrößerung des Verhältnisses Oberfläche zu Volumen ermöglicht ein stark verbessertes Kühlkonzept, womit die Strahlqualität erhöht werden kann.

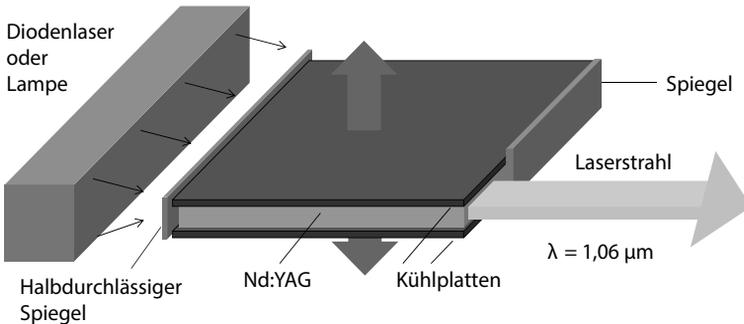


Bild 9.5 Slab laser

Scheibenlaser

Der Scheibenlaser (Bild 9.6) zeichnet sich durch ein weiter verbessertes Kühlkonzept aus. Das laseraktive Material wird als sehr dünne Scheibe nur noch von einer Stirnseite gekühlt. Damit verkleinert sich aber auch das Volumen. Deshalb wird statt mit Neodym (1 %) mit Ytterbium (30 %) dotiert. Ytterbium ermöglicht eine höhere Effizienz mit geringerem Verlustwärmestrom. Die zweite Stirnseite der Scheibe wird zum Einkoppeln der Pumpstrahlung verwendet.

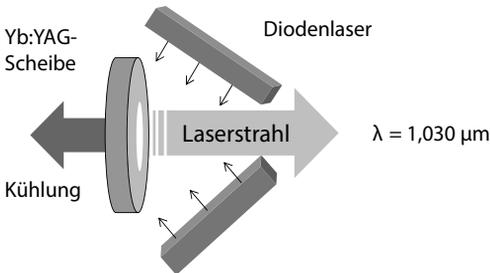


Bild 9.6 Scheibenlaser

Die Pumpstrahlung wird aufgrund der geringen Dicke des Kristalls nur schwach absorbiert. Deshalb wird die transmittierte Strahlung mit Spiegeln mehrfach durch den Kristall geführt. Bild 9.7 zeigt eine Aufnahme des 4-kW-Scheibenlasers TLD4002 der Fa. Trumpf im LaserApplikationsZentrum der Hochschule Aalen. Werden mehrere Scheiben kombiniert, können Leistungen bis zu 16 kW erzeugt werden.



Bild 9.7 Scheibenlaser TLD4002 der Fa. Trumpf im LaserApplikationsZentrum der Hochschule Aalen

Mithilfe eines akusto-optischen Modulators kann der Scheibenlaser auch für den Pulsbetrieb verwendet werden. Dabei werden Pulse zunächst in einem Oszillator erzeugt und anschließend mit einem Scheibenlaser verstärkt. Pulsdauern im ns- bis zu fs-Bereich sind dabei mit hohen mittleren Leistungen möglich.

Faserlaser

Das laseraktive Medium ist hier ein dotiertes Quarzglas in Form einer Glasfaser (Bild 9.8). Die häufigste Dotierung ist, wie beim Scheibenlaser, Ytterbium (1 030 nm). Es werden aber auch Erbium (1 550 nm), Neodym (1 060 nm) und Thulium (1 500 nm) angewandt. Je nach Anordnung können sehr hohe Laserleistungen von bis zu 50 kW erzeugt werden. Ein kleiner Faserdurchmesser ermöglicht eine hohe Strahlqualität.

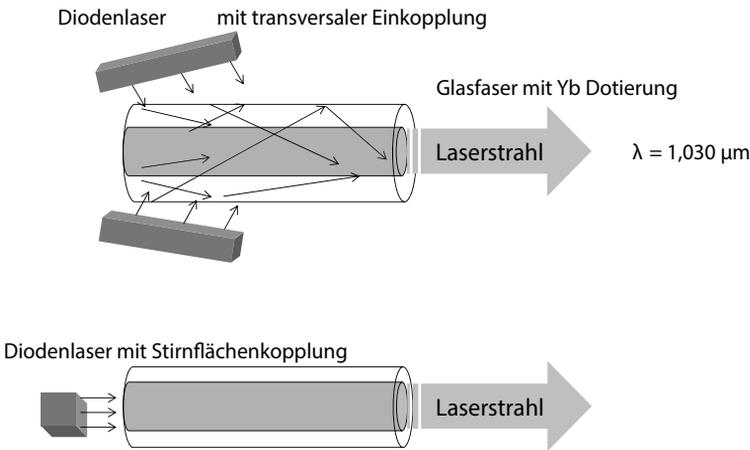


Bild 9.8 Faserlaser

Aufgrund seiner großen Oberfläche kann er sehr gut gekühlt werden. Scheiben- und Faserlaser haben derzeit die beste Strahlqualität. Das Licht der Diodenlaser zum Pumpen des Faserlasers wirkt über Mehrfachreflexionen in einer Lichtleitfaser auf den laseraktiven Faserkern ein. Der Faserlaser besitzt einen robusten Aufbau mit wenigen optischen Elementen und kann sogar mobil eingesetzt werden. Systeme mit bis zu 30 kW sind auf dem Markt erhältlich.

Der Faserlaser steht für die Materialbearbeitung als universelles, multifunktionales Werkzeug für den kontinuierlichen Hochleistungsbetrieb bis zu ultrakurzgepulsten Systemen mit hohen Pulsspitzenleistungen und hoher mittlerer Leistung bei hohen Strahlqualitäten zur Verfügung. Bild 9.9 zeigt einen Faserlaser in Funktion.

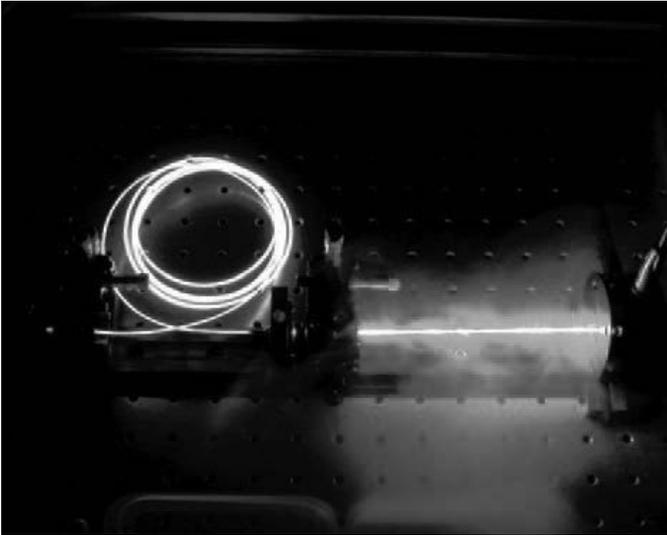


Bild 9.9 Foto eines Faserlasers (Quelle: H. ZELLMER, A. TÜNNEMANN: Physik Journal 4 (2006) Nr. 6)

9.1.1.2 Halbleiterlaser (Diodenlaser)

Der Halbleitertyp bestimmt die Wellenlänge der Strahlung, die einen großen Bereich von 400 nm bis 2 000 nm abdeckt (Bild 9.2). Weil einzelne Dioden nur wenige Milliwatt Leistung bieten, werden mehrere Hundert Dioden zu einem *Laserbarren* zusammengefasst. Ein Laserbarren von 500 Dioden liefert etwa 50 W bis 100 W. Für höhere Leistungen werden die vorgefertigten Barren entsprechend zu einem *Laserstapel* vereint. Bild 9.10 zeigt im linken Teilbild den Aufbau eines Halbleiterlasers und im rechten Teilbild einen in der Praxis eingesetzten Diodenlaser mit 11 Halbleiterstapeln und einer Strahlungsleistung von 1 kW. Weil die Laserbarren Licht unterschiedlicher Wellenlänge emittieren, sorgen selektive Spiegel dafür, dass nur die gewünschten Wellenlängen reflektiert werden. Sie werden dann in einem Lichtleitkabel zu den entsprechenden Einsatzstellen geleitet.

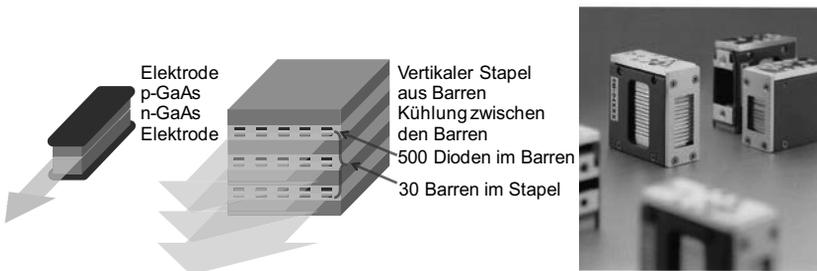


Bild 9.10 Aufbau eines Halbleiterlasers (linkes Bild) und der als Laserquelle eingesetzte Halbleiterlaser (Quelle: TRUMPF GmbH + Co.KG)

Die Diodenlaser haben in der Materialbearbeitung eine bedeutende Rolle erlangt, die in der Zukunft noch zunehmen wird. Die Lebensdauer für industrielle Anwendungen wird mit 30 000 Stunden zugesichert. Neben den geringen Abmessungen zeichnen sie sich durch extrem hohe Wirkungsgrade von bis zu 60 % aus. Die Strahlung kann fasergeführt oder als Freistrahler bereitgestellt werden. Zukünftige Entwicklungen zielen auf die Erhöhung der Strahlqualität bei hohen Laserleistungen ab.

9.1.1.3 Gaslaser

Gaslaser sind universell verwendbar; denn mit ihnen lässt sich fast jede Wellenlänge realisieren. Zum Pumpen wird fast ausschließlich das Verfahren der *Gasentladung* verwendet. Als Betriebsart lässt sich der *kontinuierliche* (cw) und *gepulste* (pw) Betrieb realisieren. Minimale Pulsdauern im Bereich weniger Nanosekunden sind möglich, zumeist wird aber mit den Gaslasern im Bereich Millisekunden gearbeitet. In der Materialbearbeitung sind die CO_2 -Laser in vielfältiger Ausprägung und der *Excimerlaser* von Bedeutung.

CO_2 -Gaslaser

Das laseraktive Medium ist ein Gas, in dem der Laserstrahl erzeugt wird (Bild 9.11). Je nach Zusammensetzung ergeben sich unterschiedliche Wellenlängen des Laserstrahls. Der Standard für Industrielaser hat eine Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ mit den Gasanteilen $^{1/13} \text{CO}_2$; $^{2/13} \text{N}_2$ und $^{10/13} \text{He}$ (oder: $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He}$ wie 0,5 : 2 : 5). Das aktive Lasergas ist das *CO_2 -Gas*. Stickstoff und Helium unterstützen den Prozess. Das Gasgemisch wird durch Gleichstrom oder durch Wechselstrom (Hochfrequenzfelder) im sogenannten *Resonator* angeregt. Es entsteht dabei eine Gasentladung. N_2 nimmt Energie in Form von Schwingungen auf und überträgt die Energie durch Stöße auf das CO_2 , das die Energie ebenfalls in Form von Schwingungen speichert. Helium unterstützt die Prozesse im Resonator durch Stöße mit den CO_2 -Molekülen. Dadurch werden die unteren Schwingungszustände des CO_2 besser entleert. Helium hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit, die bei der Kühlung des Resonators eine große Rolle spielt.

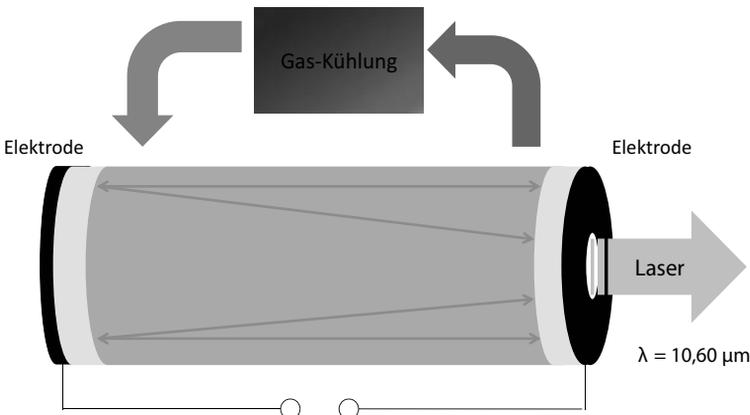


Bild 9.11 Prinzip eines CO_2 -Lasers mit längs geströmtem Resonator

Tabelle 9.1 Eigenschaften von CO₂-Lasern (*P*: Leistung; *M*²: Beugungsmaßzahl; Maß für die Qualität eines Laserstrahls; ideal ist *M*² = 1; Abschn. 4.6: GAUSS'sche Strahlen; Abschn. 9.1.3: Strahlqualität)

Richtung Gasstrom	Geschwindigkeit Gas	Gasentladung	Eigenschaften
Quer zur Strahlachse	Schnelle Strömung mit Umwälzpumpe	Gleichspannung (etwa 12 kV)	Hohe Leistung geringe Strahlqualität keine Bedeutung mehr
Längs zur Strahlachse	Langsame Strömung Diffusionsgekühlt	Gleichstrom	Geringer Gasbedarf $P_I/I = 120 \text{ W/m}$ $M^2 < 1,25$
Längs zur Strahlachse	Schnelle Strömung mit Turboradialgebläse	HF: Hochfrequenzanregung Pulsbetrieb mit $f \sim 10 \text{ Hz bis } 100 \text{ kHz}$	Kompakter, stabiler Resonator hohe Modularität viele Leistungsklassen
„Quasistationär“ Längs zur Strahlachse	Freie Konvektion (Gasdruck) (diffusionsgekühlte CO ₂ -Laser)	HF: Hochfrequenzanregung	Geringer Gasbedarf CO ₂ -Slablaser Leistungsskalierung über Elektrodenfläche
Keine Strömung „Sealed Off“	Abgeschlossenes System Durch Zugabe von H ₂ und O ₂ wird CO zu CO ₂ reduziert	HF: Hochfrequenzanregung $f \sim 13 \text{ MHz}$ Elektroden außerhalb Resonator	Sehr kompakt Gute Systemintegration $P_{\text{max}} = 1 \text{ kW}$ $M^2 < 1,2$

Es gibt verschiedene Bauformen für CO₂-Laser, deren Eigenschaften sich auf die Leistung, die Strahlqualität und die Betriebskosten auswirken. Insbesondere unterscheiden sich die CO₂-Laser in ihren Kühlkonzepten, d. h., wie der Abtransport der Verlustwärme aus dem Resonator erfolgt (Tabelle 9.1).

Die längsgeströmten CO₂-Laser haben eine bessere Strahlqualität als die quer geströmten. Sogar bei hohen Leistungen wird eine rotationssymmetrische Leistungsverteilung im Laserstrahl erreicht. Hohe Leistungen sind nur mit einem ausreichend langen Resonator möglich. Dieser kann mithilfe von Spiegeln gefaltet werden, sodass ein relativ kompakter Aufbau möglich ist (Bild 9.11). Die Strömungsgeschwindigkeit kann 500 m/s betragen. Die Elektroden regen die Gasentladung berührungslos über kapazitive Kopplung hochfrequenter Wechselspannung von 13,56 MHz an.



Bild 9.12 Gefalteter CO₂-Resonator (Quelle: TRUMPF GmbH + Co.KG)

In Bild 9.12 ist ein Hochleistungslaser der Firma Trumpf aus der Produktserie TruFlow dargestellt. Der Resonator ist quadratisch über zwei Ebenen aufgebaut, sodass sich die Resonatorlänge aus acht Röhren zusammensetzt. Maximale Leistungen von bis zu 20 kW Laserleistung sind auf diese Weise möglich.

