

Kapitel 6

MT-Spektrum eines einzelnen Barium-Ions

6.1 Übersicht über das Experiment

Abbildung 6.1 gibt einen Überblick über das durchgeführte Experiment zur Modulationstransferspektroskopie. Die Laserstrahlen bei 493 nm und 650 nm werden jeweils in einem Strahlteiler aufgeteilt, wobei ca. 80% der Intensität durch den vorderen und 20% durch den seitlichen Strahlengang gelangen. Der vordere Strahlengang wird benutzt um ein Ion zu speichern und zu kühlen, während das Mikroskop [G14] im seitlichen Strahlengang zur Kontrolle der Speicherung Verwendung findet. Ist das Ion gefangen, so wird es durch den seitlichen Strahlengang beleuchtet und der vordere Strahlengang wird abgeschattet. Das ist sinnvoll, weil das Mikroskop einen wesentlich kleineren Fokus ($< 15\mu m$) erreicht, als es mit der Optik im vorderen Strahlengang möglich ist (ca. $200\mu m$). Auf diese Weise kann man die gleiche Feldstärke am Ort des Ions mit wesentlich geringerer Strahlintensität erreichen. Das Hintergrundsignal an der APD wird also geringer.

Der Polarisator, welcher sich direkt vor der Vakuumapparatur im vorderen Strahlengang befindet gehört zu der Intensitätseinstellung, wie sie in Abschnitt 5.2.5 beschrieben ist. Um die Intensität der Strahlen im seitlichen Strahlengang einstellen zu können, befindet sich im seitlichen Strahlengang direkt vor dem Lichtwellenleiter ebenfalls ein Polarisator. Mit Hilfe der $\frac{\lambda}{2}$ -Verzögerungsplatten in den Strahlengängen beider Laser lassen sich die Intensitäten der Laser im seitlichen Strahlengang regeln.

Der Polarisator und der Wellenleiter sind so aufeinander abgestimmt, daß die Polarisation bei Durchgang durch die Faser erhalten bleibt. Die Polarisation am Ort des Ions kann durch Drehen der Auskoppereinheit des Wellenleiters gewählt werden. Durch Verschieben des Mikroskopes, wird der Fokus auf das Fallenzentrum gelenkt, in dem sich das Ion befindet.

