

Optik und Photonik

Bahaa E A Saleh und Malvin C Teich

Dritte, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage XIX

Vorwort zur zweiten Auflage XXIII

Teil I Optik I

1	Strahlenoptik 3
11	Postulate der Strahlenoptik 4
111	Ausbreitung in einem homogenen Medium 5
12	Einfache optische Komponenten 6
121	Spiegel 6
122	Ebene Grenzflächen 8
123	Sphärische Grenzflächen und Linsen 10
124	Lichtleiter 13
13	Gradientenindexoptik 14
131	Die Strahlengleichung 14
132	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex 15
133	Die Eikonalgleichung 18
14	Matzenoptik 19
141	Die Strahltransfermatrix 19
142	Matrizen einfacher optischer Komponenten 20
143	Matrizen von hintereinander geschalteten optischen Komponenten 21
144	Periodische optische Systeme 23
2	Wellenoptik 29
21	Die Postulate der Wellenoptik 30
211	Die Wellengleichung 30
22	Monochromatische Wellen 31
221	Komplexe Darstellung und die Helmholtzgleichung 31
222	Einfache Wellen 32
223	Paraxiale Wellen 34
23	Die Beziehung zwischen Wellenoptik und Strahlenoptik 35
23 1	Die Eikonalgleichung 36
24	Einfache optische Komponenten 36
241	Reflexion und Brechung 36
242	Durchgang durch optische Komponenten 37
243	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex 41

VI Inhaltsverzeichnis

- 25 Interferenz 42
- 25 1 Interferenz zweier Wellen 42
- 252 Vielwelleninterferenz 45
- 26 Polychromatisches und gepulstes Licht 49
- 261 Zeitliche und spektrale Beschreibung 49
- 262 Lichtschwebung 51

- 3 Optik von Strahlbündeln 57
- 31 Der Gaußstrahl 57
- 311 Die komplexe Amplitude eines Gaußstrahls 57
- 312 Eigenschaften von Gaußstrahlen 58
- 313 Die Qualität eines Strahlbündels 64
- 32 Durchgang durch optische Komponenten 64
- 321 Durchgang durch eine dünne Linse 64
- 322 Formung eines Strahlbündels 66
- 323 Reflexion an einem Kugelspiegel 67
- 324 Durchgang durch ein beliebiges optisches System 68
- 33 Hermite-Gauß-Strahlen 70
- 331 Die komplexe Amplitude 71
- 332 Intensitätsverteilung 71
- 34 Laguerre-Gauß-Strahlen 72
- 341 Laguerre-Gauß-Strahlen 72
- 342 Optische Wirbel 73
- 343 Ince-Gauß-Strahlen 73
- 35 Nichtbeugende Strahlen 74
- 351 Besselstrahlen 74
- 352 Airystrahlen 75

- 4 Fourieroptik 79
- 41 Lichtausbreitung im Vakuum 80
- 411 Räumliche harmonische Funktionen und ebene Wellen 80
- 412 Die Übertragungsfunktion des Vakuums 85
- 413 Die Impulsantwortfunktion des Vakuums 87
- 414 Huygens-Fresnel-Prinzip 88
- 42 Die optische Fouriertransformation 88
- 421 Fouriertransformation im Fernfeld 88
- 422 Fouriertransformation mithilfe einer Linse 89
- 43 Lichtbeugung 91
- 431 Fraunhoferbeugung 92
- 432 Fresnelbeugung 94
- 433 Nichtbeugende Wellen 97
- 44 Bildentstehung 98
- 441 Strahlenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems 98
- 442 Wellenoptische Beschreibung eines 4f-Systems 99
- 443 Wellenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems 101
- 444 Abbildung im Nahfeld 104
- 45 Holographie 105
- 451 Die holographische Codierung 106
- 452 Holographie außerhalb der optischen Achse 107
- 453 Fouriertransformations-Holographie 108
- 454 Holographische Ortsfilter 109
- 455 Die holographische Apparatur 109
- 456 Volumen holographie 110

