

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage XIX

Vorwort zur zweiten Auflage XXIII

Teil I Optik 1

1	Strahlenoptik	3
1.1	Postulate der Strahlenoptik	4
1.1.1	Ausbreitung in einem homogenen Medium	5
1.2	Einfache optische Komponenten	6
1.2.1	Spiegel	6
1.2.2	Ebene Grenzflächen	8
1.2.3	Sphärische Grenzflächen und Linsen	10
1.2.4	Lichtleiter	13
1.3	Gradientenindexoptik	14
1.3.1	Die Strahlengleichung	14
1.3.2	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex	15
1.3.3	Die Eikonalgleichung	18
1.4	Matrizenoptik	19
1.4.1	Die Strahltransfermatrix	19
1.4.2	Matrizen einfacher optischer Komponenten	20
1.4.3	Matrizen von hintereinander geschalteten optischen Komponenten	21
1.4.4	Periodische optische Systeme	23
2	Wellenoptik	29
2.1	Die Postulate der Wellenoptik	30
2.1.1	Die Wellengleichung	30
2.2	Monochromatische Wellen	31
2.2.1	Komplexe Darstellung und die Helmholtzgleichung	31
2.2.2	Einfache Wellen	32
2.2.3	Paraxiale Wellen	34
2.3	Die Beziehung zwischen Wellenoptik und Strahlenoptik	35
2.3.1	Die Eikonalgleichung	36
2.4	Einfache optische Komponenten	36
2.4.1	Reflexion und Brechung	36
2.4.2	Durchgang durch optische Komponenten	37
2.4.3	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex	41

2.5	Interferenz	42
2.5.1	Interferenz zweier Wellen	42
2.5.2	Vielwelleninterferenz	45
2.6	Polychromatisches und gepulstes Licht	49
2.6.1	Zeitliche und spektrale Beschreibung	49
2.6.2	Lichtschwebung	51
3	Optik von Strahlbündeln	57
3.1	Der Gaußstrahl	57
3.1.1	Die komplexe Amplitude eines Gaußstrahls	57
3.1.2	Eigenschaften von Gaußstrahlen	58
3.1.3	Die Qualität eines Strahlbündels	64
3.2	Durchgang durch optische Komponenten	64
3.2.1	Durchgang durch eine dünne Linse	64
3.2.2	Formung eines Strahlbündels	66
3.2.3	Reflexion an einem Kugelspiegel	67
3.2.4	Durchgang durch ein beliebiges optisches System	68
3.3	Hermite-Gauß-Strahlen	70
3.3.1	Die komplexe Amplitude	71
3.3.2	Intensitätsverteilung	71
3.4	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.1	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.2	Optische Wirbel	73
3.4.3	Ince-Gauß-Strahlen	73
3.5	Nichtbeugende Strahlen	74
3.5.1	Besselstrahlen	74
3.5.2	Airystrahlen	75
4	Fourieroptik	79
4.1	Lichtausbreitung im Vakuum	80
4.1.1	Räumliche harmonische Funktionen und ebene Wellen	80
4.1.2	Die Übertragungsfunktion des Vakuums	85
4.1.3	Die Impulsantwortfunktion des Vakuums	87
4.1.4	Huygens-Fresnel-Prinzip	88
4.2	Die optische Fouriertransformation	88
4.2.1	Fouriertransformation im Fernfeld	88
4.2.2	Fouriertransformation mithilfe einer Linse	89
4.3	Lichtbeugung	91
4.3.1	Fraunhoferbeugung	92
4.3.2	Fresnelbeugung	94
4.3.3	Nichtbeugende Wellen	97
4.4	Bildentstehung	98
4.4.1	Strahlenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	98
4.4.2	Wellenoptische Beschreibung eines $4f$ -Systems	99
4.4.3	Wellenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	101
4.4.4	Abbildung im Nahfeld	104
4.5	Holographie	105
4.5.1	Die holographische Codierung	106
4.5.2	Holographie außerhalb der optischen Achse	107
4.5.3	Fouriertransformations-Holographie	108
4.5.4	Holographische Ortsfilter	109
4.5.5	Die holographische Apparatur	109
4.5.6	Volumenholographie	110

