

Inhaltsverzeichnis

1	Doppler-begrenzte Absorptions- und Fluoreszenz-Spektroskopie mit Lasern	1
1.1	Vorteile des Lasers für die Spektroskopie	1
1.2	Empfindliche Verfahren der Absorptionsspektroskopie	7
1.2.1	Frequenzmodulation des Lasers	7
1.2.2	Absorptionsspektroskopie durch Messung der Abklingzeit eines optischen Resonators	12
1.2.3	Absorptionsspektroskopie innerhalb des Laserresonators	16
1.3	Direkte Messung der absorbierten Photonen	22
1.3.1	Anregungsspektroskopie	22
1.3.2	Photoakustische Spektroskopie	27
1.3.3	Ionisationsspektroskopie	30
1.3.4	Optogalvanische Spektroskopie	37
1.3.5	Optothermische Spektroskopie	40
1.4	Magnetische Resonanz- und Stark-Spektroskopie mit Lasern	44
1.5	Geschwindigkeitsmodulations-Spektroskopie	47
1.6	Laserinduzierte Fluoreszenz	49
1.7	LIBS	56
1.8	Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren	57
2	Nichtlineare Spektroskopie	61
2.1	Lineare und nichtlineare Absorption	61
2.2	Sättigung inhomogen verbreiteter Absorptionsübergänge	65
2.3	Sättigungs-Spektroskopie	70
2.4	Polarisations-Spektroskopie	80
2.4.1	Anschauliche Darstellung	81
2.4.2	Die Frequenzabhängigkeit des Polarisationssignals	82
2.4.3	Größe der Polarisations-signale	86
2.4.4	Empfindlichkeit der Polarisations-Spektroskopie	90
2.4.5	Vorteile der Polarisations-Spektroskopie	91
2.5	Mehrphotonen-Spektroskopie	92
2.5.1	Grundlagen der Zweiphotonen-Absorption	92
2.5.2	Doppler-freie Zweiphotonen-Spektroskopie	95
2.5.3	Abhängigkeit des Zweiphotonen-Signals von der Fokussierung	100

2.5.4	Mehrphotonen-Spektroskopie	101
2.6	Anwendungsbeispiele und spezielle Techniken der nichtlinearen Spektroskopie	103
3	Laser-Raman-Spektroskopie	111
3.1	Grundlagen	111
3.2	Neuere Techniken der linearen Raman-Spektroskopie	116
3.3	Nichtlineare Raman-Spektroskopie	122
3.3.1	Induzierte Raman-Streuung	123
3.3.2	Kohärente Anti-Stokes Raman-Spektroskopie	127
3.3.3	Resonante CARS und Box-CARS	131
3.3.4	Hyper-Raman-Effekt	133
3.4	Spezielle Techniken der Raman-Spektroskopie	135
3.4.1	Resonante Raman-Spektroskopie	135
3.4.2	Raman-Mikroskopie	135
3.4.3	Raman-Spektroskopie auf Oberflächen	136
3.5	Anwendungen der nichtlinearen Raman-Spektroskopie	137
3.6	Vor- und Nachteile der Raman-Spektroskopie	138
4	Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	141
4.1	Reduktion der Doppler-Breite in kollimierten Strahlen	141
4.2	Abkühlung von Molekülen in Überschallstrahlen	147
4.3	Bildung und Spektroskopie von Clustern und van der Waals-Molekülen in kalten Molekularstrahlen	156
4.4	Nichtlineare Spektroskopie in Molekularstrahlen	161
4.5	Kollineare Laserspektroskopie in schnellen Ionenstrahlen	163
4.6	Spektroskopie in kalten Ionenstrahlen	169
4.7	Laser Photodetachment in Molekülstrahlen	170
4.8	Massenselektive Laserspektroskopie in Molekularstrahlen	170
5	Optisches Pumpen und Doppelresonanz-Verfahren	175
5.1	Optisches Pumpen	176
5.2	Optische/Radiofrequenz-Doppelresonanz	181
5.2.1	Grundlagen	181
5.2.2	Laser-Hochfrequenz-Doppelresonanz-Spektroskopie in Molekularstrahlen	183
5.3	Optische/Mikrowellen-Doppelresonanz	186
5.4	Optische/Optische Doppelresonanz	190
5.4.1	Vereinfachung komplexer Absorptionsspektren	190
5.4.2	Stufenweise Anregung und Spektroskopie von Rydberg-Zuständen	194
5.4.3	Molekulare Rydbergzustände	200
5.4.4	Resonante induzierte Raman-Streuung	202
5.4.5	Beispiele für Doppelresonanz-Experimente	205
5.5	Spezielle Doppelresonanz-Techniken	207