5	Elektromagnetische Optik 117
5 1	Die elektromagnetische Theorie des Lichts 118
511	Die maxwellschen Gleichungen im Vakuum 118
512	Die Wellengleichung 118
513	Die maxwellschen Gleichungen in Medien 119
5 14	Randbedingungen 120
515	Intensität, Leistung und Energie 120
516	Impuls 120
52	Elektromagnetische Wellen in Dielektrika 121
521	Definitionen 121
522	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien 121
523	Nichtlineare, dispersive, inhomogene oder anisotrope Medien 122
53	Monochromatische elektromagnetische Wellen 124
531	Die maxwellschen Gleichungen in einem Medium 125
532	Intensität und Leistung 125
533	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien 125
534	Inhomogene Medien 125
535	Dispersive Medien 125
54	Einfache elektromagnetische Wellen 126
541	Ebene, Dipol- und gaußsche elektromagnetische Wellen 126
542	Die Beziehung zwischen elektromagnetischer Optik und skalarer Wellenoptik 129
543	Vektor-Strahlbündel 130
55	Absorption und Dispersion 130
551	Absorption 130
5 52	Dispersion 132
5 53	Resonante Medien 134
56	Die Streuung elektromagnetischer Wellen 137
561	Die Bornsche Näherung 138
5 62	Rayleighstreuung 138
563	Mie-Streuung 141
5 64	Dämpfung in einem streuenden Medium 142
5 7	Pulsausbreitung in dispersiven Medien 143
571	Die Gruppengeschwindigkeit 143
572	Die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit 144
6	Polarisationsoptik 151
61	Die Polarisation des Lichts 152
611	Die Polarisation 152
6 12	Die Matrixdarstellung der Polarisation 155
62	Reflexion und Brechung 159
621	TE-Polarisation 160
622	TM-Polarisation 161
63	Die Optik anisotroper Medien 163
631	Der Brechungsindex 163
632	Ausbreitung entlang einer Hauptachse 165
633	Ausbreitung entlang beliebiger Richtungen 166
634	Die Dispersionsrelation, Strahlen, Wellenfronten und Energietransport 168
635	Doppelbrechung 170
64	Optische Aktivität und Magnetooptik 172
641	Optische Aktivität 172
642	Magnetooptik Der Faradayeffekt 174

65	Optik von Flüssigkristallen 175
65 1	Die Struktur von Flüssigkristallen 175
652	Optische Eigenschaften von verdrehten nematischen Flüssigkristallen 176
66	Polarisierende Bauelemente 177
661	Polarisatoren 177
662	Retarder 178
663	Polarisationsrotatoren 179
664	Nichtreziproke polarisierende Bauelemente 179
7	Optik photonischer Kristalle 185
71	Optik von dielektrischen Schichtmedien 187
711	Matrxtheorie der Optik von Schichtmedien 187
712	Das Fabry-Pdrot-Etalon 192
713	Das Bragggitter 194
72	Eindimensionale photomische Kristalle 200
721	Blochmoden 201
722	Matrizenoptik periodischer Medien 203
723	Founeroptik periodischer Medien 208
724	Grenzflächen zwischen periodischen und homogenen Medien 210
73	Zwei- und dreidimensionale photonische Kristalle 211
731	Zweidimensionale photomische Kristalle 212
732	Dreidimensionale photonische Kristalle 213
8	Optik von Metallen und Metamaterialien 221
81	Einfach- und doppelt-negative Medien 223
811	Wellenausbreitung in einfach- und doppelt-negativen Medien 224
812	Wellen an Grenzflächen zwischen DP-, EN- und DP-Medien 226
813	Hyperbolische Medien 232
82	Optik von Metallen Plasmonik 234
821	Die optischen Eigenschaften von Metallen 234
822	Die Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum Oberflächenplasmonpolaritonen 239
823	Metallische Nanokugeln Lokalisierte Oberflächenplasmonen 241
824	Optische Antennen 244
83	Optik von Metamaterialien 245
83 1	Metamaterialien 246
832	Metaoberflächen 251
84	Transformationsoptik 253
841	Transformationsoptik 253
842	Zusammenhänge 255
9	Wellenleiteroptik 261
91	Wellenleiter aus ebenen Spiegeln 262
911	Wellenleitermoden 262
912	Ausbreitungskonstanten 263
913	Feldverteilungen 264
914	Die Zahl der Moden 265
915	Die Dispersionsrelation 265
916	Gruppengeschwindigkeiten 265
917	TM-Moden 266
918	Vielmodenfelder 267
92	Ebene dielektrische Wellenleiter 267
921	Wellenleitermoden 268

