Übungen (6) zur Experimentalphysik IV "Moderne Physik" Ss2006

Heiko Dumlich

May 31, 2006

13 Mach-Zehnder-Interferometer

(a)

Das klassische Mach-Zehnder-Interferometer besteht aus 2 beamsplittern (Strahlteilern) und 2 Spiegeln (alternativ kann man auch drei Gitter benutzen, wobei das erste und dritte als beamsplitter wirken und das mittlere als "Spiegel"). Hierbei wird ein Licht-/Laser-/Atomstrahl auf den ersten Strahlteiler gerichtet, dieser teilt sich in zwei Teilstrahlen A und B, welche durch Reflektion an einem Spiegel (bzw. Gitter) auf einen zweiten Strahlteiler gelenkt werden, wo sie interferieren können. Da man die Abstände zwischen erstem und zweitem Strahlteiler für den jeweiligen Strahl A bzw. B variieren kann, kann man so einen Laufzeitunterschied erzeugen, ähnlich zum Michelson-Interferometer. Man kann somit auch Interferenzmuster erzeugen. Als Skizze ergibt sich also:

(b)

Für die zwei unterschiedlichen Formen des Interferometer kann man z.B. eine Koinzidenzmessung durchführen, indem man beim zweiten Strahlteiler zwei Zähler aufstellt in beide Strahlrichtungen, bzw. beim Gitter in verschiedene Ordnungen (z.B. 1. und -1.). Man kann auch einfach nur den Phasenunterschied aufnehmen, indem man auf einem Schirm die Interferenz betrachtet.

(c)

Man nutzt die Beugungseingeschaft des Gitters. Die Gitterbeugung spaltet den Strahl auf, wobei mehrere Teilstrahlen entstehen (da wir mehrere Ordnungen erhalten), im Gegensatz zum Strahlteiler, der den Strahl nur in zwei Teilstrahlen aufspaltet. Nun sortiert man die ungewollten Strahlen durch "Abschirmung" bzw. "Ausrichtung der Apparatur" aus, dies kann durch einfügen von z.B. Kupferfolie geschehen (hierbei dient die Kupferfolie nicht direkt als Abschirmung, sondern viel mehr wird durch diese das EM-Feld beeinflusst, wodurch die Strahlen abgelenkt und somit ausgedünnt werden) oder einfach durch Ausrichtung, so dass die ungewünschten Teilstrahlen nicht auf das nachfolgende Gitter treffen. Die Intensität kann also auch mit dieser Abschirmung beeinflusst werden, indem man eine höhere Ordnung nimmt, wodurch die Intensität sinkt. Im klassischen Fall könnte man auch Filter verwenden, die nur einen bestimmten Prozentsatz des Lichtes durchlassen, oder nur Teile des Strahles (durch geschickten Aufbau des Spiegel-Reflektions-Systems) auf den zweiten Strahlteiler treffen lassen. Für kurze Wellenlängen würde im Strahlteiler keine Aufspaltung des Lichtstrahles stattfinden, da vermutlich die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit dem Festkörper hoch ist, so bleiben Atome in diesem "stecken", dies liegt an der Festkörperstruktur, auf die wir hier nicht weiter eingehen können, da dies den Rahmen dieser Vorlesung sprengen würde und erst im Hauptstudium in der Festkörperphysik behandelt wird. Dadurch wird eine Aufspaltung des Strahles verhindert und die Möglichkeit ein klassisches Mach-Zehnder-Interferometer zu benutzen ist somit nicht gegeben.

14 Pritchard MIT-Atominterferometer-Versuch

 (\mathbf{a})

Für das optische Interferometer wird eine Wellenlänge von $\lambda_{He-Ne}=633\,nm$ (von einem Helium-Neon-Laser) verwendet, während für das Atom-Interferometer Na-Atome mit den Geschwindigkeiten $v_1=1400\,\frac{m}{s}$ und $v_2=3200\,\frac{m}{s}$ verwenden werden. Somit ergeben sich für die de-Broglie-Wellenlängen der Natrium-Atome $\left(m_{Na}=22.99\,u=3.819\cdot 10^{-26}\,kg\right)$ mit $\lambda_{dB}=\frac{h}{mv}$ die Wellenlängen von $\lambda_{Na,v_1}=1.24\cdot 10^{-11}\,m$ und $\lambda_{Na,v_2}=5.42\cdot 10^{-12}\,m$. Die Gitterabstände für das Atominterferometer betragen $d=200\,nm$, wobei für das optische Interferometer, wie man aus Fig. 8 (S.45) erkennen kann ein klassisches Mach-Zehnder-Interferometer mit Strahlteilern verwand wird. Wir nutzen die Bragg-Bedingung mit $n\lambda_{dB}=2d\sin\theta\Leftrightarrow\theta=\arcsin\left(\frac{\lambda_{dB}}{2d}\right)$ mit n=1. Mit diesen Angaben folgt für die Beugungswinkel des Atom-Interferometers $\theta_{Na,v_1}=1.8\cdot 10^{-3}\,^{\circ}$ und $\theta_{Na,v_2}=7.8\cdot 10^{-4}\,^{\circ}$.