5	Elektromagnetische Optik	117
5.1	Die elektromagnetische Theorie des Lichts	118
5.1.1	Die maxwellschen Gleichungen im Vakuum	118
5.1.2	Die Wellengleichung	118
5.1.3	Die maxwellschen Gleichungen in Medien	119
5.1.4	Randbedingungen	120
5.1.5	Intensität, Leistung und Energie	120
5.1.6	Impuls	120
5.2	Elektromagnetische Wellen in Dielektrika	121
5.2.1	Definitionen	121
5.2.2	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	121
5.2.3	Nichtlineare, dispersive, inhomogene oder anisotrope Medien	122
5.3	Monochromatische elektromagnetische Wellen	124
5.3.1	Die maxwellschen Gleichungen in einem Medium	125
5.3.2	Intensität und Leistung	125
5.3.3	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	125
5.3.4	Inhomogene Medien	125
5.3.5	Dispersive Medien	125
5.4	Einfache elektromagnetische Wellen	126
5.4.1	Ebene, Dipol- und gaußsche elektromagnetische Wellen	126
5.4.2	Die Beziehung zwischen elektromagnetischer Optik und skalarer Wellenoptik	129
5.4.3	Vektor-Strahlbündel	130
5.5	Absorption und Dispersion	130
5.5.1	Absorption	130
5.5.2	Dispersion	132
5.5.3	Resonante Medien	134
5.6	Die Streuung elektromagnetischer Wellen	137
5.6.1	Die bornsche Näherung	138
5.6.2	Rayleighstreuung	138
5.6.3	Miestreuung	141
5.6.4	Dämpfung in einem streuenden Medium	142
5.7	Pulsausbreitung in dispersiven Medien	143
5.7.1	Die Gruppengeschwindigkeit	143
5.7.2	Die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit	144
6	Polarisationsoptik	151
6.1	Die Polarisation des Lichts	152
6.1.1	Die Polarisation	152
6.1.2	Die Matrixdarstellung der Polarisation	155
6.2	Reflexion und Brechung	159
6.2.1	TE-Polarisation	160
6.2.2	TM-Polarisation	161
6.3	Die Optik anisotroper Medien	163
6.3.1	Der Brechungsindex	163
6.3.2	Ausbreitung entlang einer Hauptachse	165
6.3.3	Ausbreitung entlang beliebiger Richtungen	166
6.3.4	Die Dispersionsrelation, Strahlen, Wellenfronten und Energietransport	168
6.3.5	Doppelbrechung	170
6.4	Optische Aktivität und Magnetooptik	172
6.4.1	Optische Aktivität	172
6.4.2	Magnetooptik: Der Faradayeffekt	174

- 6.5 Optik von Flüssigkristallen 175
- 6.5.1 Die Struktur von Flüssigkristallen 175
- 6.5.2 Optische Eigenschaften von verdrehten nematischen Flüssigkristallen 176
- 6.6 Polarisierende Bauelemente 177
- 6.6.1 Polarisatoren 177
- 6.6.2 Retarder 178
- 6.6.3 Polarisationsrotatoren 179
- 6.6.4 Nichtreziproke polarisierende Bauelemente 179

- 7 Optik photonischer Kristalle 185**
- 7.1 Optik von dielektrischen Schichtmedien 187
- 7.1.1 Matrixtheorie der Optik von Schichtmedien 187
- 7.1.2 Das Fabry-Pérot-Etalon 192
- 7.1.3 Das Bragggitter 194
- 7.2 Eindimensionale photonische Kristalle 200
- 7.2.1 Blochmoden 201
- 7.2.2 Matrizenoptik periodischer Medien 203
- 7.2.3 Fourieroptik periodischer Medien 208
- 7.2.4 Grenzflächen zwischen periodischen und homogenen Medien 210
- 7.3 Zwei- und dreidimensionale photonische Kristalle 211
- 7.3.1 Zweidimensionale photonische Kristalle 212
- 7.3.2 Dreidimensionale photonische Kristalle 213

- 8 Optik von Metallen und Metamaterialien 221**
- 8.1 Einfach- und doppelt-negative Medien 223
- 8.1.1 Wellenausbreitung in einfach- und doppelt-negativen Medien 224
- 8.1.2 Wellen an Grenzflächen zwischen DP-, EN- und DP-Medien 226
- 8.1.3 Hyperbolische Medien 232
- 8.2 Optik von Metallen: Plasmonik 234
- 8.2.1 Die optischen Eigenschaften von Metallen 234
- 8.2.2 Die Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum: Oberflächenplasmonpolaritonen 239
- 8.2.3 Metallische Nanokugeln: Lokalisierte Oberflächenplasmonen 241
- 8.2.4 Optische Antennen 244
- 8.3 Optik von Metamaterialien 245
- 8.3.1 Metamaterialien 246
- 8.3.2 Metaoberflächen 251
- 8.4 Transformationsoptik 253
- 8.4.1 Transformationsoptik 253
- 8.4.2 Tarnumhänge 255