Diffusionsgekühlter Resonator (CO₂-Slablasers)

Der diffusionsgekühlte Resonator wird auch *quasistationär* bezeichnet. Nur geringe Mengen an Resonatorgas werden ausgetauscht. So können die Dissoziationsprodukte wie beispielsweise Kohlenstoffmonoxid (CO) ausgetauscht werden. Aufgrund der Bauform des CO₂-Slablasers entsteht ein rechteckiges Strahlprofil, das anschließend in einen runden Querschnitt transformiert wird. Die Anregung erfolgt wie beim schnell und längs geströmten CO₂-Laser mit Hochfrequenzanregung (Bild 9.13). Die Laserleistung ist in weiten Grenzen über die Größe der Elektrodenflächen einstellbar. Ein *wartungsfreies* System, den sogenannten *sealed-off-Laser*, erreicht man durch Zugabe von Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) ins Resonatorgas. Mithilfe einer platiniierten Elektrode kann CO so reduziert werden, dass wieder das Lasergas CO₂ entsteht.

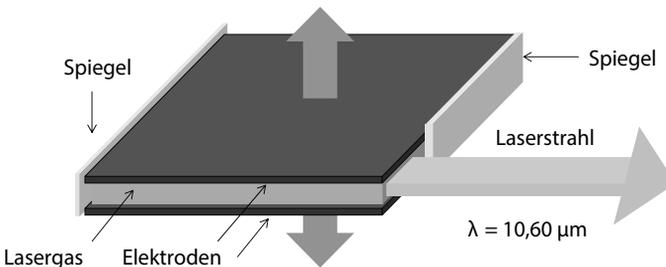


Bild 9.13 Prinzip eines CO₂-Slablasers

Excimerlaser

Die Excimerlaser sind die *leistungsstärksten gepulsten UV-Laser* am Markt. Ein kontinuierlicher Betrieb ist aufgrund des Laserprinzips nicht möglich. Der Begriff Excimer setzt sich aus „excited“, also angeregt, und „Dimer“, das ist ein zweiatomiges Molekül, zusammen. Im Resonator werden die laseraktiven, instabilen Moleküle aus Edelgas und Halogen oder aus zwei Edelgasatomen gebildet. Laseraktive Verbindungen sind zum Beispiel ArF, KrF, XeCl, Ar₂ und Kr₂. Im angeregten Zustand sind die Moleküle kurzzeitig stabil. Durch stimulierte Emission gelangen sie in einen angeregten Zustand. Dort zerfällt das instabile Molekül sofort wieder. KrF- und ArF-Excimerlaser werden in der Fotolithografie für die Waferherstellung eingesetzt. Mit den kurzen UV-Wellenlängen von 248 nm (KrF) bzw. 193 nm (ArF) können in Fotolack ca. 30 nm breite Strukturen hergestellt werden. Anwendungen in der Medizintechnik sind weit verbreitet.

9.1.2 Strahlqualität

Die Laserstrahlen sind *Gauss'sche* Strahlen, die seitlich begrenzt sind und daher Beugungserscheinungen aufweisen. Sie werden in Abschnitt 4.6 ausführlich behandelt. Die wichtigsten Eigenschaften sind in Bild 4.88 zusammengestellt.

Die *Fokussierbarkeit* des Laserstrahls ist für die Anwendungen in der Fertigungstechnik besonders wichtig; denn eine gute Fokussierbarkeit ermöglicht eine punktgenaue Materialbearbeitung. Zur Beschreibung der Strahlqualität werden nur zwei Strahlparameter benötigt: der *Fokussdurchmesser* d_F und der *Divergenzwinkel* θ_F . Es gilt für das Strahlparameterprodukt $SPP = d_F \cdot \theta_F / 4$. Diese Kennzahl ist eine *Propagationskonstante*, weil das Strahlparameterprodukt SPP beim Durchgang eines Laserstrahls durch beliebige lineare Optiken *konstant* bleibt. Das bedeutet, dass Laserstrahlen mit einem *großen Fokussdurchmesser* einen *kleinen Divergenzwinkel* aufweisen und umgekehrt. Weil die Laser, vor allem bei hohen Leistungen, bei höheren transversalen Moden (stehende Wellen in x - und y -Richtung) schwingen, ist der Strahldurchmesser um einen *Vergrößerungsfaktor* M größer als der ideale GAUSS'sche Strahl. Deshalb wird die *Beugungsmaßzahl* als *Strahlqualitätskennzahl* M^2 eingeführt und das Strahlparameterprodukt SPP wie folgt umgeschrieben: $SPP = M^2 \cdot \lambda / \pi$. Das Strahlparameterprodukt hängt lediglich von der Wellenlänge λ des Laserstrahls und seiner Beugungsmaßzahl M^2 ab. Diese ist nach DIN EN ISO 11145 ein Maß für die *Qualität* des Laserstrahls. Für einen idealen GAUSS-Strahl ist $M^2 = 1$. Steigt die Beugungsmaßzahl an, so lässt sich der Laserstrahl nicht mehr so scharf fokussieren. So ist für einen CO₂-Laser mit einer Leistung von 3 kW im Bereich $M^2 < 1,25$.

Weitere Parameter des Strahls sind die *Brennweite* f der Fokussierlinse und der Durchmesser des Laserstrahls an der Fokussierlinse d_L . Eine wichtige Größe des fokussierten Laserstrahls ist seine *Rayleigh-Länge* $z_{F,R}$. Die Länge gibt an, in welchem Bereich näherungsweise Materialbearbeitung durchgeführt werden darf, weil sich die Intensität auf dieser Strecke nur wenig ändert. Die RAYLEIGH-Länge des fokussierten Strahls lässt sich in guter Näherung aus dem Verhältnis der Strahlparameter ermitteln: $z_{R,F} = d_F / \theta_F$.

Eine höhere Strahlqualität lässt sich für verschiedene Zwecke nutzen. So ist der Fokussdurchmesser eines Strahls mit höherer Strahlqualität kleiner (Bild 9.14 oben) und die Intensität im Fokus größer. Reicht hingegen der Fokussdurchmesser bzw. die Intensität aus, so kann man mit höherer Strahlqualität die Divergenz verkleinern (Bild 9.14 Mitte) und damit die RAYLEIGH-Länge und somit die Tiefenschärfe vergrößern. Weiterhin erlaubt die größere Brennweite der Fokussierlinse einen größeren Abstand des Werkstücks von der Fokussieroptik. So kann die Optik besser vor Spritzern geschützt werden.

Benötigt der Anwender keinen kleineren Fokussdurchmesser und keinen größeren Werkzeugabstand, dann kann der Entwickler einer Laseranlage mit einem kleineren Durchmesser des Rohstrahls arbeiten. Das spart wertvollen Bauraum und senkt die bewegten Massen in der Optik (Bild 9.14 unten).

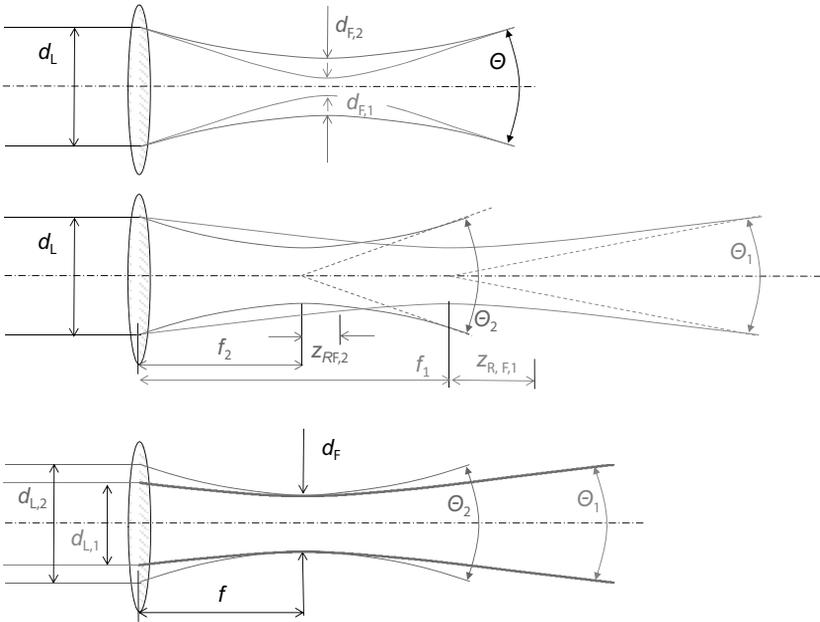


Bild 9.14 Fokussierte Laserstrahlen mit unterschiedlicher Strahlqualität ($M_1^2 \ll M_2^2$)

9.1.3 Wechselwirkung Strahlung mit Materie

Trifft ein Laserstrahl auf Material, so wird dieses entsprechend verändert. In den folgenden Abschnitten werden die Energieströme, die zeitliche und räumliche Verteilung der Prozessleistung der Laser untersucht sowie die Wirkungsgrade vorgestellt.

9.1.3.1 Energieströme und Wirkungsgrade

Bei der Lasermaterialbearbeitung wird das Werkstück durch absorbierte Strahlung lokal erwärmt. Ein effizienter Einsatz der Laserleistung (typische Einheit: Watt) erfordert eine hohe Umwandlungsrate der einfallenden Laserstrahlung in den für den Fertigungsprozess relevanten Prozesswärmestrom (übliche Einheit: Joule pro Sekunde). Die *Energieströme* bei der Lasermaterialbearbeitung sind in Bild 9.15 als *Sankey-Diagramm* dargestellt. Die fokussierte Laserleistung P_L wird am Werkstück entweder reflektiert (P_R) oder absorbiert (P_A). Eine Transmission der Strahlung durch das Werkstück tritt in seltenen Fällen auf und wird in dieser Betrachtungsweise nicht berücksichtigt.

Ein *zusätzlicher Wärmestrom* zu der absorbierten Laserleistung kann durch eine exotherme, chemische Reaktion erzeugt werden. Dazu wird insbesondere beim Laserbrennschneiden Sauerstoff als Schneidgas verwendet. Der Anteil des *chemischen Wärmestroms*, P_C , kann dabei Werte von bis zu 80 % des gesamten Wärmestroms annehmen.

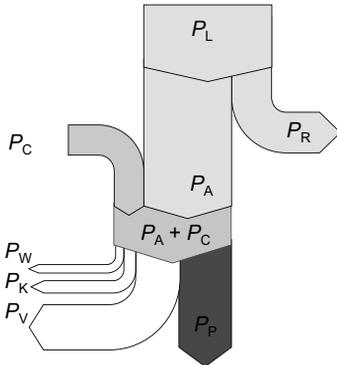


Bild 9.15 Energieströme bei der Lasermaterialbearbeitung

Der zugeführte Wärmestrom kann nicht vollständig für den Fertigungsprozess verwendet werden. Ursache sind die Verlustwärmeströme von der heißen Wechselwirkungszone durch *Wärmestrahlung* P_W und *Konvektion* P_K an die Umgebung sowie durch Wärmeleitung in die kälteren Bereiche innerhalb des Werkstücks. Die Anteile Wärmestrahlung und Konvektion sind vernachlässigbar klein gegenüber dem *Prozesswärmestrom* P_P und dem verbleibenden durch Wärmeleitung verursachten *Verlustwärmestrom* P_V (P_K und $P_R \ll P_V$ und P_P).

Die Berechnung der einzelnen Wirkungsgrade ist komplex und nur für einzelne, stark vereinfachte Modelle möglich. Der Absorptionswirkungsgrad η_A , gemäß $P_A = \eta_A \cdot P_L$, ist für unterschiedliche Einfallswinkel, Wellenlängen und Oberflächenbeschaffenheiten gründlich untersucht. Im Wesentlichen kann man die *Zunahme* des *Absorptionskoeffizienten* mit *abnehmender Wellenlänge* (Vorteil der Festkörperlaser gegenüber den CO_2 -Lasern), mit *zunehmendem Einfallswinkel* (es gelten die FRESNEL'schen Gleichungen, nach denen sich ein Maximum der Absorption beim BREWSTER-Winkel einstellt) und mit *zunehmender Rauheit* der Oberfläche beobachten. Der thermische Wirkungsgrad η_{Th} gemäß $P_P = \eta_{Th} \cdot P_A$ ist nur empirisch ermittelbar.

Der Prozesswirkungsgrad η_p ergibt sich als Produkt der beiden anderen Wirkungsgrade, sodass gilt: $\eta_p = \eta_A \cdot \eta_{Th}$. Er lässt sich wegen η_{Th} nicht berechnen. Mit der Beziehung $P_P = \eta_p \cdot P_L$ lässt sich aber die *Proportionalität* des *Prozesswirkungsgrads* zum *energiespezifischen Volumen* V_E des bearbeiteten Materials zeigen, sodass gilt: $\eta_p \sim V_E$. Letzteres berechnet sich gemäß $V_E = F \cdot P_L / v$ (Einheit $[V_E] = \text{m}^3/\text{J}$) aus messtechnisch einfach zugänglichen Größen, nämlich der *Vorschubgeschwindigkeit* v des Laserstrahls und der *Querschnittsfläche* F des bearbeiteten Materials, das sich zum Beispiel aus einem Querschliff bestimmen lässt. Ein *großes energiespezifisches Volumen* entspricht demnach einem *hohen Prozesswirkungsgrad*. Diese Größe hat sich in der Praxis bewährt. Dementsprechend kann mithilfe des experimentell ermittelten energiespezifischen Volumens und durch Vergleich zum Beispiel mit Literaturwerten die *Effizienz* eines Laserprozesses abgeschätzt werden. Entsprechende Werte werden weiter unten in Abschnitt 9.1.5 vorgestellt.

9.1.3.2 Einwirkdauer und Leistungsdichte

Die zeitliche und räumliche Verteilung der Prozessleistung auf der Werkstückoberfläche bestimmt den physikalischen Prozess der Materialbearbeitung (Bild 9.16). Eine *großflächige Verteilung* der Leistung führt zu *geringer Leistungsdichte* auf der Oberfläche. So findet bei kontinuierlicher Bestrahlung mit zum Beispiel 10^{-2} kW/mm² lediglich ein *Aufwärmen* des bestrahlten Festkörpers statt. Dieser Vorgang wird für das *Laserhärten*, *Laseranlassen* und teilweise beim *Laserlöten* eingesetzt. Eine stärkere Fokussierung der Leistung führt zum *Aufschmelzen der Oberfläche*, wie es für das *Laserpolieren*, *Wärmeleitschweißen* oder das *Auftragsschweißen* (auch Cladding) verwendet wird. Typische Intensitäten sind 1 kW/mm² bei einer Einwirkzeit im Bereich von Millisekunden (ms). Wird beispielsweise beim Wärmeleitschweißen die sogenannte Schwellintensität von ungefähr 10^1 kW/mm² überschritten, findet zentral im heißesten Punkt eine Verdampfung der Schmelze statt. Dieser Phasenübergang flüssig/dampfförmig ist mit einer enormen Volumenänderung verbunden. Der Dampf strömt in Richtung des Laserstrahls ab und hinterlässt eine Vertiefung in der Schmelze, sodass der Strahl immer tiefer in das Material eindringen kann. Das *Schweißen* mit einer *Dampfkapillare* nennt man deshalb auch *Tiefschweißen*. Auch *Laserschneidprozesse* werden oberhalb der Schwellintensität im 3-Phasen-Bereich ausgeführt. Eine gepulste Laserbearbeitung mit Pulsdauern von Millisekunden, aber einer deutlich weiter erhöhten Intensität auf etwa 10^3 kW/mm² sublimiert das Material fast vollständig. Lediglich kleine Bereiche werden aufgeschmolzen, die vom ausströmenden Dampf teilweise als Tropfen mitgerissen werden. Dieser sehr effiziente *Materialabtrag* wird für das *Bohren* und *Sublimationsschneiden* genutzt. Beim *Gravieren* und *Abtragen* tritt auch Sublimation und teilweise sogar Ionisation, also Plasmabildung, auf. Alle vier physikalischen Phasen (Festkörper, Schmelze, Dampf und Plasma) des Werkstücks treten auf engstem Raum auf. Die Intensität beträgt 10^4 kW/mm² und die Einwirkdauer Nanosekunden. Die Ausbildung der Schmelze und damit der Auswurf von Schmelztropfen kann unterdrückt werden, indem man die ultrakurzen Pulse eines Pikosekundenlasers für die Materialbearbeitung verwendet. Der Werkstoff wird dabei *strukturiert* und es tritt *Sublimation*, *Ionisation* oder sogar *Dissoziation* auf.

