

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	1
<b>2. Emission und Absorption von Licht</b>	5
2.1 Die Moden des elektromagnetischen Feldes in einem Hohlraum	5
2.2 Thermische Strahlung; Planck'sches Gesetz	8
2.3 Absorption, induzierte und spontane Emission, Einstein-Koeffizienten	11
2.4 Grundbegriffe der Strahlungsmessung	14
2.5 Polarisation von Licht	19
2.6 Absorption und Dispersion	21
2.6.1 Linienspektren und kontinuierliche Spektren	21
2.6.2 Klassisches Modell	23
2.6.3 Oszillatorenstärken und Einstein-Koeffizienten	28
2.7 Übergangswahrscheinlichkeiten	32
2.7.1 Lebensdauer angeregter Zustände	32
2.7.2 Semiklassische Behandlung der Übergangswahrscheinlichkeit	33
2.8 Kohärenz	35
2.8.1 Kohärenz eines Strahlungsfeldes	36
2.8.2 Zeitliche Kohärenz	37
2.8.3 Räumliche Kohärenz	39
2.8.4 Kohärenzvolumen	40
2.8.5 Kohärenz atomarer Zustände	43
<b>3. Linienbreiten und Profile von Spektrallinien</b>	47
3.1 Natürliche Linienbreite	48
3.2 Doppler-Verbreiterung	52
3.3 Stoßverbreiterung von Spektrallinien	57
3.4 Homogene und inhomogene Linienverbreiterung	64
3.5 Sättigungsverbreiterung	65
3.5.1 Änderung der Besetzungsdichten durch optisches Pumpen	65
3.5.2 Sättigungsverbreiterung von Absorptionslinien	70
3.6 Flugzeit-Linienbreiten	71
3.7 Linienbreiten in Flüssigkeiten und Festkörpern	74

<b>4. Experimentelle Hilfsmittel des Spektroskopikers</b> . . . . .	77
4.1 Spektrographen und Monochromatoren . . . . .	78
4.1.1 Grundbegriffe . . . . .	79
4.1.2 Prismenspektrograph . . . . .	85
4.1.3 Gitterspektrograph . . . . .	87
4.2 Interferometer . . . . .	93
4.2.1 Michelson-Interferometer . . . . .	95
4.2.2 Vielstrahlinterferenz . . . . .	99
4.2.3 Ebenes Fabry-Perot-Interferometer . . . . .	106
4.2.4 Konfokales Interferometer . . . . .	111
4.2.5 Dielektrische Vielfachschichten . . . . .	114
4.2.6 Interferenzfilter . . . . .	117
4.2.7 Durchstimmbare Interferometer . . . . .	119
4.2.8 Lyot-Filter . . . . .	122
4.3 Auflösungsvermögen und Lichtstärke von Spektrometern und Interferometern . . . . .	126
4.4 Moderne Methoden der Wellenlängen-Messung . . . . .	130
4.4.1 Das Michelson-Lambdameter . . . . .	131
4.4.2 Sigmameter . . . . .	135
4.4.3 Computergesteuertes Fabry-Perot-Wellenlängenmeßgerät . . . . .	137
4.4.4 Fizeau-Lambdameter . . . . .	141
4.5 Detektoren . . . . .	142
4.5.1 Thermische Detektoren . . . . .	145
4.5.2 Photodioden . . . . .	151
a) Photoleiter . . . . .	151
b) Photovoltaische Detektoren . . . . .	153
c) Lawinendioden . . . . .	155
d) Schnelle Photodioden . . . . .	156
4.5.3 Diodenanordnungen und CCD-Detektoren . . . . .	159
4.5.4 Photomultiplier . . . . .	162
a) Zeitliche Schwankungen der einfallenden Lichtleistung . . . . .	164
b) Dunkelstrom des Photomultipliers . . . . .	164
c) Statistische Schwankungen des Multiplikationsfaktors $\delta$ und daher auch des Verstärkungsfaktors $G$ . . . . .	165
d) Widerstandsrauschen . . . . .	165
4.5.5 Photonenzählmethode . . . . .	165
4.5.6 Bildverstärker und optische Vielkanal-Analysatoren . . . . .	166
<b>5. Der Laser als spektroskopische Lichtquelle</b> . . . . .	170
5.1 Elementare Grundlagen des Lasers . . . . .	170
5.1.1 Schwellwertbedingung . . . . .	171

