

Inhaltsverzeichnis

1	Glasfasern und nichtlineare optische Effekte: Eine Übersicht	1
1.1	Lichtwellenleiter und Singlemode-Glasfasern	1
1.2	Lineare und nichtlineare faseroptische Effekte	3
1.3	Faserlaser und Faserverstärker	6
1.4	Auswirkungen und Anwendungen der nichtlinearen Effekte	7
	Literatur	10
2	Wellenausbreitung in dielektrischen Medien	13
2.1	Feldgleichungen in dielektrischen Medien	14
2.1.1	Feldgleichungen im Zeitbereich	14
2.1.2	Maxwell-Gleichungen im Frequenzbereich	16
2.1.3	Bedeutung der Polarisierung für die Wellenausbreitung	17
2.2	Materialparameter linearer dielektrischer Medien	18
2.2.1	Lineare, verlustfreie, isotrope Medien	19
2.2.2	Frequenzabhängigkeit, Dispersion	20
2.2.3	Komplexwertige Suszeptibilität, dielektrische Verluste	21
2.2.4	Kramers-Kronig-Relation	23
2.2.5	Sellmeier-Gleichung	24
2.2.6	Anisotrope Medien, tensorielle Beschreibung	25
2.3	Eigenschaften nichtlinearer dielektrischer Medien	27
2.3.1	Skalare nichtlineare Suszeptibilität	27
2.3.2	Tensordarstellung der nichtlinearen Suszeptibilität	28
2.3.3	Nichtlineare Suszeptibilität im Zeitbereich	29
2.3.4	Nichtlineare Suszeptibilität im Frequenzbereich	30
2.4	Wellengleichung in linearen, isotropen Medien	34
2.4.1	Vektorielle Wellengleichung in inhomogenen Medien	34
2.4.2	Homogene Medien und skalare Wellengleichung	35
2.4.3	Wellenausbreitungskonstanten in homogenen Medien	36
2.4.4	Ebene Wellen in verlustfreien Medien	37
2.4.5	Leistungstransport und Intensität	40

2.4.6	Ebene Wellen in verlustbehafteten Medien	40
2.4.7	Wellengleichung in linearen verlustbehafteten Medien im Zeitbereich	42
2.5	Wellengleichungen in nichtlinearen Medien	43
2.5.1	Nichtlineare Wellengleichung im Frequenzbereich	43
2.5.2	Nichtlineare Wellengleichung im Zeitbereich	43
2.5.3	Näherung der langsam veränderlichen Hüllkurve	44
2.6	Polarisation, anisotrope Medien und Doppelbrechung	46
2.7	Bedingungen an Grenzflächen zweier Dielektrika	48
2.8	Materialien für Singlemode-Glasfasern	50
	Literatur	54
3	Moden in Stufenindex-Glasfasern	57
3.1	Wellengleichung in zylindrischen Wellenleitern	58
3.2	Moden in Wellenleitern	60
3.3	Definitionen der modalen Parameter	61
3.4	Vektorielle Moden in Stufenindex-Fasern	62
3.4.1	Lösungsansatz	63
3.4.2	Eigenwertgleichung	64
3.4.3	TM- und TE-Moden, $\nu = 0$	65
3.4.4	HE- und EH-Moden, $\nu > 0$	68
3.4.5	Grenzfrequenzen und effektive Brechungsindizes	69
3.5	Skalare LP-Moden in schwach führenden Fasern	71
3.5.1	Skalare Wellengleichung und Lösungsfunktionen	72
3.5.2	Eigenwertgleichung der LP-Moden	73
3.5.3	Grenzfrequenzen der LP-Moden	74
3.5.4	Intensitätsverteilung der LP-Moden	77
3.5.5	LP-Moden als Linearkombination entarteter Vektormoden	79
3.6	Singlemodefasern	81
3.6.1	Die LP ₀₁ -Grundmode in typischen Singlemodefasern	81
3.6.2	Cut-off Wellenlänge	84
3.6.3	Modenfeldradien und Fernfeld	85
3.6.4	Gauß-Näherung	89
3.6.5	Divergenzwinkel und numerische Apertur	90
3.6.6	Effektive Modenfläche	92
	Literatur	94
4	Lineare faseroptische Effekte	97
4.1	Dämpfung	97
4.1.1	Absorption	98
4.1.2	Thermische Zerstörung	100
4.1.3	Rayleigh-Streuung	101