- 9 Wellenleiteroptik 261**
- 9.1 Wellenleiter aus ebenen Spiegeln 262
- 9.1.1 Wellenleitermoden 262
- 9.1.2 Ausbreitungskonstanten 263
- 9.1.3 Feldverteilungen 264
- 9.1.4 Die Zahl der Moden 265
- 9.1.5 Die Dispersionsrelation 265
- 9.1.6 Gruppengeschwindigkeiten 265
- 9.1.7 TM-Moden 266
- 9.1.8 Vielmodenfelder 267
- 9.2 Ebene dielektrische Wellenleiter 267
- 9.2.1 Wellenleitermoden 268

- 9.2.2 Feldverteilungen 270
- 9.2.3 Dispersionsrelation und Gruppengeschwindigkeiten 271
- 9.3 Zweidimensionale Wellenleiter 273
 - 9.3.1 Der rechteckige Spiegelwellenleiter 273
 - 9.3.2 Der rechteckige dielektrische Wellenleiter 274
 - 9.3.3 Die Geometrie von Kanalwellenleitern 274
 - 9.3.4 Materialien 275
- 9.4 Optische Kopplung in Wellenleitern 276
 - 9.4.1 Einkopplung 276
 - 9.4.2 Gekoppelte Wellenleiter 277
 - 9.4.3 Wellenleiterarrays 281
- 9.5 Photonische Kristalle als Wellenleiter 282
 - 9.5.1 Braggitter als Wellenleiter 282
 - 9.5.2 Bragg-Gitterwellenleiter als photonischer Kristall mit einer Defektschicht 283
 - 9.5.3 Zweidimensionale Wellenleiter aus photonischen Kristallen 283
- 9.6 Plasmonische Wellenleiter 283

- 10 Faseroptik 289**
 - 10.1 Geführte Strahlen 290
 - 10.1.1 Stufenindexfasern 290
 - 10.1.2 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**
 - 11.1 Resonatoren aus ebenen Spiegeln 323
 - 11.1.1 Resonatormoden 323
 - 11.1.2 Schief einfallende Resonatormoden 329
 - 11.2 Kugelspiegelresonatoren 330
 - 11.2.1 Strahleingrenzung 330
 - 11.2.2 Gaußmoden 332
 - 11.2.3 Resonanzfrequenzen 334
 - 11.2.4 Hermite-Gauß-Moden 335
 - 11.2.5 Endliche Blenden und Beugungsverluste 336
 - 11.3 Zwei- und dreidimensionale Resonatoren 337
 - 11.3.1 Zweidimensionale rechteckige Resonatoren 337
 - 11.3.2 Kreisförmige Resonatoren und Flüstergaleriemoden 338
 - 11.3.3 Dreidimensionale rechteckige Hohlraumresonatoren 339

- 11.4 Mikro- und Nanoresonatoren 340
 - 11.4.1 Rechteckige Mikroresonatoren 341
 - 11.4.2 Mikrosäulen-, Mikrodisk- und Mikroringresonatoren 342
 - 11.4.3 Mikrokugeln 343
 - 11.4.4 Mikroresonatoren aus photonischen Kristallen 344
 - 11.4.5 Plasmonische Resonatoren: Metallische Nanodisks und Nanokugeln 345

- 12 Statistische Optik 349**
 - 12.1 Statistische Eigenschaften von stochastischem Licht 350
 - 12.1.1 Optische Intensität 350
 - 12.1.2 Zeitliche Kohärenz und Spektrum 351
 - 12.1.3 Räumliche Kohärenz 355
 - 12.1.4 Longitudinale Kohärenz 358
 - 12.2 Interferenz von partiell kohärentem Licht 359
 - 12.2.1 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
 - 12.4.1 Die Kohärenzmatrix 371
 - 12.4.2 Stokesparameter und Poincarékugeldarstellung 371
 - 12.4.3 Unpolarisiertes Licht 372
 - 12.4.4 Polarisiertes Licht 372

