

Inhaltsverzeichnis

1	Strahlenoptik 1
1.1	Postulate der Strahlenoptik 3
1.1.1	Ausbreitung in einem homogenen Medium 4
1.2	Einfache optische Komponenten 7
1.2.1	Spiegel 7
1.2.2	Parabolspiegel 7
1.2.3	Elliptische Spiegel 7
1.2.4	Sphärische Spiegel 8
1.2.5	Reflexion von paraxialen Strahlen an sphärischen Spiegeln 8
1.2.6	Ebene Grenzflächen 10
1.2.7	Sphärische Grenzflächen und Linsen 13
1.2.8	Lichtleiter 17
1.3	Gradientenindexoptik 19
1.3.1	Die Strahlengleichung 19
1.3.2	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex 21
1.3.3	Die Eikonalgleichung 25
1.4	Matrixoptik 26
1.4.1	Die Strahltransfermatrix 27
1.4.2	Matrizen einfacher optischer Komponenten 29
1.4.3	Matrizen von hintereinander geschalteten optischen Komponenten 30
1.4.4	Periodische optische Systeme 30
	Aufgaben 37
	Weiterführende Literatur 40
2	Wellenoptik 43
2.1	Die Postulate der Wellenoptik 45
2.1.1	Die Wellengleichung 45
2.2	Monochromatische Wellen 46
2.2.1	Komplexe Darstellung und die Helmholtzgleichung 47
2.2.2	Einfache Wellen 49
2.2.3	Paraxiale Wellen 53

2.3	Die Beziehung zwischen Wellenoptik und Strahlenoptik	55
2.3.1	Die Eikonalgleichung	56
2.4	Einfache optische Komponenten	56
2.4.1	Reflexion und Brechung	56
2.4.2	Durchgang durch optische Komponenten	58
2.4.3	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex	64
2.5	Interferenz	65
2.5.1	Interferenz zweier Wellen	65
2.5.2	Vielwelleninterferenz	71
2.6	Polychromatisches und gepulstes Licht	75
2.6.1	Zeitliche und spektrale Beschreibung	75
2.6.2	Lichtschwebung	79
	Aufgaben	81
	Weiterführende Literatur	83
3	Optik von Strahlbündeln	85
3.1	Der Gaußstrahl	86
3.1.1	Die komplexe Amplitude eines Gaußstrahls	86
3.1.2	Eigenschaften von Gaußstrahlen	88
3.1.3	Die Qualität eines Strahlbündels	96
3.2	Durchgang durch optische Komponenten	97
3.2.1	Durchgang durch eine dünne Linse	98
3.2.2	Formung eines Strahlbündels	100
3.2.3	Reflexion an einem sphärischen Spiegel	103
3.2.4	Durchgang durch ein beliebiges optisches System	104
3.3	Hermite–Gauß–Strahlen	107
3.3.1	Die komplexe Amplitude	109
3.3.2	Intensitätsverteilung	110
3.4	Laguerre–Gauß– und Besselstrahlen	111
3.4.1	Laguerre–Gauß–Strahlen	111
	Aufgaben	114
	Weiterführende Literatur	115
4	Fourieroptik	117
4.1	Lichtausbreitung im Vakuum	119
4.1.1	Räumliche harmonische Funktionen und ebene Wellen	119
4.1.2	Die Übertragungsfunktion des Vakuums	127
4.1.3	Die Impulsantwortfunktion des Vakuums	131
4.1.4	Huygens–Fresnel–Prinzip	132
4.2	Die optische Fouriertransformation	133
4.2.1	Fouriertransformation im Fernfeld	133
4.2.2	Fouriertransformation mithilfe einer Linse	136