5.5.1	Polarisations-Markierung	207
5.5.2	Mikrowellen/Optische Doppelresonanz-Polarisations-Spektroskopie	208
5.5.3	STIRAP-Technik	208
5.5.4	Photo-Assoziations-Spektroskopie	210
6	Zeitaufgelöste Laserspektroskopie	213
6.1	Erzeugung kurzer Lichtpulse	213
6.1.1	Zeitverhalten gepulster Laser	213
6.1.2	Güteschaltung von Laserresonatoren	215
6.1.3	Modenkopplung und Pikosekundenpulse	219
6.1.4	Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen	227
6.1.5	Fiberlaser	241
6.1.6	Solitonenlaser	243
6.1.7	Erzeugung durchstimmbarer kurzer Pulse	246
6.1.8	Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse	249
6.1.9	Der Vorstoß in den Attosekunden-Bereich	254
6.1.10	Formung des Zeitprofils optischer Pulse	256
6.1.11	Zusammenfassung der Erzeugung kurzer Pulse	258
6.2	Messung kurzer Lichtpulse	259
6.2.1	Streackkamera	259
6.2.2	Optischer Korrelator zur Messung kurzer Lichtpulse	261
6.2.3	FROG-Technik	267
6.2.4	SPIDER-Technik	267
6.3	Lebensdauermessungen mit Lasern	271
6.3.1	Die Phasenmethode	273
6.3.2	Messung der Abklingkurve nach Einzelpulsanregung	274
6.3.3	Die Methode der verzögerten Koinzidenzen	275
6.3.4	Lebensdauermessungen in schnellen Atom- und Ionenstrahlen	277
6.4	Spektroskopie im Piko- und Femtosekundenbereich	280
6.4.1	Stoßinduzierte Relaxation von Molekülen in Flüssigkeiten ..	281
6.4.2	Elektronische Relaxation in Halbleitern	282
6.4.3	Untersuchung molekularer Dynamik auf der Femtosekundenskala	282
6.4.4	Attosekunden Spektroskopie von Prozessen in inneren Schalen von Atomen	286
6.4.5	Erzeugung transienter optischer Gitter	289
6.4.6	Untersuchung schneller Photochemischer Reaktionen	290
7	Kohärente Spektroskopie	291
7.1	Level-Crossing-Spektroskopie	292
7.1.1	Grundlagen	293
7.1.2	Quantenmechanisches Modell	297
7.1.3	Induzierte Level Crossing Spektroskopie	298

7.2	Quantenbeat-Spektroskopie	300
7.2.1	Grundprinzip der Quantum-Beat Spektroskopie	301
7.2.2	Experimentelle Techniken	302
7.2.3	Molekulare Quantum-Beat Spektroskopie	306
7.3	Photonen-Echo	308
7.4	Optische Nutation und freier Induktionszerfall	313
7.5	Optische Pulszug-Interferenzspektroskopie	316
7.6	Selbstinduzierte Transparenz	317
7.7	Kohärente Dunkelzustände und Dunkelresonanzen	319
7.8	Kohärente Überlagerungsspektroskopie	321
7.9	Korrelations-Spektroskopie	323
7.9.1	Grundlagen	323
7.9.2	Messung des Homodyn-Spektrums	326
7.9.3	Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie	328
7.9.4	Heterodyne Korrelations-Spektroskopie	330
7.10	Optische Kohärenztomographie	331
8	Laserspektroskopie von Stoßprozessen	335
8.1	Hochauflösende Laserspektroskopie der Stoßverbreiterung und Verschiebung von Spektrallinien	336
8.2	Messung inelastischer Stoßquerschnitte durch LIF	341
8.2.1	Stoß-Satelliten im Fluoreszenzspektrum	341
8.2.2	Andere Verfahren zur Messung von Stößen im angeregten Zustand	344
8.2.3	Stöße zwischen angeregten Atomen	346
8.3	Spektroskopische Bestimmung inelastischer Stoßprozesse im elektronischen Grundzustand	349
8.3.1	Zeitaufgelöster Fluoreszenznachweis	350
8.3.2	Zeitaufgelöste Absorptions- und Doppelresonanz-Methode	350
8.3.3	Spektroskopie von Stößen im Grundzustand mit kontinuierlichen Lasern	354
8.4	Spektroskopische Messung differenzieller Stoßquerschnitte in gekreuzten Molekularstrahlen	356
8.5	Spektroskopie reaktiver Stoßprozesse	361
8.6	Stöße im Strahlungsfeld eines Lasers	365
9	Neuere Entwicklungen in der Laserspektroskopie	371
9.1	Optische Ramsey-Resonanzen	371
9.1.1	Grundlagen der Ramsey-Interferenzen	371
9.1.2	Zweiphotonen-Ramsey-Resonanzen	375
9.1.3	Nichtlineare Ramsey-Interferenzen	378
9.1.4	Optische Ramsey-Resonanzen durch äquidistante Folge von Laserpulsen	380
9.1.5	Atomarer Springbrunnen	381
9.2	Photonenrückstoß	382