- 922 Feldverteilungen 270
- 923 Dispersionsrelation und Gruppengeschwindigkeiten 271
- 93 Zweidimensionale Wellenleiter 273
- 931 Der rechteckige Spiegelwellenleiter 273
- 932 Der rechteckige dielektrische Wellenleiter 274
- 933 Die Geometrie von Kanalwellenleitern 274
- 934 Matenahen 275
- 94 Optische Kopplung in Wellenleitern 276
- 941 Einkopplung 276
- 942 Gekoppelte Wellenleiter 277
- 943 Wellenleiterarrays 281
- 95 Photonische Kristalle als Wellenleiter 282
- 951 Bragggitter als Wellenleiter 282
- 952 Bragg-Gitterwellenleiter als photonischer Kristall mit einer Defektschicht 283
- 953 Zweidimensionale Wellenleiter aus photonischen Kristallen 283
- 96 Plasmonische Wellenleiter 283

- 10 Faseroptik 289**
- 101 Geführte Strahlen 290
- 1011 Stufenindexfasern 290
- 1012 Gradientenindexfasern 292
- 10 2 Geführte Wellen 293
- 10 2 1 Helmholtzgleichung 293
- 10 2 2 Stufenindexfasern 294
- 10 2 3 Einmodenfasern 298
- 10 2 4 Quasi-ebene Wellen in Stufen- und Gradientenindexfasern 300
- 10 2 5 Mehrkernfasern und Faserkoppler 304
- 10 3 Dämpfung und Dispersion 306
- 10 3 1 Dämpfung 306
- 10 3 2 Dispersion 307
- 10 4 Hohlkernfasern und Fasern aus photonischen Kristallen 314
- 10 4 1 Führung durch effektiven Brechungsindex 314
- 10 4 2 Führung durch photonische Bandlücke 315
- 10 4 3 Anwendungen 315
- 10 5 Materialien für optische Fasern 316
- 10 5 1 Fasern für das mittlere Infrarot 316
- 10 5 2 Hybrid- und Multifunktionsfasern 317

- 11 Resonatoroptik 321**
- 111 Resonatoren aus ebenen Spiegeln 323
- 1111 Resonatormoden 323
- 1112 Schief entfallende Resonatormoden 329
- 112 Kugelspiegelresonatoren 330
- 112 1 Strahleingrenzung 330
- 112 2 Gaußmoden 332
- 112 3 Resonanzfrequenzen 334
- 112 4 Hermite-Gauß-Moden 335
- 112 5 Endliche Blenden und Beugungsverluste 336
- 113 Zwei- und dreidimensionale Resonatoren 337
- 113 1 Zweidimensionale rechteckige Resonatoren 337
- 113 2 Kreisförmige Resonatoren und Flustergaleriemoden 338
- 113 3 Dreidimensionale rechteckige Hohlraumresonatoren 339

- 114 Mikro- und Nanoresonatoren 340
- 1141 Rechteckige Mikroresonatoren 341
- 114 2 Mikrosaulen-, Mikrodisk- und Mikronngresonatoren 342
- 114 3 Mikrokugeln 343
- 114 4 Mikroresonatoren aus photonischen Kristallen 344
- 114 5 Plasmomsche Resonatoren Metallische Nanodisks und Nanokugeln 345