4.3	Lichtbeugung	139
4.3.1	Fraunhoferbeugung	141
4.3.2	Fresnelbeugung	143
4.4	Bildentstehung	147
4.4.1	Strahlenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	147
4.4.2	Wellenoptische Beschreibung eines $4f$ -Systems	149
4.4.3	Wellenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	151
4.4.4	Abbildung im Nahfeld	156
4.5	Holographie	158
4.5.1	Die holographische Codierung	159
4.5.2	Holographie außerhalb der optischen Achse	162
4.5.3	Fouriertransformations-Holographie	163
4.5.4	Holographische Ortsfilter	163
4.5.5	Die holographische Apparatur	165
4.5.6	Volumenholographie	166
	Aufgaben	169
	Weiterführende Literatur	172
5	Elektromagnetische Optik	175
5.1	Die elektromagnetische Theorie des Lichts	177
5.1.1	Die maxwellschen Gleichungen im Vakuum	177
5.1.2	Die Wellengleichung	178
5.1.3	Die maxwellschen Gleichungen in Medien	179
5.1.4	Randbedingungen	179
5.1.5	Intensität, Leistung und Energie	180
5.1.6	Impuls	181
5.2	Elektromagnetische Wellen in Dielektrika	181
5.2.1	Definitionen	182
5.2.2	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	182
5.2.3	Nichtlineare, dispersive, inhomogene oder anisotrope Medien	184
5.3	Monochromatische elektromagnetische Wellen	188
5.3.1	Die maxwellschen Gleichungen in einem Medium	189
5.3.2	Intensität und Leistung	189
5.3.3	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	190
5.3.4	Inhomogene Medien	190
5.3.5	Dispersive Medien	190
5.4	Einfache elektromagnetische Wellen	191
5.4.1	Ebene, sphärische und gaußsche elektromagnetische Wellen	191
5.4.2	Die Beziehung zwischen elektromagnetischer Optik und skalarer Wellenoptik	196

5.4.3	Vektor-Strahlbündel	197
5.5	Absorption und Dispersion	198
5.5.1	Absorption	198
5.5.2	Dispersion	201
5.5.3	Resonante Medien	204
5.5.4	Optik leitfähiger Medien	211
5.6	Pulsausbreitung in dispersiven Medien	214
5.6.1	Die Gruppengeschwindigkeit	215
5.6.2	Die Gruppengeschwindigkeitsdispersion	216
5.7	Optik von magnetischen und Metamaterialien	222
5.7.1	Doppeltnegative Metamaterialien	223
5.7.2	Optik von Materialien mit negativen Brechungsindex	226
	Aufgaben	227
	Weiterführende Literatur	228
6	Polarisationsoptik	231
6.1	Die Polarisation des Lichts	233
6.1.1	Die Polarisation	233
6.1.2	Die Matrixdarstellung der Polarisation	237
6.2	Reflexion und Brechung	244
6.2.1	TE-Polarisation	246
6.2.2	TM-Polarisation	247
6.3	Die Optik anisotroper Medien	251
6.3.1	Der Brechungsindex	252
6.3.2	Ausbreitung entlang einer Hauptachse	255
6.3.3	Ausbreitung entlang beliebiger Richtungen	257
6.3.4	Die Dispersionsrelation, Strahlen, Wellenfronten und Energietransport	259
6.3.5	Doppelbrechung	264
6.4	Optische Aktivität und Magnetooptik	267
6.4.1	Optische Aktivität	267
6.4.2	Magnetooptik: Der Faradayeffekt	270
6.5	Optik von Flüssigkristallen	272
6.5.1	Die Struktur von Flüssigkristallen	272
6.6	Polarisierende Bauelemente	275
6.6.1	Polarisatoren	276
6.6.2	Retarder	277
6.6.3	Polarisationsrotatoren	279
6.6.4	Nichtreziproke polarisierende Bauelemente	279
	Aufgaben	281
	Weiterführende Literatur	284