Im Mikroskop ist ein Strahlteiler integriert. Mit diesem wird ein Teil des vom

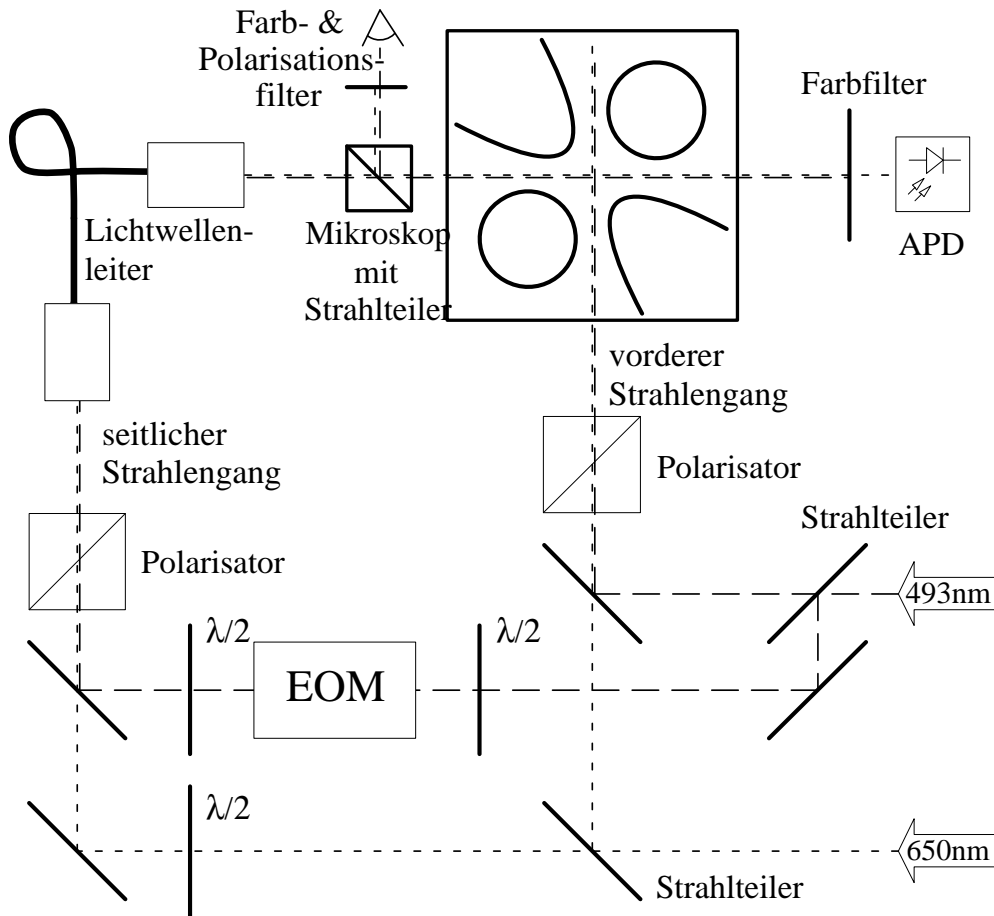


Abbildung 6.1: Experimenteller Aufbau für die Modulationstransfer-Spektroskopie

Ion kommenden Fluoreszenzlichts ausgekoppelt und kann mit dem bloßen Auge betrachtet werden. Das menschliche Auge ist so empfindlich, daß auch einzelne Photonen noch wahrgenommen werden können, es eignet sich jedoch nicht zur quantitativen Bestimmung der Lichtstärke. Da die Fluoreszenz des Ions zu drei Vierteln aus grünem Licht bei 493 nm besteht und das Auge zudem in diesem Bereich empfindlicher ist als im roten Spektralbereich, wird das rote Licht mit einem Farbfilter herausgefiltert. Zusätzlich befindet sich im Beobachtungskanal ein Polarisationsfilter, das das linear polarisierte Streulicht des grünen Lasers herausfiltert. Die Polarisation des Fluoreszenzlichts ist zufällig verteilt, so daß durch dieses Filter die Hälfte des Fluoreszenzlichts herausgefiltert wird. Das Polarisationsfilter verschlechtert also die absolute Intensität des Fluoreszenzlicht, verbessert aber den Kontrast von Fluoreszenz- zu Streulicht und erhöht damit die Sichtbarkeit des Ions.

Das grüne Lichtfeld wird mit Hilfe des EOMs im seitlichen Strahlengang phasenmoduliert. Hierbei ist es wichtig, daß das Licht genau senkrecht durch die Kristalloberflächen tritt. Um das zu gewährleisten ist der Modulator auf einem Dreh- und Verschiebetisch mit zwei Translations- und drei Rotationsachsen ge-

lagert. Mit Hilfe der $\frac{\lambda}{2}$ -Verzögerungsplatte vor dem EOM wird die Polarisation so eingestellt, daß hinter dem Kristall nur ein Strahl — der ordentliche, also nicht versetzte Strahl — zu sehen ist. Die Verzögerungsplatte hinter dem EOM wird in Verbindung mit dem Polarisator vor der Faser zur Intensitätsregelung verwendet.

6.2 Durchführung der Messung

Zunächst werden beide Laser im seitlichen Strahlengang abgeschattet und das Fallenzentrum wird nur durch den vorderen Strahlengang beleuchtet. In dieser Konstellation wird mit Bariumofen und Elektronenkanone ein Ion eingespeichert, wie es im vorherigen Kapitel beschrieben wurde. Dieses wird, sobald es gespeichert ist, durch die beiden Laser gekühlt.

