

Zusammenfassung aus der Masterarbeit von Frau Helen Bieker, Uni Bremen, Januar 2014

In dieser Arbeit wurden Versuchsideen für neue Praktikumsversuche zur Atomphysik erprobt, um deren Realisierungsmöglichkeiten zu testen. Dabei handelt es sich um Versuche zum Zeeman-Effekt, die preiswerter realisiert werden sollten als bisher bekannte, konfektionierte Versuche, die in der Regel große Magneten und teure interferometrische Messtechniken verwenden.

So wurde erstens das Verhalten des 632 nm Laserübergangs beim HeNe-Laser im transversalen und im axialen Magnetfeld und zweitens die magnetfeldinduzierte Doppelbrechung (Faraday-Rotation) in Glas untersucht. Beide Effekte haben ihre Ursache in der Zeeman-Aufspaltung von Energie-Niveaus zwischen denen optische Übergänge stattfinden.

Beim HeNe-Laser im Axialfeld spaltet das auf $\Delta\nu_D = 1,5$ GHz doppler-verbreiterte Verstärkungsprofil in zwei Verstärkungsprofile für links- (σ^-) und rechtszirkular (σ^+) polarisiertes Licht auf, wobei der Abstand der Mittenfrequenzen beider Profile gleich der doppelten Zeeman-Aufspaltung ist. Die einfache Zeeman-Aufspaltung beträgt ca. 18 MHz/mT bei gleichen g -Faktoren für die oberen und unteren Laserniveaus.

Für die Untersuchungen wurden mehrere HeNe-Laser ohne Brewster-Fenster aber mit unterschiedlicher Resonatorlänge verwendet und mittels konfokalem, piezogesteuerten FP-Etalon bzw. mit einer schnellen Photodiode und einem Spektrumanalysator hinsichtlich ihrer Axialmodenabstände $\delta\nu_r$ charakterisiert.

Beim HeNe-Laser im magnetischen Axialfeld wurden im Bereich zwischen 5 mT und 30 mT niederfrequente Schwebungsfrequenzen (LFB) zwischen σ^- - und σ^+ -Linien beobachtet, die mit der magnetischen Flussdichte von 300 kHz bis auf 900 kHz linear anstiegen. In einer Abschätzung konnte gezeigt werden, dass das jeweils in verschiedene Richtungen erfolgende Frequenzziehen (frequency pulling) der in einer etwa 5 MHz breiten Resonatormode gleichzeitig anschwingenden σ^- - und σ^+ -Übergänge das Auftreten und die Größe der Schwebungsfrequenzen gut erklärt. Das Frequenzziehen erfolgt dabei jeweils in Richtung der Mittenfrequenzen der entsprechenden Verstärkungsprofile und nur solange sich beide Verstärkungsprofile ausreichend überlappen.

Der im Bereich der anomalen Dispersion bei Zeeman-aufgespaltenen Verstärkungsprofilen erwartete Brechungsindexunterschied $\Delta n = n_l - n_r$ zwischen σ^- - und σ^+ -Resonanz wurde berechnet, kann aber im Gegensatz zu einem Vorschlag aus der Literatur nicht die beobachteten niederfrequenten Schwebungsfrequenzen im axialen Magnetfeld erklären.

Im transversalen Magnetfeld entstehen aufgrund der Zeeman-Aufspaltung drei dopplerverbreiterte Verstärkungsprofile, in denen jeweils linear polarisiertes Laserlicht parallel ($\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$, $\nu_{s\pm} = \nu_0 \pm \Delta\nu_{\text{Zeeman}}$) und senkrecht ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$, $\nu_{\pi} = \nu_0$) zum Magnetfeld erzeugt wurde. Aufgrund der durch das transversale Magnetfeld erzeugten Resonatoranisotropie wurde mit steigendem Magnetfeld B eine Zunahme der Lichtintensität mit $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ auf Kosten der Intensität mit $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ beobachtet (Polarisationsdrehung). Darüber hinaus wurden bei Magnetfeldvariation nur stark schwankende Schwebungsfrequenzen etwa gleichbleibender Größe ($\nu_{\text{Schwebung}} = 250 \text{ kHz} \pm 100 \text{ kHz}$) in zwei Bereichen beobachtet. Diese lassen aber im Gegensatz zum Axialfeld keine Rückschlüsse auf die Größe der Zeeman-Aufspaltung zu.

Bei Flussdichten oberhalb 100 mT ($\Delta\nu_{\text{Zeeman}} > \Delta\nu_{\text{D}}$) sind die Verstärkungsprofile offenbar soweit auseinandergezogen, dass der HeNe-Laser nicht mehr anschwingt. Offenbar reichte die Gesamtverstärkung dieser HeNe-Laser nicht mehr aus, um die gestiegene Anzahl möglicher Resonatormoden in den Verstärkungsprofilen zum Anschwingen zu bringen. Deshalb waren auch getrennte Linien z. B. mit dem Fabry-Perot-Etalon nicht beobachtbar.