7	Optik photonischer Kristalle	287
7.1	Optik von dielektrischen Schichtmedien	290
7.1.1	Matrixtheorie der Optik von Schichtmedien	290
7.1.2	Das Fabry-Pérot-Etalon	300
7.1.3	Das Bragggitter	304
7.2	Eindimensionale photonische Kristalle	313
7.2.1	Blochmoden	314
7.2.2	Matrixoptik periodischer Medien	318
7.2.3	Fourieroptik periodischer Medien	326
7.2.4	Grenzflächen zwischen periodischen und homogenen Medien	330
7.3	Zwei- und dreidimensionale photonische Kristalle	332
7.3.1	Zweidimensionale photonische Kristalle	333
7.3.2	Dreidimensionale photonische Kristalle	337
	Aufgaben	341
	Weiterführende Literatur	343
8	Wellenleiteroptik	345
8.1	Wellenleiter aus ebenen Spiegeln	347
8.1.1	Wellenleitermoden	347
8.1.2	Ausbreitungskonstanten	349
8.1.3	Feldverteilungen	349
8.1.4	Die Zahl der Moden	351
8.1.5	Die Dispersionsrelation	352
8.1.6	Gruppengeschwindigkeiten	353
8.1.7	TM-Moden	353
8.1.8	Vielmodenfelder	355
8.2	Ebene dielektrische Wellenleiter	356
8.2.1	Wellenleitermoden	357
8.2.2	Feldverteilungen	361
8.2.3	Dispersionsrelation und Gruppengeschwindigkeiten	363
8.3	Zweidimensionale Wellenleiter	366
8.3.1	Der rechteckige Spiegelwellenleiter	366
8.3.2	Der rechteckige dielektrische Wellenleiter	367
8.3.3	Die Geometrie von Kanalwellenleitern	368
8.3.4	Materialien	369
8.4	Photonische Kristalle als Wellenleiter	370
8.4.1	Bragggitter als Wellenleiter	370
8.4.2	Bragg-Gitterwellenleiter als photonischer Kristall mit einer Defektschicht	371
8.4.3	Zweidimensionale Wellenleiter aus photonischen Kristallen	371
8.5	Optische Kopplung in Wellenleitern	372
8.5.1	Einkopplung	372

8.5.2	Gekoppelte Wellenleiter	375
8.5.3	Periodische Wellenleiter	381
8.6	Metallische Subwellenlängen-Wellenleiter (Plasmonen)	382
	Aufgaben	384
	Weiterführende Literatur	385
9	Faseroptik	387
9.1	Geführte Strahlen	389
9.1.1	Stufenindexfasern	389
9.1.2	Gradientenindexfasern	392
9.2	Geführte Wellen	394
9.2.1	Helmholtzgleichung	394
9.2.2	Stufenindexfasern	395
9.2.3	Einmodenfasern	404
9.2.4	Quasiebene Wellen in Stufen- und Gradientenindexfasern	406
9.3	Dämpfung und Dispersion	413
9.3.1	Dämpfung	413
9.3.2	Dispersion	417
9.4	Mikrostrukturierte Fasern	428
9.4.1	Führung durch effektiven Index	428
9.4.2	Führung durch photonische Bandlücke	430
	Aufgaben	430
	Weiterführende Literatur	432
10	Resonatoroptik	435
10.1	Resonatoren aus ebenen Spiegeln	437
10.1.1	Resonatormoden	437
10.1.2	Schief einfallende Resonatormoden	448
10.2	Kugelspiegelresonatoren	449
10.2.1	Strahleingrenzung	449
10.2.2	Gaußmoden	453
10.2.3	Resonanzfrequenzen	457
10.2.4	Hermite–Gauß-Moden	458
10.2.5	Endliche Blenden und Beugungsverluste	460
10.3	Zwei- und dreidimensionale Resonatoren	462
10.3.1	Zweidimensionale rechteckige Resonatoren	462
10.3.2	Kreisförmige Resonatoren und Flüstergaleriemoden	464
10.3.3	Dreidimensionale rechteckige Hohlraumresonatoren	465
10.4	Mikroresonatoren	468
10.4.1	Rechteckige Mikroresonatoren	469
10.4.2	Mikrosäulen-, Mikroscheiben- und Mikroringresonatoren	470
10.4.3	Mikrokugelresonatoren	472

10.4.4	Mikrohohlräume aus photonischen Kristallen	474
	Aufgaben	475
	Weiterführende Literatur	477
11	Statistische Optik	479
11.1	Statistische Eigenschaften von stochastischem Licht	481
11.1.1	Optische Intensität	481
11.1.2	Zeitliche Kohärenz und Spektrum	482
11.1.3	Räumliche Kohärenz	489
11.1.4	Longitudinale Kohärenz	494
11.2	Interferenz von partiell kohärentem Licht	496
11.2.1	Interferenz von zwei partiell kohärenten Wellen	496
11.2.2	Interferenz und zeitliche Kohärenz	498
11.2.3	Interferenz und räumliche Kohärenz	501
11.3	Transmission von partiell kohärentem Licht durch optische Systeme	505
11.3.1	Ausbreitung von partiell kohärentem Licht	505
11.3.2	Bildentstehung mit inkohärentem Licht	507
11.3.3	Verstärkung der räumlichen Kohärenz durch Ausbreitung	511
11.4	Partielle Polarisation	516
11.4.1	Die Kohärenzmatrix	517
11.4.2	Stokesparameter und Poincarékugeldarstellung	517
11.4.3	Unpolarisiertes Licht	518
11.4.4	Polarisiertes Licht	519
	Aufgaben	521
	Weiterführende Literatur	523
12	Photonenoptik	525
12.1	Das Photon	527
12.1.1	Licht in einem Resonator: elektromagnetische Theorie	527
12.1.2	Licht in einem Resonator: photonenoptische Theorie	528
12.1.3	Die Energie eines Photons	529
12.1.4	Die Polarisation von Photonen	530
12.1.5	Die Position eines Photons	533
12.1.6	Der Impuls eines Photons	534
12.1.7	Die Interferenz von Photonen	537
12.1.8	Die Zeit eines Photons	538
12.2	Photonenströme	542
12.2.1	Der mittlere Photonenfluss	543
12.2.2	Stochastische Eigenschaften des Photonenfluxes	546
12.2.3	Photonenstatistik	547
12.2.4	Die zufällige Aufteilung von Photonenströmen	554