Nun wird zunächst nur der rote Laser in dem seitlichen Strahlengang geöffnet. Da sich im Beobachtungskanal ein grünes Farbfilter befindet, wird dadurch kein Streulicht sichtbar, so daß sich der Kontrast nicht verschlechtert. Die Strahl-lage des seitlichen Strahlengangs wird so einjustiert, daß das Ion beim Abschatten des roten Lasers im vorderen Strahlengang sichtbar bleibt. Liegt der Brennpunkt des seitlich eingestrahlt Lichts nicht genau im Fallenzentrum, so verschwindet die Fluoreszenz des Ions beim Abschatten des vorderen Strahlengangs.

Gelingt es durch räumliches Verschieben der Strahl-lage nicht, das Ion wieder zur Fluoreszenz anzuregen, so ist es notwendig, die Intensität des Lasers im seitlichen Strahlengang, oder die Verstimmungen der Laser zu ändern. Das ist deshalb erforderlich, weil die Intensitäten der Lichtfelder am Ort des Ions einen starken Einfluß auf die Linienform der Fluoreszenz haben. Beim Einspeichern des Ions wurden die Intensitäten im vorderen Strahlengang so gewählt, daß das Ion optimal sichtbar wird. Die Intensitäten des seitlichen Strahlengangs am Ort des Ions können aber nicht direkt gemessen werden. Es ist darum nicht möglich, sie zu denen im vorderen Strahlengang identisch einzustellen. Durch Probieren wird eine Kombination von Verstimmungen und Intensitäten eingestellt, die dazu führt, daß das Ion sichtbar aufleuchtet, wenn es mit dem Brennpunkt des seitlichen Strahlengangs getroffen wird.

Ist der seitliche Strahlengang räumlich richtig justiert, so wird zusätzlich der grüne Laser im seitlichen Strahlengang geöffnet. Da auch mit dem Polarisationsfilter die vollständige Unterdrückung des Streulichts nicht möglich ist, verschlechtert sich hierdurch der Kontrast von Fluoreszenzlicht zu Streulicht erheblich. Der vordere Strahlengang wird nun vollständig abgeschattet und für das weitere Experiment nicht mehr benötigt. Die Intensitäten und Wellenlängen der Laser im seitlichen Strahlengang werden so eingestellt, daß die Fluoreszenz des Ions gut zu sehen ist.

War die Falle mit einer Wolke von mehreren Ionen bestückt, so sind bei dem Versuch, die Laser im seitlichen Strahlengang einzurichten, jedesmal alle Io-

nen außer eines verloren gegangen. Es ist also mit dem hier beschriebenen Aufbau nicht möglich gewesen, eine Wolke von Ionen zu untersuchen. Eine mögliche Erklärung hierfür ist in der Laserkühlung zu finden. Die Kühlung enthält drei Anteile: Zum einen trägt die Absorption jedes der beiden Laser dann zur Kühlung bei, wenn die Laserfrequenz gegenüber einer Resonanz zu kleinen Energien verstimmt ist. Zum anderen bewirken Zwei-Photon-Prozesse dann Kühlung, wenn die Differenzfrequenz zwischen beiden Lasern gegenüber der Raman-Resonanz zwischen dem S - und dem D -Niveau zu kleinen Energien verstimmt ist. Der letzte Anteil, der als Raman-Kühlung bezeichnet ist, erreicht aufgrund der schmalen Resonanz sehr kleine Bewegungsenergien. Befindet sich der Versuchsaufbau in der Konstellation, daß das grüne Licht durch den vorderen, daß rote Licht aber durch den seitlichen Strahlengang eingestrahlt wird, so wirkt die Dopplerverschiebung nicht mehr für beide Lichtfelder in die gleiche Richtung. In bestimmten Bewegungsrichtungen eines Ions kann sich so die Verstimmung der Laser zueinander Umkehren. Das Ion wird dann aus der Falle herausbeschleunigt. Befinden sich nun mehrere Ionen in der Falle, so befindet sich nur eines genau im Fallenzentrum, die anderen bewegen sich um dieses Ion herum, und haben größere Geschwindigkeiten, so daß sie leicht herausbeschleunigt werden können.

