

Zeeman-Effekt

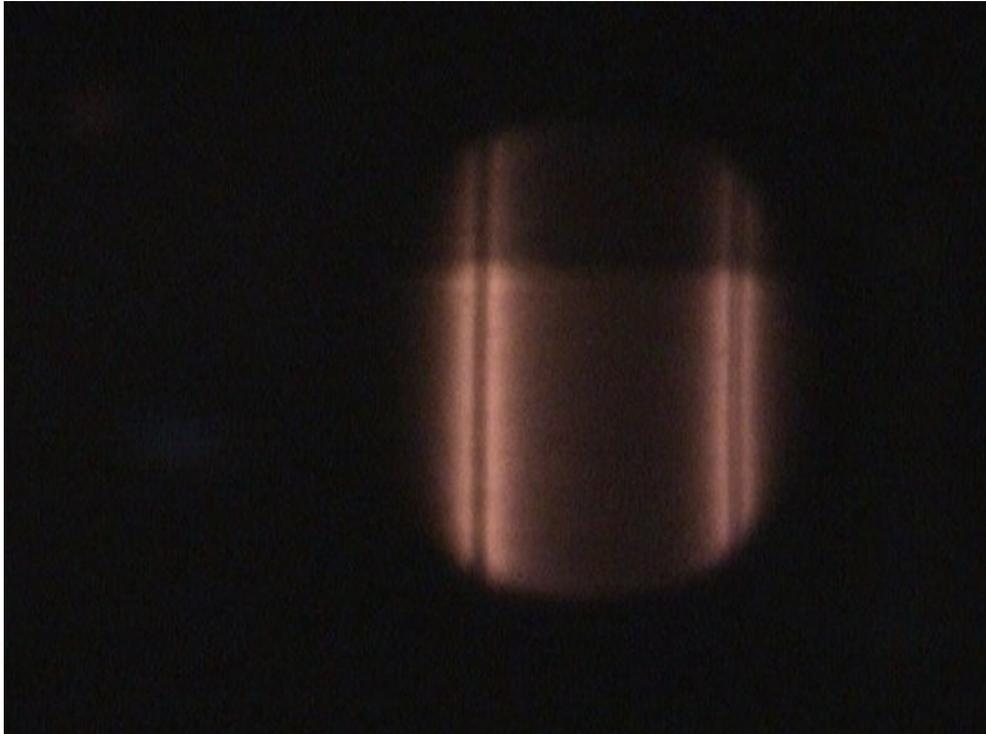


Abb. 1: Natrium D-Linien, hoch aufgelöst mit Selbstabsorptionsminima im Zentrum

Geräteliste:

Na-Dampf-Lampe, Regeltransformator, Stativmaterial, Blende, Linsen ($f = 5000\text{ mm}$, $f = 100\text{ mm}$, $2 \times f = 1000\text{ mm}$), Schirm, optische Bank, Beugungsgitter (3600 lines/mm), starke Dauermagnete in einem Hufeisenmagnet,

Für Aufbau mit Elektromagneten: Stromquelle 60V/10A, Ringkern mit 4 Spulen
1200 Wdg

Für Aufbau zur Flammabsorption: Bunsenbrenner, Magnesia-Stäbchen, Na-Dampf Lampe, Aufbau für starken E-Magneten, NaCl, Schirm

Versuchsbeschreibung:

Der Zeeman-Effekt ist ein eindrucksvoller Beweis für die magnetische Wechselwirkung von Atomen mit einem äußeren Feld.

Das Natrium-Dublett wird mit hoher Auflösung gezeigt. Der Lampenkolben wird in ein starkes ($\approx 1\text{ T}$) Magnetfeld gebracht und die beiden Linien spalten auf. Das Magnetfeld wird entweder mit Hochfeld-Neodym Magneten realisiert, die schwenkbar über den Lampenkolben gebracht werden können, oder ein starker Elektromagnet wird aufgebaut.

Das verwendete Beugungsgitter ist ein Reflexionsgitter. Für den Aufbau ist darauf zu achten, dass das Magnetfeld parallel zu den Furchen des Beugungsgitters gerichtet sein sollte, da die Zeeman-Komponenten senkrechter Polarisation eine größere Aufspaltung zeigen als diejenigen mit longitudinaler Polarisation.