5.1.2	Bilanzgleichungen	173
5.2	Optische Resonatoren	175
5.2.1	Offene Resonatoren	177
5.2.2	Räumliche Modenstrukturen im offenen Resonator	180
5.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	184
5.2.4	Stabile und instabile Resonatoren	186
5.2.5	Frequenzspektrum passiver optischer Resonatoren	190
5.3	Laser-Moden	193
5.3.1	Frequenzspektrum des aktiven Resonators	193
5.3.2	Beeinflussung der Modenfrequenz durch das aktive Medium	196
5.3.3	Verstärkungssättigung und Modenwechselwirkung	197
5.3.4	Das Frequenzspektrum realer Mehrmoden-Laser	201
5.4	Experimentelle Realisierung von stabilen Einmoden-Lasern	203
5.4.1	Linien-Selektion	204
5.4.2	Moden-Selektion	205
5.4.3	Intensitätsstabilisierung	212
5.4.4	Wellenlängenstabilisierung von Lasern	214
5.4.5	Kontrollierte Wellenlängendurchstimmung	220
5.4.6	Wellenlängeneichung	225
5.5	Linienbreiten von Einmoden-Lasern	227
5.6	Durchstimmbare Laser	231
5.6.1	Halbleiterlaser	233
5.6.2	Durchstimmbare vibronische Festkörperlaser	237
5.6.3	Farbzentrenlaser	239
5.6.4	Farbstofflaser	244
5.6.5	Excimer-Laser	255
5.7	Kohärente Strahlungsquellen durch nichtlineare Frequenzverdoppelung und Mischung	258
5.7.1	Grundlagen	258
5.7.2	Optische Frequenzverdopplung	262
5.7.3	Frequenzmischung	267
5.7.4	Röntgen-Laser	272
5.7.5	Differenzfrequenz-Spektrometer	273
5.7.6	Optische parametrische Oszillatoren	277
5.7.7	Raman-Frequenz-Konversion	280
6.	<b>Doppler-begrenzte Absorptions- und Fluoreszenz- Spektroskopie mit Lasern</b>	282
6.1	Vorteile des Lasers für die Spektroskopie	282
6.2	Empfindliche Verfahren der Absorptionsspektroskopie	286
6.2.1	Frequenzmodulation des Lasers	286

6.2.2	Absorptionsspektroskopie innerhalb des Laserresonators	290
6.2.3	Absorptionsmessung über die Abklingzeit eines optischen Resonators	296
6.3	Direkte Messung der absorbierten Photonen	298
6.3.1	Anregungsspektroskopie	298
6.3.2	Photoakustische Spektroskopie	302
6.3.3	Ionisationsspektroskopie	305
6.3.4	Optogalvanische Spektroskopie	310
6.3.5	Optothermische Spektroskopie	313
6.4	Magnetische Resonanz- und Stark-Spektroskopie mit Lasern	316
6.5	Geschwindigkeitsmodulations-Spektroskopie	319
6.6	Laserinduzierte Fluoreszenz	321
6.7	Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren	328
<b>7.</b>	<b>Nichtlineare Spektroskopie</b>	<b>330</b>
7.1	Lineare und nichtlineare Absorption	330
7.2	Sättigung inhomogen verbreiteter Absorptionsübergänge	335
7.3	Sättigungs-Spektroskopie	341
7.4	Polarisations-Spektroskopie	351
7.4.1	Anschauliche Darstellung	351
7.4.2	Die Frequenzabhängigkeit des Polarisationssignals	352
7.4.3	Größe der Polarisations-signale	357
7.4.4	Empfindlichkeit der Polarisations-Spektroskopie	360
7.5	Mehrphotonen-Spektroskopie	363
7.5.1	Grundlagen der Zweiphotonen-Absorption	363
7.5.2	Doppler-freie Zweiphotonen-Spektroskopie	366
7.5.3	Abhängigkeit des Zweiphotonen-Signals von der Fokussierung	371
7.5.4	Mehrphotonen-Spektroskopie	373
7.6	Anwendungsbeispiele und spezielle Techniken der nichtlinearen Spektroskopie	375
<b>8.</b>	<b>Laser-Raman-Spektroskopie</b>	<b>381</b>
8.1	Grundlagen	381
8.2	Neuere Techniken der Linearen Raman-Spektroskopie	386
8.3	Nichtlineare Raman-Spektroskopie	392
8.3.1	Induzierte Raman-Streuung	393
8.3.2	Kohärente Anti-Stokes Raman-Spektroskopie	398
8.3.3	Resonante CARS und Box-CARS	402
8.3.4	Hyper-Raman-Effekt	404
8.4	Anwendungen der nichtlinearen Raman-Spektroskopie	405