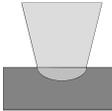
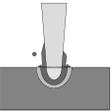
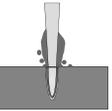
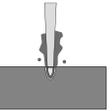
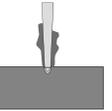
10 ⁻² kW/mm ²	10 ⁰ kW/mm ²	10 ¹ kW/mm ²	10 ³ kW/mm ²	10 ⁴ kW/mm ²	10 ⁶ kW/mm ²
Aufwärmen	Schmelzen	Schmelzen und Verdampfen	Verdampfen	Verdampfen und Ionisieren	Sublimieren und Dissoziieren
Dauer					
s	ms	ms	ms	ns	ps
					
Beispiele					
Härten, Anlassen, (Löten)	Umschmelzen, Polieren, Schweißen	Tiefschweißen, Schneiden	Bohren	Abtragen, Gravieren	Strukturieren

Bild 9.16 Materialverhalten bei verschiedenen Leistungen und Pulszeiten von Lasern

9.1.4 Laser-Materialbearbeitung

Die Verfahren der Lasermaterialbearbeitung werden in den folgenden Abschnitten nach aufsteigender Leistungsdichte und abnehmender Wechselwirkungszeit nach Bild 9.16 behandelt.

9.1.4.1 Aufwärmen zum Bearbeiten von Oberflächen

Ein Verfahren mit geringer Leistungsdichte ist das Laserhärten (Bild 9.17). Dazu wird die Stoffeigenschaft der Oberfläche verändert.

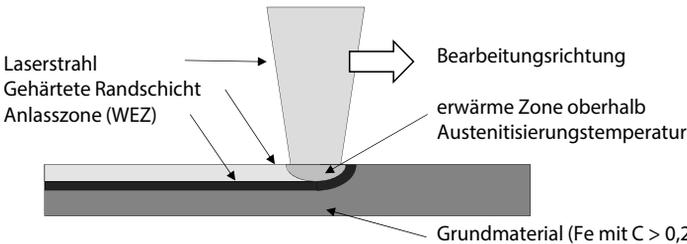


Bild 9.17 Aufwärmen von Oberflächen: links: Schema; rechts: Beispiel für Laserhärten (Quelle: rofin)

Das *Laserhärten* kann nur für Stähle und Gusseisen, also Eisenwerkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt von über 0,2 Prozent, eingesetzt werden. Die Strahlungsenergie erwärmt auf die sogenannte Austenitisierungstemperatur. Dazu wird typischerweise die Temperatur der Oberfläche in einem Bereich von 900 °C bis 1 400 °C geregelt. Bei dieser Temperatur ordnen sich die Eisen- und Kohlenstoffatome in einer anderen Struktur an. Der Laserstrahl wird dabei kontinuierlich über das Werkstück bewegt, und hinter dem wärmenden Strahl wird das warme Eisen vom eigenen, kalten Grundmaterial auf Raumtemperatur abgeschreckt (Selbstabschreckung). Die hohe Abkühlgeschwindigkeit lässt die Atome an Ort und Stelle einfrieren und es entsteht ein verspanntes, sehr hartes Metallgefüge, der Martensit. Je geringer die Geschwindigkeit des Laserstrahls und je größer die Fläche des bestrahlten Werkstücks ist, desto tiefer kann die Härtezone in den Werkstoff reichen. In jedem Fall wird aber nur eine *Randschicht* in der Größenordnung von 0,1 mm bis 1,5 mm gehärtet. In Spezialfällen werden auch wenige Millimeter tief gehärtet. Dabei wird der Laserstrahl auf eine Fläche (Rechteck) oder eine Linie aufgeweitet, deren Breite mehrere Zentimeter betragen kann.

Konventionelle Randschichtverfahren sind das *Flammhärten* und das *Induktionshärten*. Der Vorteil des Laserhärtens ist die Selbstabschreckung, bei der keine externe Kühlung zur Abschreckung benötigt wird. Die *geringe Wärmebelastung* und die *Flexibilität* der Strahlführung ergeben viele weitere Vorteile wie den *geringen Verzug* (keine Nacharbeit) oder *Wirtschaftlichkeit* bereits bei *kleinen Losgrößen*. Der Nachteil ist allerdings eine Anlasszone am Rand der gehärteten Schicht. In diesem Bereich wird das Material zwar auch erwärmt, die Temperatur bleibt aber unterhalb der Austenitisierungstemperatur. Innerhalb dieser Wärmeeinfluss- oder Anlasszone wird der Stahl lediglich angelassen und die Härte ist gering.

9.1.4.2 Schmelzen zur Behandlung von Oberflächen

Bei einer erhöhten Leistungsdichte von etwa 1 kW/mm^2 wird das Material an der Oberfläche aufgeschmolzen (Bild 9.16). Diese Eigenschaft wird für verschiedene Anwendungen ausgenutzt:

Umschmelzen

Wenn die aufgeschmolzene Oberfläche erstarrt, dann kann sich ein neues Gefüge bilden, d. h., eine neue Legierung entsteht. Durch entsprechende Wärmebehandlungen können in der neu erstarrten Legierung *härtere* Oberflächen entstehen (z. B. durch rasche Abkühlung der Schmelze). Die dazu benötigte Leistungsdichte liegt bei 20 W/mm^2 bis 30 W/mm^2 .

Polieren

Mit dem Verfahren können aber auch raue Oberflächen poliert werden. Bild 9.18 zeigt links das Schema des Prozesses, und auf der rechten Seite ist eine polierte Oberfläche im Vergleich zur unpolierten zu sehen.

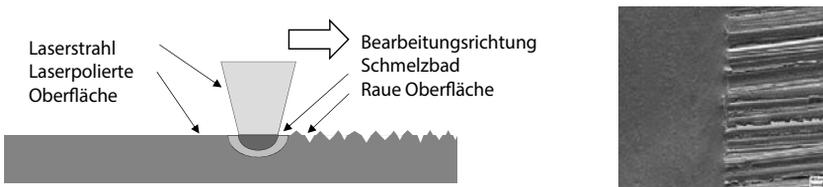


Bild 9.18 Laserpolieren: links: Schema; rechts Beispiel für Laserpolieren (Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG)

Beschichten

Werden Zusatzwerkstoffe in die Schmelze gebracht (z. B. durch eine Düse direkt in die Schmelze), so kann man die Oberflächeneigenschaften der Werkstoffe verändern. Meist sollen die umgeschmolzenen Oberflächen *korrosionsbeständiger* (Zusatzstoffe: Karbide) oder *verschleißfester* (Zusatzstoffe: Chrom, Nickel und Titan) sein. Diese Schicht ist meist zwischen $0,5 \text{ mm}$ und 2 mm dick. Die Zusatzwerkstoffe können durch zwei Verfahren in die Schmelze gelangen. Zum einen können sie durch eine Düse direkt in die Schmelze *gespritzt* werden. Bei der zweiten Möglichkeit wird der Zusatzwerkstoff *direkt* auf der *Oberfläche* aufgebracht, und der Laser *verschmilzt* beide Werkstoffe miteinander. Für diese Anwendung braucht man Leistungsdichten von 100 W/mm^2 bis 1000 W/mm^2 .

9.1.4.3 Schmelzen zum Aufbauen und Laserformen (Urformen)

Bild 9.19 zeigt die entsprechenden Verfahren in einer Übersicht.

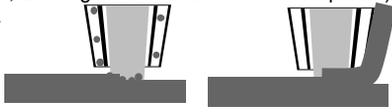
- 1) Selektives Lasersintern (SLS)
- 2) Der Laser schmilzt kleine Partikel aus Kunststoff, Keramik, Glas oder Metall in eine dreidimensionale Form
 - a) Selektives Lasersintern von Kunststoffgranulat
 
 - b) Indirektes Lasersintern von Metall und Sand (Kunststoffhaut um Metall und Sand schmilzt auf)
 
 - c) Direktes selektives Lasersintern von Metallen (2 Metalle hoher und geringer Schmelztemperatur)
 
 - d) Selective Laser Melting, SLM, Lasercusing (Metallpulver auf einem Metall-Substrat)
 
- 2) Stereolithografie (STL) (UV-Licht härtet flüssige, monomere Kunststoffschicht aus)
- 3) Lamierte Objekt-Modellierung (LOM) (Teile werden Layer für Layer aufgebaut, Laser geschnitten und in Teile verpresst)
- 4) Direkte Materialauftragung durch Laser (DMD: Direct Laser Deposition: (Metallpulver wird direkt in den Laserstrahl gespritzt, aufgeschmolzen und erstarrt an der Oberfläche)
 

Bild 9.19 Verfahren zum Laserformen

Das *selektive Lasersintern* (SLS) formt Pulverkörner (Durchmesser zwischen 10 μm und 200 μm) aus Kunststoff, Metall und Glas zu einem gewünschten dreidimensionalen Bauteil. Der Aufbau geschieht Schicht um Schicht. Bild 9.19 zeigt dazu vier Verfahren:

- a) Selektives Lasersintern von *Kunststoffgranulat* (Polyamid oder Polystyrol). Die Schichtdicke beträgt von 0,05 mm bis 0,2 mm.
- b) *Indirektes Lasersintern* von *Metall* und *Sand* (meist spezieller Gießereisand). Dabei schmilzt die Kunststoffhaut um das Metall oder den Sand auf und es entsteht ein sogenannter *Grünling*. Dieser bestimmt beim Gießen die Form des Gussteiles.
- c) *Direktes selektives Lasersintern* (DMLS: Direct Metal Laser Sintering). Dabei schmilzt der Laser ein Metallpulver aus mehreren Bestandteilen unterschiedlicher Schmelztemperaturen (z. B. aus Eisenpulver und Bindemitteln) so auf, dass das Bindemittel zuerst schmilzt und die Eisenpartikel umschließt. Die Dicken betragen zwischen 0,02 mm und 0,1 mm.
- d) *Selektives Laserschmelzen* (SLM: Selective Laser Melting). Der Laser schmilzt nur bestimmte Teile auf.

Das zweite Verfahren ist die *Stereolithografie* (STL). Zähflüssige Kunststoffe (z. B. Epoxidharz) härten bei UV-Licht aus. Ein Laserstrahl fährt entsprechend der Konturen über das Harzbad und härtet diese Schicht aus (Schichtdicken zwischen 0,03 mm und 0,15 mm). Dann senkt sich das ausgehärtete Teil ab und der Laserstrahl härtet die nächste Schicht. Schicht für Schicht entsteht das Bauteil, das zum Schluss in einem UV-Ofen unter UV-Licht vollständig ausgehärtet wird.

Im dritten Verfahren, dem *Laser-Object-Modelling* (LOM), wird das Bauteil ebenfalls Schicht für Schicht aufgebaut, durch einen Laser entsprechend zugeschnitten und als Teile verpresst.

Das vierte Verfahren nach Bild 9.19 ist das *Auftragsschweißen* (DMD: Direct Metal Deposition). Durch den Laser wird die Oberfläche eines Bauteils angeschmolzen. In dieses Schmelzbad hinein wird feines Metallpulver gespritzt. Dort verschmilzt dieses mit dem aufgeschmolzenen Basismaterial. Der Vorgang findet unter Schutzgas (meist Argon) statt. Die Schichtdicken betragen 0,2 mm bis 1 mm und können mehrmals erzeugt werden. Im Formen- und Maschinenbau wird dieses Verfahren oft eingesetzt, um schadhafte Teile zu reparieren, Werkzeuge entsprechend neuen Anforderungen anzupassen, korrosions- und verschleißfreie Oberflächen zu generieren oder Eigenschaften zu optimieren (z. B. Werkzeuge herzustellen aus Kupfer (leitet gut die Wärme) und korrosionsbeständigem Stahl).

9.1.4.4 Wärmeleitschweißen (Schmelzen zum Fügen)

Der Laser heizt die Oberfläche auf, sodass eine *Schmelze* entsteht (Bild 9.20). Läuft der Laserstrahl zwischen zwei Fügepartnern, so werden beide Teile aufgeschmolzen und sind nach der Erstarrung zusammengeschweißt. Die Oberflächentemperatur erreicht dabei die Schmelztemperatur von Stahl (1 490 °C).

Da die Wärmeleitung gleichermaßen in die Breite und in die Tiefe geht, ist die Schweißnaht glatt und gleichmäßig sowie von einer hohen optischen Qualität. CO₂-, Festkörper- und Diodenlaser sind für dieses Verfahren geeignet. Die Nahttiefe beträgt 0,1 mm bis 1 mm.

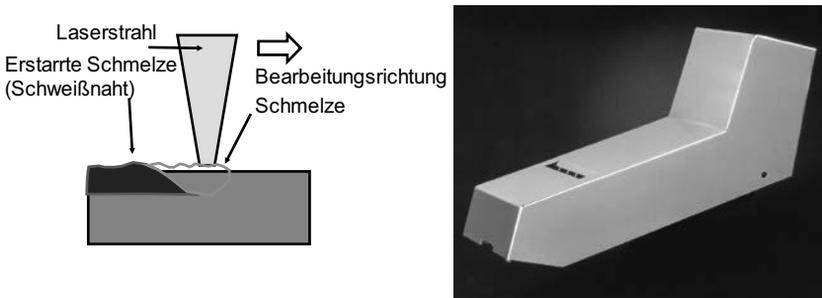


Bild 9.20 Verfahren zum Wärmeleitschweißen
(Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG: Werkzeug Laser, S. 157)

9.1.4.5 Tiefschweißen (Verdampfen zum Fügen)

Für hohe Schweißiefen oder beim Schweißen mehrerer Werkstofflagen muss man hohe Leistungsdichten beim Laser (etwa 1 MW/cm^2) erzeugen. Dann wird nicht nur der Werkstoff aufgeschmolzen, sondern es wird auch Dampf erzeugt, der abströmt, sodass der Laserstrahl das Werkzeug weiter aufschmelzen kann. Es entsteht, wie Bild 9.21 zeigt, ein schmales, dampfgefülltes Loch (keyhole: Schlüsselloch). Die dadurch entstehende *Dampfkapillare* erzeugt eine schmale und tiefe Schweißnaht (1 mm breit und bis zu 25 mm tief).

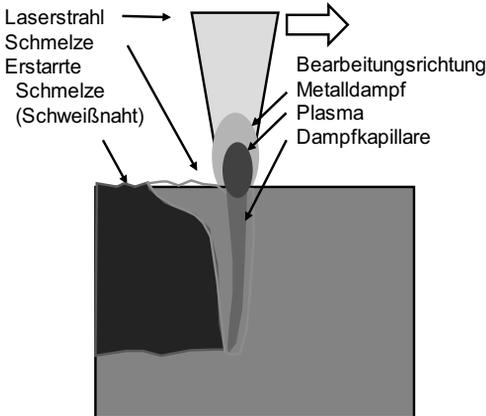


Bild 9.21 Verfahren zum Tiefschweißen (Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG: Werkzeug Laser, S. 157)

9.1.4.6 Laserschneiden

Beim *Schneiden* erwärmt der Laser das Material lokal über seinen Schmelzpunkt. Die Schmelze wird durch ein Arbeitsgas aus der Fuge geblasen, sodass eine Schnittfuge entsteht. Teilweise wird das Material nicht nur geschmolzen, sondern auch verdampft (Bild 9.22). Der entstehende Schnittspalt ist kaum breiter als der Laserstrahl.