Nun können die MT-Signale aufgenommen werden. Dazu wird an dem EOM eine Modulationsfrequenz von 18.55 MHz angelegt, die zur Phasenmodulation des grünen Lichts führt. Diese Frequenz wird dem Lock-In-Verstärker als Referenz zugeführt. Das Licht, das das Ion durch den seitlichen Strahlengang durchleuchtet hat, wird durch ein Farbfilter von den modulierten grünen Komponenten befreit. Dann wird das rote Licht mit der APD aufgenommen und dem Lock-In-Verstärker zugeführt. Die Ausgänge des Lock-In-Verstärkers werden mit dem CAMAC-Datennahmesystem digitalisiert und zur Auswertung gespeichert.

6.3 Nachweis eines MT-Signals

Abbildung 6.2 zeigt eine zeitliche Messung des MT-Signals über 930 Sekunden. Vom Anfang der Messung bis zum Zeitpunkt 1 wurden die Parameter im Rahmen der Kontrollierbarkeit konstant gehalten. Die Modulationsfrequenz beträgt 18.55 MHz der Modulationsindex liegt bei 1.15 ± 0.06 . Die Konstante u für die Zeeman-Aufspaltung beträgt ca. 7 MHz, konnte aber nicht direkt vor der Messung kontrolliert werden.

Am Zeitpunkt 1 wurde dann der rote Laser zu kleineren Frequenzen verstimmt, bis die Fluoreszenz des Ions nicht mehr beobachtbar war. Die Intensität der Lichtfelder wurde hierbei nicht beeinflusst. Nun wurden die Parameter wieder bis zum Zeitpunkt 2 konstant gehalten. An diesem Zeitpunkt wurde der rote Laser wieder von Hand in Richtung der Resonanz abgestimmt, bis das Ion wieder deutlich zu erkennen war. Von da an wurden die Parameter wieder konstant gehalten.

Bei dieser Messung wurde nur ein Kanal des Lock-In-Verstärkers ausgelesen.

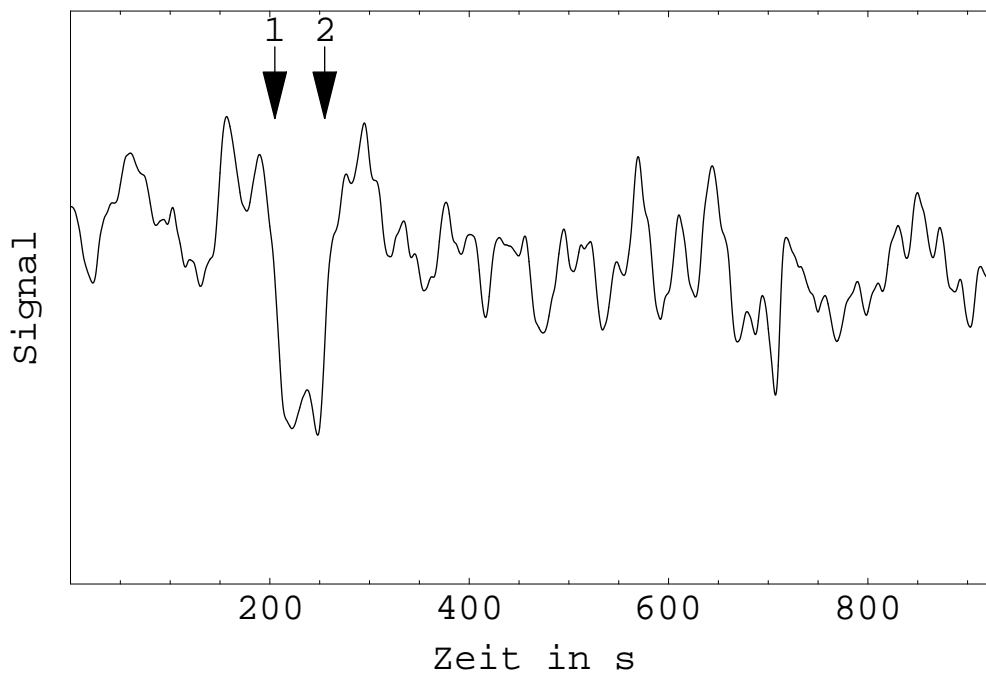


Abbildung 6.2: Zeitlicher Verlauf des MT-Signals: Zur Zeit 1 wurde der rote Laser so weit zu kleineren Frequenzen verstimmt, daß die Fluoreszenz verschwand. Zur Zeit 2 wurde der Laser wieder auf die Resonanz gefahren, so daß das Ion sichtbar wurde.