12.3	Quantenzustände des Lichts	556
12.3.1	Quantentheorie des harmonischen Oszillators	558
12.3.2	Die Analogie zwischen einer optischen Mode und einem harmonischen Oszillator	559
12.3.3	Licht in einem kohärenten Zustand	560
12.3.4	Licht in gequetschten Zuständen	561
	Aufgaben	563
	Weiterführende Literatur	567
13	Photonen und Atome	571
13.1	Energieniveaus	572
13.1.1	Atome	573
13.1.2	Moleküle	579
13.1.3	Festkörper	582
13.2	Die Besetzung von Energieniveaus	593
13.2.1	Die Boltzmannverteilung	593
13.2.2	Die Fermi-Dirac-Verteilung	595
13.3	Die Wechselwirkung von Photonen mit Atomen	596
13.3.1	Die Wechselwirkung von Einmodenlicht mit einem Atom	596
13.3.2	Spontane Emission	600
13.3.3	Induzierte Emission und Absorption	603
13.3.4	Linienverbreiterung	607
13.3.5	Verstärkte spontane Emission	612
13.3.6	Laserkühlung und Einschluss von Atomen	613
13.4	Thermisches Licht	615
13.4.1	Das thermische Gleichgewicht zwischen Photonen und Atomen	615
13.4.2	Das Spektrum des schwarzen Strahlers	617
13.5	Lumineszenz und Lichtstreuung	621
13.5.1	Formen der Lumineszenz	621
13.5.2	Der Mechanismus der Photolumineszenz	623
13.5.3	Lichtstreuung	627
	Aufgaben	629
	Weiterführende Literatur	631
14	Laserverstärker	635
14.1	Theorie der Laserverstärkung	638
14.1.1	Gewinn und Bandbreite	638
14.1.2	Phasenverschiebung	641
14.2	Pumpen des Verstärkers	643
14.2.1	Geschwindigkeitsgleichungen	644
14.2.2	Pumpschemata	648

14.3	Verbreitete Laserverstärker	653
14.3.1	Rubin	654
14.3.2	Neodymdotiertes Glas	655
14.3.3	Erbiumdotierte Quarzfasern	658
14.3.4	Raman-Faserverstärker	660
14.3.5	Die Eigenschaften ausgewählter Laserübergänge	664
14.4	Die Nichtlinearität von Verstärkern	664
14.4.1	Der Gewinn bei Sättigung in homogen verbreiterten Medien	664
14.4.2	Gewinn bei Sättigung in inhomogen verbreiterten Medien	669
14.5	Verstärkerrauschen	671
	Aufgaben	673
	Weiterführende Literatur	676
15	Laser	679
15.1	Theorie der Laseroszillation	681
15.1.1	Optische Verstärkung und Rückkopplung	681
15.1.2	Bedingungen für die Laseroszillation	684
15.2	Die Eigenschaften der Laserstrahlung	688
15.2.1	Leistung	688
15.2.2	Die spektrale Verteilung	694
15.2.3	Räumliche Verteilung und Polarisation	699
15.2.4	Modenselektion	702
15.3	Häufige Lasertypen	706
15.3.1	Festkörperlaser	706
15.3.2	Gaslaser	720
15.3.3	Andere Laser	721
15.3.4	Tabellen ausgewählter Eigenschaften	727
15.4	Gepulste Laser	727
15.4.1	Methoden zur Erzeugung von Laserpulsen	727
15.4.2	Die Analyse von Einschwingvorgängen	731
15.4.3	Die Gütemodulation	734
15.4.4	Modenkopplung	739
	Aufgaben	745
	Weiterführende Literatur	749
16	Halbleiteroptik	753
16.1	Halbleiter	754
16.1.1	Energiebänder und Ladungsträger	755
16.1.2	Halbleitermaterialien	760
16.1.3	Die Konzentrationen von Elektronen und Löchern	768
16.1.4	Erzeugung, Rekombination und Injektion	776
16.1.5	Halbleiterübergänge	781