- 12 Statistische Optik 349**
- 121 Statistische Eigenschaften von stochastischem Licht 350
- 1211 Optische Intensität 350
- 1212 Zeitliche Kohärenz und Spektrum 351
- 1213 Räumliche Kohärenz 355
- 1214 Longitudinale Kohärenz 358
- 12 2 Interferenz von partiell kohärentem Licht 359
- 12 21 Interferenz zweier partiell kohärenter Wellen 359
- 12 2 2 Interferometrie und zeitliche Kohärenz 360
- 12 2 3 Interferometrie und räumliche Kohärenz 362
- 12 3 Transmission von partiell kohärentem Licht durch optische Systeme 364
- 12 3 1 Ausbreitung von partiell kohärentem Licht 364
- 12 3 2 Bildentstehung mit inkohärentem Licht 365
- 12 3 3 Verstärkung der räumlichen Kohärenz durch Ausbreitung 367
- 12 4 Partielle Polarisierung 370
- 12 41 Die Kohärenzmatrx 371
- 12 4 2 Stokesparameter und Pomcarökugeldarstellung 371
- 12 4 3 Unpolansiertes Licht 372
- 12 4 4 Polarisiertes Licht 372

- 13 Photonenoptik 377**
- 13 1 Das Photon 378
- 13 11 Licht in einem Resonator 378
- 13 12 Die Energie eines Photons 379
- 13 1 3 Die Polarisierung von Photonen 380
- 13 1 4 Der Ort eines Photons 382
- 13 1 5 Der Impuls eines Photons 383
- 13 1 6 Die Interferenz von Photonen 384
- 13 1 7 Die Zeit eines Photons 385
- 13 2 Photonenströme 387
- 13 21 Der Photonenstrom 387
- 13 2 2 Stochastische Eigenschaften des Photonenflusses 389
- 13 2 3 Photonenanzahlstatistik 390
- 13 2 4 Die zufällige Aufteilung von Photonenströmen 394
- 13 3 Quantenzustände des Lichts 396
- 13 3 1 Quantentheorie des harmonischen Oszillators 396
- 13 3 2 Die Analogie zwischen einer optischen Mode und einem harmonischen Oszillator 397
- 13 3 3 Kohärente Zustände 397
- 13 3 4 Quadraturgequetschtes Licht 398
- 13 3 5 Photonenanzahlgequetschtes Licht 399
- 13 3 6 Zweiphotonenhcht 400

Teil II Photonik 411**14 Licht und Materie 413**

- 141 Energieniveaus 413
- 1411 Atome 414
- 1412 Ionen und dotierte Dielektrika 418
- 1413 Moleküle 422
- 1414 Festkörper 424
- 14 2 Die Besetzung von Energieniveaus 428
- 14 21 Die Boltzmannverteilung 428
- 14 2 2 Die Fermi-Dirac-Verteilung 429
- 14 3 Die Wechselwirkung von Photonen mit Atomen 430
- 14 3 1 Die Wechselwirkung von Einmodenlicht mit einem Atom 430
- 14 3 2 Spontane Emission 432
- 14 3 3 Induzierte Emission und Absorption 433
- 14 3 4 Linienverbreiterung 436
- 14 3 5 Verstärkte spontane Emission 439
- 14 3 6 Laserkühlung, Einschluss von Atomen und Atomoptik 440
- 144 Thermisches Licht 443
- 14 41 Das thermische Gleichgewicht zwischen Photonen und Atomen 443
- 14 4 2 Das Spektrum des schwarzen Strahlers 444
- 14 5 Lumineszenz und Lichtstreuung 446
- 14 5 1 Formen der Lumineszenz 447
- 14 5 2 Photolumineszenz 448
- 14 5 3 Lichtstreuung 451