Zusätzlich wurden die Kontrollsignale der Frequenzstabilisierungen beider Laser aufgenommen, so daß mit Sicherheit angenommen werden kann, daß die Frequenzen stabil waren. Auch die Intensitätsregelungen beider Laser wurden während der Messung überwacht und nicht verändert.

Es ist eine deutlich Abnahme des Signals an dem Zeitpunkt zu erkennen, an dem die Frequenz des roten Lasers verstimmt wurde. Am Zeitpunkt 2, an dem die Frequenz wieder auf die Resonanz zurückgestellt wurde nimmt auch das Signal wieder erkennbar zu. Ein solcher Signalverlauf wurde mehrfach beobachtet, so daß eine zufällige Korrelation zwischen Verstimmung und Absinken des Signals ausgeschlossen werden kann. Auch ist kein Effekt bekannt, der den Untergrund bei Verstimmung im Bereich von einigen zehn MHz so stark ändern könnte, daß das beobachtete Signal als Untergrundeffekt gedeutet werden könnte. Die Wirkung des EOM ist zwar wellenlängenabhängig, die Verstimmung der Laserfrequenz um 100 MHz würde aber nur eine Wellenlängenänderung von ca. 0.2 ppm bewirken. Um die Fluoreszenz des Ions auf ein nicht mehr sichtbares Maß herunterzuregulieren ist jedoch eine deutlich geringere Verstimmung als 100 MHz nötig (Siehe Fluoreszenzlinien in Abschnitt 4.2 oder bei [Sie 91]).

Der beobachtete Signalverlauf ist also auf eine Wechselwirkung der Lichtfelder mit dem Ion zurückzuführen. Die Absorption eines einzelnen Ions wurde zweifelsfrei nachgewiesen.

Aus dieser Messung läßt sich ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von ca. 2:1 ab-

schätzen. Außerdem ist eine langsame Drift des Signals zu beobachten, die im Zeitbereich von ca. 400–700 Sekunden zur tendenziellen Abnahme des gemessenen Signals führt.

6.4 MT-Spektrum

Als nächstes wurden MT-Spektren aufgenommen, bei denen der rote Laser mittels des AOMs durchgestimmt wurde. Ein solches Spektrum ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Im oberen Teilbild wurde begonnen, die Frequenz des roten Lasers zu höheren Frequenzen zu verstimmen. Nach einer Verweildauer von wenigen Sekunden am rechten Rand wurde die Verstimmung wieder in die Gegenrichtung gefahren. Den Verlauf der Signale während des Rücklaufs gibt das mittlere Teilbild wieder. Im unteren Teilbild wurde die Frequenz erneut in positiver Richtung verstimmt. Der Nullpunkt der Verstimmung ist willkürlich.

Abbildung 6.4 zeigt drei theoretische Spektren im gleichen Frequenzmaßstab zum Vergleich. Dabei wurden verschiedene Sättigungsparameter gewählt. Die längeren Markierungen am unteren Rand geben die Positionen der Dunkelresonanzen an, die kürzeren Markierungen sind den langen gegenüber um die Modulationsfrequenz 18.55 MHz verschoben. Bei großen Intensitäten sind die Einflüsse unterschiedlicher Resonanzen offensichtlich nicht mehr aufzulösen. Die Markierungen befinden sich weder an den Spitzen der Signale, noch an deren größten Steigungen, so daß die Signalform weder rein dispersiv noch absorptiv verstanden werden kann.

