

Spektrograph

Stichworte zur Vorbereitung:

Spektrographen, Dispersion, Auflösungsvermögen, Moleküle, Spektren zweiatomiger Moleküle, Dissoziationsenergie.

Literatur

- [1] Bergmann-Schaefer, *Lehrbuch der Experimentalphysik* Bd. III, Walter de Gruyter, Berlin, 1989.
- [2] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon Press, Oxford, 1980.
- [3] W. Demtröder, *Laserspectroscopy*, Springer, Berlin 1982.
- [4] E. Hecht, *Optik*, Addison-Wesley, Bonn, 1989.
- [5] H. Jäger, Skripten Experimentalphysik 3 und 4.
- [6] Westphal, Physikalisches Praktikum.

1 Grundlagen

1.1 Der Prismenspektrograph

Unter einem Spektrographen versteht man einen Spektralapparat bei dem das beobachtete Spektrum photographiert oder mittels eines elektronischen Bilderfassungssystems aufgezeichnet wird. Nach dem verwendeten Dispersionsmittel unterscheidet man Prismen- und Gitterspektrographen.

Bei einem Prismenspektrographen beleuchtet das zu untersuchende Licht einen schmalen Eintrittspalt. Das von diesem Spalt ausgehende Licht wird von einem Kollimator parallelgerichtet und durchsetzt ein oder mehrere Dispersionsprismen. Dieses bewirkt eine wellenlängenabhängige Ablenkung der parallelen Lichtbündel. Die Kameralinse des Spektrographen fokussiert die abgelenkten Parallelstrahlbündel in der Austrittsebene. Somit entsteht auf dieser für jede im Licht enthaltene Wellenlänge ein gesondertes Bild des Eintrittsspalt (Abb. 1).

Die Änderung des Ablenkungswinkels $d\Theta$ mit der Wellenlängenänderung $d\lambda$ wird durch die Winkeldispersion $\frac{d\Theta}{d\lambda}$ beschrieben. Die Lineardispersion $\frac{dx}{d\lambda}$ bestimmt den Abstand dx zweier Linien auf der Photoplatte für eine vorgegebene Wellenlängenänderung:

$$\frac{dx}{d\lambda} = f \frac{d\Theta}{d\lambda} \quad f \dots \text{Brennweite der Kameralinse} \quad (1)$$

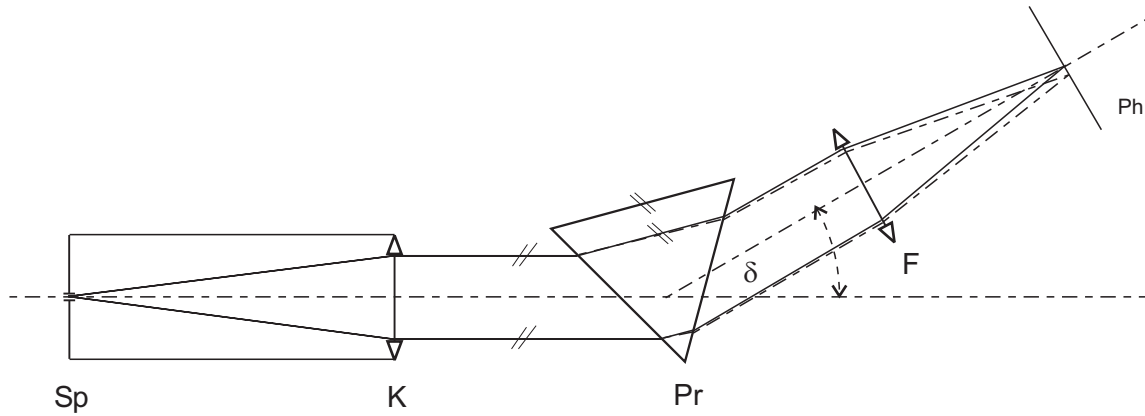


Abbildung 1: Aufbau eines einfachen Prismenspektrographen

1.2 Auflösungsvermögen eines Prismenspektrographen

Wesentlich für die Leistungsfähigkeit eines Spektrographen ist sein Auflösungsvermögen. Darunter wird das Verhältnis der Wellenlänge λ zur kleinsten noch trennbaren Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ verstanden. Die theoretische Auflösungsgrenze ergibt sich aus der Beugung des Lichtes an der Prismenbegrenzung. Nach Rayleigh werden zwei eng benachbarte Spektrallinien noch als getrennt angesehen, wenn sich die Beugungsbilder des beliebig schmalen Eintrittsspalt für beide Wellenlängen so überdecken, daß das Maximum der einen Linie in das erste Beugungsminimum der zweiten Linie fällt. Dieses Rayleigh-Kriterium führt zum Auflösungsvermögen

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda} \quad t \dots \text{Prismenbasis,} \quad \frac{dn}{d\lambda} \dots \text{Materialdispersion} \quad (2)$$

Das theoretische Auflösungsvermögen wird praktisch kaum erreicht und ist zum Beispiel noch durch die Linienbreite der untersuchten Spektrallinien und die endliche Spaltbreite des Spektrographen begrenzt. Eine Steigerung des Auflösungsvermögens ist durch Hinzufügen weiterer Prismen möglich.