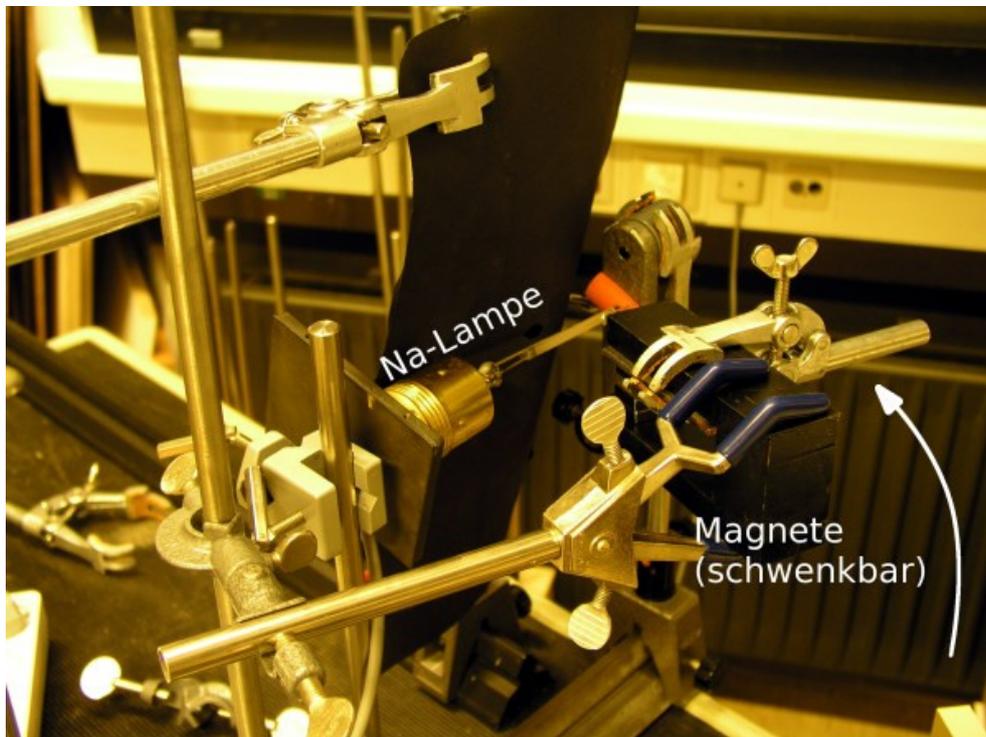


Abb. 2: Ein Hufeisenmagnet wird vorne mit starken Nd-Magneten versehen und so schwenkbar angebracht, dass der Kolben der Lampe in das Magnetfeld gebracht werden kann

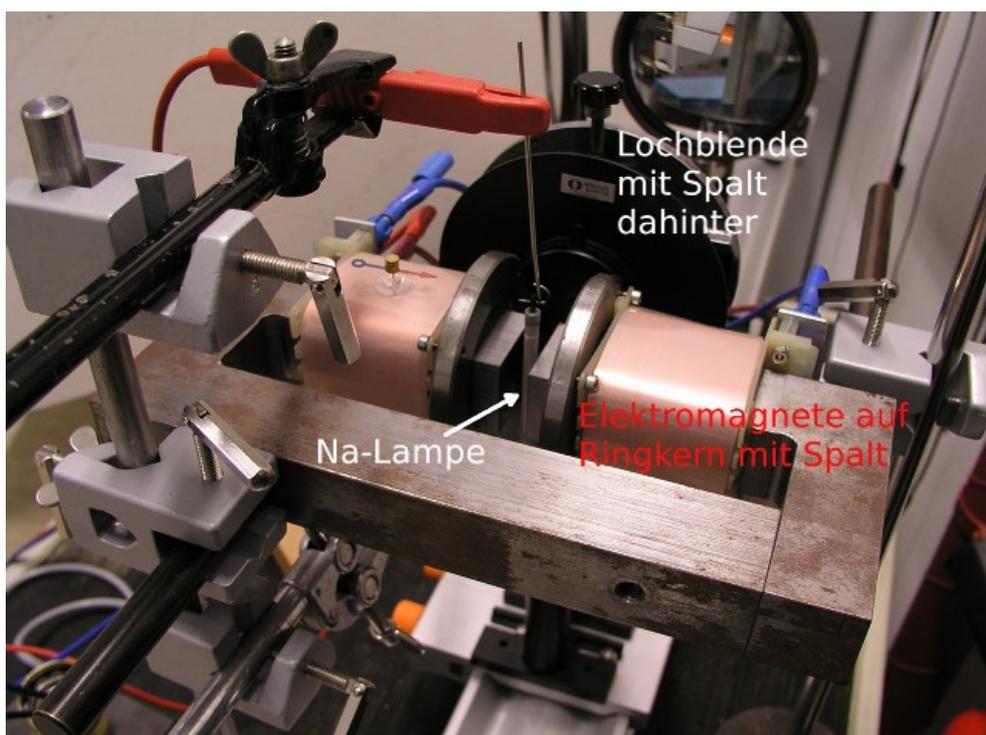


Abb. 3: Aufbau mit Elektromagnet, in diesem Fall ein ungeeigneter Aufbau, da das B-Feld parallel zu den Gitterfurchen liegen sollte.

Zu sehen sind erst einmal die beiden Natrium Linien, die in der Mitte ein Intensitätsminimum aufweisen. An dieser Stelle sollte auf die Selbstabsorption durch die kältere, äußere Gasschicht in der Entladungslampe hingewiesen werden. Beim Einschalten des Magnetfeldes verwischt das Minimum der einen Linie (je nach Güte der optischen Justage auch das andere).

In der Folge kann die Betriebsspannung der Lampe mit dem Regeltransformator auf ca. 100 V reduziert werden. Die Brenntemperatur der Lampe sinkt, und nach einigen Sekunden verschwinden die Selbstabsorptionsminima. Zusätzlich nimmt die Druckverbreiterung der Linien ab. Wird nun das Magnetfeld eingeschaltet, ist deutlich eine Verbreiterung zu erkennen.