16.1.6	Heteroübergänge	786
16.1.7	Quantenbeschränkte Strukturen	787
16.2	Wechselwirkungen von Photonen mit Ladungsträgern	794
16.2.1	Photonenwechselwirkungen in Volumenhalbleitern	795
16.2.2	Interbandübergänge in Volumenhalbleitern	796
16.2.3	Absorption, Emission und Gewinn in Volumenhalbleitern	802
16.2.4	Photonenwechselwirkungen in quantenbeschränkten Strukturen	809
16.2.5	Der Brechungsindex	810
	Aufgaben	811
	Weiterführende Literatur	813
17	Halbleiter-Photonenquellen	817
17.1	Lichtemittierende Dioden	818
17.1.1	Injektionselektrolumineszenz	819
17.1.2	Die Eigenschaften von LED	823
17.1.3	Materialien und Aufbau von Bauelementen	835
17.2	Optische Halbleiterverstärker	843
17.2.1	Gewinn und Bandbreite	843
17.2.2	Der Pumpvorgang	849
17.2.3	Heterostrukturen	852
17.2.4	Quantenschichtstrukturen	854
17.2.5	Superlumineszenzdioden	859
17.3	Laserdioden	860
17.3.1	Verstärkung, Rückkopplung und Schwingung	860
17.3.2	Leistung und Wirkungsgrad	866
17.3.3	Spektrale und räumliche Eigenschaften von Laserdioden	870
17.4	Quantenbeschränkte und Mikrohohlraumlaser	875
17.4.1	Quantenbeschränkte Laser	875
17.4.2	Mikrohohlraumlaser	883
17.4.3	Materialien und Strukturen von Bauelementen	886
	Aufgaben	893
	Weiterführende Literatur	896
18	Halbleiter-Photodetektoren	901
18.1	Photodetektoren	902
18.1.1	Äußerer und innerer Photoeffekt	902
18.1.2	Allgemeine Eigenschaften	906
18.2	Photoleiter	913
18.2.1	Intrinsische Materialien	914
18.2.2	Dotierte Materialien	917
18.2.3	Heterostrukturen	918

18.3	Photodioden 919
18.3.1	Die pn-Photodiode 919
18.3.2	Die pin-Photodiode 922
18.3.3	Heterostrukturen 924
18.4	Lawinenphotodioden 926
18.4.1	Grundlagen des Betriebs 926
18.4.2	Gewinn und Ansprechempfindlichkeit 929
18.4.3	Antwortzeit 932
18.4.4	Einphotonenlawinendioden 934
18.5	Arraydetektoren 935
18.5.1	Materialien und Strukturen 935
18.5.2	Ausleseelektronik 937
18.6	Rauschen in Photodetektoren 937
18.6.1	Photoelektronenrauschen 939
18.6.2	Gewinnrauschen 944
18.6.3	Schaltungsräuschen 949
18.6.4	Signal/Rausch-Verhältnis und Empfängerempfindlichkeit 953
18.6.5	Bitfehlerrate und Empfängerempfindlichkeit 959
	Aufgaben 962
	Weiterführende Literatur 967
19	Akustooptik 971
19.1	Die Wechselwirkung von Licht und Schall 973
19.1.1	Braggsche Beugung 973
19.1.2	Die Theorie gekoppelter Wellen 981
19.1.3	Braggsche Beugung von Strahlen 983
19.2	Akustooptische Bauelemente 988
19.2.1	Modulatoren 988
19.2.2	Scanner 990
19.2.3	Raumschalter 993
19.2.4	Filter, Frequenzschieber und Isolatoren 997
19.3	Akustooptik von anisotropen Medien 998
19.3.1	Akustische Wellen in anisotropen Materialien 998
	Aufgaben 1003
	Weiterführende Literatur 1004
20	Elektrooptik 1007
20.1	Grundlagen der Elektrooptik 1009
20.1.1	Pockels- und Kerreffekt 1009
20.1.2	Elektrooptische Modulatoren und Schalter 1011
20.1.3	Scanner 1016
20.1.4	Richtkoppler 1018