- 13 Photonenoptik 377**
 - 13.1 Das Photon 378
 - 13.1.1 Licht in einem Resonator 378
 - 13.1.2 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
 - 13.2.1 Der Photonenstrom 387
 - 13.2.2 Stochastische Eigenschaften des Photonenflusses 389
 - 13.2.3 Photonenstatistik 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 Zweiphotonenlicht 400

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

- 14.1 Energieniveaus 413
 - 14.1.1 Atome 414
 - 14.1.2 Ionen und dotierte Dielektrika 418
 - 14.1.3 Moleküle 422
 - 14.1.4 Festkörper 424
- 14.2 Die Besetzung von Energieniveaus 428
 - 14.2.1 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
- 14.4 Thermisches Licht 443
 - 14.4.1 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
 - 15.1.1 Gewinn und Bandbreite 459
 - 15.1.2 Phasenverschiebung 460
- 15.2 Pumpen des Verstärkers 461
 - 15.2.1 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
 - 15.4.1 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
 - 16.1.1 Optische Verstärkung und Rückkopplung 486
 - 16.1.2 Bedingungen für die Laseroszillation 488
- 16.2 Die Eigenschaften der Laserstrahlung 490
 - 16.2.1 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 Gütemodulation	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 Löchern	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	Siliciumphotonik	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	Superlumineszenzdioden	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 Quanteneinschlusslaser 627
 - 18.4.1 Einfach- und Mehrfachquantenschichtlaser 628
 - 18.4.2 Quantendraht- und Mehrfachquantendrahtlaser 631
 - 18.4.3 Quantenpunkt- und Mehrfachquantenpunktlaser 632
 - 18.4.4 Quantenkaskadenlaser 633
- 18.5 Mikroresonatorlaser 636
 - 18.5.1 Oberflächenemitter 637
 - 18.5.2 Mikrodisk- und Mikroringlaser 640
 - 18.5.3 Mikroresonatorlaser aus photonischen Kristallen 641
- 18.6 Nanoresonatorlaser 642

- 19 Photodetektoren 651**
 - 19.1 Photodetektoren 652
 - 19.1.1 Äußerer und innerer Photoeffekt 652
 - 19.1.2 Allgemeine Eigenschaften 655
 - 19.2 Photoleiter 660
 - 19.2.1 Intrinsische Materialien 660
 - 19.2.2 Dotierte Materialien 661
 - 19.2.3 Heterostrukturen 662
 - 19.3 Photodioden 663
 - 19.3.1 Die pn-Photodiode 663
 - 19.3.2 Die pin-Photodiode 665
 - 19.3.3 Heterostrukturen 666
 - 19.4 Lawinenphotodioden 669
 - 19.4.1 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
 - 19.5.1 Photodetektoren 679
 - 19.5.2 Ausleseelektronik 680
 - 19.6 Rauschen in Photodetektoren 681
 - 19.6.1 Photoelektronenrauschen 682
 - 19.6.2 Gewinnrauschen 685
 - 19.6.3 Schaltungsrauschen 690
 - 19.6.4 Signal/Rausch-Verhältnis und Empfindlichkeit analoger Empfänger 692
 - 19.6.5 Bitfehlerrate und Empfindlichkeit digitaler Empfänger 696

- 20 Akustooptik 705**
 - 20.1 Die Wechselwirkung von Licht und Schall 706
 - 20.1.1 Braggsche Beugung 706
 - 20.1.2 Die Theorie gekoppelter Wellen 711
 - 20.1.3 Braggsche Beugung von Strahlen 712
 - 20.2 Akustooptische Bauelemente 714
 - 20.2.1 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
 - 20.3.1 Akustische Wellen in anisotropen Materialien 721

