



dandelion.com

Wolfgang Demtröder

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to [dandelion.com](http://dandelion.com) network.

# Laser- spektroskopie

Grundlagen und Techniken

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage  
Mit 489 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo  
Hong Kong Barcelona  
Budapest

# 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 .....	10
2.4 Grundbegriffe der Strahlungsmessung .....	13
2.5 Linienspektren und kontinuierliche Spektren .....	18
2.6 Absorption und Dispersion .....	21
2.6.1 Klassisches Modell .....	21
2.6.2 Oszillatorenstärken und Einstein-Koeffizienten .....	24
2.7 Übergangswahrscheinlichkeiten .....	28
2.7.1 Lebensdauer angeregter Zustände .....	29
2.7.2 Semiklassische Behandlung der Übergangswahrscheinlichkeit .....	30
2.8 Kohärenz .....	31
2.8.1 Kohärenz eines Strahlungsfeldes .....	32
2.8.2 Zeitliche Kohärenz .....	33
2.8.3 Räumliche Kohärenz .....	34
2.8.4 Kohärenzvolumen .....	36
2.8.5 Kohärenz atomarer Zustände .....	38
<b>3. Linienbreiten und Profile von Spektrallinien</b> .....	41
✕ 3.1 Natürliche Linienbreite .....	42
✕ 3.2 Doppler-Verbreiterung .....	46
✕ 3.3 Stoßverbreiterung von Spektrallinien .....	50
✕ 3.4 Homogene und Inhomogene Linienverbreiterung .....	55
3.5 Sättigungsverbreiterung .....	56
3.5.1 Änderung der Besetzungsdichten durch optisches Pumpen .....	57
✕ 3.5.2 Sättigungsverbreiterung von Absorptionslinien .....	60
3.6 Flugzeit-Linienbreiten .....	61
3.7 Linienbreiten in Flüssigkeiten und Festkörpern .....	64
<b>4. Experimentelle Hilfsmittel des Spektroskopikers</b> .....	66
4.1 Spektrographen und Monochromatoren .....	67
4.1.1 Grundbegriffe .....	68
4.1.2 Prismen Spektrograph .....	73

4.1.3	Gitter-Spektrograph	75
4.2	Interferometer	80
4.2.1	Michelson-Interferometer	81
4.2.2	Vielstrahlinterferenz	85
4.2.3	Ebenes Fabry-Perot Interferometer	90
4.2.4	Dielektrische Vielfachschichten	95
4.2.5	Interferenzfilter	98
4.2.6	Konfokales Interferometer	99
4.2.7	Durchstimbare Interferometer	102
4.2.8	Das Auflösungsvermögen von Spektrometern und Interferometern	106
4.3	Lyot-Filter	108
4.4	Moderne Methoden der Wellenlängen-Messung	112
4.4.1	Das Michelson-Lambdameter	112
4.4.2	Sigameter	116
4.4.3	Computergesteuertes Fabry-Perot-Wellenlängenmeßgerät	118
4.4.4	Fizeau-Lambdameter	120
4.5	Detektoren	123
4.5.1	Thermische Detektoren	125
4.5.2	Photodioden	130
	a) Photoleiter	130
	b) Photovoltaische Detektoren	133
	c) Lawinendioden	134
	d) Schnelle Photodioden	136
4.5.3	Diodenarrays	138
4.5.4	Photomultiplier	140
	a) Zeitliche Schwankungen der einfallenden Lichtleistung	142
	b) Dunkelstrom des Photomultipliers	142
	c) Statistische Schwankungen des Multiplikationsfaktors $\delta$ und daher auch des Verstärkungsfaktors $G$	143
	d) Widerstandsrauschen	143
4.5.5	Bildverstärker und optische Vielkanal-Analysatoren	144
5.	<b>Der Laser als spektroskopische Lichtquelle</b>	147
5.1	Elementare Grundlagen des Lasers	147
5.1.1	Schwellwertbedingung	148
5.1.2	Bilanzgleichungen	150
5.2	Optische Resonatoren	152
5.2.1	Offene Resonatoren	153
5.2.2	Räumliche Modenstrukturen im offenen Resonator	155
5.2.3	Beugungsverluste offener Resonatoren	160
5.2.4	Stabile und instabile Resonatoren	161
5.2.5	Frequenzspektrum passiver optischer Resonatoren	164
5.3	Laser-Moden	167
5.3.1	Frequenzspektrum des aktiven Resonators	167
5.3.2	Beeinflussung der Modenfrequenz durch das aktive Medium	169