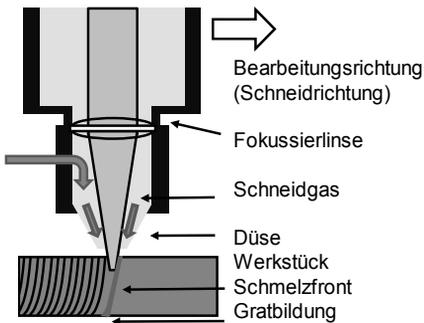


Bild 9.22 Verfahren zum Schneiden (Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG: Werkzeug Laser, S. 119)

Je nach Material werden drei verschiedene Schneidverfahren eingesetzt:

a) *Laser-Brennschneiden*

Dieses Verfahren wird zum Schneiden dicker Bleche oder von Baustahl eingesetzt. Als Schneidgas dient Sauerstoff (O_2). Es wird unter Hochdruck (bis zu 6 bar) in die Schnittfuge geblasen. Dort reagiert das Metall mit dem Sauerstoff und verbrennt das Material. Die chemische Reaktion des Sauerstoffs mit dem Metall setzt Energie frei (bis zum 5-Fachen der Laserenergie) und unterstützt die Schneidwirkung des Laserstrahls. Dadurch können dicke Metallteile bei hohen Schneidgeschwindigkeiten bearbeitet werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Schnittkanten oxidiert sind. Bei einer weiteren Oberflächenbehandlung (z. B. Lackieren oder Beschichten) muss diese Oxidschicht entfernt werden.

b) *Laser-Schmelzschnitten*

Damit wird meist Edelstahl, Leicht- und Buntmetall geschnitten. Schneidgas ist Stickstoff (N_2) oder Argon (2 bar bis 20 bar). Das inerte Schneidgas reagiert nicht mit dem Werkstoff, sondern bläst nur das flüssige Metall aus der Schnittfuge. Der Vorteil ist, dass die Schnittkanten oxidfrei sind und nicht nachbehandelt werden müssen; nachteilig ist, dass nur die Leistung des Laserstrahls zum Schneiden zur Verfügung steht. Mit kombinierten Verfahren wird es möglich, mit Sauerstoffgas zu beginnen und dann mit Stickstoff weiterzuschneiden.

c) *Laser-Sublimationsschnitten*

Der Laserstrahl verdampft den Werkstoff direkt, ohne dass eine flüssige Phase entsteht. Dieses Verfahren eignet sich besonders zum Schneiden von Holz oder Papier.

9.1.4.7 Laserbohren

Trifft ein Laser hoher Leistungsdichte für kurze Zeit auf ein Werkstück auf, so schmilzt das Material, verdampft und ein Loch entsteht. Ist das Loch durchgebohrt, dann tritt das geschmolzene Material auch nach unten aus (Bild 9.23).

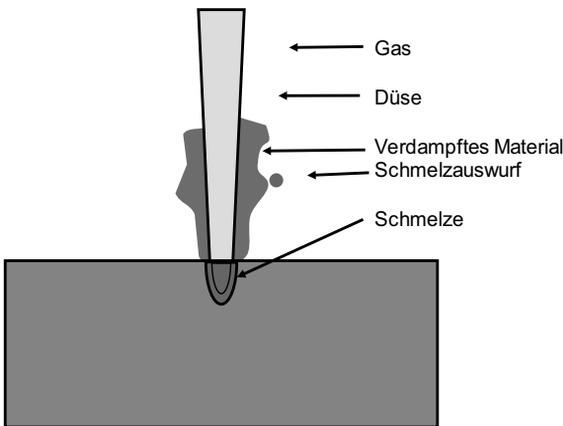


Bild 9.23 Prinzip des Laserbohrens (Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG: Werkzeug Laser, S. 138)

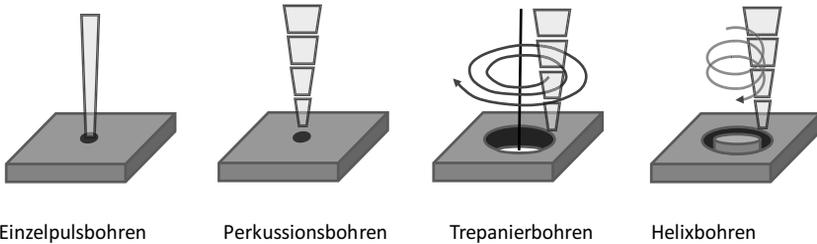


Bild 9.24 Unterschiedliche Verfahren zum Laserbohren
(Quelle: Trumpf GmbH + Co. KG: Werkzeug Laser, S. 139)

Durch einen entsprechenden Abstand zwischen Laseroptik und Werkstück oder durch coaxiale Gasströme können die Materialspritzer von der Optik ferngehalten werden. Es können folgende unterschiedlichen Bohrverfahren angewandt werden (Bild 9.24).

a) *Einzelpulsverfahren*

Ein einzelner Laserpuls mit hoher Energie erzeugt die Bohrung. Innerhalb kürzester Zeit können viele Löcher gebohrt werden.

b) *Perkussionsbohren*

Mehrere Laserpulse mit geringer Energie und Pulsdauer erlauben tiefere und genauere Bohrlöcher, die zudem auch kleinere Bohrlochdurchmesser aufweisen als beim Einzelpulsverfahren. Mit diesem Verfahren können kleine Lochdurchmesser oder tiefe Bohrungen hergestellt werden.

c) *Trepanierbohren*

Mit dem Perkussionsbohren wird ein sogenanntes *Startloch* gebohrt. Anschließend fährt der Laserstrahl kreisförmig über den Rand des Loches und vergrößert dieses. Das Material wird dann nach unten aus dem Bohrloch entfernt.

d) *Helixbohren*

Die Pulse des Laserstrahls werden von Anfang an kreisförmig geführt. In Spiralförmigen (Helix) wird das Loch gebohrt. Mit diesem Verfahren können, wie beim Trepanierbohren, große und tiefe Löcher hoher Qualität gebohrt werden.

9.1.4.8 Lasermikrobearbeitung

(Verdampfen zum Reinigen, Strukturieren und Abtragen)

Bei der Mikrobearbeitung durch Laser werden Werkstücke so bearbeitet, dass kleine Strukturen auf der Oberfläche erzeugt werden können (einige 10 μm Durchmesser bei einigen Mikrometern Tiefe). Dies geschieht durch kurze energiereiche Pulse des Lasers. Das Material wird so direkt verdampft, ohne in die Schmelzphase einzutreten. Die Vorteile dabei sind, dass der Laserstrahl berührungslos, kraftfrei und sehr präzise arbeitet und deshalb die Oberfläche des Werkstücks kaum beeinflusst. Zudem sind die Laserverfahren umweltfreundlicher als die chemischen, ätzenden Verfahren. Die Prozesse können völlig automatisiert werden, sind sehr flexibel und für große und kleine Stückzahlen einsetzbar. In Bild 9.25 sind die verschiedenen Verfahren beschrieben.

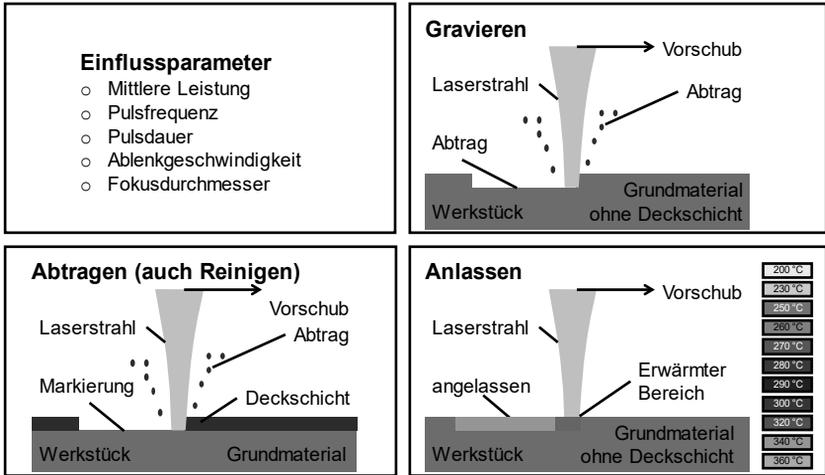


Bild 9.25 Unterschiedliche Verfahren zur Lasermikrobearbeitung

a) *Strukturieren (Gravieren)*

Mit diesem Verfahren werden auf der Werkstückoberfläche regelmäßig angeordnete Geometrien erzeugt. Mit diesen Mikrostrukturen (einige Mikrometer groß) können gezielte Oberflächeneffekte erzeugt werden (durch Änderung der Oberflächeneigenschaften, wie Reflexion, Rauigkeit oder Reibeigenschaften) oder auf der Oberfläche Informationen abgelegt werden (z. B. Gravieren oder Beschriften).

b) *Abtragen (Reinigen)*

Werden nicht nur kleinere Vertiefungen, wie beim Strukturieren, erzeugt, sondern Linien und Flächen, so werden dadurch Oberflächen abgetragen, bis die gewünschte Tiefe erreicht ist. Es entstehen dadurch größere Vertiefungen mit komplizierterer Geometrie mit Maßen weniger als 100 µm. Das Laserabtragen ist unabhängig von der Härte des Werkstoffs. Im Vergleich zum Erodieren werden keine Elektroden verbraucht, sodass die Fertigungs-Prozesse (auch bei Losgröße 1) kostengünstig und schnell zu realisieren sind.

c) *Anlassen*

Mit einem Laserstrahl können die Oberflächen der Werkstücke erwärmt, d. h. angelassen werden. Die Geschwindigkeit des Laserstrahls bestimmt die Tiefe der Anlassbereiche.

In Bild 9.25 oben links sind die entscheidenden Einflussparameter für die Verfahren der Laser-Mikrobearbeitung zusammengestellt.

Sachwortverzeichnis

A

- AA (Antialiasing)-Filter 622
- Abbe-Diagramm 28
- Abbe-König-System 632
- Abbe'sche Auflösungsgrenze 644, 748, 749, 750
- Abbe'sche Beugungsgrenze 643
- Abbe'sche Invariante 38
- Abbe-Zahl 27, 793, 811
- Abbildung, projektive 740
- Abbildungsfehler 93, 747, 756, 759
- Abbildungsgleichung 45
 - des Hohlspiegels 23
- Abbildungskette 743, 744, 746, 747
- Abbildungsmaßstab 23, 635, 764, 767
- Abbildungsqualität 515, 764, 765, 774, 776, 779, 780, 783, 799, 819, 831
- A,B,C,D-Matrix 65
- Aberration
 - axial chromatische 792
 - chromatische 756, 757, 758, 771
 - Design- 757, 758
 - sphärische 756, 771, 781
 - Wellen- 771
- ABg-Modell 825, 826
- Abrastern 640
- Abregungslaser 644
- Absehen 635
- absoluter Drehgeber 550
- absolutes Messverfahren 547
- Absolutgenauigkeit, Display 588
- Absorbance 695
- Absorptionskoeffizient 363
- Absorptionslimit 752
- Absorptions-Spektralfotometer 695, 697
- Absorption von Licht 324
- Abstandssensor 538
 - Triangulation 542
- Abtasttheorem, Nyquist-Shannon'sches 643
- Abtastung, fotoelektrisch 547
- Abtragen (Reinigen), Laserbearbeitung 470
- Achromasiebedingung 793, 794
- Achromat 780, 793, 794, 811
- Achromatisierung 792
- Acoustic Resolution – Photoacoustic Microscope (AR-PAM) 753
- Active Pixel Sensor (APS) 512
- Adaptive Correction Method (ACM) 800
- adaptiver Tertiärspiegel 731
- ADC-Wandelrate, Flächendetektor 505
- additive Farbmischung 170
- additive Fertigung 538
- afokal 633
- afokales System 64
- AIMS-System (AIMS Actinic Aerial Image Metrology System) 755
- Airy-Funktion 270
- Airy'sche Beugungsscheibe 279, 640, 749
- Airy Units (AU) 640
- Akkommodation 107, 109
- Aktiv-Matrix-Technologie 648
- akustisches Mikroskop 762
- Akzeptanzwinkel 30
 - optischer Sensor 496
- akzidentielle Doppelbrechung 210
- Algorithmus
 - Bildverarbeitung 628
 - Phase-Unwrapping- 660
- Amateurastronomie 729, 730
- Ambiguität 838, 841
- Ames-Raum 844, 849
- Ampel 433
- analoge Fotokamera 619
- Analysator 194
 - Multikanal (MCA) 705
- Analyse
 - Frequenzgang (FRA) 706
 - Lifetime 706
 - pekttraleradiometrische 717
 - Phasen/Modulation 706
 - spektraleradiometrische 717
- Anamorphose 844
 - Zylinder- 844
- anamorphotische Abbildung 60
- Anisotropiefaktor g , Laser in Medizin und Biologie 475
- Anlassen, Laserbearbeitung 470

- annulare Blende 744
 Anregungslaser 644
 Anregungs-Scan 701
 Ansatz, paraxialer 779
 Apertur 668, 677, 680, 686, 687, 688, 689,
 764, 765, 766, 767, 768, 770, 771, 772,
 776, 777, 780, 781, 784, 788, 795
 Aperturblende 82, 765, 768
 Aperturkoordinate 770
 aplanatische Linsen 97
 Array
 – MEMS-Spiegel- 652
 – Mikrolinsen 622, 628
 Array-Detektoren 503
 Asphäre 780, 803, 805, 806, 807, 808,
 818, 819
 Asphärenkoeffizient 764, 799, 805, 807
 asphärische Fläche 35, 662
 Astigmatismus 101, 765, 770, 771, 785,
 786, 788, 795, 805, 818
 Astro Imager 730
 Astronomie
 – Amateur- 729
 – terrestrische 730
 astronomische Fernrohre 134
 astronomische Teleskope 728
 Astro Telescope 730
 Asymmetriefehler 784
 Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS) 698
 ATR Attenuated total reflectance (ATR)-
 Spektroskopie 603
 Audience Scanning, Laser in der
 Unterhaltung 492
 Aufbauten, Transmissions- 667
 Auffaltung 23
 Auflichtmikroskopie, Laser in Medizin und
 Biologie 480
 Auflösung 668, 669, 678, 681, 688, 690,
 691, 693, 736, 738, 739, 740, 744, 747,
 749, 750, 751, 752, 753, 758, 759, 762
 – Sensor 539
 – Tiefen- 552
 Auflösungs Grenze, Sensor 539
 Auflösungsvermögen 111, 122
 – beugungsbegrenzter Instrumente 280
 – des Mikroskops 282
 – eines Gitters 291
 Auftragsschweißen, Laserbearbeitung 462,
 466
 Aufwärts-Lumineszenz 702
 Aufweitungsoptik 434
 Auge 107
 Augenschutz, Normen 853
 Augmented Reality (AR) 652
 Ausbreitungskonstante 379
 Auslesezeit, Flächendetektor 505
 Austenitisationstemperatur 463
 Austrittsluke 87
 Austrittspupille (AP) 84, 631, 765, 768,
 769, 773, 775, 820, 833
 Auswertung
 – modellbasiert 738
 – Phasenshift 657
 Autofokussfunktion 625
 Autokollimationsoptik 541
 Autokollimationsprinzip, Lichtschanke
 560
 Autokollimator 665
 Avalanche-Dioden 503
 Avalanche-Photodiode (APD) 641
 axiale chromatische Aberration 792
 Azimutwinkel 822
- B**
- Babinet'sches Theorem 278
 Barcode 577
 Bayer-Pattern 594
 beaconlight 441
 Beamer 651
 Beleuchtung 736, 744, 745, 746, 750, 751,
 753, 754, 757, 759
 – Fassaden 427
 – Innenraum 422
 – Klassen 428
 – schiefe 744
 – Straßen 427
 – telezentrische 514
 Beleuchtungsanordnung, Köhler'sche 638
 Beleuchtungsmesser 583
 Beleuchtungsstärke 166, 416
 Beleuchtungstechnik 415
 Belichtung 166
 Benham-Scheibe 846, 847
 Beschichten, Laserbearbeitung 464
 Bestrahlungsstärke 147
 Beugung 273
 – am Doppelspalt 287
 – am Gitter 285
 – am Spalt 276
 – an einer Lochblende 279
 – kaskadierte 833
 Beugungseffizienz 764, 812, 814, 815, 816
 Beugungsgitter 289, 668, 669, 670