Zeeman Aufbau mit Flammabsorption:

Ein Magnesiastäbchen wird zur Glut gebracht und in NaCl eingetaucht, einige Salzkristalle bleiben haften. Das Stäbchen und der Bunsenbrenner werden so positioniert, dass die kleinere Zündflamme das Stäbchen erhitzt und diese zwischen den Magnetpolen brennt. Die Na-Lampe wird derart aufgebaut, dass der Schatten des Magneten scharf auf den Schirm abgebildet wird. Bei einschalten des Magneten wird die Flamme für das Licht der Lampe durchsichtig, da die Absorptionsenergien der Atome im Magnetfeld zu dem emittierten Licht der Lampe verschoben werden.

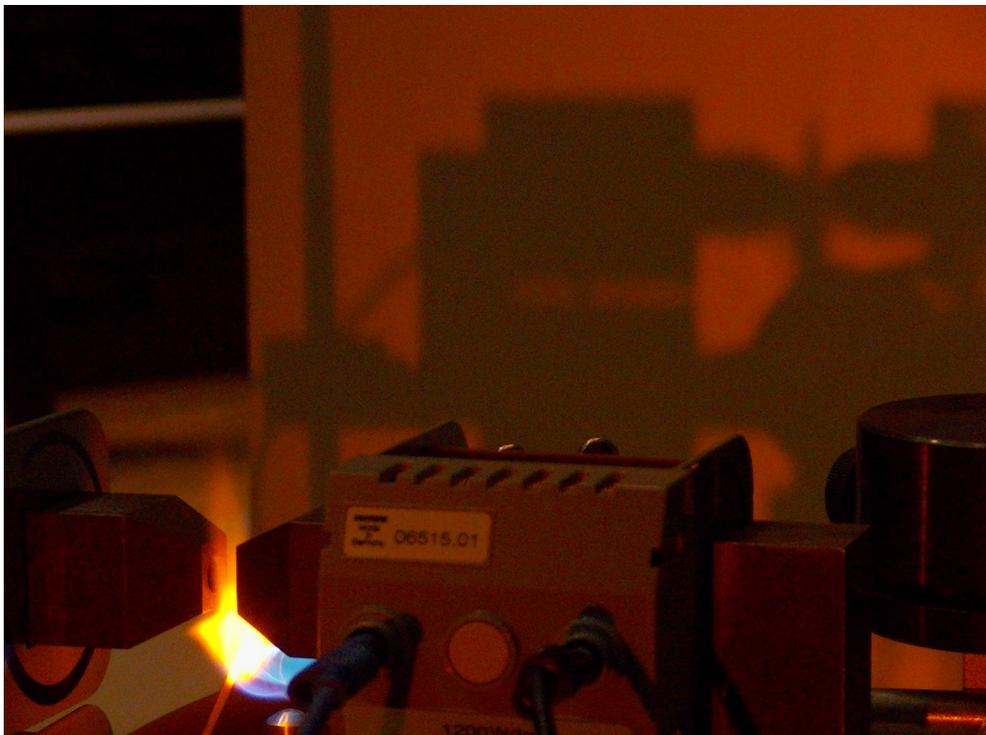


Abb. 4: Flamme wirft einen Schatten auf den Schirm.

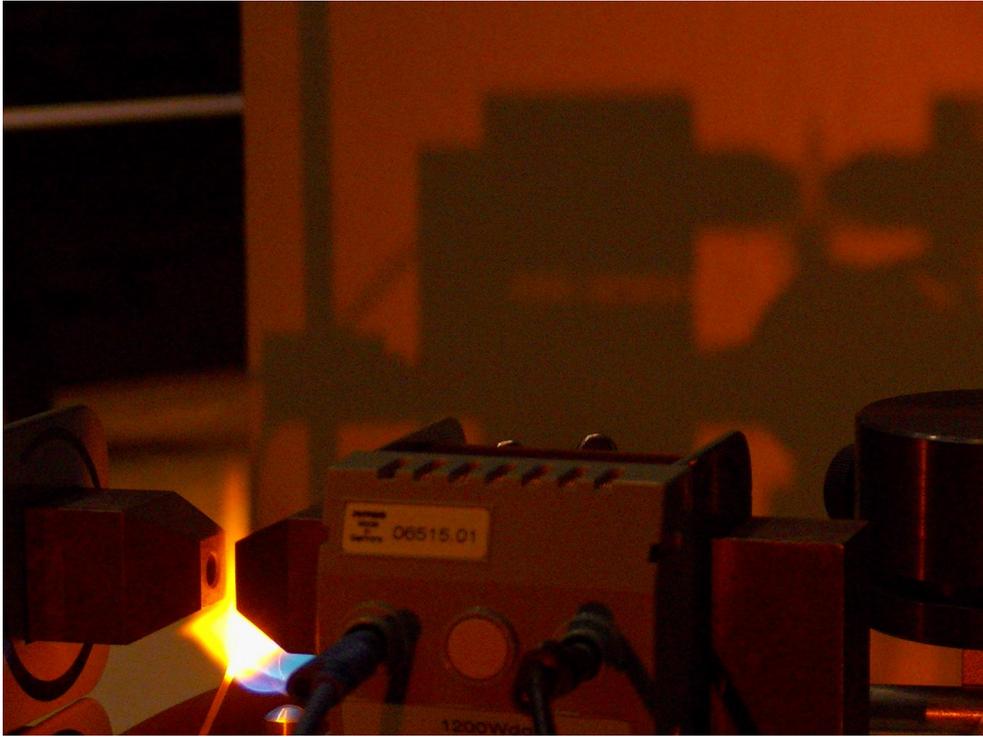


Abb. 5: Bei eingeschaltetem Magnetfeld erscheint die Flamme durchsichtig.