4.1.4	Biegung	104
4.1.5	Typische Dämpfungsdaten von Standardfasern	106
4.2	Dispersion	108
4.2.1	Modendispersion	108
4.2.2	Chromatische Dispersion	109
4.2.3	Pulsausbreitung in dispersiven Fasern	114
4.3	Polarisation und Doppelbrechung	118
4.3.1	Ursachen der Doppelbrechung	118
4.3.2	Lineare Doppelbrechung	120
4.3.3	Zirkulare Doppelbrechung	122
4.3.4	Statistisch verteilte Doppelbrechung	123
4.3.5	Polarisationserhaltende Glasfasern	124
4.3.6	Polarisationsmodendispersion	126
	Literatur	128
5	Nichtlinearer Brechungsindex	133
5.1	Grundlagen des nichtlinearen Brechungsindex	133
5.2	Nichtlineare Polarisierbarkeit in Glas	135
5.3	Nichtlinearer Brechungsindex in Glas	140
5.4	Nichtlinearer Koeffizient von Glasfasern	143
	Literatur	146
6	Nichtlineare Schrödinger-Gleichung	149
6.1	Ansatz und Herleitung	149
6.1.1	Pulsausbreitung in linearen Wellenleitern	150
6.1.2	Lineare Ausbreitungsgleichung	152
6.1.3	Nichtlineare Schrödinger-Gleichung	154
6.2	Gekoppelte Schrödinger-Gleichungen	155
6.3	Der Split-Step-Fourier-Algorithmus	157
6.3.1	Prinzip der Split-Step-Fourier-Methode	158
6.3.2	Fehlerbetrachtung	160
6.3.3	Schrittweitenbestimmung	163
6.3.4	Modifizierte Split-Step-Verfahren	169
	Literatur	171
7	Effekte der Kerr-Nichtlinearität in Glasfasern	173
7.1	Selbstphasenmodulation	173
7.1.1	Selbstphasenmodulation ohne Dispersionseinfluss	174
7.1.2	Selbstphasenmodulation und Dispersion	177
7.1.3	Superkontinuum-Erzeugung	179
7.2	Kreuzphasenmodulation	180
7.3	Vierwellenmischung	182

7.3.1	Frequenzen der Vierwellenmischung	182
7.3.2	Phasenanpassung	184
7.3.3	Analytische Bestimmung der Amplituden, parametrische Verstärkung	188
7.4	Modulationsinstabilität	199
7.4.1	Skalare MI im Bereich anomaler Dispersion	200
7.4.2	Vektorielle MI in doppelbrechenden Fasern	200
	Literatur	201
8	Stimulierte Raman-Streuung	205
8.1	Raman-Streuung: Eine Übersicht	205
8.1.1	Klassifizierung der Streuprozesse	205
8.1.2	Raman-Streuprozesse	207
8.2	Spontane Raman-Streuung	208
8.2.1	Placzek-Modell, klassische Elektrodynamik	208
8.2.2	Quantenelektronisches Modell	210
8.2.3	Makroskopische Streukoeffizienten	215
8.2.4	Spontane Raman-Streuung in Glasfasern	216
8.3	Stimulierte Raman-Streuung	218
8.3.1	Quantenelektronische Betrachtung der SRS	218
8.3.2	Elektrodynamische Betrachtung der SRS	220
8.3.3	Frequenzabhängigkeit der SRS	224
8.3.4	Impulsantwort der SRS	226
8.3.5	Zusammenhang zwischen stimulierter und spontaner Raman-Streuung	228
8.3.6	Lichtverstärkung durch SRS	228
8.3.7	Stimulierte Raman-Streuung in Glasfasern	229
8.3.8	Einfluss der Polarisierung	234
8.3.9	Vergleich der SRS in verschiedenen Fasertypen	238
8.4	Raman-Faserverstärker	239
8.4.1	Gekoppelte Leistungsgleichungen	240
8.4.2	Kleinsignalverstärkung	241
8.4.3	Großsignalverstärkung	244
8.4.4	Messung des faserspezifischen Raman-Koeffizienten	247
8.5	Stimuliert-verstärkte spontane Raman-Streuung	248
8.5.1	Quantitative Beschreibung der spontanen Raman-Streuung	250
8.5.2	Spontane Raman-Streuung in den gekoppelten Leistungsgleichungen	252
8.5.3	Beispielsimulationen zur verstärkten spontanen Raman-Streuung	254
8.5.4	Analytische Bestimmung der SRS-Schwelle	258
8.5.5	Raman-Superstrahler	267

