

Bezug einer Laserfrequenz auf die atomare Frequenz durch Wobbeln

F. SPIEWECK

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

(Z. Naturforsch. 22 a, 2067–2069 [1967]; eingegangen am 12. August 1967)

A new method for relating the laser frequency to the atomic resonance is described. The piezoelectric mirror mount of a He-Ne laser is fed by a DC and an AC voltage, high enough, so that the laser frequency is scanned over the width $\Delta\nu$ of the line profile at threshold. The resulting emission may have a coherence length of the order of 2 m. Frequency stability is approximately that of the natural spectral line.

Die Strahlung eines Lasers beruht auf der Erregung einer oder mehrerer Resonatoreigenschwingungen, deren Frequenzen von den Abmessungen des Resonators abhängen. Abb. 1a zeigt die Zusammensetzung der Strahlung eines Mehrfrequenzlasers. Durch Verkleinerung des Resonator- Q -Wertes lässt

sich die Laserschwelle so weit erhöhen, daß nur eine Resonatoreigenschwingung erregt wird¹ (s. Abb. 1b). Die Resonatorlänge ist von verschiedenen Einflüssen abhängig. Daher muß sie stabilisiert werden. Häufig wird zu diesem Zweck die Frequenz eines Einfrequenzlasers an die Bezugsfrequenz der natür-