9.3	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen	387
9.3.1	Optisches Kühlen durch Photonenrückstoß	387
9.3.2	Optische Melasse	394
9.3.3	Magneto-optische Falle	396
9.3.4	Grenzen der optischen Kühlung	400
9.3.5	Kräfte auf einen induzierten Dipol im Lichtfeld	404
9.3.6	Optische Mikrofallen	405
9.3.7	Bose-Einstein-Kondensation	414
9.3.8	Eigenschaften des Bose-Einstein-Kondensats	418
9.3.9	Atomlaser	421
9.3.10	Erzeugung und Speicherung kalter Fermi-Gase	422
9.3.11	Bildung kalter Moleküle	423
9.3.12	Kalte Atome in optischen Gittern	426
9.4	Spektroskopie an einzelnen Ionen	427
9.4.1	Ionenfallen	428
9.4.2	Seitenbandkühlung	431
9.4.3	Direkte Beobachtung von Quantensprüngen	432
9.4.4	Wigner-Kristalle in Ionenfallen	435
9.4.5	Quantencomputer mit gespeicherten Ionen	436
9.5	Der Einatom-Maser	438
9.6	Auflösung innerhalb der natürlichen Linienbreite	441
9.7	Absolute optische Frequenzmessung und Frequenzstandard	448
9.7.1	Optische Frequenzketten	449
9.7.2	Optische Frequenz-Teilung	450
9.7.3	Optischer Frequenzkamm	451
9.7.4	Anwendungen des optischen Frequenzkammes	456
9.8	Kann man das Photonenrauschen überlisten?	458
9.8.1	Phasen- und Amplitudenschwankungen des Lichtfeldes ...	458
9.8.2	Quetschzustände	461
9.8.3	Realisierung von Quetschzuständen	462
9.8.4	Anwendungen der „Squeezing-Technik“ auf Gravitationswellen-Detektoren	463
10	Anwendungen der Laserspektroskopie	467
10.1	Anwendungen in der Chemie	467
10.1.1	Laserspektroskopie in der analytischen Chemie	467
10.1.2	Laserinduzierte chemische Reaktionen	470
10.1.3	Kohärente Kontrolle chemischer Reaktionen	474
10.1.4	Laser-Femtochemie	477
10.2	Isotopentrennung mit Lasern	479
10.3	Laserspektroskopie in der Umwelt- und Atmosphärenforschung ...	482
10.3.1	Absorptionsmessungen	482
10.3.2	Atmosphärenmessungen mithilfe des LIDAR-Verfahrens ...	484
10.3.3	Analytik von Verunreinigungen in Flüssigkeiten	490
10.4	Anwendungen auf technische Probleme	492

10.4.1	Untersuchung von Verbrennungsvorgängen	492
10.4.2	Einsatz der Laserspektroskopie in der Materialforschung ...	495
10.4.3	Messung von Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen	496
10.5	Anwendungen in der Biologie	498
10.5.1	Energietransfer in DNA-Komplexen	499
10.5.2	Zeitaufgelöste Messungen biologischer Prozesse	500
10.5.3	Korrelationspektroskopie von Mikробenbewegungen	501
10.5.4	Lasermikroskop	502
10.5.5	Konfokale Mikroskopie biologischer Objekte	503
10.5.6	Räumliche Auflösung biologischer Strukturen jenseits der Beugungsgrenze	504
10.5.7	Einzel-Molekül-Nachweis	507
10.6	Medizinische Anwendungen	508
10.6.1	Analyse von Atemgasen	509
10.6.2	Laser in der Augendiagnostik	512
10.6.3	Laser in der Inneren Medizin	513
10.6.4	Laserspektroskopie in der Ohrenheilkunde	514
10.6.5	Tumordiagnose und Therapie	514
10.6.6	Optische Tomographie in der Medizin	517
10.6.7	Laserlithotripsie	518
10.6.8	Weitere Anwendungen der Laserspektroskopie in der Medizin	519
Literatur		521
Sachverzeichnis		571