	5.3.3 Verstärkungssättigung und Modenwechselwirkung . . . . .	171
	5.3.4 Das Frequenzspektrum realer Mehrmoden-Laser . . . . .	174
×	5.4 Experimentelle Realisierung von stabilen Einmoden-Lasern . . . . .	176
×	5.4.1 Linien-Selektion . . . . .	176
×	5.4.2 Moden-Selektion . . . . .	177
(×)	5.4.3 Intensitätsstabilisierung . . . . .	184
×	5.4.4 Wellenlängenstabilisierung von Lasern . . . . .	185
	5.4.5 Kontrollierte Wellenlängendurchstimmung . . . . .	192
	5.4.6 Wellenlängeneichung . . . . .	196
×	5.5 Linienbreiten von Einmoden-Lasern . . . . .	198
	5.6 Durchstimmbare Laser . . . . .	201
×	5.6.1 Halbleiterlaser . . . . .	202
	5.6.2 Spin-Flip-Raman-Laser . . . . .	207
×	5.6.3 Durchstimmbare Festkörperlaser . . . . .	208
	5.6.4 Farbzentrenlaser . . . . .	210
×	5.6.5 Farbstoff-Laser . . . . .	214
×	5.6.6 Excimer-Laser . . . . .	223
	5.7 Kohärente Strahlungsquellen durch nichtlineare Frequenzverdopplung und Mischung . . . . .	227
	5.7.1 Grundlagen . . . . .	227
	5.7.2 Optische Frequenzverdopplung . . . . .	230
	5.7.3 Frequenzmischung . . . . .	234
	5.7.4 Differenz-Frequenz-Spektrometer . . . . .	238
	5.7.5 Optische Parametrische Oszillatoren . . . . .	240
	5.7.6 Raman-Frequenz-Konversion . . . . .	243

**6. Doppler-begrenzte Absorptions- und Fluoreszenz-Spektroskopie mit Lasern . . . . . 245**

	6.1 Vorteile des Lasers für die Spektroskopie . . . . .	245
	6.2 Empfindliche Nachweisverfahren . . . . .	248
	6.2.1 Frequenzmodulation des Lasers . . . . .	248
	6.2.2 Anregungsspektroskopie . . . . .	251
	6.2.3 Photoakustische Spektroskopie . . . . .	253
	6.2.4 Ionisationsspektroskopie . . . . .	256
	6.2.5 Optogalvanische Spektroskopie . . . . .	261
	6.2.6 Optothermische Spektroskopie . . . . .	262
	6.2.7 Absorptionsspektroskopie innerhalb des Laserresonators . . . . .	265
	6.3 Magnetische Resonanz- und Stark-Spektroskopie mit Lasern . . . . .	270
	6.4 Geschwindigkeits-Modulations-Spektroskopie . . . . .	273
	6.5 Laserinduzierte Fluoreszenz . . . . .	274
	6.6 Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren . . . . .	280

**7. Nichtlineare Spektroskopie . . . . . 283**

×	7.1 Lineare und nichtlineare Absorption . . . . .	283
×	7.2 Sättigung inhomogen verbreiteter Absorptionsübergänge . . . . .	286
×	7.3 Sättigungsspektroskopie . . . . .	292
×	7.4 Polarisations-Spektroskopie . . . . .	301
×	7.4.1 Anschauliche Darstellung . . . . .	301