Die Markierungen, wie sie sich in Abbildung 6.4 befinden wurden auch in die Messung (Abb. 6.3) eingetragen, wobei eine Verstimmung des grünen Lasers von -28 MHz angenommen wurde. Im unteren Teilbild stimmen die Abstände der gefundenen Strukturen in etwa mit denen der Strichmarken überein. Dies ist jedoch nicht in den beiden oberen Teilbildern reproduziert. Hierfür könnte die Drift unbekanntem Ursprungs verantwortlich sein, die auch in Abbildung 6.2 zu erkennen ist. Lineares Driften der Laserfrequenz würde zu Verzerrungen im Spektrum führen, die sich durch Verbreiterung der Strukturen bei Verstimmung in Richtung der Drift, sowie durch Stauchung der Strukturen bei Verstimmung gegen die Drift bemerkbar machen würde. Auch der stark verrauschte Untergrund kann dazu führen, daß die gemessenen Strukturen durch zufällige Schwankungen überdeckt werden.

Für das Vorhandensein einer Linearen Frequenzdrift spricht die aus zwei Spitzen bestehende Struktur in der Mitte des oberen Teilbildes. Eine solche Struktur ist auch im mittleren Teilbild zu erkennen, dort ist sie jedoch um ca. 5 MHz zu niedrigen Frequenzen verschoben. Der Abstand der beiden Maxima ist ein wenig größer. Im unteren Teilbild ist diese Struktur in der Form nicht mehr zu erkennen.

Starkes Rauschen, mit einem Signal-zu-Rausch-Verhältnis von nur etwa 2:1 wurde bereits Abbildung 6.2 nachgewiesen.