Nichtlineare Modenwechselwirkungen traten auf, wenn bei den verwendeten Mehrmodenlasern der Axialmodenmodenabstand gleich der doppelten bzw. einfachen Zeeman-Aufspaltung im Axialfeld bzw. im Transversalfeld betrug. Diese waren insbesondere beim Transversalfeld als Minima der Laserintensität bei Variation der magnetischen Flussdichte gut beobachtbar und gestatteten Rückschlüsse auf die Größe der Zeeman-Aufspaltung. Ursachen der nichtlinearen Modenwechselwirkungen sind Konkurrenz und Reabsorptionsprozesse. So kann ein Atom gleichzeitig mit in verschiedenen Resonatormoden (ν_q) anschwingenden Linien in Resonanz sein, wenn zum Beispiel $\nu_{q,\sigma^-} + \delta\nu = \nu_{q-1,\sigma^+}$ ist.

Für einen Praktikumsversuch zur Untersuchung der Zeeman-Aufspaltung am HeNe-Laser erscheinen lediglich die Untersuchungen der niederfrequenten Schwebungsfrequenzen im Axialfeld geeignet zu sein, wobei dann zur Reproduzierbarkeit der Messungen besondere Maßnahmen zur Temperaturstabilisierung des Laserresonators nötig sind.

Weiterhin wurde ein Versuchsaufbau zur Messung der Faraday-Rotation in Glas erprobt. Zur preiswerten Realisierung verschiedener Wellenlängen wurden LEDs verwendet, deren Strahlung parallelisiert und linear polarisiert wurde. Zum Nachweis der sehr kleinen Winkeldrehungen des linear polarisierten Lichts musste ein Modulationsverfahren verwendet werden. Dazu wurde das axiale Magnetfeld mit Frequenzen im Bereich von 40 Hz bis 100 Hz moduliert.

Es konnte gezeigt werden, dass die maximale Modulation bei einem Winkel von 45° zwischen Polarisator und Analysator erhalten wird. Damit stand neben dem modulierten Lichtsignal (AC-Signal) stets auch ein DC-Signal zur Verfügung. Es wurde gezeigt, dass der Drehwinkel proportional zum Quotienten aus AC- und DC-Signal ist. Damit kürzen sich die unterschiedlichen Helligkeiten der verschiedenfarbigen LEDs sowie die spektrale Empfindlichkeit des verwendeten Si-Photodetektors heraus. Die Dispersionskurve des als Messobjekt verwendeten Glasblocks wurde ellipsometrisch vermessen und mit einem Ein-Oszillator-Modell angepasst. Die Zeeman-Aufspaltung dieser Modellresonanz, die alle hochenergetischen Absorpti-

onsbanden zusammenfasst, führt auch fernab von dieser Resonanz im transparenten Bereich der Probe zu unterschiedlichen Brechungsindizes für σ^- - und σ^+ -zirkular polarisiertes Licht und damit zu einer magnetfeldinzuzierten Doppelbrechung.

Aus den gemessenen Drehwinkeln bei verschiedenen Wellenlängen konnten die Verdet-Konstante in Abhängigkeit vom Magnetfeld, die effektive Masse der Elektronen im Glas sowie die Anzahl der Dispersionselektronen bestimmt werden. Die Anzahl der Dispersionselektronen beträgt im Glas etwa 10^{23} cm^{-3} , sodass pro Atom etwa ein Elektron für die optischen Eigenschaften verantwortlich ist. Dieser Versuch ist in reduzierter Form für das vierte Semester (Atomphysik) geeignet oder im Fortgeschrittenen Praktikum einsetzbar.

Ein mögliches Experiment im Physikalischen Praktikum aus Kombination von Zeeman-Effekt und Faraday-Rotation ist die Bestimmung des Brechungsindexunterschieds $n_l - n_r$ von HeNe-Gas in einem axialen Magnetfeld. Es könnte die Polarisationsdrehung θ einer Laserlinie eines HeNe-Lasers beim Durchgang durch ein HeNe-Laserrohr (ohne Spiegel und ohne Brewster-Fenster), das sich in einer axialen Spule befindet, mit dem hier vorgestellten Versuchsaufbau zur Bestimmung der Faraday Rotation untersucht werden und die Brechungsindexdifferenz $n_l - n_r$ im axialen Magnetfeld bestimmt werden, um zu überprüfen, ob das Auftreten der Schwebungsfrequenzen anhand der Brechungsindexdifferenz erklärt werden kann.