Bemerkungen:

Aufbau mit Flammabsorption:

Natrium Spektrallampe (keine Hochdrucklampe wie im anderen Versuch) in min. 1,5 m Abstand aufbauen. Abstand zwischen Magnet und Schirm möglichst klein wählen um ein scharfes Abbild des Polzwischenraumes darstellen zu können. Schärfe über Linse einstellen. Die kleine Brennerflamme unter die Pole bringen und das Stäbchen in den oberen Teil der Flamme bringen. Höhe des Magneten vorher einstellen und diesen so über die leuchtende Flamme des Stäbchens schieben, dass der Großteil der Flamme genau zwischen den Polen brennt.

Im Schattenbild ist die Flamme nun auch als Schatten zu sehen. Beim Einschalten des Feldes wird die Flamme im Idealfall durchsichtig.

Atomare Größen wie der Bahndrehimpuls \vec{l} , der Spin \vec{s} und die Kopplung von beiden (Gesamtdrehimpuls \vec{j}) sind jeweils mit einem magnetischen Moment verbunden. Für den Gesamtdrehimpuls z.B. beträgt das magnetische Moment

$$\vec{\mu}_j = -g_j \mu_B \frac{\vec{j}}{\hbar}$$

mit dem so genannten Landé- oder g-Faktor g_j der das Verhältnis von magnetischem Moment zum Drehimpuls misst und dem Bohrschen Magneton μ_B . Das Bohrsche Magneton ist die Einheit des magnetischen Moments und entspricht demjenigen Moment welches ein Elektron auf der ersten Bohrschen Bahn (nach der Bohrschen Theorie) des Wasserstoff Atoms besitzt.

$$\mu_B = \frac{e}{2m_0} \hbar \quad \text{bzw.} \quad \approx 9,26 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

Mit der Elementarladung e und der Ruhemasse m_0 .

In einem Äußeren Feld richten sich die magnetischen Momente aus bzw. präzedieren um die Feldrichtung \vec{B} . Für die Zustände des Atoms im Feld bedeutet dies eine Zusatzenergie

$$V_{m_j} = -(\vec{\mu}_j)_z \cdot B_0 = -m_j g_j \mu_B B_0 \quad \text{mit} \quad m_j = j, j-1, \dots, -j,$$

also ein Produkt aus der Feldstärke und der z-Komponente des magnetischen Momentes abhängig von der magnetischen Quantenzahl m_j . Die Größenordnung dieser Energie für die beobachteten Übergänge liegt im Bereich einige μeV und berechnet sich nach

$$\Delta E_{m_j, m_{j-1}} = g_j \mu_B B_0.$$

Der Wert des Landé-Faktors g_j erfordert eine weiterreichende Erklärung und wird hier mit 2 angenähert, und das Feld der Magnete ist auch nur grob abschätzbar mit ca. 1 T . Die so erhaltene Aufspaltung beträgt für den $^2P_{1/2}$ -Term $\approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$. Es wird von Aufspaltung gesprochen, weil die magnetische Quantenzahl m_j die Zusatzenergie mit einem Vorzeichen versieht, und daher sowohl eine Absenkung als auch eine Anhebung der jeweiligen Unterniveaus stattfindet. Die so genannte Entartung wird aufgehoben/sichtbar gemacht. Der $^2S_{1/2}$ -Zustand spaltet auch in 2 Niveaus auf und an Stelle der D_1 -Linie sind 4 Übergänge zu sehen. Übergänge sind erlaubt für $\Delta m_j = 0, \pm 1$, da der $^2P_{3/2}$ -Zustand in 4 Unterniveaus aufspaltet, werden an Stelle der D_2 -Linie bei eingeschaltetem Magnetfeld 6 neue Übergänge sichtbar.

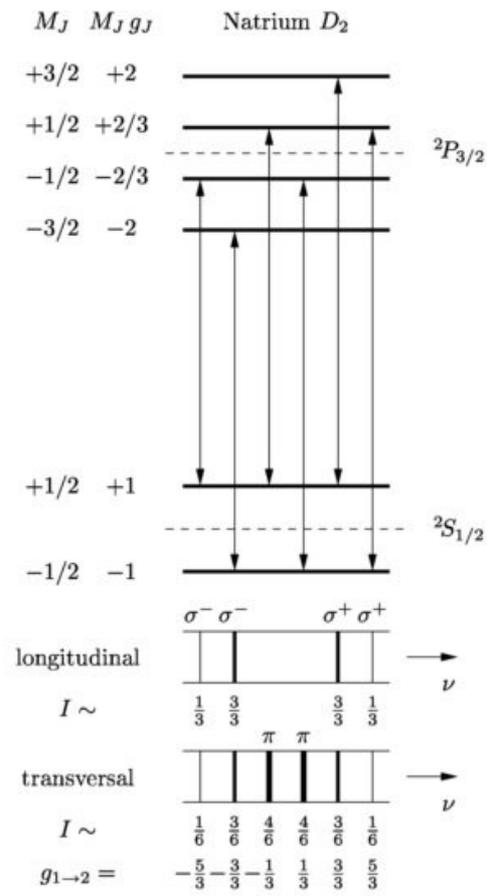


Abb. 6: Übergänge zwischen den im Magnetfeld aufgespaltenen Niveaus

Bei der spektroskopischen Erfassung der Linien muss noch die Beobachtungsrichtung im Verhältnis zum Magnetfeld berücksichtigt werden. Die Komponenten die transversal zum \vec{B} -Feld abgestrahlt werden sind linear, senkrecht zur Feldrichtung polarisiert.