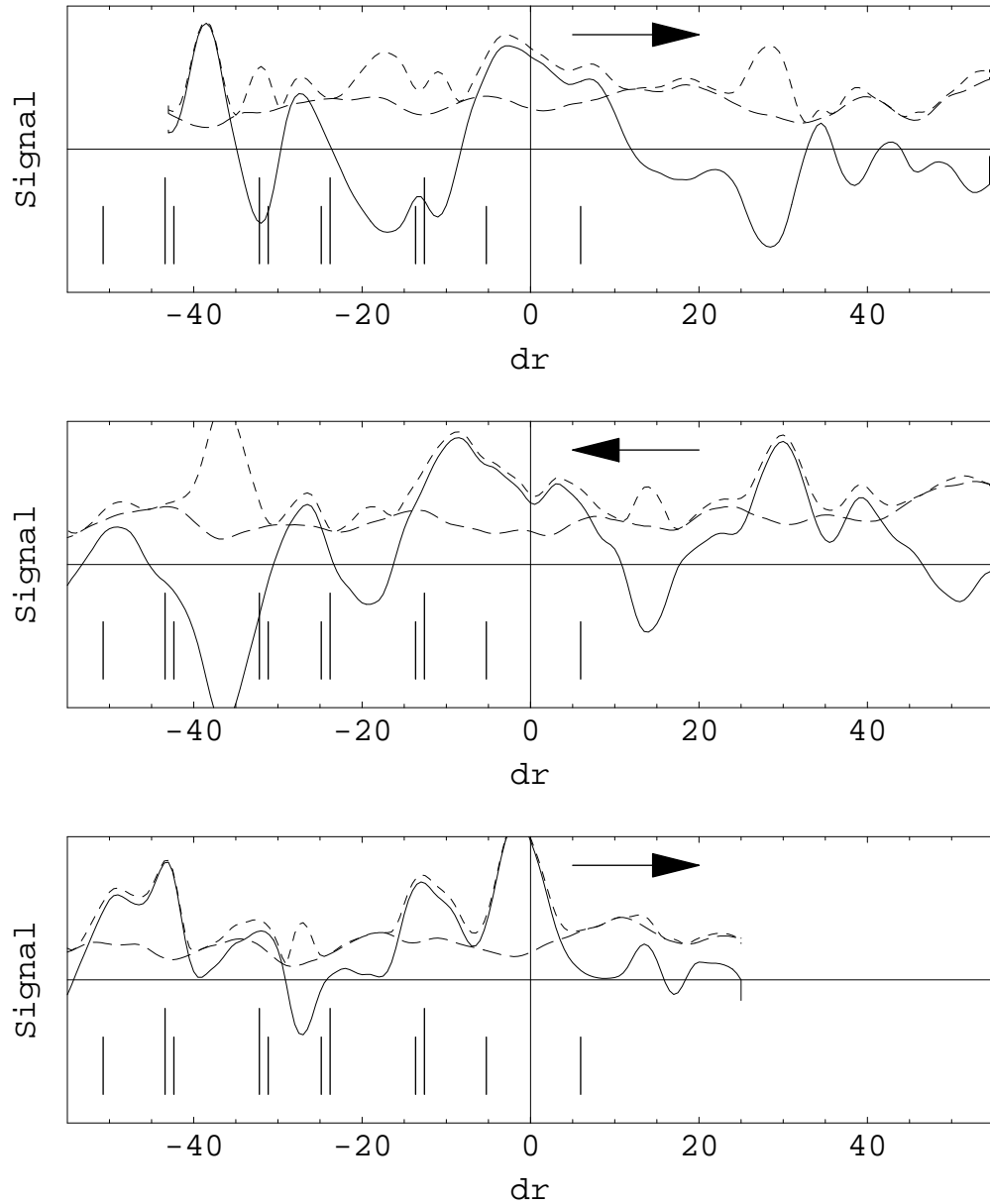


Abbildung 6.3: MT-Spektrum: Inphase- (durchgezogen) und Quadratursignal (grob gestrichelt), wie sie mit dem Lock-In-Verstärker gemessen wurden. Fein gestrichelt ist der Betrag der Signale eingezeichnet. Oben: Beginn der Messung mit positiver Verstimmung des roten Lasers. Mitte: Der Laser wird über den gleichen Bereich zurück Verstimmt. Unten: Zweites Abfahren des Bereichs in positiver Richtung. Der Nullpunkt der Verstimmung ist willkürlich gewählt. Jeweils im unteren Bereich der Bilder befindet sich ein Streifenmuster, das mögliche Positionen der Dunkelresonanzen sowie der um die Modulationsfrequenz verschobenen Dunkelresonanzen anzeigt.