7.4.2	Die Frequenzabhängigkeit des Polarisations-Signals . . .	302
7.4.3	Größe der Polarisations-Signale . . . . .	306
7.4.4	Empfindlichkeit der Polarisations-Spektroskopie . . .	309
* 7.5	Mehr-Photonen-Spektroskopie . . . . .	311
×	7.5.1 Grundlagen der Zweiphotonen-Absorption . . . . .	311
×	7.5.2 Doppler-freie Zweiphotonen-Spektroskopie . . . . .	314
7.5.3	Abhängigkeit des Zweiphotonen-Signals von der Fokussierung . . . . .	318
7.5.4	Mehrphotonen-Spektroskopie . . . . .	320
7.6	Anwendungs-Beispiele und spezielle Techniken der nichtlinearen Spektroskopie . . . . .	321
<b>8.</b>	<b>Laser-Raman Spektroskopie . . . . .</b>	<b>327</b>
8.1	Grundlagen . . . . .	327
8.2	Neuere Techniken der Linearen Raman-Spektroskopie . . .	331
8.3	Nichtlineare Raman-Spektroskopie . . . . .	335
8.3.1	Induzierte Raman-Streuung . . . . .	335
8.3.2	Kohärente Anti-Stokes Raman-Spektroskopie (CARS)	340
8.3.3	Hyper-Raman-Effekt . . . . .	343
8.4	Anwendungen der nichtlinearen Raman-Spektroskopie . . .	344
<b>9.</b>	<b>Laserspektroskopie in Molekularstrahlen . . . . .</b>	<b>347</b>
9.1	Reduktion der Doppler-Breite in kollimierten Strahlen . . .	347
9.2	Abkühlung von Molekülen in Überschallstrahlen . . . . .	354
9.3	Nichtlineare Spektroskopie in Molekularstrahlen . . . . .	361
9.4	Kollineare Laserspektroskopie in schnellen Ionenstrahlen . .	364
9.5	Spektroskopie in kalten Ionenstrahlen . . . . .	369
<b>10.</b>	<b>Optisches Pumpen und Doppelresonanz-Verfahren . . . . .</b>	<b>370</b>
10.1	Optisches Pumpen . . . . .	371
10.2	Optische/Radiofrequenz-Doppelresonanz . . . . .	376
10.2.1	Grundlagen . . . . .	376
10.2.2	Laser-Hochfrequenz-Doppelresonanz-Spektroskopie in Molekularstrahlen . . . . .	378
10.3	Optische/Mikrowellen-Doppelresonanz . . . . .	381
10.4	Optische/Optische Doppelresonanz . . . . .	384
10.4.1	Vereinfachung komplexer Absorptionsspektren . . .	385
10.4.2	Stufenweise Anregung und Spektroskopie von Rydberg-Zuständen . . . . .	389
10.4.3	Resonante induzierte Raman-Streuung . . . . .	396
10.5	Spezielle Doppelresonanz-Techniken . . . . .	399
10.5.1	Polarisations-Markierung . . . . .	399
10.5.2	Mikrowellen/Optische Doppelresonanz- Polarisations-Spektroskopie . . . . .	400
<b>11.</b>	<b>Zeitaufgelöste Laserspektroskopie . . . . .</b>	<b>401</b>
11.1	Erzeugung kurzer Lichtpulse . . . . .	401
11.1.1	Zeitverhalten gepulster Laser . . . . .	401

11.1.2	Güteschaltung von Laserresonatoren . . . . .	403
11.1.3	Modenkopplung und Pikosekundenpulse . . . . .	407
	a) Aktive Modenkopplung . . . . .	407
	b) Passive Modenkopplung . . . . .	411
	c) Synchrones Pumpen . . . . .	412
11.1.4	Erzeugung von Femtosekunden-Pulsen . . . . .	415
	a) Der CPM-Farbstofflaser . . . . .	416
	b) Optische Pulskompression . . . . .	418
11.1.5	Solitonenlaser . . . . .	422
11.1.6	Erzeugung leistungsstarker ultrakurzer Pulse . . . . .	424
11.2	Messung kurzer Lichtpulse . . . . .	426
11.2.1	Streakkamera . . . . .	426
11.2.2	Optischer Korrelator zur Messung kurzer Lichtpulse . . . . .	428
11.3	Lebensdauermessungen mit Lasern . . . . .	433
11.3.1	Die Phasenmethode . . . . .	435
11.3.2	Messung der Abklingkurve nach Einzelpuls-Anregung . . . . .	436
11.3.3	Die Methode der verzögerten Koinzidenzen . . . . .	437
11.3.4	Lebensdauermessungen in schnellen Atom- und Ionenstrahlen . . . . .	439
11.4	Messung schneller Relaxationsprozesse . . . . .	442
<b>12.</b>	<b>Kohärente Spektroskopie . . . . .</b>	<b>444</b>
12.1	„Level-Crossing“-Spektroskopie . . . . .	445
12.1.1	Grundlagen . . . . .	446
12.1.2	Quantenmechanisches Modell . . . . .	449
12.2	Quantenbeat-Spektroskopie . . . . .	450
12.3	Photonen-Echo . . . . .	455
12.4	Optische Nutation und freier Induktions-Zerfall . . . . .	460
12.5	Optische Pulszug-Interferenzspektroskopie . . . . .	462
12.6	Kohärente Überlagerungsspektroskopie . . . . .	464
12.7	Korrelations-Spektroskopie . . . . .	466
12.7.1	Messung des Homodyn-Spektrums . . . . .	469
12.7.2	Heterodyne Korrelations-Spektroskopie . . . . .	471
<b>13.</b>	<b>Laserspektroskopie von Stoßprozessen . . . . .</b>	<b>472</b>
13.1	Hochauflösende Laserspektroskopie der Stoßverbreiterung und Verschiebung von Spektrallinien . . . . .	473
13.1.1	Doppler-freie Spektroskopie von Stoßprozessen . . . . .	474
13.1.2	Kombination verschiedener Techniken . . . . .	476
13.2	Messung inelastischer Stoßquerschnitte durch LIF . . . . .	478
13.2.1	Stoß-Satelliten im Fluoreszenzspektrum . . . . .	478
13.2.2	Andere Verfahren zur Messung von Stößen im angeregten Zustand . . . . .	481
13.2.3	Stöße zwischen angeregten Atomen . . . . .	483
13.3	Spektroskopische Bestimmung inelastischer Stoßprozesse im elektronischen Grundzustand . . . . .	486
13.3.1	Zeitaufgelöster Fluoreszenznachweis . . . . .	487