<b>9. Laserspektroskopie in Molekularstrahlen</b> . . . . .	409
9.1 Reduktion der Doppler-Breite in kollimierten Strahlen . . . . .	409
9.2 Abkühlung von Molekülen in Überschallstrahlen . . . . .	416
9.3 Nichtlineare Spektroskopie in Molekularstrahlen . . . . .	425
9.4 Kollineare Laserspektroskopie in schnellen Ionenstrahlen . . . . .	427
9.5 Spektroskopie in kalten Ionenstrahlen . . . . .	433
<b>10. Optisches Pumpen und Doppelresonanz-Verfahren</b> . . . . .	438
10.1 Optisches Pumpen . . . . .	439
10.2 Optische/Radiofrequenz-Doppelresonanz . . . . .	444
10.2.1 Grundlagen . . . . .	444
10.2.2 Laser-Hochfrequenz-Doppelresonanz-Spektroskopie in Molekularstrahlen . . . . .	447
10.3 Optische/Mikrowellen-Doppelresonanz . . . . .	449
10.4 Optische/Optische Doppelresonanz . . . . .	454
10.4.1 Vereinfachung komplexer Absorptionsspektren . . . . .	455
10.4.2 Stufenweise Anregung und Spektroskopie von Rydberg-Zuständen . . . . .	459
10.4.3 Resonante, induzierte Raman-Streuung . . . . .	467
10.5 Spezielle Doppelresonanz-Techniken . . . . .	470
10.5.1 Polarisations-Markierung . . . . .	470
10.5.2 Mikrowellen/Optische Doppelresonanz- Polarisations-Spektroskopie . . . . .	472
<b>11. Zeitaufgelöste Laserspektroskopie</b> . . . . .	473
11.1 Erzeugung kurzer Lichtpulse . . . . .	473
11.1.1 Zeitverhalten gepulster Laser . . . . .	473
11.1.2 Güteschaltung von Laserresonatoren . . . . .	475
11.1.3 Modenkopplung und Pikosekundenpulse . . . . .	480
a) Aktive Modenkopplung . . . . .	480
b) Passive Modenkopplung . . . . .	484
c) Synchrones Pumpen . . . . .	486
11.1.4 Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen . . . . .	488
a) Der CPM-Farbstofflaser . . . . .	489
b) Optische Pulskompression . . . . .	493
c) Ultrakurze Pulse mit Festkörperlasern . . . . .	499
11.1.5 Solitonenlaser . . . . .	502
11.1.6 Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse . . . . .	504
11.2 Messung kurzer Lichtpulse . . . . .	507
11.2.1 Streackkamera . . . . .	507
11.2.2 Optischer Korrelator zur Messung kurzer Lichtpulse . . . . .	509
11.3 Lebensdauermessungen mit Lasern . . . . .	515

11.3.1	Die Phasenmethode	517
11.3.2	Messung der Abklingkurve nach Einzelpulsanregung	519
11.3.3	Die Methode der verzögerten Koinzidenzen	520
11.3.4	Lebensdauermessungen in schnellen Atom- und Ionenstrahlen	522
11.4	Spektroskopie im Piko- und Femtosekundenbereich	525
11.4.1	Stoßinduzierte Relaxation von Molekülen in Flüssigkeiten	526
11.4.2	Elektronische Relaxation in Halbleitern	527
11.4.3	Untersuchung molekularer Dynamik auf der Femtosekundenskala	527
<b>12.</b>	<b>Kohärente Spektroskopie</b>	531
12.1	Level-Crossing-Spektroskopie	532
12.1.1	Grundlagen	533
12.1.2	Quantenmechanisches Modell	537
12.2	Quantenbeat-Spektroskopie	538
12.3	Photonen-Echo	544
12.4	Optische Nutation und freier Induktionszerfall	549
12.5	Optische Pulszug-Interferenzspektroskopie	551
12.6	Kohärente Überlagerungsspektroskopie	553
12.7	Korrelations-Spektroskopie	555
12.7.1	Messung des Homodyn-Spektrums	559
12.7.2	Heterodyne Korrelations-Spektroskopie	561
<b>13.</b>	<b>Laserspektroskopie von Stoßprozessen</b>	563
13.1	Hochauflösende Laserspektroskopie der Stoßverbreiterung und Verschiebung von Spektrallinien	564
13.2	Messung inelastischer Stoßquerschnitte durch LIF	569
13.2.1	Stoß-Satelliten im Fluoreszenzspektrum	570
13.2.2	Andere Verfahren zur Messung von Stößen im angeregten Zustand	573
13.2.3	Stöße zwischen angeregten Atomen	575
13.3	Spektroskopische Bestimmung inelastischer Stoßprozesse im elektronischen Grundzustand	578
13.3.1	Zeitaufgelöster Fluoreszenznachweis	579
13.3.2	Zeitaufgelöste Absorptions- und Doppelresonanz-Methode	580
13.3.3	Stoß-Spektroskopie im Grundzustand mit kontinuierlichen Lasern	583
13.4	Spektroskopische Messung differentieller Stoßquerschnitte in gekreuzten Molekularstrahlen	586