20.1.5	Raumlichtmodulatoren	1020
20.2	Elektrooptik anisotroper Medien	1024
20.2.1	Kristalloptik: Eine kurze Wiederholung	1024
20.2.2	Pockels- und Kerreffekt	1025
20.2.3	Modulatoren	1031
20.3	Elektrooptik von Flüssigkristallen	1033
20.3.1	Phasenschieber und Modulatoren	1033
20.3.2	Raumlichtmodulatoren	1040
20.4	Photorefraktivität	1042
20.4.1	Vereinfachte Theorie der Photorefraktion	1044
20.5	Elektroabsorption	1048
	Aufgaben	1050
	Weiterführende Literatur	1052
21	Nichtlineare Optik	1055
21.1	Nichtlineare optische Medien	1058
21.1.1	Die nichtlineare Wellengleichung	1060
21.2	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung	1062
21.2.1	Frequenzverdopplung und Gleichrichtung	1062
21.2.2	Der elektrooptische Effekt	1065
21.2.3	Dreiwellenmischung	1067
21.2.4	Phasenbedingung und Abstimmungskurven	1072
21.2.5	Quasi-Phasenanpassung	1078
21.3	Nichtlineare Optik dritter Ordnung	1081
21.3.1	Die Erzeugung der dritten Harmonischen und der optische Kerreffekt	1082
21.3.2	Selbstphasenmodulation, Selbstfokussierung und räumliche Solitonen	1083
21.3.3	Kreuzphasenmodulation	1087
21.3.4	Vierwellenmischung	1088
21.3.5	Optische Phasenkonjugation	1090
21.4	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung: die Theorie gekoppelter Wellen	1094
21.4.1	Die Gleichungen gekoppelter Wellen	1094
21.4.2	Frequenzverdopplung	1098
21.4.3	Optische Frequenzkonversion	1101
21.4.4	Optische parametrische Verstärkung und Oszillation	1103
21.5	Nichtlineare Optik dritter Ordnung: Theorie gekoppelter Wellen	1107
21.5.1	Vierwellenmischung	1107
21.5.2	Dreiwellenmischung und Erzeugung der dritten Harmonischen	1109

21.5.3	Optische Phasenkonjugation	1112
21.6	Anisotrope nichtlineare Medien	1114
21.6.1	Dreiwellenmischung in anisotropen nichtlinearen Medien zweiter Ordnung	1116
21.7	Dispersive nichtlineare Medien	1118
21.7.1	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Integraltransformation	1119
21.7.2	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Differentialgleichung	1121
	Aufgaben	1124
	Weiterführende Literatur	1126
22	Ultraschnelle Optik	1129
22.1	Eigenschaften von Pulsen	1130
22.1.1	Zeitliche und spektrale Eigenschaften	1130
22.1.2	Gaußpulse und gechirpte Gaußpulse	1135
22.1.3	Räumliche Eigenschaften	1137
22.2	Pulsformung und Kompression	1140
22.2.1	Chirpfilter	1141
22.2.2	Ausführungen von Chirpfiltern	1149
22.2.3	Pulskompression	1154
22.2.4	Pulsformung	1156
22.3	Pulsausbreitung in optischen Fasern	1158
22.3.1	Die optische Faser als Chirpfilter	1159
22.3.2	Ausbreitung eines Gaußpulses in einer optischen Faser	1161
22.3.3	Diffusionsgleichung für langsam variierende Einhüllende	1168
22.3.4	Analogie zwischen Dispersion und Beugung	1170
22.4	Ultraschnelle lineare Optik	1173
22.4.1	Strahlenoptik	1174
22.4.2	Wellen- und Fourieroptik	1176
22.4.3	Optik von Strahlbündeln	1179
22.5	Ultraschnelle nichtlineare Optik	1186
22.5.1	Gepulste parametrische Prozesse	1187
22.5.2	Optische Solitonen	1193
22.5.3	Superkontinuumslicht	1204
22.6	Pulsdetektion	1206
22.6.1	Die Messung der Intensität	1206
22.6.2	Die Messung der spektralen Intensität	1212
22.6.3	Die Messung der Phase	1214
22.6.4	Messung des Spektrogramms	1218
	Aufgaben	1221
	Weiterführende Literatur	1224