Soll mit einem Spektrographen lediglich die Wellenlänge einer unbekannten Spektrallinie ermittelt werden, so gelingt dies z.B. durch Vergleich mit einem bekannten Linienspektrum, welches über die Aufnahme des unbekannten aufgenommen wird. Als Bezugslinie gilt seit 1960 die rote Linie des Isotops ^{86}Kr mit $\lambda = 605.7802106 \text{ nm}$. An diesen Wellenlängenstandard sind über 300 Linien des Eisenspektrums angeschlossen, welche üblicherweise als Bezugslinien genutzt werden. Bei Vergleich zwischen theoretischen und experimentellen Werten der Wellenlänge ist vor allem darauf zu achten, daß die in der Literatur angegebenen experimentellen Wellenlängen sich meist auf Luft unter Normalbedingungen (15°C , 760 Torr) beziehen, während die über Theorien erhaltenen Werte sich im allgemeinen auf Vakuum beziehen.

1.3 Zur Ausleuchtung

Bei spektroskopischen Untersuchungen ist auf eine optimale Ausleuchtung des Spektrographenspaltes und auf optimale Helligkeit der Spektrallinien zu achten. Das Abbildungssystem ist dem jeweiligen Problem anzupassen. So kann man durch scharfe Abbildung der Lichtquelle auf den Spektrographenspalt erreichen, daß jedem Teilgebiet der Spektrallinie ein bestimmtes Teilgebiet der Lichtquelle zugeordnet werden kann. Befindet sich hingegen die Lichtquelle im Brennpunkt des Abbildungsobjektives und dasselbe unmittelbar vor dem Spektrographenspalt, so kann eine vollkommen homogene Ausleuchtung desselben erreicht werden. Bei der Abbildung ist stets zu berücksichtigen, daß das zur Abbildung beitragende Strahlenbündel durch die Fassung der Kollimatorlinse begrenzt wird.

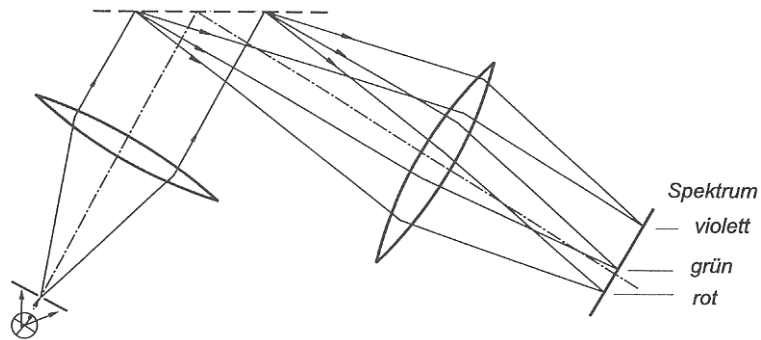


Abbildung 2: Gitterspektrograph

1.4 Der Gitterspektrograph

Als Dispersionselement dient bei diesem Spektrograph ein Gitter. Die durch den Kollimator parallelgerichteten Strahlen werden dabei am Gitter gebeugt, wobei das Spektrum durch Interferenz der einzelnen Reflexionen erzeugt wird. Das Auflösungsvermögen eines Gitterspektrographen ist gegeben durch

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \quad (3)$$

wobei k die Beugungsordnung und N die Anzahl der ausgeleuchteten Gitterstriche bezeichnet.

1.5 Bestimmung von Molekülkonstanten aus gemessenen Spektren

Betrachtet man das Absorptionsspektrum von molekularem Joddampf im sichtbaren Spektralbereich, sieht man zahlreiche nach Rot abgeschattete Banden (d.h. mit einer scharfen Kante zur blauen Seite hin). In diesen Schwingungsbanden können bei genauer Betrachtung mit dem hier verwendeten Prismenspektrographen leicht die Rotationslinien gefunden werden. Die Abfolge dieser Schwingungsbanden konvergiert gegen kürzere Wellenlängen hin zu einer Stelle, an die sich ein Bereich kontinuierlicher Absorption anschließt. Diese Konvergenzstelle entspricht der Dissoziation des angeregten Moleküls und ist daher um die Anregungsenergie eines dissoziierten Jodatoms größer als die Dissoziationsenergie des elektronischen Grundzustandes.

Für die Wellenzahlen von Schwingungsübergängen gilt das erste Deslandre'sche Gesetz:

$$\bar{\nu} = \bar{\nu}_{00} + (a'v' + b'(v')^2) - (a''v'' + b''(v'')^2) \quad (4)$$

$\bar{\nu}_{00}, a', b', a'', b'' \dots$ Molekülkonstanten, $v', v'' \dots 0, 1, 2 \dots$

Dabei sind die Rotationsniveaus nicht berücksichtigt, die Gleichung gilt also für $J = 0$.