15 Laserverstärker 457

- 15 1 Theorie der Laserverstärkung 459
- 15 11 Gewinn und Bandbreite 459
- 15 12 Phasenverschiebung 460
- 15 2 Pumpen des Verstärkers 461
- 15 21 Geschwindigkeitsgleichungen 462
- 15 2 2 Pumpschemata 464
- 15 3 Verbreitete Laserverstärker 468
- 15 3 1 Rubin 469
- 15 3 2 Neodymdotiertes Glas 470
- 15 3 3 Erbiumdotierte Quarzglasfasern 472
- 15 3 4 Raman-Faserverstärker 474
- 15 3 5 Die Eigenschaften ausgewählter Laserübergänge 475
- 15 4 Die Nichtlinearität von Verstärkern 476
- 15 41 Der Gewinn bei Sättigung in homogen verbreiterten Medien 476
- 15 4 2 Gewinn bei Sättigung in inhomogen verbreiterten Medien 478
- 15 5 Verstärkerrauschen 480
- 15 5 1 Photonenstatistik nach Verstärkung 481

16 Laser 485

- 16 1 Theorie der Laseroszillation 486
- 16 11 Optische Verstärkung und Rückkopplung 486
- 1612 Bedingungen für die Laseroszillation 488
- 16 2 Die Eigenschaften der Laserstrahlung 490
- 16 21 Leistung 490
- 16 2 2 Die spektrale Verteilung 493

- 16 2 3 Räumliche Verteilung und Polarisation 497
- 16 2 4 Modenselektion 498
- 16 3 Bauarten von Lasern 500
- 16 3 1 Festkörperlaser 501
- 16 3 2 Faserlaser 506
- 16 3 3 Raman-Faserlaser 510
- 16 3 4 Chaotische Laser 512
- 16 3 5 Gas- und Farbstofflaser 513
- 16 3 6 Röntgen- und Freie-Elektronen-Laser 515
- 16 3 7 Tabelle ausgewählter Eigenschaften 523
- 16 4 Gepulste Laser 523
- 16 4 1 Methoden zur Erzeugung von Laserpulsen 525
- 16 4 2 Die Analyse von Einschwingvorgängen 526
- 16 4 3 Die Gutemodulation 528
- 16 4 4 Modenkopplung 531
- 16 4 5 Optische Frequenzkämme 535

- 17 Halbleiteroptik 543**
- 17 1 Halbleiter 544
- 17 1 1 Energiebänder und Ladungsträger 544
- 17 1 2 Halbleitermaterialien 547
- 17 1 3 Die Konzentrationen von Elektronen und Lochern 554
- 17 1 4 Erzeugung, Rekombination und Injektion 559
- 17 1 5 Halbleiterübergänge 561
- 17 1 6 Heteroübergänge 564
- 17 1 7 Quantenbeschränkte Strukturen 565
- 17 2 Wechselwirkungen von Photonen mit Ladungsträgern 569
- 17 2 1 Photonenwechselwirkungen in Volumenhalbleitern 570
- 17 2 2 Interbandübergänge in Volumenhalbleitern 571
- 17 2 3 Absorption, Emission und Gewinn in Volumenhalbleitern 574
- 17 2 4 Photonenwechselwirkungen in quantenbeschränkten Strukturen 578
- 17 2 5 Quantenpunkt-Einzelphotonenemitter 579
- 17 2 6 Der Brechungsindex 580

- 18 LED und Laserdioden 585**
- 18 1 Lichtemittierende Dioden (LED) 586
- 18 1 1 Injektionselektrolumineszenz 586
- 18 1 2 Die Eigenschaften von LED 590
- 18 1 3 Materialien und Aufbau von Bauelementen 596
- 18 1 4 Siliciumphotodiode 600
- 18 1 5 Organische LED 601
- 18 1 6 LED-Beleuchtungen 603
- 18 2 Optische Halbleiterverstärker 607
- 18 2 1 Gewinn und Bandbreite 608
- 18 2 2 Der Pumpvorgang 612
- 18 2 3 Heterostrukturen 613
- 18 2 4 Quantenschichtstrukturen 614
- 18 2 5 Superlumineszenzdiode 617
- 18 3 Laserdioden 618
- 18 3 1 Verstärkung, Rückkopplung und Schwingung 618
- 18 3 2 Leistung und Wirkungsgrad 621
- 18 3 3 Spektrale und räumliche Eigenschaften von Laserdioden 624