Die hohe Auflösung des abzubildenden Effektes wurde mit folgendem Aufbau realisiert.

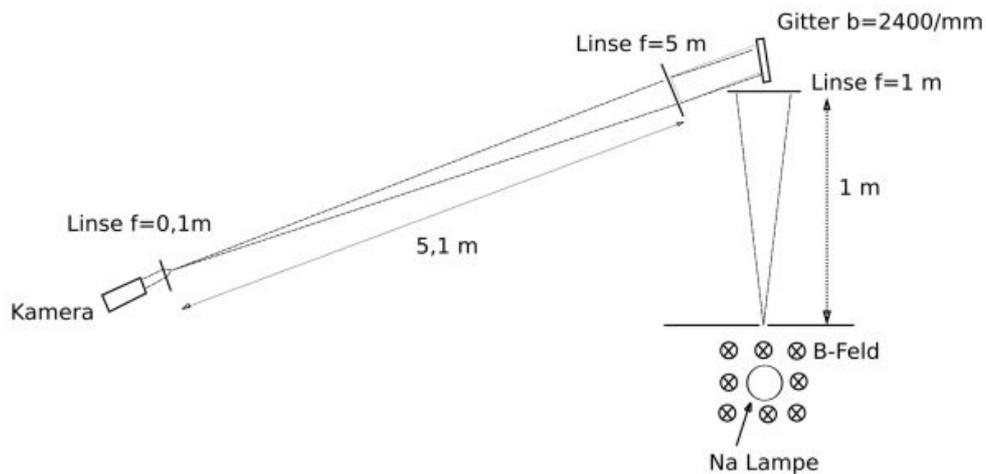


Abb. 7: Schematischer Aufbau

Als Lichtquelle wurde eine Hochdruck Na-Dampf-Lampe verwendet, deren äußerer Glaskolben entfernt war. Um das Magnetfeld zu realisieren wurden mehrere moderne Hochfeld-Nd Magnete verwendet, die so in einen Hufeisenmagneten montiert waren, dass ein möglichst hohes Feld am Ort der gemessenen Emission herrscht (s. Bild 2). Das Bild eines Spaltes wurde scharf gestellt und ein Reflexionsgitter ($b = 2400\text{ mm}^{-1}$) in den Strahlengang gebracht.