21	Elektrooptik	727
21.1	Grundlagen der Elektrooptik	728
21.1.1	Pockels- und Kerreffekt	728
21.1.2	Elektrooptische Modulatoren und Schalter	729
21.1.3	Scanner	732
21.1.4	Richtkoppler	733
21.1.5	Räumliche Lichtmodulatoren	735
21.2	Elektrooptik anisotroper Medien	737
21.2.1	Kristalloptik: Eine kurze Wiederholung	737
21.2.2	Pockels- und Kerreffekt	737
21.2.3	Modulatoren	741
21.3	Elektrooptik von Flüssigkristallen	742
21.3.1	Phasenschieber und Modulatoren	742
21.3.2	Räumliche Lichtmodulatoren und Displays	746
21.4	Photorefraktivität	749
21.4.1	Vereinfachte Theorie der Photorefraktion	750
21.5	Elektroabsorption	753
22	Nichtlineare Optik	759
22.1	Nichtlineare optische Medien	760
22.1.1	Die nichtlineare Wellengleichung	762
22.2	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung	763
22.2.1	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-Phasenanpassung	773
22.3	Nichtlineare Optik dritter Ordnung	775
22.3.1	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
22.4.1	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
22.6.1	Dreiwellenmischung in anisotropen nichtlinearen Medien zweiter Ordnung	795
22.7	Dispersive nichtlineare Medien	796
22.7.1	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
- 23.1.1 Zeitliche und spektrale Eigenschaften 804
- 23.1.2 Gaußpulse und gechirpte Gaußpulse 807
- 23.1.3 Räumliche Eigenschaften 808
- 23.2 Pulsformung und Kompression 810
- 23.2.1 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
- 23.4.1 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 Superkontinuumslicht 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**
- 24.1 Optische Verbindungen 871
- 24.1.1 Die Verbindungsmatrix 871
- 24.1.2 Nichtreziproke Verbindungen: Isolatoren und Zirkulatoren 872
- 24.1.3 Brechende und beugende Verbindungen im freien Raum 873
- 24.1.4 Wellenleiterverbindungen 875
- 24.1.5 Nichtreziproke optische Verbindungen 876
- 24.1.6 Optische Verbindungen in Mikroelektronik und Computertechnik 876
- 24.2 Passive optische Router 881
- 24.2.1 Wellenlängenbasierte Router 881
- 24.2.2 Polarisations-, phasen- und intensitätsbasierte Router 885
- 24.3 Photonische Schalter 887
- 24.3.1 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
- 24.4.1 Bistabile Systeme 908
- 24.4.2 Das Prinzip der optischen Bistabilität 910
- 24.4.3 Bistabile optische Bauelemente 912

25	Faseroptische Kommunikation	919
25.1	Faseroptische Komponenten	920
25.1.1	Optische Fasern	920
25.1.2	Quellen für optische Sender	925
25.1.3	Optische Verstärker	926
25.1.4	Detektoren für optische Empfänger	928
25.1.5	Integriert-photonische Schaltkreise	930
25.2	Faseroptische Nachrichtensysteme	931
25.2.1	Entwicklungsgeschichte faseroptischer Nachrichtensysteme	932
25.2.2	Die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Systemen	935
25.2.3	Dämpfungs- und dispersionsbegrenzte Systeme	937
25.2.4	Kompensation und Management von Dämpfung und Dispersion	942
25.2.5	Solitonoptische 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
25.4.1	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
A.1	Die eindimensionale Fouriertransformation	969
A.1.1	Eigenschaften der Fouriertransformation	969
A.1.2	Beispiele	970
A.2	Zeitliche und spektrale Breite	970
A.2.1	Die quadratisch gemittelte Breite	970
A.2.2	Die leistungäquivalente Breite	972
A.2.3	1/e-, Halbwerts- und 3-dB-Breite	973
A.3	Die zweidimensionale Fouriertransformation	973
A.3.1	Eigenschaften	974
	Anhang B Lineare Systeme	977
B.1	Eindimensionale lineare Systeme	977
B.1.1	Lineare Systeme	977
B.2	Zweidimensionale lineare Systeme	979
	Anhang C Die Moden linearer Systeme	981
C.1	Die Moden eines diskreten linearen Systems	982
C.2	Die Moden eines kontinuierlichen durch einen Integraloperator beschriebenen Systems	982
C.2.1	Translationssymmetrie und harmonische Moden	983
C.3	Die Moden eines durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschriebenen Systems	983
C.4	Die Moden eines durch eine partielle Differentialgleichung beschriebenen Systems	984
C.4.1	Die Moden des Feldes/der Welle in einem homogenen Medium mit Randbedingungen	984
C.4.2	Moden von Feldern/Wellen in einem periodischen Medium	985

	Lösungen zu den Übungen	987
1	Strahlenoptik	987
2	Wellenoptik	992
3	Optik von Strahlbündeln	994
4	Fourieroptik	996
5	Elektromagnetische Optik	998
6	Polarisationsoptik	998
7	Optik photonischer 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