- 18 4 Quantenemschlusslaser 627
- 18 41 Einfach- und Mehrfachquantenschichtlaser 628
- 18 4 2 Quantendraht- und Mehrfachquantendrahtlaser 631
- 18 4 3 Quantenpunkt- und Mehrfachquantenpunktlaser 632
- 1844 Quantenkaskadenlaser 633
- 18 5 Mikroresonatorlaser 636
- 18 51 Oberflächenemitter 637
- 18 5 2 Mikrodisk- und Mikroringlaser 640
- 185 3 Mikroresonatorlaser aus photonischen Kristallen 641
- 18 6 Nanoresonatorlaser 642

- 19 Photodetektoren 651**
- 191 Photodetektoren 652
- 1911 Äußerer und innerer Photoeffekt 652
- 1912 Allgemeine Eigenschaften 655
- 19 2 Photoleiter 660
- 19 21 Intrinsische Matenahen 660
- 19 2 2 Dotierte Matenahen 661
- 19 2 3 Heterostrukturen 662
- 19 3 Photodioden 663
- 19 31 Die pn-Photodiode 663
- 19 3 2 Die pin-Photodiode 665
- 19 3 3 Heterostrukturen 666
- 19 4 Lawmenphotodioden 669
- 19 41 Konventionelle Lawinenphotodioden 669
- 19 4 2 Dioden mit positions- und verlaufsabhängigen Parametern 675
- 19 4 3 Einzelphotonen- und photonenzahlauflösende Detektoren 676
- 19 5 Arraydetektoren 679
- 19 51 Photodetektoren 679
- 19 5 2 Ausleseelektronik 680
- 19 6 Rauschen in Photodetektoren 681
- 19 61 Photoelektronenrauschen 682
- 19 6 2 Gewinnrauschen 685
- 19 6 3 Schaltungsrauschen 690
- 19 6 4 Signal/Rausch-Verhältnis und Empfindlichkeit analoger Empfänger 692
- 196 5 Bitfehlerrate und Empfindlichkeit digitaler Empfänger 696

- 20 Akustooptik 705**
- 201 Die Wechselwirkung von Licht und Schall 706
- 2011 Braggsche Beugung 706
- 2012 Die Theorie gekoppelter Wellen 711
- 2013 Braggsche Beugung von Strahlen 712
- 20 2 Akustooptische Bauelemente 714
- 20 21 Modulatoren 715
- 20 2 2 Scanner 716
- 20 2 3 Räumliche Schalter 718
- 20 2 4 Filter, Frequenzschieber und Isolatoren 720
- 20 3 Akustooptik von anisotropen Medien 721
- 20 31 Akustische Wellen in anisotropen Matenahen 721