23	Optische Verbindungen und Schalter	1227
23.1	Optische Verbindungen	1229
23.1.1	Die Verbindungsmatrix	1229
23.1.2	Nichtreziproke Verbindungen: Isolatoren und Zirkulatoren	1231
23.1.3	Brechende und beugende Verbindungen im Vakuum	1232
23.1.4	Wellenleiterverbindungen	1237
23.1.5	Nichtreziproke optische Verbindungen	1238
23.1.6	Optische Verbindungen in der Mikroelektronik	1239
23.2	Passive optische Router	1244
23.2.1	Wellenlängenbasierte Router	1245
23.2.2	Polarisations-, phasen- und intensitätsbasierte Router	1251
23.3	Photonische Schalter	1255
23.3.1	Ausführungen von Raumschaltern	1255
23.3.2	Realisierungen von optischen Raumschaltern	1257
23.3.3	Volloptische Raumschalter	1266
23.3.4	Wellenlängenbereichsschalter	1272
23.3.5	Zeitbereichsschalter	1276
23.3.6	Paketschalter	1280
23.4	Optische Gatter	1282
23.4.1	Bistabile Systeme	1282
23.4.2	Das Prinzip der optischen Bistabilität	1285
23.4.3	Bistabile optische Bauelemente	1287
	Aufgaben	1295
	Weiterführende Literatur	1296
24	Faseroptische Kommunikation	1299
24.1	Faseroptische Komponenten	1301
24.1.1	Optische Fasern	1301
24.1.2	Quellen für optische Sender	1308
24.1.3	Optische Verstärker	1309
24.1.4	Detektoren für optische Empfänger	1313
24.2	Faseroptische Nachrichtensysteme	1315
24.2.1	Entwicklungsgeschichte faseroptischer Nachrichtensysteme	1316
24.2.2	Die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Systemen	1320
24.2.3	Dämpfungs- und dispersionsbegrenzte Systeme	1324
24.2.4	Kompensation und Management von Dämpfung und Dispersion	1333
24.2.5	Optische Kommunikation durch Solitonen	1335
24.3	Modulation und Multiplexing	1337
24.3.1	Modulation	1337
24.3.2	Multiplexing	1340
24.3.3	Wellenlängenmultiplexing	1342

24.4	Faseroptische Netze	1344
24.4.1	Netztopologien und Vielfachzugriff	1344
24.4.2	Wellenlängenmultiplexnetze	1347
24.5	Kohärente optische Kommunikation	1352
24.5.1	Homodyn- und Heterodynempfänger	1352
24.5.2	Kohärente Systeme	1355
	Aufgaben	1360
	Weiterführende Literatur	1362
A	Die Fouriertransformation	1365
A.1	Die eindimensionale Fouriertransformation	1365
A.1.1	Eigenschaften der Fouriertransformation	1366
A.1.2	Beispiele	1367
A.2	Zeitliche und spektrale Breite	1367
A.2.1	Die quadratisch gemittelte Breite	1368
A.2.2	Die leistungsäquivalente Breite	1370
A.2.3	1/e-, Halbwerts- und 3-dB-Breite	1371
A.3	Die zweidimensionale Fouriertransformation	1372
A.3.1	Eigenschaften	1373
	Weiterführende Literatur	1374
B	Lineare Systeme	1375
B.1	Eindimensionale lineare Systeme	1375
B.1.1	Lineare Systeme	1375
B.2	Zweidimensionale Lineare Systeme	1379
	Weiterführende Literatur	1380
C	Die Moden linearer Systeme	1381
C.1	Die Moden eines diskreten linearen Systems	1382
C.2	Die Moden eines kontinuierlichen durch einen Integraloperator beschriebenen Systems	1384
C.2.1	Translationssymmetrie und harmonische Moden	1385
C.3	Die Moden eines durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschriebenen Systems	1386
C.4	Die Moden eines durch eine partielle Differentialgleichung beschriebenen Systems	1386
C.4.1	Die Moden des Felds/der Welle in einem homogenen Medium mit Randbedingungen	1387
C.4.2	Moden von Feldern/Wellen in einem periodischen Medium	1388