

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	Doppelnegative 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 Photonenflusses 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 Schaltungsrauschen 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 Heterodympfänger 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