- Beugungsgrenze 690
 – ABBE'sche 643
 Beugungsordnung 809, 810, 812, 814, 815, 820
 Beugungswinkel 809
 Bewegungstäuschung 846
 Bezugssehweite 109
 biaxiale Optik 541
 Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) 822
 Bildanalyse 646
 Bildaufzeichnung, fotoelektronische 621
 Bilderzeugung 619
 Bildfehler 765, 770, 771, 774, 781, 790, 795, 819
 Bildfeldkorrektur 668, 688
 Bildfeldkrümmung 770, 771, 787, 788, 795
 Bildfeldwölbung 101, 765, 786
 Bildfunktion, Punkt 643
 bildgebende Verfahren 736, 763
 Bildgebung, Wärme 633
 Bildgütekriterium 553
 Bildkontrast 747, 750, 752, 754, 756
 Bildlage 756, 757
 Bildqualität 744, 756
 Bildraum 767, 768, 771, 772, 788
 Bildrotation 756
 Bildspeicherung 619
 Bildstabilisierung 634
 Bildverarbeitungsalgorithmen 628
 Bildverarbeitung, Time of flight (TOF) 745
 Bildweite 41
 Bildwiedergabe 746
 Binary On Off Keying (OOK), optische Kommunikation 472
 Binning, Flächendetektor 505
 binokulares Fernrohr 630
 Biosensoren 616
 Bitrate-Länge-Produkt 400
 black body curve, Display 589
 Blazebedingung 671
 Blaze-Profil 814, 815, 816
 Blazewellenlänge 671
 Blende 82
 – annulare 744
 Blendenlage 789, 795
 Blendenzahl 86, 137
 Blendung 430
 – physiologisch 419
 – psychologisch 419
 Blendungswert GR 430
 Blickwinkelabhängigkeit, LCD 592
 Blindbereich, Sensor 541
 Blitzlicht, rot 441
 Blooming, CCD-Detektor 506
 Bohren, Laserbearbeitung 462
 Bokeh 754
 Bouguer-Lambert'sches Gesetz 330, 363, 394, 596
 Boxkamera 619
 Brechkraft 783, 786, 787, 789, 790, 792, 793, 794, 808, 810, 811
 – der dicken Linse 50
 Brechungsgesetz 26
 Brechungsindex 19, 667
 Brechzahlmessung 666
 Bremsstrahlen 745
 Brennpunkt 42
 Brennweite 42, 764, 765, 781, 787, 789, 790, 792, 794
 Brennweitenbestimmung nach Bessel 54
 Brewster'scher Winkel 191
 Brillouin-Spektralfotometer 709
 Brillouin-Spektrometer 714
 BSDF 822, 823, 824, 825, 826
 Burn-In-Effekt, Display 590
- C**
- Candela 168, 417
 Cassegrain-Teleskop 728
 CCD
 – Bildverstärkung 511
 – mit „Electron Multiplication“ (EMCCD) 511
 – mit vorgeschaltetem Mikrokanalplatten-Bildverstärker (MCP-CCD) 512
 CCD-Architektur 507
 CCD-Detektor 503, 676
 CCD-Sensor 748
 Charge Coupled Device (CCD) 500, 511, 542
 Chemilumineszenz-Immunosensor 607
 Chemilumineszenz-Sensoren 606
 Chemosensoren 616
 Chip, Kamera 622
 Chopper 696
 chromatische Aberration 104, 756, 758
 chromatische Dispersion 404, 407
 chromatische Längsaberration 757, 771, 795
 chromatische Queraberration 757, 771, 795
 chromatische Vergrößerungsdifferenz (CHV) 828
 CIE-Lab-Farbraum 584, 588
 Cladding, Laserbearbeitung 462
 CMOS-Detektor 503

- CMOS-Sensor 513
 CMYK-Farbraum 585
 CO₂-Gaslaser 456
 CO₂-Laser 742, 743, 745
 CO₂-Slablaser 458
 Coarse Pointing Assembly (CPA), optische Kommunikation 472
 Code
 – Bar- 577
 – Farb- 524
 – Matrix- 577
 – Stapel- 577
 Code Aster-Programm 832
 Codeleser, scannender 578
 Codenummer 28
 CODEV[®]-Optikprogramm 764, 772, 832, 834
 Colorimetrie 603, 608
 colorimetrischer Enzymnachweis 609
 Colour Rendering Index (CRI) 418, 430
 Computerspiel 655
 Computertomografie (CT) 738, 760
 COMSOL Multiphysics[®]-Optikprogramm 832
 Constraint 799
 Cooke-Triplet 78, 770, 785, 787, 788, 790, 796, 799
 CR (Contrast Ratio Kontrastverhältnis) 587
 Curved Grating Spektrometer 684
 cutoff frequency 777
 Cutoff-Wellenlänge 389
 Czerny-Turner-Spektrometer (CT) 680, 681, 685
- D**
- Dämmerungszahl 134, 632
 Damped Least Square Method (DLS) 801
 Dampfampe, Quecksilber- 743
 Dämpfung in Lichtwellenleitern 394
 Dämpfungskoeffizient 394
 Dämpfungsterm 801
 Datenbrille 746
 Deconvolution 703, 706
 Deflektometrie 527
 Defokussierung 745, 754
 Demosaicing 758
 Depletion Laser 644
 Depolarisator 674, 675
 Depth of Field (DOF) 739
 Desensitivierung 803
 Designaberration 757, 758
 Design to cost 803
 Detection Limit (DL), optischer Sensor 496
 Detektionsprinzipien 614
 Detektionsvermögen 502
 Detektivität 365
 Detektor 668, 676, 684
 – Array- 503
 – CCD- 503
 – CMOS 503
 – Fabry-Perot- 581
 – Festkörper- 500
 – Flächen- 503, 668, 692
 – optischer 495
 – positionsempfindlich (PSD) 550
 – Zeilen 668
 Detektormaterial 502
 DFB- und DBR-Laser 355
 Diagramm
 – Jablonski 699
 – Spot- 773
 DIALux 443
 Dichroismus
 – optischer Rotations- (ORD) 698
 – zirkularer 698
 dichroitischer Strahlteiler 641
 Dichromatic Beamsplitter 641
 Dichteschwankung 740
 dicke Linsen 48
 dielektrische Kristalle 743
 dielektrische Spiegel 263
 Difference Frequency Mixing (DFM) 745
 Diffraction Limit (RDL) 690
 diffraktive Optik 743, 809, 810
 diffraktives Element 811
 diffraktive Struktur 817
 diffraktiv optische Komponente (DOE) 808
 diffraktiv optisches Bauelement (DOE) 653, 662
 – geblaztes 812
 Diffuse Light Mikroskop (DLM) 753
 diffusionsgekühlter Resonator 458
 Diffusionslimit 752, 753
 digitale Fotografie 621, 758
 digitale mirror devices (DMD) 552
 digitale Optik 827
 digitaler Projektor 651, 758
 digitales Postprocessing 622
 digitale Visualisierung 647
 Digitalmikroskop 127
 Dioden, Avalanche- 503
 diodengepumpter Nd:YAG-Laser 451
 Diodenlaser 455
 Diodenlaserspektrometer (TDL) 601

- Dioptrie 42
 Direct Metal Deposition (DMD),
 Laserbearbeitung 466
 Direct Metal Laser Sintering (DMLS),
 Laserbearbeitung 465
 Direct Part Marking (DPM) 577
 direct Stochastical Optical Reconstruction
 Microscopy (dSTORM) 646
 Direktsicht-Display 647
 Dispersion 27, 245, 667, 668, 669, 670,
 671, 673, 677, 678, 679, 680, 681, 682,
 683, 684, 687, 688, 690, 691, 692
 – extreme 810
 – im Lichtwellenleiter 398
 Dispersionsprisma 672
 Display 647
 Display-Messtechnik 585
 Divergenzwinkel 299, 459
 DNA-Chip-Technologie 606
 Doppelaugensystem, Lichtschranke 560
 Doppelbrechung 195
 Doppel-Gauß-Objektiv 785, 788, 790, 796
 Doppelpass-Spektrometer 679
 Doppelspalt 242
 Doppelspektrometer 680, 681, 682, 693,
 713
 Doughnut-Mode 645
 Drehgeber 549, 550
 Dreifach-Spektrometer 713
 Drift-Fehler 758
 Drucker 3D 538
 Drucker, Laser- 483
 dünne Linsen 40
 Dünnschichttransistor 648
 Dynamik, Flächendetektor 505
 dynamische Fehler 758
 dynamische Lumineszenz 703
- E**
- Ebbinghaus'sche Vergleichstäuschung 840
 Ebene
 – meridional 785
 – sagittal 785
 Ebert-Fastie-Spektrometer (EF) 678, 679
 Echelette-Gitter 671
 Echellespektrometer 672, 688, 714
 Edlén-Formel 666
 Effizienz, optische 814
 Eindringtiefe 740, 751, 752, 753, 762
 Einfall, streifender 733
 Einmodenfaser 388
 Einpunkt-Sensor 551
 Eintrittsluke 87
 Eintrittspupille (EP) 83
 Eintritts-Pupille (EP) 631, 765, 768, 769
 Einweglichtschranke 556
 Einzelphotonenquellen 474
 Einzel-Photonenzählung 705
 Einzelpulsverfahren Bohren,
 Laserbearbeitung 469
 Elektrografie 483
 elektromagnetische Wellen 740, 742
 elektronisches Papier 649
 elektronische Sucher 625
 elektro-optische Kurve 650
 elektro-optischer Wandler (E/O-Wandler)
 471
 Element
 – diffraktives 811
 – fokussierendes 809
 Ellipsoidspiegel 21
 Ellipsometrie 612
 – spektroskopische 698
 elliptische Polarisierung 186
 Emissionen radioaktiver Substanzen 737
 Emissionsgrad 151
 Emissions-Scan 701
 emissives Display 647
 energetischer Triangulationslichttaster 565
 Energiedichte 183
 Energie-Effizienzfaktoren 428
 Energiesparlampe 421
 Energiestromdichte 183
 Energiestrom, Laserbearbeitung 460
 Entfernungsmesser, Laser 634
 Entladungslampe 420
 Entrauschung 759
 Enzymnachweis, colorimetrisch 609
 Escape-Funktion 802
 Escher Treppauf – Treppab 848
 Etaloning, CCD-Detektor 508
 Euludat-Format 424
 European Extremely Large Telescope (E-ELT)
 731
 EUV-Lithografie 743
 evaneszentes Feld 381, 603, 611
 evaneszente Welle 225, 750
 Excimerlaser 456, 458, 743, 745
 Excitation Laser 644
 Extinktion 695, 696
 extreme Dispersion 810, 811
 Extrem-Ultraviolett (EUV) 737, 743, 745
 Eyebox 746, 747

F

- Fabry-Perot-Detektor 581
- Fabry-Perot-Interferometer 268, 582
- Fabry-Perot-Laser 349
- Falschfarbendarstellung 425, 553
- Faraday-Effekt 203
- Farbcode 524
- Farben 586
 - dünner Blättchen 253
 - Pantone 593
 - RAL- 593
- Farbfehler 104
- Farbfilter Sensoren 593
- Farbkorrektur 594, 758
- Farblängsfehler 780, 790, 792
- Farbmessung 179
- Farbmetrik 170
- Farbmischung 651
- Farbmodell 583
 - RGB- 584
- Farbort, Display 588
- Farbquerfehler 654, 795
- Farbraum
 - CIE-Lab- 584
 - CMYK- 585
 - Lab- 584
 - LCh- 585
 - Luv- 585
- Farbreizfunktion 171
- Farbsensor 571
- Farbsysteme 177, 593
- Farbtafel 173
- Farbtäuschung 846
- Farbtemperatur T_C 418, 422
- Farbton (Hue) 585
- Farbwiedergabeindex 179
- Farbwiedergabe-Index CRI 418
- Farbwiedergabewert R_a 430
- Faserlaser 454
- Faseroptik-Spektrometer 685
- Featurematching 526
- Fehler
 - Asymmetrie- 784
 - Drift- 758
 - dynamische 758
 - Farblängs- 792
 - Farbquer- 795
 - Öffnungs- 781
 - Perspektive 739
 - Telezentrie- 739
 - Wellenfront 757
- Fehlsichtigkeit 718, 724
- Feld 765, 767, 768, 770, 771, 773, 777, 780, 788, 789, 795, 833
- Feldblende 87
- Feldgröße 764
- Feldlinse 90, 786
- Feldstecher 758
- Feldwinkel 87, 766, 767, 768, 770, 781, 788, 790, 791
- Fermat'sches Prinzip 19
- Fernfeldnäherung 833
- Fernglas 630
- fernoptische Geräte 630
- Fernrohr 128, 630, 635
- Fertigung, additiv 538
- Festkörperdetektor 500
- Festkörperlaser 451
- Feuchtemessung 596
 - LWL Lichtwellenleiter 600
 - NIR Nahes Infrarot 598
 - UV Ultraviolett 599
- Filter 674, 677, 686, 688
 - AA (Antialiasing) 622
 - Normen 853
 - Polarisation 648
- Finite-Elemente (FEM)-Optik-Programme 832
- first order layout 779
- Fisheye 790, 791
- Fizeau-Streifen 255
- Fizeau- und Michelson-Interferometer 657
- Flachdisplay 648
- Flächendetektor 503, 668, 683, 690, 691, 692
- Flächenformen 764, 803, 804
- Flammhärten, Laserbearbeitung 463
- Fließinjektionsanalyse (FIA) 614
- Flimmerfarben, musterinduzierte 846
- Fluorescence Lifetime Imaging Microscope (FLIM) 753
 - Laser in Medizin und Biologie 481
- Fluorescence Resonance Energy Transfer 702
- Fluoreszenzdiagnostik, Laser in Medizin und Biologie 476
- Fluoreszenzfilterwürfel 640
- Fluoreszenzintensität 611
- Fluoreszenzmarker, Laser in Medizin und Biologie 477
- Fluoreszenzmikroskopie 480, 639, 745, 750, 751
- Fluoreszenz-Polarisation 701
- Fluoreszenz-Spektroskop 699, 701, 702, 714
- Flüssigkristall-Display 211
- F-Number 86, 766

- Fokusbildung 459
 Fokusbildung 667
 fokussierendes Element 809, 810, 816
 Fokussierspiegel 679, 684, 685, 689
 förderliche Vergrößerung 124
 Formhaltigkeitsmessung 518
 Förster Energie-Transfer (FRET) 702
 foto-akustisches Spektroskop (PAS) 698
 Fotoapparat 136
 Fotodiode 367
 – Avalanche 641
 fotodynamische Therapie, Laser in Medizin und Biologie 477
 Fotoeffekt 362
 fotoelektrische Abtastung 547
 fotoelektronische Bildaufzeichnung 621
 Fotografie, digitale 758
 Fotogrammetrie 521, 790, 831
 Fotokamera 619
 – analoge 619
 – digitale 621
 Fotokathode 500
 Fotoleiter 366
 Fotometrie 143, 165, 583, 603, 608
 fotometrische Grenzentfernung 145
 fotometrische Größen 583
 fotometrisches Entfernungsgesetz 147
 fotometrisches Grundgesetz 147
 fotometrisches Strahlungsäquivalent 167
 Fotomultiplier (PMT) 497, 641
 Fotoobjektiv, Weitwinkel- 771
 Fotoröhre 497
 fotovoltaischer Effekt 367
 Fotowiderstand 366
 Fourier Domain (FD) 725
 Fourier-Rücktransformation 775
 Fourier-Transformation 775, 777, 833
 Fraser'sche Täuschung 840
 Fraunhofer-Integral 833
 Fraunhofer-Linien 27
 Fraunhofer-Näherung 775, 833
 Freiformfläche 803, 808, 818, 819
 Freiraumausbreitung 832, 833
 Freiraumkommunikation 471, 472
 Frequenzgang-Analyse (FRA) 706
 Fresnel-Linse 55, 813
 Fresnel'sche Gleichungen 215, 774
 Fresnel'sches Parallelepiped 223
 Fresnel'sche Zonenplatte 308
 frustrierte Totalreflexion 226
 Funktion, Escape- 802
 Funktionsreservekurve 561
- G**
- GA: Gamut Area Index 418
 Galvanometerscanner, Laser in der Unterhaltung 491
 Gammawert, Display 588
 Gamut, Display 589
 Gasentladungslampe 420
 Gaslaser 456
 Gating 500
 Gauß'sche Optik 38
 Gauß'sche Strahlen 296, 389, 459, 833
 Gauß'sche Linsengruppen 790
 Gauß'sche Normalengleichung 800
 geblatztes diffraktives optisches Element (DOE) 812
 Gegenstandsweite 41
 geometrische 3-D-Strahldurchrechnung 765
 geometrischer Fluss 156
 geometrische Täuschungen 839
 gepulste Spektroskopie-Methoden 704
 Geräte, fernoptische 630
 Gerätetechnik, optische 618
 Gesetz von Malus 195
 Gitter-Dispersion 293
 Gitterfunktion 286
 Gittergeister 693
 Gittergleichung 669, 677, 681
 Gitterkoppler 614
 Gitter-Monochromator 293
 Gitterspektrometer 669, 692
 Gitterversionen 671
 Glan-Polarisatoren 674
 Glan-Thompson-Prisma 197
 Glare Rating (GR) 430
 Glassorten 28
 globales Optimierungsverfahren 802
 Glühlampe 421
 GNU Image Manipulation Program 827
 gonioskopisches Messverfahren 592
 GPS-Handy 636
 Gradientenfaser 391
 Gradientenindex 799, 817, 818
 Gradientenvektor 818
 Graubild 622
 Graucode 520
 Graugrade 595
 Graustufen (GS) 586
 Grauwertverschiebung 539
 Gravieren, Laserbearbeitung 470
 Gravitationsfeldmessung 736
 Gray-Code 550

grazing incidence 733
 Grazing-Incidence-Spektrometer 684
 Grenzflächenübergang 832, 833
 Grenzfrequenz 777, 829
 Grenzwinkel der Totalreflexion 30
 GRIN-Linse 56, 818, 819, 831
 Grism 674
 Größenkonstanz 844, 849
 Größentäuschung 840, 841, 849
 Gruppengeschwindigkeit 243
 Gruppenindex 245
 Güteermkmale 428
 Güteschaltung 335

