

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	Bragggitter 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	Photonenzahlstatistik	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	Photonenzahlgequetschtes 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 Polarisierung	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-Phasen Anpassung	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
--	-----------------------------	------