(b)

Für den "relativen Kontrast" gilt, wie man mit Hilfe des Papers zeigen kann:

$$C'\cos(k_g x + \phi') = \int d(\Delta k_x) P(\Delta k_x) C_0 \times \cos(k_g x + \Delta k_x d)$$

mit $\Delta \phi = \Delta k_x d$. Dieser wird durch den Abstand d der Teilstrahlen zum Zeitpunkt der Photonenstreuung beeinflusst. Es gilt für die Kreiswellenzahl $k=\frac{2\pi}{\lambda}$. Mit $\Delta \bar{k}_x d \approx \pi$ fällt der Kontrast auf 0, d.h. also $d=\frac{\lambda}{2}$ (wenn die Winkelverteilung der gestreuten Photonen isotrop wäre), womit wir die Wellenlängenabhängigkeit des Kontrastes erkennen können. Zudem fällt uns die Antwort der zweiten Frage auch in die Hand, da wir mit $d=\frac{z\lambda_{dB}}{\lambda_{g}}$, wobei λ_{g} die Gitterkonstante beschreibt, die Bedingung $n\lambda_{dB}=\lambda_{g}\sin\theta\,mit\,\sin\theta=\frac{x}{L}=\frac{d}{z}\Rightarrow\lambda_{dB}=\frac{d\lambda_{g}}{z}$ finden. Somit können wir also durch $\frac{d}{\lambda_{Photon}}=\frac{z\lambda_{dB}}{\lambda_{g}\lambda_{Photon}}$ sofort die Korrelation zwischen $d,\lambda_{dB}\,und\,\lambda_{Photon}$ erkennen. Man kann den Graphen auch in Form der zwei "Interferenzmuster" betrachten, welche die Teilstrahlen erzeugen. So wird durch die Phasenverschiebung, welche maßgeblich durch d(es gilt: $\Delta \phi = \Delta \vec{k} \cdot \vec{d} = \Delta k_x d$) und somit auch ihre korrelierten Größen beeinflusst wird, das eine Interferenzmuster relativ zu dem anderen verschoben, wodurch, wenn die beiden Muster übereinander liegen, also Maxima auf Maxima man diese nicht mehr unterscheiden kann, d.h. wir erkennen ein Interferenzmuster, besitzen jedoch keine Welcher-Weg-Information. Verschiebt man dies nun weiter, so liegen die Maxima in den Minima und wir erhalten keine Interferenz, können jedoch eine Aussage über den Weg des Atoms treffen. Dies ist auch im wesentlichen was der Kontrast ist. Jedoch erhalten wir einen abfallenden Kontrast, da sich die Hauptmaxima voneinander entfernen und somit das Interferenzmuster "verschmiert", da die Abstände der Nebenmaxima nicht konstant sind.

15 Feynman - Korrektur

Die Begründung muss auf die Phasenverschiebungen zurückgeführt werden, wobei jedoch für ein Elektron zu prüfen bleibt, inwiefern der Phasenverschiebungseffekt und inwieweit der Impulsänderungseffekt (der ja den Weg des Elektrons/bzw. allgemeiner des Teilchens beeinflusst) für das Elektron die Interferenz beeinflussen. Für schwere Teilchen, wie z.B. Atome, im Fall des Pritchard Experimentes: Natrium, welches um ca. $4\cdot 10^4\,bis\,5\cdot 10^4$ mal schwerer ist als ein Elektron, spielt die Änderung des Impulses eine eher untergeordnete Rolle. Um trotz Photonenstreuung ein Interferenzmuster zu erhalten brauchen wir nur die Ergebnisse aus dem Pritchardversuch zu betrachten, denen dies gelungen ist. Die Bedingung, dass es zu keiner Phasenverschiebung kommt und dass das Teilchen durch den Impulsänderungseffekt nicht zu stark beeinflusst wird, d.h. dass es eine bestimmte Masse besitzen muss, müssen erfüllt sein. Man könnte nun noch nachrechnen, bis zu welcher Masse dies möglich ist, jedoch lasse ich diese Rechnung weg.