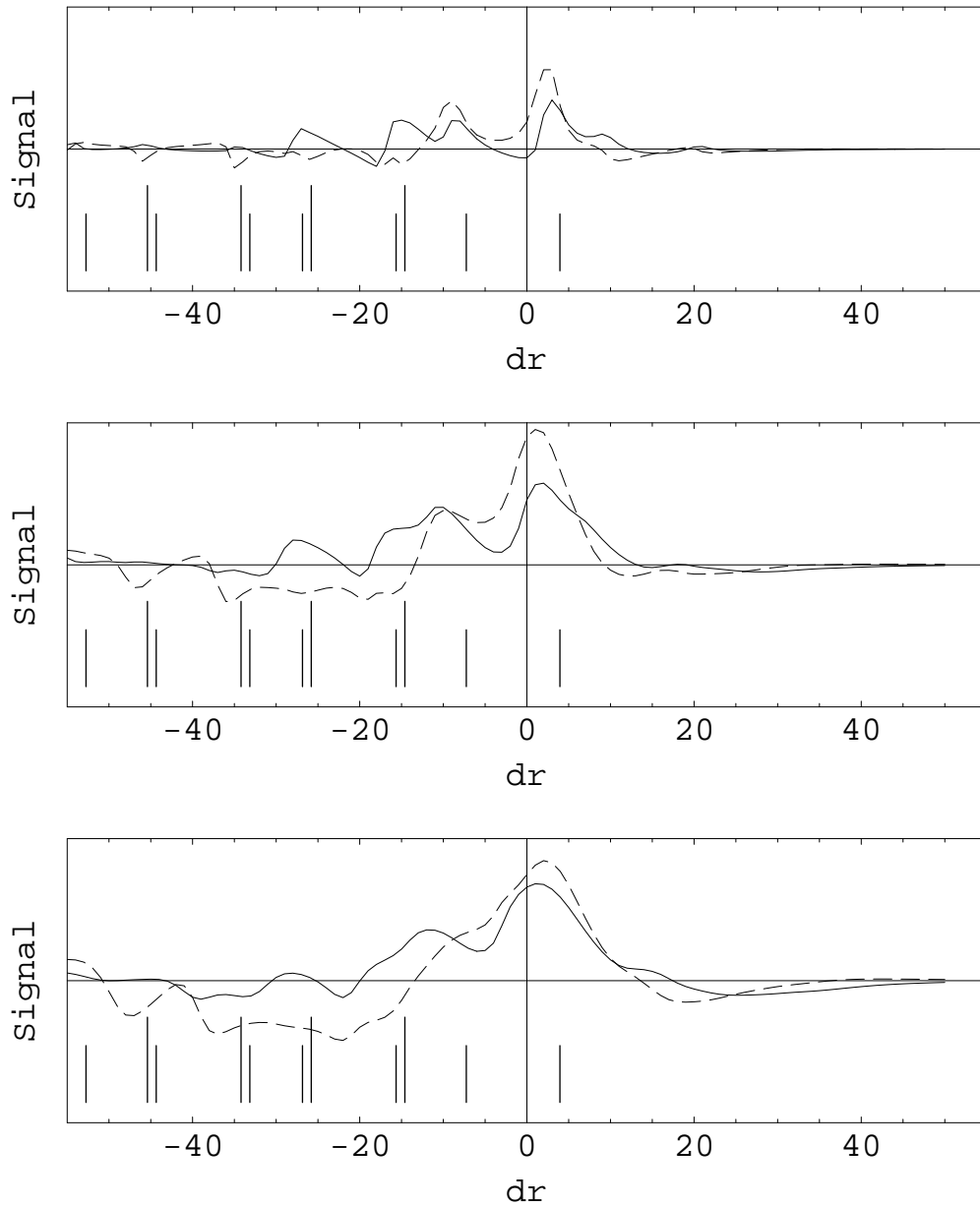


Abbildung 6.4: Theoretische Spektren zum Vergleich mit der Messung: Die Zeeman-Aufspaltung wurde mit $u = 7$ MHz angenommen. Modulationsfrequenz und Modulationsindex wurde wie im Experiment auf $\Omega = 18.55$ MHz und $M = 1.15$ gesetzt. Die Verstimmung des grünen Lasers beträgt $\delta g = -30$ MHz. Die Dunkelresonanzen sind durch lange Striche angedeutet. Die kurzen Striche zeigen die um Ω verschobenen Dunkelresonanzen an. Die Sättigungsparameter sind: Im oberen Teilbild: $\text{sat}_g = \text{sat}_r = 1$. Im mittleren Teilbild: $\text{sat}_g = \text{sat}_r = 1.6$. Im unteren Teilbild: $\text{sat}_g = 2.2$ und $\text{sat}_r = 1.6$.

Die eindeutige Zuordnung von gemessenem Inphase- und Quadratursignal zu den Anteilen des theoretisch berechneten Signals ist deshalb nicht möglich, weil in den zwischengeschalteten Verstärkern und im Schwingkreis am EOM unbekannte Phasenverschiebungen auftreten. Die Übereinstimmung der Meßkurve mit den theoretischen Signalen reicht nicht aus, um eine Anpassung zur Eichung der Phasenlage vornehmen zu können.

Die theoretischen Kurven in Abbildung 6.4 zeigen ein Problem bei der günstigsten Wahl der Intensitäten auf: Für kleinere Intensitäten werden die Strukturen schmaler und das Signal ist leichter zu interpretieren. Die Stärke der Signale nimmt jedoch ab, so daß ein ungünstigeres Signal-zu-Rausch Verhältnis zu erwarten ist. In der Messung wurden die Intensitäten so gewählt, daß das Ion im Mikroskop gut sichtbar ist.