

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Doppler-begrenzte Absorptions- und Fluoreszenz-Spektroskopie mit Lasern</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Nichtlineare Spektroskopie</b>	<b>61</b>
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 Polarisationssignale	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	<b>Laser-Raman-Spektroskopie .....</b>	<b>111</b>
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	<b>Laserspektroskopie in Molekularstrahlen .....</b>	<b>141</b>
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	<b>Optisches Pumpen und Doppelresonanz-Verfahren .....</b>	<b>175</b>
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
<b>6</b>	<b>Zeitaufgelöste Laserspektroskopie .....</b>	<b>213</b>
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	Streakkamera .....	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
<b>7</b>	<b>Kohärente Spektroskopie .....</b>	<b>291</b>
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
<b>8</b>	<b>Laserspektroskopie von Stoßprozessen .....</b>	<b>335</b>
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
<b>9</b>	<b>Neuere Entwicklungen in der Laserspektroskopie .....</b>	<b>371</b>
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