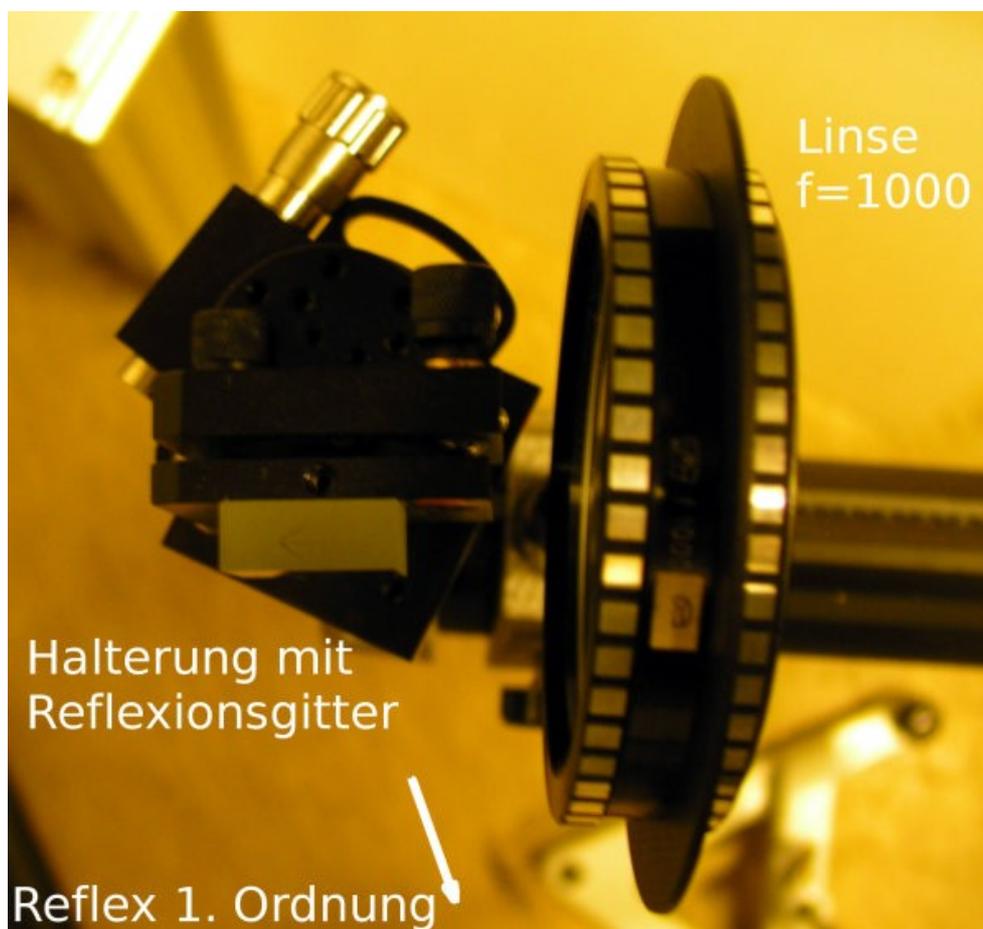


Abb. 8: Das Gitter steht sehr flach zum einfallenden Strahlengang

Das Beugungsbild wurde mit einer 50-fachen Vergrößerung (Teleskopanordnung) auf die Kamera eingekoppelt.

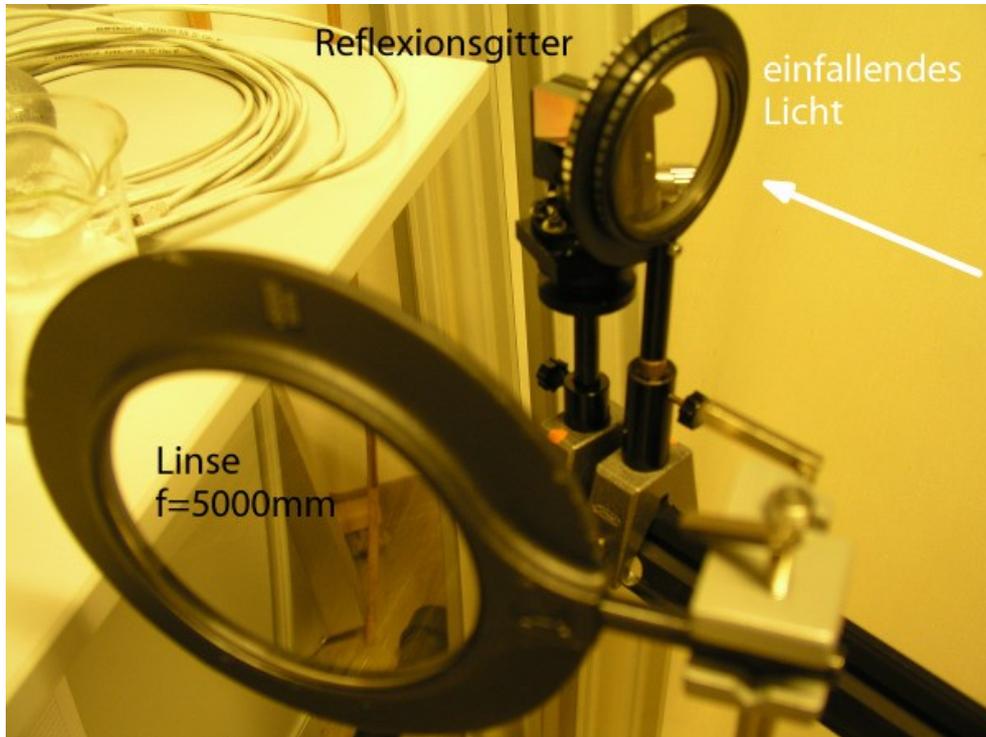


Abb. 9 und Abb. 10: Teleskopanordnung für 50-fache Vergrößerung

Die Justage erfordert ein wenig Geduld.

Wenn das Bild scharf ist, sind 4 Linien zu sehen. Dies ist ein Effekt der Selbstabsorption. Die im inneren des Lampenzylinders entstehende Strahlung ist auf Grund der hohen Temperatur und des Drucks spektral verbreitert. Von der Mitte zur Oberfläche herrscht ein relativ großes Temperaturgefälle, die angeregten Na-Atome nahe der Kolbenhülle absorbieren auf Grund der dort schmalen Temperaturverbreiterung der Linie die Anteile um die Linienmitte herum zu einem nicht unwesentlichen Teil heraus.