8.5.6	Rauschen in Raman-Verstärkern	268
8.5.7	Kaskadierte Raman-Streuung	275
8.6	Beispiel für einen Raman-Leistungsverstärker	277
	Literatur	278
9	Stimulierte Brillouin-Streuung	283
9.1	Brillouin-Streuung: Eine Übersicht	283
9.2	Grundlagen der Brillouin-Streuung	286
9.2.1	Schallwellen in Festkörpern	286
9.2.2	Photoelastischer Effekt	292
9.2.3	Akustooptischer Effekt und Brillouin-Streuung	295
9.2.4	Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Dotierung	304
9.2.5	Akustische Moden in Glasfasern	305
9.3	Spontane Brillouin-Streuung	309
9.3.1	Spontane Brillouin-Streuung im Volumenmaterial	310
9.3.2	Spontane Brillouin-Streuung im Teilchenbild	311
9.3.3	Spontane Brillouin-Streuung in Glasfasern	313
9.4	Stimulierte Brillouin-Streuung	321
9.4.1	Elektrostriktion	321
9.4.2	Interferenz zweier gegenläufiger Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen	328
9.4.3	Ausbreitungsgleichungen der stimulierten Brillouin-Streuung	332
9.4.4	Einfluss der Polarisations	342
9.5	Stimulierte Brillouin-Streuung in Glasfasern	343
9.5.1	Faserspezifischer Brillouin-Koeffizient	343
9.5.2	Gekoppelte Leistungsgleichungen	344
9.5.3	Kleinsignalverstärkung	345
9.5.4	Großsignalverstärkung	346
9.5.5	Messung des SBS-Koeffizienten einer Faser	348
9.5.6	Einfluss der spektralen Breite der Pumplichtwelle	352
9.5.7	Einfluss der Pulsdauer	357
9.5.8	Einfluss der Dotierung und Fasergeometrie auf die SBS	358
9.5.9	Polarisation und SBS in Glasfasern	362
9.5.10	Brillouin-Faserverstärker, -Filter und -Faserlaser	369
9.5.11	Slow Light	371
9.6	Stimuliert-verstärkte spontane Brillouin-Streuung	374
9.6.1	SBS-Schwelle	376
9.6.2	Mathematische Beschreibung und Modellierung	377
9.6.3	SBS-Schwelle in aktiven Fasern	385
9.6.4	Bedeutung der SBS-Schwelle	387
9.7	Sensoranwendungen der Brillouin-Streuung	389
9.7.1	Dehnungs- und Temperatur-Koeffizienten der Brillouin-Streuung	389

9.7.2	Einfluss von Druck und Biegung	391
9.7.3	Ortsaufgelöste verteilte Sensorverfahren	391
9.8	Maßnahmen zur SBS-Unterdrückung	393
9.8.1	SBS-Unterdrückung: Eine Übersicht	393
9.8.2	Wickelmaschine zur Herstellung von verspannten Fasern	398
9.8.3	Effektiver SBS-Koeffizient in Fasern mit ortsvariabler Dehnung	403
9.8.4	Berechnung des SBS-Spektrums mit einer Dichtefunktion	404
9.8.5	SBS-Unterdrückung mit einer linearen Dehnungsverteilung	406
9.8.6	Beliebige spektrale Formung der SBS	409
9.8.7	Optimierte Verspannung in aktiven Fasern	412
9.8.8	Zusammenfassung der SBS-Formung in verspannten Fasern	417
9.9	Dynamik der SBS	417
	Literatur	420
10	Raman-Faserlaser	431
10.1	Aufbau und Merkmale von Raman-Faserlasern	431
10.1.1	Aufbau eines einfachen Raman-Faserlasers	431
10.1.2	Kaskadierte Raman-Faserlaser	433
10.1.3	Merkmale von Raman-Faserlasern	433
10.1.4	Beispiel für einen Raman-Faserlaser	435
10.1.5	Spezielle Raman-Faserlaser	436
10.2	Quantitative Beschreibung von Raman-Faserlasern	437
10.2.1	Schwingbedingung	438
10.2.2	Beschreibung durch gekoppelte Leistungsgleichungen	443
10.2.3	Analytische Überlegungen	444
10.3	Simulative Berechnung der Ausgangsleistung	445
10.3.1	Simulation mit dem Schießverfahren	446
10.3.2	Simulationsbeispiele	449
10.4	Faser-Bragg-Gitter für Raman-Faserlaser	451
10.4.1	Grundlagen von Faser-Bragg-Gittern	451
10.4.2	Photosensitivität und Schreibprozess von FBGs	453
10.4.3	Einfluss von Dehnung und Temperatur	455
10.4.4	Nachbearbeitung und Feinabstimmung von FBGs	455
10.4.5	FBGs für Raman-Faserlaser	457
10.5	Spektrale Eigenschaften von Raman-Faserlasern	458
10.5.1	Verbreiterung durch FWM	458
10.5.2	Effektive Reflektivität der Resonator-FBGs	460
10.5.3	Mathematisches Simulationsmodell	461
10.5.4	Schrittweitensteuerung	465
10.5.5	Simulations- und Messergebnisse	469
10.5.6	DBR- und DFB-Raman-Faserlaser	475

10.5.7 Raman-MOPA	477
10.6 Frequenzverdopplung von Raman-Faserlasern	479
10.6.1 Optische Frequenzverdopplung	479
10.6.2 SHG in periodisch gepolten Kristallen	483
10.6.3 Gelbe Strahlquellen durch SHG eines Raman-Faserlasers	484
10.6.4 Beispiel für einen SHG-Raman-Faserlaser	485
Literatur	487
Anhang A: Definitionen und mathematische Hilfsmittel	493
Sachverzeichnis	503