13.3.2	Zeitaufgelöste Absorptions- und Doppelresonanz-Methoden . . . . .	487
13.3.3	Stoß-Spektroskopie im Grundzustand mit kontinuierlichen Lasern . . . . .	490
13.4	Spektroskopische Messung differentieller Stoßquerschnitte in gekreuzten Molekularstrahlen . . . . .	493
13.5	Spektroskopie reaktiver Stoßprozesse . . . . .	498
13.6	Stöße im Strahlungsfeld eines Lasers . . . . .	502
<b>14.</b>	<b>Neuere Entwicklungen in der Laserspektroskopie . . . . .</b>	<b>506</b>
14.1	Optische Ramsey-Resonanzen . . . . .	506
14.1.1	Grundlagen der Ramsey-Interferenzen . . . . .	506
14.1.2	Zwei-Photonen Ramsey-Resonanzen . . . . .	510
14.1.3	Nichtlineare Ramsey-Interferenzen . . . . .	513
14.2	Photonenrückstoß . . . . .	515
14.3	Optisches Kühlen und Speichern von Atomen . . . . .	520
14.3.1	Optisches Kühlen durch Photonrückstoß . . . . .	520
14.3.2	Kräfte auf einen induzierten Dipol im Lichtfeld . . . . .	526
14.3.3	Speicherung langsamer Atome in dreidimensionalen Lichtfallen . . . . .	528
14.4	Spektroskopie an einzelnen Ionen . . . . .	531
14.4.1	Ionenfallen . . . . .	531
14.4.2	Seitenbandkühlung . . . . .	533
14.4.3	Direkte Beobachtung von Quantensprüngen . . . . .	535
14.4.4	Wigner-Kristalle in Ionenfallen . . . . .	537
14.5	Der Ein-Atom-Maser . . . . .	539
14.6	Auflösung innerhalb der natürlichen Linienbreite . . . . .	541
14.7	Absolute optische Frequenzmessung und Frequenzstandard . . . . .	549
14.8	Kann man das Photonenrauschen überlisten? . . . . .	551
14.8.1	Phasen- und Amplitudenschwankungen des Lichtfeldes . . . . .	552
14.8.2	Quetschzustände . . . . .	555
14.8.3	Realisierung von Quetschzuständen . . . . .	556
14.8.4	Anwendungen der „Squeezing-Technik“ auf Gravitationswellen-Detektoren . . . . .	557
<b>15.</b>	<b>Anwendungen der Laserspektroskopie . . . . .</b>	<b>559</b>
15.1	Anwendungen in der Chemie . . . . .	559
15.1.1	Laserspektroskopie in der analytischen Chemie . . . . .	559
15.1.2	Laserinduzierte chemische Reaktionen . . . . .	561
15.2	Isotopentrennung mit Lasern . . . . .	564
15.3	Laserspektroskopie in der Umwelt- und Atmosphärenforschung . . . . .	567
15.3.1	Absorptionsmessungen . . . . .	567
15.3.2	Atmosphärenmessungen mit Hilfe des LIDAR-Verfahrens . . . . .	569
15.4	Anwendungen auf technische Probleme . . . . .	573
15.4.1	Untersuchung von Verbrennungsvorgängen . . . . .	573

15.4.2	Einsatz der Laserspektroskopie in der Materialforschung . . . . .	576
15.4.3	Messung von Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen . . . . .	577
15.5	Anwendungen in der Biologie . . . . .	577
15.5.1	Energietransfer in DNA-Komplexen . . . . .	578
15.5.2	Zeitaufgelöste Messungen biologischer Prozesse . . . . .	578
15.5.3	Korrelationspektroskopie von Mikробenbewegungen . . . . .	580
15.5.4	Lasermikroskop . . . . .	580
15.6	Medizinische Anwendungen der Laserspektroskopie . . . . .	582
15.6.1	Anwendung der Raman-Spektroskopie in der Medizin . . . . .	583
15.6.2	Tumordiagnose und Therapie . . . . .	584
15.6.3	Laserlithotripsie . . . . .	585
<b>Literatur . . . . .</b>		<b>587</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>		<b>629</b>