Folgende Intensitätsverteilung ist zu sehen

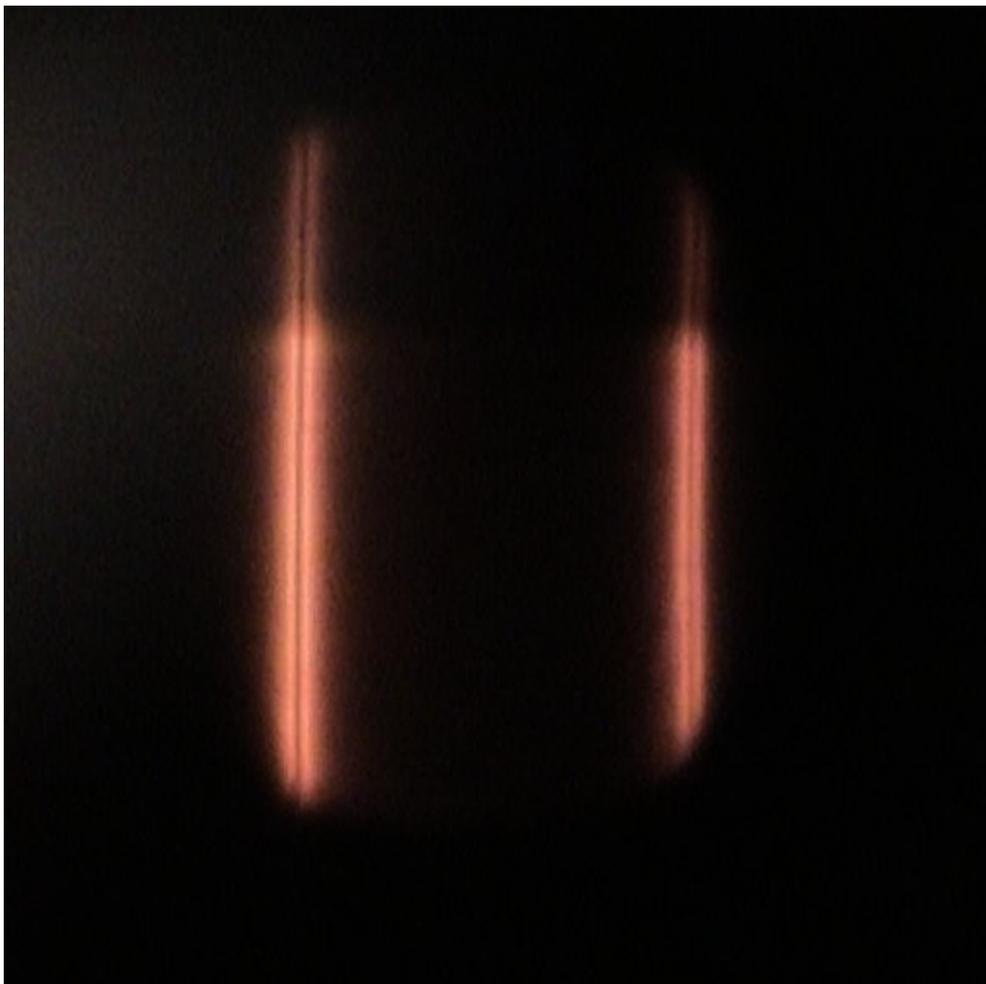


Abb. 11: Kamerabild der beobachteten Linien mit Selbstabsorptionsminima

Die Bilddaten lassen sich zu Abb. 10 zusammenfassen.