21	Elektrooptik 727
211	Grundlagen der Elektrooptik 728
2111	Pockels- und Kerreffekt 728
2112	Elektrooptische Modulatoren und Schalter 729
2113	Scanner 732
2114	Richtkoppler 733
2115	Räumliche Lichtmodulatoren 735
212	Elektrooptik anisotroper Medien 737
2121	Kristalloptik Eine kurze Wiederholung 737
212 2	Pockels- und Kerreffekt 737
212 3	Modulatoren 741
213	Elektrooptik von Flüssigkristallen 742
213 1	Phasenschieber und Modulatoren 742
213 2	Räumliche Lichtmodulatoren und Displays 746
214	Photorefraktivität 749
2141	Vereinfachte Theorie der Photorefraktion 750
21 5	Elektroabsorption 753
22	Nichtlineare Optik 759
221	Nichtlineare optische Medien 760
2211	Die nichtlineare Wellengleichung 762
22 2	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung 763
22 21	Frequenzverdopplung und Gleichrichtung 763
22 2 2	Der elektrooptische Effekt 765
22 2 3	Dreiwellenmischung 766
22 2 4	Phasenbedingung und Abstimmungskurven 769
22 2 5	Quasi-Phasen Anpassung 773
22 3	Nichtlineare Optik dritter Ordnung 775
22 31	Die Erzeugung der dritten Harmonischen und der optische Kerreffekt 775
22 3 2	Selbstphasenmodulation, Selbstfokussierung und räumliche Solitonen 776
22 3 3	Kreuzphasenmodulation 778
22 3 4	Vierwellenmischung 778
22 3 5	Optische Phasenkonjugation 780
22 4	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung Die Theorie gekoppelter Wellen 782
22 41	Die Gleichungen gekoppelter Wellen 782
22 4 2	Frequenzverdopplung 784
22 4 3	Optische Frequenzkonversion 786
22 4 4	Optische parametrische Verstärkung und Oszillation 787
22 5	Nichtlineare Optik dritter Ordnung Die Theorie gekoppelter Wellen 789
22 5 1	Vierwellenmischung 789
22 5 2	Dreiwellenmischung und Erzeugung der dritten Harmonischen 791
22 5 3	Optische Phasenkonjugation 792
22 6	Anisotrope nichtlineare Medien 794
22 61	Dreiwellenmischung in anisotropen nichtlinearen Medien zweiter Ordnung 795
22 7	Dispersive nichtlineare Medien 796
22 71	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Integraltransformation 796
22 7 2	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Differentialgleichung 797

- 23 **Ultraschnelle Optik 803****
- 23 1 Eigenschaften von Pulsen 804
- 23 11 Zeitliche und spektrale Eigenschaften 804
- 23 12 Gaußpulse und gechirpte Gaußpulse 807
- 23 13 Räumliche Eigenschaften 808
- 23 2 Pulsformung und Kompression 810
- 23 21 Chirpfilter 810
- 23 2 2 Ausführungen von Chirpfiltern 816
- 23 2 3 Pulskompression 819
- 23 2 4 Pulsformung 819
- 23 3 Pulsausbreitung in optischen Fasern 821
- 23 3 1 Die optische Faser als Chirpfilter 821
- 23 3 2 Ausbreitung eines Gaußpulses in einer optischen Faser 823
- 23 3 3 Diffusionsgleichung für langsam variierende Einhüllende 827
- 23 3 4 Analogie zwischen Dispersion und Beugung 828
- 23 4 Ultraschnelle lineare Optik 831
- 23 41 Strahlenoptik 831
- 23 4 2 Wellen- und Fourieroptik 832
- 23 4 3 Optik von Strahlbündeln 834
- 23 5 Ultraschnelle nichtlineare Optik 838
- 23 5 1 Gepulste parametrische Prozesse 838
- 23 5 2 Optische Solitonen 842
- 23 5 3 Superkontinuumlicht 848
- 23 5 4 Die Erzeugung höherer Harmonischer und Attosekundenoptik 850
- 23 6 Pulsdetektion 854
- 23 6 1 Die Messung der Intensität 854
- 23 6 2 Die Messung der spektralen Intensität 858
- 23 6 3 Die Messung der Phase 859
- 23 6 4 Messung des Spektrogramms 861

- 24 **Optische Verbindungen und Schalter 869****
- 241 Optische Verbindungen 871
- 2411 Die Verbindungsmatrix 871
- 2412 Nichtreziproke Verbindungen Isolatoren und Zirkulatoren 872
- 2413 Brechende und beugende Verbindungen im freien Raum 873
- 2414 Wellenleiterverbindungen 875
- 2415 Nichtreziproke optische Verbindungen 876
- 2416 Optische Verbindungen in Mikroelektronik und Computertechnik 876
- 242 Passive optische Router 881
- 24 21 Wellenlängenbasierte Router 881
- 24 2 2 Polisations-, phasen- und intensitätsbasierte Router 885
- 24 3 Photonische Schalter 887
- 24 31 Ausführungen von räumlichen Schaltern 887
- 24 3 2 Realisierungen von photonischen räumlichen Schaltern 889
- 24 3 3 Volloptische räumliche Schalter 895
- 24 3 4 Wellenlängenempfindliche Schalter 902
- 24 3 5 Zeitbereichsschalter 904
- 24 3 6 Code- oder Paketschalter 906
- 24 4 Photonische Logikgatter 908
- 24 41 Bistabile Systeme 908
- 244 2 Das Prinzip der optischen Bistabilität 910
- 24 4 3 Bistabile optische Bauelemente 912