13.5	Spektroskopie reaktiver Stoßprozesse	592
13.6	Stöße im Strahlungsfeld eines Lasers	597
<b>14.</b>	<b>Neuere Entwicklungen in der Laserspektroskopie</b>	<b>601</b>
14.1	Optische Ramsey-Resonanzen	601
14.1.1	Grundlagen der Ramsey-Interferenzen	601
14.1.2	Zweiphotonen Ramsey-Resonanzen	606
14.1.3	Nichtlineare Ramsey-Interferenzen	609
14.2	Photonenrückstoß	612
14.3	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen	617
14.3.1	Optisches Kühlen durch Photonenrückstoß	617
14.3.2	Optische Melasse	624
14.3.3	Magneto-optische Falle	627
14.3.4	Grenzen der optischen Kühlung	630
14.3.5	Kräfte auf einen induzierten Dipol im Lichtfeld	634
14.3.6	Bose-Einstein-Kondensation	636
14.4	Spektroskopie an einzelnen Ionen	641
14.4.1	Ionenfallen	641
14.4.2	Seitenbandkühlung	644
14.4.3	Direkte Beobachtung von Quantensprüngen	646
14.4.4	Wigner-Kristalle in Ionenfallen	648
14.5	Der Einatom-Maser	650
14.6	Auflösung innerhalb der natürlichen Linienbreite	653
14.7	Absolute optische Frequenzmessung und Frequenzstandard	661
14.8	Kann man das Photonenrauschen überlisten?	666
14.8.1	Phasen- und Amplitudenschwankungen des Lichtfeldes	666
14.8.2	Quetschzustände	669
14.8.3	Realisierung von Quetschzuständen	671
14.8.4	Anwendungen der „Squeezing-Technik“ auf Gravitationswellen-Detektoren	672
<b>15.</b>	<b>Anwendungen der Laserspektroskopie</b>	<b>675</b>
15.1	Anwendungen in der Chemie	675
15.1.1	Laserspektroskopie in der analytischen Chemie	676
15.1.2	Laserinduzierte chemische Reaktionen	678
15.2	Isotopentrennung mit Lasern	683
15.3	Laserspektroskopie in der Umwelt- und Atmosphärenforschung	685
15.3.1	Absorptionsmessungen	686
15.3.2	Atmosphärenmessungen mit Hilfe des LIDAR-Verfahrens	688
15.3.3	Analytik von Verunreinigungen in Flüssigkeiten	693

15.4	Anwendungen auf technische Probleme . . . . .	695
15.4.1	Untersuchung von Verbrennungsvorgängen . . . . .	695
15.4.2	Einsatz der Laserspektroskopie in der Materialforschung . . . . .	698
15.4.3	Messung von Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen . . . . .	700
15.5	Anwendungen in der Biologie . . . . .	702
15.5.1	Energietransfer in DNA-Komplexen . . . . .	702
15.5.2	Zeitaufgelöste Messungen biologischer Prozesse . . . . .	704
15.5.3	Korrelationsspektroskopie von Mikробenbewegungen . . . . .	705
15.5.4	Lasermikroskop . . . . .	706
15.6	Medizinische Anwendungen . . . . .	707
15.6.1	Anwendung der Raman-Spektroskopie in der Medizin . . . . .	708
15.6.2	Tumordiagnose und Therapie . . . . .	709
15.6.3	Laserlithotripsie . . . . .	711
15.6.4	Weitere Anwendungen der Laserspektroskopie in der Medizin . . . . .	713
<b>Literatur . . . . .</b>		<b>715</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>771</b>