H

Haidinger'sche Ringe 252
 Halbleiter-Detektoren 362
 Halbleiterlaser 352, 455
 Halbwellenplatten 199
 Halogen-Glühlampe 421
 Halogen-Lampe 638
 Halogen-Metaldampf 421
 Handykamera 623
 HANLE-Prisma 675
 Härten
 - Flamm- 463
 - Induktions- 463
 Hauptebenen 49
 Hauptstrahl 85, 767, 768, 769, 773, 784
 HDDM-Verfahren (High Definition Distance Measurement) 576
 Head Mounted Device (HMD) 652, 746
 Head Up Display (HUD) 652
 Heisenberg'sche Unschärferelation 739
 Helixbohren, Laserbearbeitung 469
 Hellempfindlichkeitsgrad 165
 Helligkeit (Brightness) 585
 Helligkeitsempfinden 583
 Helligkeits-Täuschung 845
 Helmholtz-Gleichung 833
 Helmholtz-Lagrange-Invariante 40
 Hering'sche Täuschung 840
 Hermann-Gitter 845
 Heterodyn-Modus 707
 High Spatial Frequency Range (HSFR) 757
 Hintergrundrauschen, optischer Sensor 495
 Hintergrundstrahlung 502
 Hintergrundunterdrückung, Lichttaster 565
 Hochleistungsobjektiv 628
 Hochleistungs-Spektrofotometer 697

I

höchstauflösendes Mikroskop 642
 Höhenrelief 740
 Hohlgesichter 845
 Hohlraumstrahler 149
 Hohlspiegel 22
 Holografie 307, 671
 Hubble-Space-Teleskop 733
 Huygens-Fresnel'sches Prinzip 273
 Huygens-Okular 116
 Hybridelement 809, 810, 811, 812
 Hygens'sches Prinzip 833
 hyperspektrale Spektrometer 688

ideales Punktbild (*PSF*) 745
 Identifikation, optische 577
 illusionäre Konturen 838, 843
 Illusionen, visuelle 837
 Image-Modus, CCD-Detektor 507
 Image Sticking, Display 590
 imaging correction 668
 Immersionsbrechzahl 757
 Immersionsobjektiv 123
 Indexellipsoid 196
 individualisierte optische Messtechnik 537
 Induktionshärten, Laserbearbeitung 463
 Infrarothygrometer 597
 Infrarot (IR) 745
 Infrarotsperrfilter 622
 Injektionslaser 349
 inkrementaler Drehgeber 549
 inkrementales Messverfahren 547
 Intensität 184
 Intensitätsmodulation, optische Kommunikation 472
 Intensitätsprofil, Luftbild- 755
 Interferenz 745
 - Laser- 671
 Interferenzbedingungen 237
 Interferenzen 236
 - gleicher Dicke 255
 - gleicher Neigung 251
 Interferenzfilter 272
 Interferenzholografie 314
 Interferenzmuster, parasitär 746
 Interferenzspektroskopie, reflektometrisch 612, 615
 Interferogramm 659
 Interferometer 264, 657
 - Fabry-Perot- 582
 - Michelson 657, 658

- Twyman-Green 660
Interferometrie, Weißlicht 745
interferometrische Längenmessung 546
Invariante der Brechung 27
Inzidenz, senkrechte 809
Inzidenzwinkel 782, 784, 785, 790, 803,
824, 825, 826
Ionenstrahlen 737
IR, Feuchtebestimmung 597
IR-Spektroskopie 603
IR-Strahler mit Fabry-Perot Detektor 581
Isochromaten 211

J

Jablonski-Diagramm 699
Jones-Matrix 189
Jones-Vektor 187

K

Kamera
- Box 619
- Foto 619, 621
- Handy 623
- Kompakt 623
- Lichtfeld- 555
- Matrix- 580
- Mess-Sucher 627
- plenoptische 555
- Smart- 580
- Spiegelreflex 619, 623
- Sucher 619
- System 623
- Zeilen- 579
Kamerachip 622
Kamerasensor 553
Kanizsa-Dreieck 838, 843
Kapazität, Flächendetektor 505
Kardinalpunkte 61, 75
kaskadierte Beugung 833
Kaustik 781
Kegelschnitt 805
Kellner-Okular 117
Kennlinie, Sensor 539
Kepler-Teleskop 728
Kernspin 737
Kerr-Effekt 205, 209
Kipp-Bilder 838, 841
Kippspiegel, digitale 552
Kirchhoff'sches Beugungsintegral 833
kissenförmige Verzeichnung 654

Knotenpunkt 76
Kodak 619
Kohärenz 238, 745
Kohärenz-Gating 745
Kohärenzgrad 241
Kohärenzlänge 239
Kohärenztomografie, optische 477
Kohärenzzeit 239
Köhler'sche Beleuchtungsanordnung 127,
638
Kollisionswarnlichter 441
Koma 99, 765, 770, 771, 784, 785, 788,
790, 795, 803, 805, 818
Kommunikation, Freiraum 471, 472
kompakte Spektrometer 685
Kompaktkamera 623
Komplementärfarben 170
Komponenten
- optisch diffraktiv (DOE) 808
- optische 415
Kondensator 90
Konfokalbedingung 642
konfokaler Sensor 551
konfokale Sensorik 530
konfokales Scanning-Mikroskop 552
Konfokalmikroskop 641
Konkavspiegel 22
Kontrastfunktion 774, 777, 829
Kontrastkurve 553
Kontrasttaster 570
Kontrasttäuschung 845
Kontrastverhältnis (*CR* Contrast Ratio) 586,
587
Konuswinkel 667
Kopierer, Laser- 483
Kopplungsmodul Spektrometer 686
Korrektur, Bildfeld 668
korrelative Mikroskopie 741
Kristalle, dielektrische 743
Krümmungstäuschung 840
Kurve, elektro-optische 650
Kurvenentfaltung 703

L

Lab-Farbraum 584
Lambert-Beer'sches Gesetz 596, 608, 610
Lambert-Bouguer'sches Gesetz 230
Lambert-Strahler 145, 822, 823
Lambert'sche Reflexionscharakteristik 564
Lampe 420
- Halogen 638

- lampengepumpter Nd:YAG-Stablaser 451
 Längenmessung, interferometrisch 546
 Längentäuschung 839
 Längsaberration, chromatische 771
 Laser 329
 - Abregungs- 644
 - Anregungs- 644
 - Anwendungen 450
 - CO₂ 743
 - CO₂-Gas 456
 - CO₂-Slab 458
 - Depletion- 644
 - Dioden 455
 - Excimer 456, 458, 743
 - Excitation- 644
 - Faser 454
 - Festkörper 451
 - Gas 456
 - Halbleiter 455
 - Kommunikationstechnik 471
 - Materialbearbeitung 450
 - Pikosekunden 462
 - Quantenkaskaden 745
 - Scheiben 453
 - Sintern 465
 - Slab 452
 - Stab Nd:Yag 451
 - Strahlquelle 450
 - Unterhaltung 487
 Laseranwendungen
 - Medizin und Biologie 474
 - mikroskopisch 480
 Laseraufweitungssysteme 305
 Laserbedingungen 330
 Laserbohren 468
 Laser-Chirp 361
 Laser Communication Terminal (LCT) 472
 Laserdioden 349
 Laserdrucker 483
 Laserentfernungsmesser 634
 Laserformen, Laserbearbeitung 465
 lasergestützte Optoporation, Laser in
 Medizin und Biologie 482
 lasergestützte Zelltransfektion, Laser in
 Medizin und Biologie 482
 Laserhärten 463
 Laserinterferenz 671
 Laserinterferometersystem 533
 Laserkommunikation, aeronautisch 474
 Laserkopierer 483
 Laserleistung, fokussiert 460
 Lasermikrobearbeitung 469
 Laser-Mikromanipulation, Laser in Medizin
 und Biologie 482
 Laser-Object-Modelling (LOM),
 Laserbearbeitung 466
 Laserpinzette, Laser in Medizin und Biologie
 481
 Laser pressure catapulting 482
 Laserprojektor 486
 Laser-Resonatoren 300
 Laserscanner 485, 574
 Laser-Scanning-Mikroskopie (LSM) 480,
 748, 753
 Laserschmelzen, selektives 465
 Laserschneiden 467
 Laserschneidprozess, Laserbearbeitung 462
 Lasershow 491
 Lasertracking 533
 Lasertriangulation 517
 Lasertypen 334
 Laser-Übertragungsstation (LCT), optische
 Kommunikation 472
 Laservideo 491
 Laufzeitunterschied 736, 740
 Lawinenfotodiode 373
 LCD
 - Blickwinkelabhängigkeit 592
 - optische Spezifikation 586
 - Schaltzeit 591
 - Schwellwert 592
 - transmissiv 648
 LCh-Farbraum 585
 Lebensdauer (LT Life-Time), Display 589
 LED 342, 420, 704, 715
 Leica 619
 Leistung, reale optische 802
 Leistungsdichte
 - Laserbearbeitung 462
 - spektrale 757
 Leuchtdichte 166, 417, 430, 583, 586, 587
 Leuchtdichtemesser 583
 Leuchte 420, 421
 Leuchtenkatalog 444
 Leuchtenstückliste 425
 Leuchtenverteilung 425
 Leuchtstofflampe 420, 421
 Licht
 - Immission 448
 - Informationsträger 442
 - Therapie 446
 - Verschmutzung 447
 - Wirkung auf Menschen 446
 Lichtausbeute 418

- Lichtaustrittsfläche 424
Lichtberechnung 422
Lichtdruck 320
lichtelektrischer Effekt 318
Lichtempfindlichkeit 628
Lichtfarbe 415
Lichtfeldkamera 555
Lichtgeschwindigkeit 182
Lichtgitter 562
Lichtlaufzeitmessung 539
Lichtleiter 408, 668
Lichtleiterkopplung 685, 686
Lichtleitersensor 572
Lichtleitkopplungen 410
Lichtleitwert 156, 668, 687, 758, 759
Lichtmikroskopie 637
Lichtqualität 418
Lichtquanten 318
Lichtquelle 420, 744, 745
– Halogen 434
– LED 434
– unkorreliert 744
Lichtscheibenmikroskopie, Laser in Medizin und Biologie 480
Lichtschnittverfahren 554
Lichtschranke 556
– Einweg- 556
– Reflexions- 559
Lichtsignalanlage 433
Lichtstärke 166, 417, 669, 677
Lichtstärkeverteilung 424
Lichtstärke-Verteilungskurven (LVK) 417
Lichtstrom 166, 416, 424, 583
Lichtsystem, dynamisch 436
Lichttaster 556, 563
– energetischer Triangulations- 565
– Triangulation, Hintergrundaussblendung 568
– Triangulations- 565
lichttechnische Größen 165, 416
Lichtvorhang 562
Lichtwellenleiter 30, 376
– Normen 853
Lifetime-Analyse 703, 706, 709
Light Emitting Diode 420
Lineare Polarisierung 186
Lingelbach und Schrauf'sches Scintillating-grid 845
Linsendurchbiegung 786, 795
Linsenformen 44
Linsengruppen, Gauß'sche 790
Linsensysteme 61, 632
Linsenumkehrsysteme 635
Linse, refraktive 810
Liquid Crystal Display (LCD) 649
Lithografie 743, 744, 746, 748, 750, 754, 756, 758, 759, 760
Lithografieobjektiv 755, 771, 780, 788, 799
Littrow-Aufbau 670, 676, 677, 679
Lochblende 640
Lochkamera 136
Lokalisation 738, 749, 753
longitudinale Lasermoden 357
Look-Around-System 653
Lorentz-Profil 326
Low Spatial Frequency Range (LSFR) 757
LP-Moden 382
Luftbild-Fotogrammetrie 526
Luftbildmesstechnik 755
Luken 87
Lumen 416, 417
Luminanz 584
Lumineszenz 603, 694, 697, 698, 699, 700, 703
– Aufwärts- 702
– dynamische 703
– stationäre 701
Lumineszenzdioden 342
Lumineszenz-Spektroskop 699
Lumineszenzstrahlung 698
Lumineszenztaster 570
Luminosität 668, 677, 678, 679
Lupe 113
Luv-Farbraum 585
Lux 416
Luxmeter 583
LWL (Lichtwellenleiter), Feuchtemessung 600
LYOT-Platte 675

M

- Mach-Zehnder-Chip 614
Mach-Zehnder-Interferometer 266
Magnetresonanztomografie (MRT) 736, 737, 738
Maksutov-Teleskop 728, 729
Marechal-Kriterium 756, 776
Markersubstanzen 603
markierungsfreie Verfahren, Laser in Medizin und Biologie 476
Maßstab 756, 757
Materialdispersion 404
Matrix-Code 577
Matrixkamera 580

- Matrix-LED-Scheinwerfer 438
 Matrixmethoden der Gauß'schen Optik 65
 Matrix-Sensor 551
 Matrizen für Linsen 68
 Mavica 621
 Maxwell-Gleichungen 817, 833, 834
 Melanopsin 446
 Melatonin 446
 MEMS-Spiegelarray 652
 Meridionalebene 785
 Meritfunktion 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 808
 Messgenauigkeit 744
 Messgerät
 - optisches 657
 - Scheitelpunkt 723
 Mess-Sucherkamera 627
 Messtechnik
 - 3-D 550
 - Display- 585
 - Luftbild 755
 - optische 513
 - optisch, individualisiert 537
 Messtechnik 3D 550
 Messung
 - Brechzahl 666
 - Feuchte- 596
 - Lifetime 703
 - Multianalyt- 616
 - optische 3D- 554
 - Temperatur- 581
 Messverfahren
 - absolutes 547
 - gonioskopisches 592
 - inkremental 547
 Methode
 - adaptive Korrekturen- (ACM) 800
 - Damped Least Square (DLS) 801
 - Sattelpunkt- 802
 Michelson-Interferometer 264, 658
 Microbolometer 633
 Mikroskop, Scanning Electron (SEM) 741
 Mid Spatial Frequency Range (MSFR) 757
 Mie-Streuung 596, 602
 Mikrodisektion, Laser in Medizin und Biologie 482
 Mikrokanalplatte (MCP) 499
 Mikrolinsenarray 555, 622, 628
 Mikroskanner, Laser in der Unterhaltung 491
 Mikroskop 118, 771
 - Acoustic Resolution - Photoacoustic (AR-PAM) 753
 - akustisches 762
 - Diffuse Light (DLM) 753
 - Fluorescence Lifetime imaging (FLIM) 753
 - Fluoreszenz 745
 - höchstauflösend 642
 - konfokal 641
 - konfokales Scanning- 552
 - Laser Scanning (LSM) 753
 - Laser-Scanning (LSM) 748
 - Optical Resolution - Photoacoustic (OR-PAM) 753
 - Photoactivated Localization (PALM) 753
 - Rasterelektronen 646
 - Scanning Electron (SEM) 752
 - Selective Plane Illumination (SPIM) 753
 - Stimulated Emission Depletion (STED) 753
 - Stochastic Optical Reconstruction (STORM) 753
 - Structured Illumination (SIM) 753
 - Total Internal Reflection (TIR) 750
 Mikroskopie 637
 - Auflicht- 480
 - Fluoreszenz 639
 - korrelative 741
 - Lichtscheiben- 480
 - Totalreflexions-Fluoreszenz- 480
 mikroskopische Laseranwendungen 480
 Mikroskopobjektiv 765, 772, 777
 Mischfarben 174
 mittlere freie Weglänge (MFP) 752
 Mode, Doughnut- 645
 Modell, ABg- 825
 modellbasierte Auswertung 736, 738
 Moden 387
 Modendispersion 399
 Modenfeldradius 389
 Modenkopplung 336
 Modenmischung 403
 Modulation, Intensitäts- 472
 Modulation Transfer Function (MTF) 347, 774, 777
 Modus
 - Image- 507
 - Spektroskopie- 507
 Moiré-Effekt 622, 830
 Monochromator 668, 675, 688, 689, 692
 monokulares Fernrohr 630
 Monomodefaser 388
 MTF 775, 777, 778, 827, 829, 830
 Müller-Lyer'sche Strecktäuschung 839
 Multianalytmessung 616
 Multi-Frame-Verfahren 759