In Absorption tritt am stärksten der Bandenzug mit $v'' = 0$ auf. Daher gilt:

$$\bar{\nu} = \bar{\nu}_{00} + (a'v' + b'(v')^2) \quad (5)$$

Der quadratische Term bewirkt die Konvergenz der Folge der Wellenzahlen $\bar{\nu}$. Da die Schwingungszahl der beobachteten Bandkante im Prinzip unbekannt ist, setzt man

$$v' = N + i \quad i \dots \text{Laufzahl} \quad (6)$$

und es ergibt sich

$$\bar{\nu} = \bar{\nu}_0 + ai + bi^2 \quad (7)$$

mit $a = a' + 2b'N$, $b = b'$ und $\bar{\nu}_0$ der Wellenzahl der Bandkante mit $i = 0$

Die Differenz zwischen zwei benachbarten Schwingungsniveaus erhält man zu:

$$\Delta\bar{\nu}_i = \bar{\nu}_{i+1} - \bar{\nu}_i = A + Bi \quad (8)$$

mit $A = a + b$ und $B = 2b$

Man erhält daher eine Geradengleichung $\Delta\bar{\nu}_i = f(i)$. Mit der aus der Ausgleichsgeraden ermittelten Laufzahl i bei $\Delta\bar{\nu}_i = 0$ kann die Konvergenzenergie ermittelt werden. Aus der Anregungsenergie des dissoziierten Jodatoms ($E_{Anreg} = 0.97 \text{ eV}$) kann die Dissoziationsenergie des Grundzustandes ermittelt werden.

2 Geräte und Aufbau

Zur Verfügung steht ein Steinheil-Spektrograph, Brennweite des Kolimators $f = 800 \text{ mm}$ mit 3-Prismensatz, automatischem Verschluß, variablem Spalt und einigen Umbauoptionen. Der Kameraarm ist in Länge, Winkel und Verkipfung der Photoplatte justierbar, die Photoplatte ist der Höhe nach verschiebbar. Eine Hg-Cd-Lampe mit einer Serie gut sichtbarer und identifizierbarer Spektrallinien dient zur Ermittlung der Dispersionskurve des Prismenspektrographen. Für die Aufnahme des Absorptionsspektrums des Joddampfes wird eine Halogenlampe verwendet. Zur möglichst günstigen Ausleuchtung der Zelle und des Eintrittspaltes stehen mehrere Abbildungslinsen mit unterschiedlicher Brennweite zur Verfügung.

3 Fragen

1. Warum erscheinen Spektrallinien bei Prismenspektrographen gekrümmt und nach welcher Seite erfolgt die Krümmung?
2. Warum bewirkt das Prisma eines Spektralapparates eine Verbreiterung des (monochromatischen) Spaltbildes?
3. Nach welchen Gesichtspunkten bezüglich Schärfe und Helligkeit der Spektrallinie ist die Spaltbreite zu wählen?
4. Abhängigkeit der Flächenhelligkeit einer Spektrallinie von der Spaltbreite?
5. Prinzipieller Aufbau von Atom- und Molekülspektren?
6. Termschema und Potentialkurve zweiatomiger Moleküle?
7. Was besagt das Franck-Condon-Prinzip?
8. In Absorption tritt am stärksten der Bandenzug mit $v'' = 0$ auf. Wieso?
9. Auswahlregeln für die Übergänge zwischen spektroskopischen Niveaus?

4 Aufgaben

4.1 Justieren des Prismenspektrographen

Mittels einer gut sichtbaren Linie der Hg-Cd-Lampe soll der Prismensatz und der Abbildungsarm des Spektrographen auf das Minimum der Ablenkung eingestellt werden. Danach muß die Halterung der Photoplatte so justiert werden, daß alle sichtbaren Spektrallinien möglichst scharf abgebildet werden. Die erforderliche Spaltbreite ist mittels einer Mikrometerschraube vorsichtig einzustellen. Die Kontrolle erfolgt in der Filmebene durch Betrachtung des Spaltbeugungsbildes auf dem Display der CCD Kamera.

4.2 Aufbau mit Jodzelle, Strahlengang

Das Licht der Halogenlampe ist möglichst ohne störende Reflexionen durch die Jod-Absorptionszelle zu führen, die Lichtquelle soll dabei so abgebildet werden, daß ein gleichmäßig und möglichst hell ausgeleuchtetes Spektrum entsteht. Vor der Aufnahme des Absorptionsspektrums wird die Zelle vorsichtig mit einem Heißluftgebläse erwärmt. Die Jodzelle selbst ist (aufgrund ihrer Einzigartigkeit im Institut) mit entsprechender Vorsicht zu behandeln.

5 Auswertung

1. Die Ausmessung der Spektren erfolgt mittels Matlab. Es ist die Dispersionskurve des Prismenspektrographen anhand des Hg-Cd-Spektrums zu ermitteln.
2. Das Auflösungsvermögen des Gitter- und des Prismenspektrographen ist zu ermitteln.
3. Anhand der erhaltenen Kurve sind die Wellenlängen der entsprechenden Jod-Absorptionsbandkanten zu ermitteln.
4. Aus den ermittelten Energieabständen ist die Dissoziationsenergie des Jodmoleküls im Grundzustand zu ermitteln.