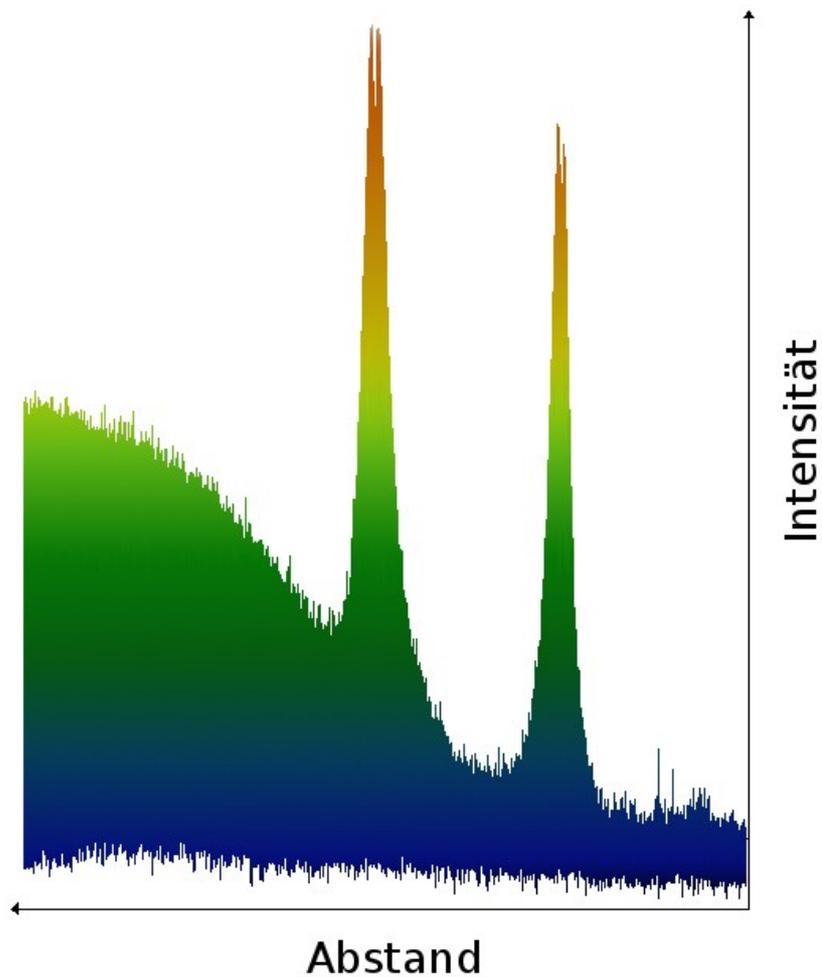


Abb. 12: Intensitätsverteilung von Abb. 9

Nach dem Anlegen des Magnetfeldes ist folgender Unterschied zu sehen

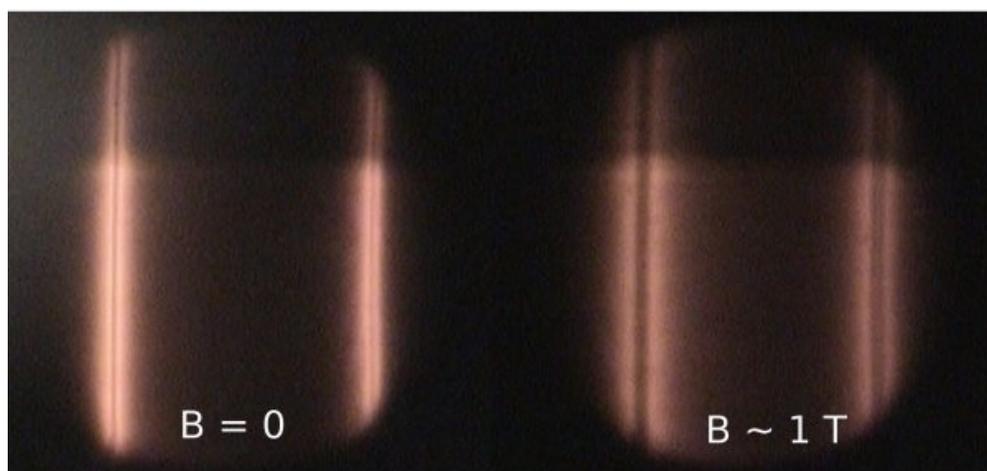


Abb. 13: Aufspaltung der Linien rechts als „Verschmierung“ sichtbar, zusätzlich ist bei der rechten Linie in der Mitte eine weitere Linie zu sehen.

Das Anlegen des Feldes ist im Film zu erkennen und anhand der Bilddaten lässt sich die

Stärke des Magnetfeldes abschätzen.

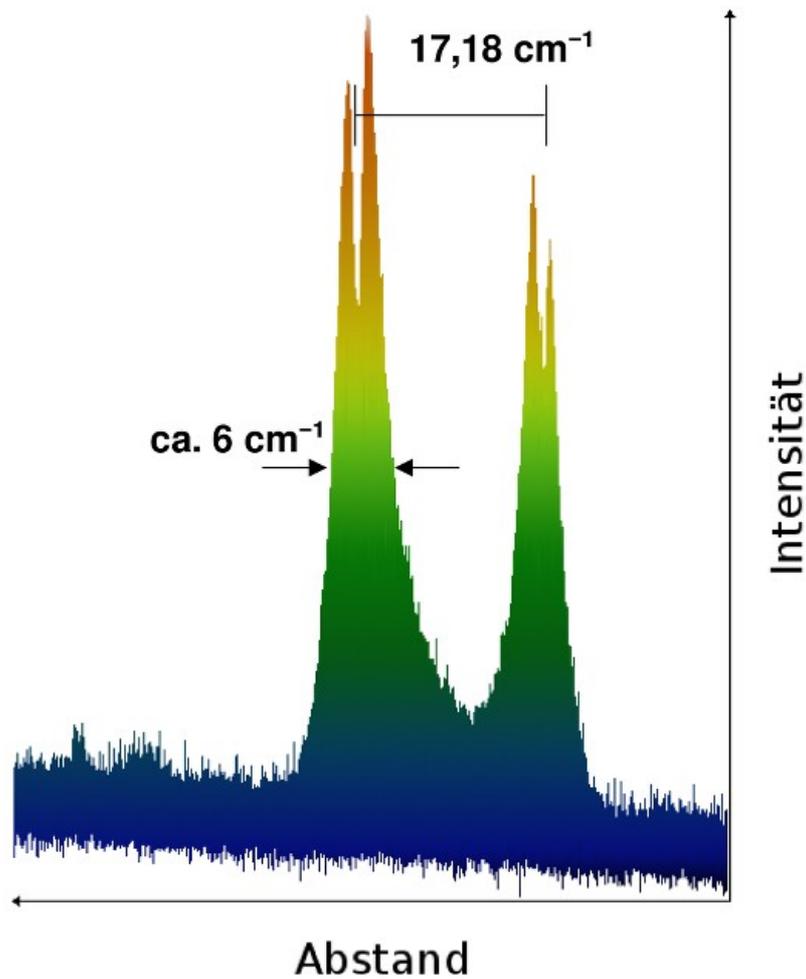


Abb.14: Intensitätsverteilung bei angelegtem Magnetfeld

Die Halbwertsbreite wurde durch Anlegen des Magnetfeldes verdoppelt. Bei einem Linienabstand von $17,18 \text{ cm}^{-1}$ beträgt die Halbwertsbreite für die D_2 -Linie ohne Feld etwa $3,23 \text{ cm}^{-1}$ und mit Feld ca. $6,0 \text{ cm}^{-1}$. Wenn angenommen wird, dass bei angelegtem Feld die Linie aus 6 Linien der Breite ohne Feld besteht, beträgt die Aufspaltung 1 cm^{-1} , eingesetzt in die Gleichung für die Aufspaltung ergibt sich

$$\frac{\Delta E}{g_j \mu_B} = \frac{1,986 \cdot 10^{-23} \text{ J}}{2 \cdot 9,26 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2} \approx 1 \text{ T}$$

und spiegelt den abgeschätzten Wert für \vec{B} ziemlich gut.