Multikanal-Analysator (MCA) 705
 Multi-Method-Fusion-Verfahren 759
 Multiple-Gitter-Spektrometer 688
 Multiple-Mirror-Teleskop 731
 Multiplexing, zeitliches 651
 musterinduzierte Flimmerfarben 846
 Muster, Random Dot 555

N

Nachtsichtgerät 632
 Nachweisgrenze, optischer Sensor 496
 Näherungsfokussierung 500
 Nahfeldmikroskopie 227
 NASTRAN-Optikprogramm 832
 Natriumdampf Lampe 421
 Nd:YAG-Laser 451
 Necker-Würfel 841
 Neutralweiß 418
 New Technology Telescope (NTT) 730
 Newton'sche Abbildungsgleichung 45
 Newton'sche Ringe 255
 Newton-Teleskop 728
 Nipkow-Scheibe 641
 NIR (Nahes Infrarot) 598
 – Feuchtemessung 598
 Normalengleichung, Gauß'sche 800
 Normal Incidence-Spektrometer (NI) 683
 Normalvergrößerung der Lupe 114
 Normen
 – Augenschutz 853
 – Filter 853
 – Optik 851
 – Beleuchtung 851
 – Optikfertigung 851
 – optische Bauelemente 851
 – Optoelektronik 853
 – Radio- und Fotometrie 852
 Normlichtquelle 589
 Normvalenzsystem 171
 Notchfilter 712, 713
 Null-Feld-Optiken 759
 numerische Apertur 30, 739, 748
 Nyquist-Frequenz 830
 Nyquist-Shannon-Abtasttheorem 515, 643

O

Oberflächenfehler 756, 758
 Oberflächenplasmonenresonanz (SPR),
 Surface Plasmon Resonance 603, 614
 Oberflächenrauigkeit 820, 821, 824, 825

Objekterfassung 556
 Objektfeld 766, 767, 770
 Objekthöhe 767, 768, 780
 Objektiv
 – Doppel-Gauß- 790, 796
 – Hochleistung 628
 – Lithografie- 755, 771, 780
 – Mikroskop- 765
 – Petzval 789
 – Weitwinkel-Foto- 771
 – Zoom 624
 Objektivauszug 138
 Objektpunkt 765, 767, 770, 775, 795, 803
 Objektraum 767, 768, 772
 Objekttrue 754, 756
 Observable 736, 738
 OCT
 – Spectral Domain 725
 – SweptSource 725
 Öffnungsfehler 781
 Öffnungszahl 766, 788, 790
 Okulare 116
 OLED 420
 Ophthalmoskop 721, 722, 724
 Oppel-Fick-Täuschung 839
 Optical Character Recognition (OCR) 578
 Optical Coherence Tomography (OCT) 745
 Optical Resolution – Photoacoustic
 Microscope (OR-PAM) 753
 Optical Transfer Function (OTF) 774, 829
 Optik
 – Autokollimations 541
 – biaxial 541
 – diffraktive 743, 809
 – digitale 827
 Optikdesign 764, 765, 770, 771, 772, 779,
 780, 781, 783, 796, 797, 798, 801, 803,
 805, 806, 817, 818, 819, 820, 827, 829,
 830, 831, 832
 Optikdesignprogramm 772
 Optikfertigung, Normen 851
 Optiknormen 851
 Optikprogramm 832
 Optiksimitation 764, 819, 820, 833
 Optimierung 765, 779, 781, 783, 796, 797,
 798, 799, 800, 801, 802, 803, 805, 806, 808
 optische 3-D-Messung 554
 optische Aktivität 200
 optische Bauelemente, Normen 851
 optische Berechnung, Hybridmethoden 834
 optische Detektoren 495
 optische Effizienz 814, 816

- optische Geräte, Normen 851
 optische Gerätetechnik 618
 optische Identifikation 577
 optische Instrumente 107
 optische Kohärenztomografie (OCT) 725
 – Laser in Medizin und Biologie 477
 optische Komponenten (DOE), diffraktiv 808
 optische Messtechnik 513
 – individualisiert 537
 optische Normen
 – Augenschutz 853
 – Beleuchtung 851
 – Filter 853
 – Lichtwellenleiter 853
 – Optikfertigung 851
 – optische Bauelemente 851
 – optische Geräte 851
 – Optoelektronik 853
 – Radio- und Fotometrie 852
 optische Performance 796, 802, 803, 831, 832
 optische Phänomene 837
 – Ambiguität 838
 – Ames-Raum 849
 – Anamorphose 844
 – Benham-Scheibe 846
 – Bewegungstäuschung 846
 – Ebbinghaus'sche Vergleichstäuschung 840
 – Escher Treppauf - Treppab 848
 – Farbtäuschung 846
 – Fraser'sche Täuschung 840
 – geometrische Täuschungen 839
 – Größentäuschung 840
 – Helligkeits-Täuschung 845
 – Hering'sche Täuschung 840
 – Hermann-Gitter 845
 – Hohlgesichter 845
 – illusionären Konturen 838
 – Kanizsa-Dreieck 838
 – Kipp-Bilder 838, 841
 – Kontrast-Täuschung 845
 – Krümmungstäuschung 840
 – Längentäuschung 839
 – Lingelbach und Schrauf'sches Scintillating-grid 845
 – Müller-Lyer'sche Streckentäuschung 839
 – musterinduzierte Flimmerfarben 846
 – Necker-Würfel 841
 – Oppel-Fick-Täuschung 839
 – Penrose-Dreieck 847
 – Penrose-Treppe 847
 – Perspektiventäuschung 843
 – Pinna'sche Täuschung 846
 – Poggendorf'sche Täuschung 840
 – Ponzo'sche Perspektiventäuschung 843
 – Ponzo'sche Täuschung 844
 – räumliche Täuschungen 841
 – Richtungstäuschung 840
 – Rubin's „Vase oder Gesichter“ 841
 – Schuster, unmögliches Tor 848
 – Shepard, Elefant mit vier Füßen 848
 – Suchbilder 843
 – unmögliche Objekte 847
 – Vexierbilder 842
 – Zöllner'sche Täuschung 840
 – Zylinderanamorphose- 844
 optischer Einzelpunktsensor 550
 optische Reize 837, 838
 optischer Isolator 203
 optischer Rotations-Dichroismus (ORD) 698
 optischer Weg 19, 35, 770
 optische Sensoren 494
 – Chemie 610
 optische Simulationsrechnung 831, 832
 optisches Messgerät 657
 optische Spezifikation LCD 586
 optische Systeme 749
 optische Täuschungen 837, 846
 optische Übertragungsfunktion 774, 829
 optische Zeichenerkennung (OCR) 578
 opto-akustisches Spektroskop (OAS) 698
 Optoelektronik 339
 – Normen 853
 Optometrie 718, 724
 Optoporation, lasergestützt 482
 Ordnungen, spektrale 669
 Organic Light Emitting Diode (OLED) 420, 649
 Orthogonalitätsrelation 806
 Orts-Bandbreite-Produkt 758
 Overload, CCD-Detektor 506
 Overwhelmingly Large Telescope (OWL) 731

P

- PALM-Verfahren (photoactivated localization microscopy) 643
 Pantone-Farben 593
 Papier, elektronisches 649
 Paraboloidspiegel 21
 parasitäre Interferenzmuster 746
 paraxialer Ansatz 779
 Paraxialstrahlen 22
 Pegel 394
 Penrose-Dreieck 847
 Penrose-Treppe 847

- Pentaprisma 626
- Performance, optische 831
- Perimeter 726
- Periskop 630
- Perkussionsbohren, Laserbearbeitung 469
- Perspektiven-Fehler 739
- Perspektiventäuschung 843
- Petzval-Krümmung 787, 790
- Petzval-Objektiv 789
- Petzval-Summe 787
- Phase locked loop (PLL) 708
- Phasenmodulation (PSK), optische Kommunikation 472
- Phasen/Modulations-Analyse 706
- Phasenshiftauswertung 657
- Phase-Retrieval 554
- Phase Shift Keying (PSK), optische Kommunikation 472
- Phase-Unwrapping-Algorithmus 660
- Phoropter 720
- Photoactivated Localization Microscop (PALM) 753
- Photonen 319
- Photonendrehimpuls 321
- Photonenimpuls 320
- Photonenzähler 498
- Pikosekundenlaser 462
- pin-Fotodiode 372
- Pinhole 640
- Pinna'sche Täuschung 846
- pitch 829
- Pixelansteuerung 650
- Pixelgröße, Flächendetektor 505
- Pixellierung 827
- Pixel per Inch (ppi) 650
- Planck'sches Strahlungsgesetz 149, 327, 502
- plenoptische Kamera 555
- PMT (Fotomultiplier) 497
- Pockels-Effekt 205
- Pockelszellen-Modulationsystem 707, 708
- POF-Fasern 397
- Poggendorfsche Täuschung 840
- Point Spread Function (PSF) 643, 774, 775
- Polarisation 186, 670, 672, 674
 - Fluoreszenz- 701
- Polarisationsdrehung 189, 701, 704
- Polarisationsfilter 648
- Polarisationsfolien 192
- Polarisationsgrad 193
- polarisationsoptische Komponenten 191
- Polarisationsverhalten 670
- Polarisationswinkel 191
- Polarisationszustand 187
- Polarisator 189
 - Glan- 674
 - Rochon- 675
- Polieren, Laserbearbeitung 464
- Polychromator 668, 675, 676, 682
- Ponzo'sche Perspektiventäuschung 843
- Porro-Gläser 632
- positionsempfindlicher Detektor (PSD) 550
- Positionslicht 441
- Postprocessing, digitales 622
- Power Spectral Density (PSD) 757, 823
- Poynting'scher Vektor 185
- Prinzipien, Wahrnehmung 844
- Prisma 32
 - Dispersions- 672
 - Hanle 675
- Prismenspektrometer 295, 687
- Prismensystem 632
- Prismenumkehrsystem 630
- Profilometrie 753
- Profilprojektor 754
- Programm, Optikdesign- 772
- Projektion, Laser in der Unterhaltung 490
- Projektionsdisplay 647
- Projektionsschirm 747
- projektive Abbildung 739, 740
- Projektor
 - digitaler 651, 758
 - Laser- 486
 - Profil- 754
 - reflexiver 651
 - transmissiver 651
- Proximity Focusing 500
- Prozesswirkungsgrad, Laserbearbeitung 461
- PSD-Halbleiter (PSD Position Sensitive Detector) 542
- psychologische Blendung UGR 419
- Ptychografie 759
- Pulslaufzeitverfahren 575
 - Sensor 544
- Punktarray-Sensor 551
- Punktbild 774, 775, 819, 820, 829, 833
 - ideales (PSF) 745
- Punktbildfunktion 643
- Punktverwaschungsfunktion 775
- Pupille 82
 - Austritts- 765
 - Eintritts- 765
- Pupillensampling 773, 777
- Purkinje-Effekt 166
- python 832

Q

Q-Asphäre 806, 807, 808
 Q-switch 335
 Quanten-Effizienz, optischer Sensor 495
 Quantenkaskadenlaser 745
 Quantenkommunikation 474
 Quantum Well Laser 353
 Quecksilberdampf 421
 Quecksilberdampfampe 743
 Queraberration 771, 788, 795
 – chromatische 771

R

Radarstrahlung 737
 Radiometrie 143
 – spektrale 715
 Radio- und Fotometrie, Normen 852
 RAL-Farben 593
 Raman-Spektrofotometer 709
 Raman-Spektrometer 683, 710
 Ramsden-Okular 117
 Random Dot Muster 555
 Randschichtverfahren, Laserbearbeitung 463
 Rasterelektronenmikroskop (REM) 646
 Ratio-Imaging-Verfahren, Laser in Medizin
 und Biologie 476
 Raumhöhe 424
 räumliche Täuschungen 841
 Raumwinkel 144, 667
 Rauschen 624
 – optischer Sensor 496
 Rauschquelle, Flächendetektor 505
 Rayleigh-Debye-Streuung 605
 Rayleigh-Kriterium 280, 515
 Rayleigh-Länge 298, 459
 Rayleigh-Limit 750
 Rayleigh-Linie 712, 713, 714
 Rayleigh-Rice-Störungstheorie 824
 Rayleigh-Streuung 395
 Raytracing 765, 817, 820, 826, 832, 833,
 834, 835
 reale optische Leistung 802
 reelles Bild 18
 Referenzfarbraum 419
 Reflektanz 695
 reflektives Display 647
 Reflektometrie 603, 612, 615
 reflektometrische Interferenzspektroskopie
 (RIFS) 612, 615
 Reflektorgüte, Lichtschanke 561

Reflektor-Teleskop 728
 Reflexion 694, 696, 698
 – Schleier 430
 – spekulare 821
 Reflexionscharakteristik, Lambert'sche 564
 Reflexionsgesetz 20
 Reflexionsgrad 217, 423
 – von Metallen 232
 Reflexionslichtschanke 559
 Reflexions-Spektrofotometer 695
 reflexiver Projektor 651
 reflexvermindernde Schichten 254
 Refraktionierung 722
 refraktive Linse 810
 Refraktometrie 612, 615, 719, 721
 Refraktor-Teleskop 728
 Reichweite, Lichtschanke 557
 Reinigen, Laserbearbeitung 470
 Reize, optische 837
 Rekombination 340
 Rekoss-Scheibe 724
 relative Öffnung 86
 ReluxSuite 445
 Remissionsgrad, Lichtschanke 564
 Rendering 3D 425
 Resolution Enhancement Techniques (RET)
 750
 Resonant Mirror 614
 Resonator, diffusionsgekühlt 458
 RGB-Farbmodell 584
 Richtungstäuschung 840
 Ritchey-Chretien-Teleskop 730
 RMS-Wert 773, 774, 776, 777, 806, 824,
 825, 826
 Rochon-Polarisator 675
 Röntgenstrahlung 737, 743, 745, 753
 Röntgenteleskop 733
 Rowland- und Paschen-Runge-Spektrometer
 684
 Rubin's „Vase oder Gesichter“ 841
 Rückstreuung 694
 – Laser in Medizin und Biologie 476

S

Sagittalebene 784, 785, 786
 Sammellinse 43
 Sankey-Diagramm 460
 Sattelpunktmethode 802
 Sättigung (Saturation) 585
 Sättigungsverhalten 748
 Satz von Malus 770, 775