25	Faseroptische Kommunikation 919
251	Faseroptische Komponenten 920
2511	Optische Fasern 920
25 12	Quellen für optische Sender 925
25 13	Optische Verstärker 926
25 14	Detektoren für optische Empfänger 928
25 15	Integrierte optische Schaltkreise 930
25 2	Faseroptische Nachrichtensysteme 931
25 21	Entwicklungsgeschichte faseroptischer Nachrichtensysteme 932
25 2 2	Die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Systemen 935
25 2 3	Dampfungs- und dispersionsbegrenzte Systeme 937
25 2 4	Kompensation und Management von Dämpfung und Dispersion 942
25 2 5	Sohtonoptische Kommunikation 944
25 3	Modulation und Multiplexing 945
25 3 1	Modulation 945
25 3 2	Multiplexing 947
25 3 3	Wellenlängenmultiplexing 948
25 3 4	Raummultiplexing 950
25 4	Kohärente optische Kommunikation 952
25 41	Der Heterodyndetektor 953
25 4 2	Der symmetrische Homodyndetektor 954
25 4 3	Kohärente Systeme 955
25 5	Faseroptische Netze 958
25 5 1	Netztopologien und Vielfachzugriff 958
25 5 2	Wellenlängenmultiplexnetze 961
	Anhang A Die Fouriertransformation 969
A1	Die eindimensionale Fouriertransformation 969
A11	Eigenschaften der Fouriertransformation 969
A12	Beispiele 970
A2	Zeitliche und spektrale Breite 970
A21	Die quadratisch gemittelte Breite 970
A22	Die leistungsaquivalente Breite 972
A23	1/e-, Halbwerts- und 3-dB-Breite 973
A3	Die zweidimensionale Fouriertransformation 973
A3 1	Eigenschaften 974
	Anhang B Lineare Systeme 977
B1	Eindimensionale lineare Systeme 977
B11	Lineare Systeme 977
B2	Zweidimensionale lineare Systeme 979
	Anhang C Die Moden linearer Systeme 981
C1	Die Moden eines diskreten linearen Systems 982
C2	Die Moden eines kontinuierlichen durch einen Integraloperator beschriebenen Systems 982
C21	Translationssymmetrie und harmonische Moden 983
C3	Die Moden eines durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschriebenen Systems 983
C4	Die Moden eines durch eine partielle Differentialgleichung beschriebenen Systems 984
C41	Die Moden des Feldes/der Welle in einem homogenen Medium mit Randbedingungen 984
C42	Moden von Feldern/Wellen in einem periodischen Medium 985

Losungen zu den Übungen 987

- 1 Strahlenoptik 987
- 2 Wellenoptik 992
- 3 Optik von Strahlbündeln 994
- 4 Founeroptik 996
- 5 Elektromagnetische Optik 998
- 6 Polansationsoptik 998
- 7 Optik photomscher Kristalle 999
- 9 Wellenleiteroptik 999
- 10 Faseroptik 1000
- 11 Resonatoroptik 1002
- 12 Statistische Optik 1003
- 13 Photonenoptik 1004
- 14 Licht und Materie 1005
- 15 Laserverstärker 1006
- 16 Laser 1008
- 17 Halbleiteroptik 1010
- 18 LED und Laserdioden 1012
- 19 Photodetektoren 1014
- 20 Akustooptik 1015
- 21 Elektrooptik 1016
- 22 Nichtlineare Optik 1016
- 23 Ultraschnelle Optik 1020
- 24 Optische Verbindungen und Schalter 1020

Stichwortverzeichnis 1023