- Scan
 - Anregungs- 701
 - Emissions- 701
- scannender Codeleser 578
- Scanner
 - Galvanometer- 491
 - Laser- 485, 574
 - Mikro- 491
 - Trommel- 491
- Scanning, Audience- 492
- Scanning Electron Microscope (SAM) 752
- Scanning Electron Microscope (SEM) 646, 741
- Scanning-Mikroskop, konfokales 552
- Scanningsystem, Laser in der Unterhaltung 489
- Schaltzeit, LCD 591
- Schärfentiefe 122, 139
- Schattenprojektion 514
- Scheibenlaser 453
- Scheimpflug-Bedingung 517
- Scheinwerfersysteme 436, 438
- Scheitelbrechwertmessgerät 723, 724
- Scherenfernrohr 630
- schiefe Beleuchtung 744
- Schleierleuchtdichte 430
- Schmidt-Pechan-System 632
- Schmidt-Spiegelsystem-Teleskop 728
- Schnellverstellung 635
- Schrotrauschen (Shot noise), optischer Sensor 495
- Schuster Unmögliches Tor 848
- schwarzer Strahler 150
- Schwarzkörper-Kurve, Display 589
- Schwellenwerterhöhung TI 430
- Schwellwert, LCD 592
- Scintillating-grid, Lingelbach und Schrauf'sches 845
- See-Through-System 653
- Sehfehler 110
- Sehfeld 632
- Sehfeldzahl 117
- Sehleistung 718, 719, 720, 721
- Sehnerv 837
- Sehtest 719
- Sehwinkel 112
- Sekundär-Elektronen-Vervielfacher (SEV) 497
- sekundäres Spektrum 792, 794
- Selective Laser Melting (SLM), Laserbearbeitung 465
- Selective Plane Illumination Mikroskop (SPIM) 753
- Sellmeier-Gleichung 28
- senkrechte Inzidenz 809
- Sensor
 - Abstand 538
 - Active Pixel (APS)- 512
 - Bio- 616
 - CCD- 748
 - chemilumineszenz-basiert 606
 - chemilumineszenz-Immuno- 607
 - Chemo- 616
 - CMOS- 513
 - Einpunkt- 551
 - Evanszenzfeld- 603
 - Farb- 571
 - Farbfilter 593
 - fluoreszenz-basiert DNA 606
 - Kamera- 553
 - konfokal 551
 - Lichtleiter- 572
 - Matrix- 551
 - optischer 494
 - optischer Einzelpunkt 550
 - Punktarray- 551
 - Shack-Hartmann 663, 722, 731
 - Triangulations- 550
 - Weg 538
- Sensorik, konfokale 530
- Sensorkennlinie 539
- Seya-Namioka-Spektrometer 684
- Shack-Hartmann-Sensor 663, 722, 731
- Shepard, Elefant mit vier Füßen Shepard 848
- Show, Laser- 491
- sichtbares Licht 737
- sichtbares nahes Infrarot (VIS-NIR: Visible Near Infra Red) 745
- Signal
 - Flächenhomogenität 434
 - Lichtstärke 434
 - Straßenverkehr 434
- Signaldynamik, Spektrometer 716
- Signalgerät 440
- Signalisation 417, 433
- Signalleuchte, Fahrzeug 434
- Signalrauschen, optischer Sensor 496
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) 496, 576
- Signalsäule 440
- Simulated Annealing 802
- Simulation 422
 - Beleuchtung 443
 - Optik 764, 803, 819, 820, 821, 831, 834

- Streulicht- 820
- wellenoptische 764
- Single Photon Counting 705
- Sinusbedingung 98
- Skriptsprache 832
- Slablasers 452
 - CO₂ 458
- Smart City Lights 431
- Smart-Kamera 580
- Smooth Surface Limit (SSL) 824
- SNELLIUS'sches Brechungsgesetz 27, 819, 833
- Sonografie 736, 737, 738, 740, 741
- Space Bandwidth Product (SBP) 758
- Spaltlampe 724
- Spaltmikroskop 724
- Spannungsoptik 210
- Sparrow-Kriterium 281, 750, 751
- Speckle 745
- Spectral Domain-OCT 725
- Spektiv 630, 633
- Spektralapparate 667
- spektrale Leistungsdichte 757
- spektrale Ordnung 669, 674, 688
- spektrale Radiometrie 715
- Spektralfotometer (SFM) 694
 - Absorptions- 695
 - Brillouin- 709
 - dynamische Polarisation 698
 - Hochleistungs- 697
 - Raman- 709
 - Reflexions- 695
- spektralradiometrische Analyse 717
- Spektrometer 294, 667, 668, 672, 674, 675, 676, 677, 678, 681, 683, 686, 692
 - Brillouin- 714
 - Curved Grating 684
 - Czerny-Turner (CT) 680, 685
 - Diodenlasers 601
 - Doppel 713
 - Doppelpass 679
 - Dreifach- 713
 - Ebert-Fastie (EF) 678
 - Echelle 688
 - Faseroptik 685
 - Gitter 669
 - Grazing-Incidence 684
 - hyperspektrales 688
 - kompaktes 685
 - Kopplungsmodul 686
 - multiple Gitter 688
 - Normal Incidence (NI) 683
 - Prismen- 687
 - Raman 683, 710
 - Rowland- und Paschen-Runge- 684
 - Seya-Namioka 684
 - Signaldynamik 716
 - System-Dynamik 693
 - Transmissions- 687
 - Triple 683
 - Wadsworth 684
- Spektroskop
 - Atom-Absorptions (AAS)- 698
 - Fluoreszenz 699
 - foto-akustisches (OAS) 698
 - gepulste Methoden 704
 - Lumineszenz- 699
 - opto-akustisches (OAS) 698
- Spektroskopie
 - ATR (attenuated total reflectance) 603
 - IR- 603
 - reflektometrische Interferenz (RIFS) 612, 615
- Spektroskopie-Modus, CCD-Detektor 507
- spektroskopische Ellipsometrie 698
- Spektrum, sekundäres 794
- spekulare Reflexion 821
- Sperrfilter, Infrarot 622
- spezifische Ausstrahlung 143
- sphärische Aberration 93, 756, 765, 770, 771, 781, 782, 783, 784, 788, 794, 795, 805
- Spherochromatismus 757
- Spiegelarray, MEMS- 652
- Spiegelreflexkamera 619, 623
- Spiegelteleskope 135
- spontane Emission 325
- Spot-Diagramm 773, 774, 775
- Spurenanalytik 616
- Stäbchen 837
- Stablasers 451
- Stapelcode 577
- stationäre Lumineszenz 701
- STED-Verfahren 644
- Stefan-Boltzmann'sches Gesetz 150
- stehende Welle 225, 248
- Stehwellenverhältnis 249
- Stereobetrachter 654
- Stereolithografie (STL), Laserbearbeitung 466
- Stereosystem 654
- Steuerung
 - Pixel- 650
 - Verschlusszeit 625
- Stimulated Emission Depletion (STED) 644
- Stimulated Emission Depletion (STED) Mikroskop 753

stimulierte Emission 325
Stitching-Verfahren 661
Stochastic Optical Reconstruction Mikroskop (STORM) 753
Stokes-Shift 699
Störlicht 820
Strahldichte 146
Strahldurchrechnung 3D 765
Strahlen
– Brems- 745
– Extrem-Ultra-Violett (EUV) 745
– Ionen- 737
– Synchrotron- 745
– Ultraviolett (UV)- 745
Strahlengang, Tubus 638
Strahlparameterprodukt 299, 459
Strahlqualitätskennzahl 459
Strahlquellen 737
Strahlstärke 145
Strahlteiler, dichroitischer 641
Strahlung
– Extrem-Ultraviolett (EUV)- 737
– Infrarot (IR)- 737
– Radar- 737
– Röntgen- 737
– sichtbares Licht (VIS) 737
– Synchrotron- 743
Strahlungsleistung 416
strahlungsphysikalische Größen 143
Strahlungsquellen 159
Straßenlaterne, intelligente 431
Strehl'sche Definitionshelligkeit 776, 777
streifender Einfall 733
Streifenprojektion 519
Streulicht 668, 671, 673, 678, 680, 686, 692
Streulichtprobleme 820, 821
Streulichtsimulationen 820
Streuung, Mie- 596
Stroboskoplicht, weiß 441
Structured Illumination Microscopy (SIM) 646, 753, 759
Struktur
– binäre 814
– Blaze- 814
– diffraktive 817
Strukturieren (Gravieren), Laserbearbeitung 470
Stufenindex-Faser 382
Sub-Abbe-Auflösung 643
Subpixeling 515
Substanzen, Emissionen radioaktiver 737

subtraktive Farbmischung 170
Suchbilder 843
Sucher, elektronischer 625
Sucherkamera 619
Super Resolution Microscopy 642
Surface Plasmon Resonance (SPR) 614
SweptSource-OCT 725
Symmetrieprinzip 771, 790, 795
Synchrotronstrahlung 743, 745
System
– Laserinterferometer- 533
– Linsenumkehr 635
– Look-Around- 653
– optisches 415, 749
– See-Through- 653
– Stereo- 654
Systemkamera 623
Systemmatrix 72
Szintillator 499

T

Tagsehen 634
Taper 413
Taster
– Kontrast- 570
– Lumineszenz 570
Täuschungen, optische 837
Technologie, Aktiv-Matrix- 648
Teilchenstrahlung 737
Teilerspiegel, Lichtschranke 560
Teleskop
– astronomisches 728
– Cassegrain 728
– European Extremely Large (E-ELT) 731
– Hubble-Space 733
– Kepler- 728
– Maksutov 728
– Multiple-Mirror- 731
– New Technology (NTT) 730
– Newton- 728
– Overwhelmingly Large (OWL) 731
– Reflektor 728
– Refraktor 728
– Ritchey-Chretien 730
– Röntgen 733
– Schmidt-Spiegelsystem 728
– Weltraum 733
Telezentrirende 740, 754
Telezentriefehler 739, 754, 757
telezentrische Beleuchtung 514
Temperaturmessung 581

- Temperaturstrahler 149, 420
 Terahertz Difference Frequency Mixing (DFM) 745
 terrestrische Astronomie 730
 Tertiärspiegel, adaptiver 731
 TE-Welle 215
 Therapie, fotodynamische 477
 Thermalanalyse 764
 Thin Film Transistor (TFT) 648
 Threshold Increment (TI) 430
 Tiefenauflösung 552
 Tiefenschärfe 739, 740
 Tiefschweißen, Laserbearbeitung 462, 467
 Time Domain (TD) 725
 Time of flight (TOF)-Imaging 745
 TIR-Mikroskop (TIR Total Internal Reflection) 750
 TIS-Wert 822, 823, 824, 825, 826
 TM-Welle 215
 Toleranzwerte 803
 Tolerierung 779, 781, 802, 803
 Tomografie
 - Computer (CT) 738
 - Magnetresonanz (MRT) 736
 - Optical Coherence (OCT) 745
 - optische Kohärenz 477
 tonnenförmige Verzeichnung 654
 torische Flächen 59
 Total Integrated Scatter (TIS) 822
 Totally Internal Reflection Fluorescence (TIRF) 603, 616
 Totalreflexion 30
 Totalreflexionsfluoreszenz 603
 Totalreflexions-Fluoreszenzmikroskopie, Laser in Medizin und Biologie 480
 Tracer 737
 Transducer 603, 612, 762, 763
 Transduktionselement 612
 Transillumination, Laser in Medizin und Biologie 476
 Transmissionsaufbau 667
 Transmissionsfaktor 667
 Transmissionsgrad 217
 Transmissions-Spektrometer 687
 transmissive LCD 648
 transmissiver Projektor 651
 transmissives Display 647
 Transmittanz 695
 Transportable Optical Ground Station (TOGS), optische Kommunikation 474
 Trepanierbohren, Laserbearbeitung 469
 Triangulation 539
 - Abstandssensor 542
 Triangulationslichttaster 565
 - energetischer 565
 - Hintergrundaussblendung 568
 Triangulationssensor 550
 Triangulationswinkel 518
 Triple-Spektrometer 683
 Tristimulus-Matrix, Display 589
 Trommelscanner, Laser in der Unterhaltung 491
 Tubuslänge 119
 Tubuslinse 553
 Tubustrahlengang 638
 Tunnelstrom 737
 Twyman-Green-Interferometer 660
- U**
- Übertragungsfunktion, optische 774
 UGR-Wert 422
 Ulbrichtkugel 163, 590, 675, 697, 715, 716, 717, 718
 Ultraschall 737
 Ultraviolett, extremes (EUV) 743
 Ultraviolett-Fotomultiplier (UV-PMT) 499
 Ultraviolett (UV)-Strahlen 745
 Umkehrprismen 130
 Umschmelzen, Laserbearbeitung 464
 Unbuntpunkt 584
 Unified Glare Rating 419
 unkorrelierte Lichtquelle 744
 unmögliche Objekte 847
 Unschärferelation 323
 Unterhaltung, Laser- 487
 Untersuchung, Ultraschall 736
 UV-PMT Ultraviolett-Fotomultiplier 499
 UV (Ultraviolett), Feuchtemessung 599
- V**
- VCSELS 353
 Verfahren
 - bildgebende 736
 - globales Optimierungs- 802
 - HDDM (High Definition Distance Measurement) 576
 - holografisches 671
 verflochtener Strahlengang 92, 127
 Vergrößerung 631, 744, 749
 - eines optischen Instrumentes 113
 Verkehr
 - Fluss 433

– Sicherheit 433
 Verschiebezeit, Flächendetektor 505
 Verschlusszeitsteuerung 625
 Verschmutzung, Licht 447
 Verstärkungsfaktor, optischer Sensor 495
 Verzeichnung 103, 740, 754, 755, 756,
 765, 770, 771, 788, 789, 790, 791, 795,
 805, 818, 827, 828
 – kissenförmig 654
 – tonnenförmig 654
 Verzeichnungsfehler 739, 758
 Verzögerungsplatten 189
 Vexierbilder 842
 Videobrille 746
 Video, Laser in der Unterhaltung 491
 Vielstrahlinterferenzen 267
 Viertelwellenplatten 199
 Vignettierung 87, 773, 777
 VirtualLab Fusion[®]-Optikprogramm 834
 Virtual Reality (VR) 652
 virtuelles Bild 18
 Visible Near Infra Red (VIS-NIR) 745
 Visualisierung, digitale 647
 visuelle Illusionen 837
 visuelle Wahrnehmung 746
 Visus 719
 Vorwärtsstreuung 694

W

Wadsworth-Spektrometer 684
 Wahrnehmung
 – Prinzipien 844
 – visuelle 746
 Wahrnehmungspsychologie 837
 Wandelrate, ADC 505
 Wandler, elektro-optische 471
 Wärmebildgebung 633
 Wärmeleitschweißen, Laserbearbeitung
 462, 466
 Wärmestrom, Laserbearbeitung 461
 Warmweiß 418
 Wartungsfaktor (*MF*) 419, 431
 Weg, optischer 770
 Wegsensor 538
 Weißabgleich 595, 759
 Weißbild, Display 590
 Weißlichtinterferometrie 745
 Weitwinkelobjektiv 771, 790, 791
 Welle
 – elektromagnetische 742
 – evaneszente 750

Wellenaberration 770, 771
 Wellenfront 664, 770, 774, 775, 776, 777, 825
 Wellenfrontabweichung 770
 Wellenfrontfehler 757
 Wellenfrontmessgerät 721
 Wellenlängenkonverter 499
 Wellenlängen-Verhalten 670
 Wellenlängenwandler 746, 747
 Wellenleiterdispersion 406
 Wellenoptik 181
 wellenoptische Simulation 764, 775
 Wellenwiderstand 184
 Wellenzahl 182
 Welle-Teilchen-Dualismus 322
 Weltraumteleskop 733, 734
 Wiedergabequalität 668
 Wiederholgenauigkeit, Sensor 539
 Wien'sches Verschiebungsgesetz 150
 Wirkungsgrad, Laserbearbeitung 461
 Wölb- oder Konvexspiegel 25
 Wollaston-Prisma 198
 Workplane 424

X

Xenon-Hochdrucklampe 162
 X-Ray 753

Y

Yokogawa-Prinzip 642

Z

Zapfen 837
 Zeilen-Detektor 668
 Zeilenkamera 579
 zeitliches Multiplexing 651
 Zellform 757
 Zellmembran 757
 Zelltransfektion, lasergestützt 482
 Zerstreuungslinse 44
 Zielfernrohr 630, 635
 Zielmarke 634
 zirkulare Polarisation 186
 zirkularer Dichroismus 698
 Zöllner'sche Täuschung 840
 Zoomobjektive 624
 Zweilinsler 790
 Zwischenbild 635
 Zylinderanamorphose 844
 Zylinderlinse 59