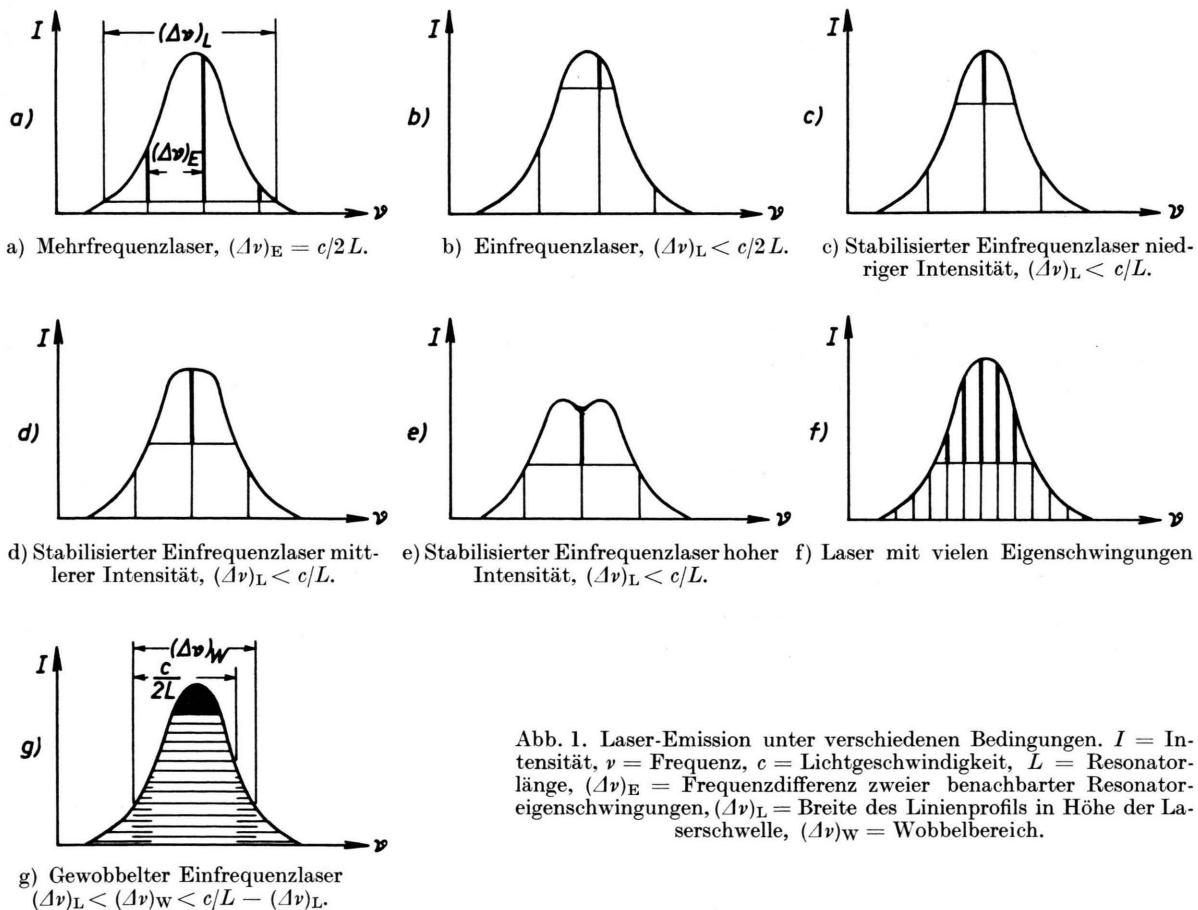


Abb. 1. Laser-Emission unter verschiedenen Bedingungen. I = Intensität, ν = Frequenz, c = Lichtgeschwindigkeit, L = Resonatorlänge, $(\Delta\nu)_E$ = Frequenzdifferenz zweier benachbarter Resonatoreigenschwingungen, $(\Delta\nu)_L$ = Breite des Linienprofils in Höhe der Laserschwelle, $(\Delta\nu)_W$ = Wobbelbereich.

¹ R. HECKEN, Arch. elektr. Übertr. 19, 227 [1965].



lichen Spektrallinie gekoppelt^{2,3}, s. Abb. 1c—e. Auf diese Weise kann man sich jedoch der Bezugsfrequenz nur nähern.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, die Laserfrequenz *unmittelbar* — d. h. ohne Stabilisierung der Resonatorlänge — auf die atomare Frequenz zu beziehen, die durch den Schwerpunkt der natürlichen Spektrallinie bestimmt ist. Bei einem Laser, der in sehr vielen Eigenschwingungen erregt wird, ist der Linienschwerpunkt ebenfalls durch die atomare Frequenz gegeben. Dieser Fall läßt sich auf zwei Arten verwirklichen. BYER, BELL, HODGES und BLOOM⁴ haben einen Quecksilber-Ionen-Vielfrequenzlaser beschrieben, s. Abb. 1f. Dieser Laser hat eine so hohe Verstärkung, daß er auch bei kleinem *Q*-Wert des Resonators erregt wird⁵. Das hat zur Folge, daß das Profil der Resonatoreigenschwingungen verbreitert ist, wobei sich die einzelnen Linien weitgehend überdecken⁶.

Eine zweite Möglichkeit läßt sich durch die Anwendung der im folgenden beschriebenen Wobbeltechnik verwirklichen.

Bezug einer Laserfrequenz auf die atomare Frequenz durch Wobbeln

Wird die Resonatorlänge eines Einfrequenzlasers in periodischer Folge mit konstanter Geschwindigkeit geändert, so daß sich die Laserfrequenz um $(\Delta\nu)_L$ ändert, dann ergibt sich — bei der Verwendung eines zeitlich integrierenden Empfängers — das in Abb. 1g gezeigte Linienprofil. Der Wobbelbereich $(\Delta\nu)_W$ muß etwas größer sein als die Profilbreite in Höhe der Laserschwelle $(\Delta\nu)_L$, darf aber nicht größer als $\Delta\nu = c/L - (\Delta\nu)_L$ werden, da sonst zwei Resonatoreigenschwingungen erregt werden. Die notwendige Bedingung ist also:

$$(\Delta\nu)_L < (\Delta\nu)_W < c/L - (\Delta\nu)_L.$$

Ein derartiger Wobbelbetrieb läßt sich durch Anlegen einer Dreiecksspannung an den einen der piezo-

elektrischen Spiegelhalter des Lasers verwirklichen. Die Resonatorlänge braucht dann nur so weit stabilisiert zu werden, daß der Wobbelbereich $(\Delta\nu)_W$ den Frequenzbereich des Lasers $(\Delta\nu)_L$ immer ganz überdeckt und die Wobbelbereiche der benachbarten Resonatoreigenschwingungen außerhalb des Bereichs $(\Delta\nu)_L$ liegen.

Messungen und Ergebnisse

1. Wellenlänge

Zur Erprobung der Methode des Wobbelns diente ein He-Ne-Laser der Firma Spectra-Physics (Modell 119, $\lambda = 6328 \text{ \AA}$), bei dem die Resonatorlänge piezoelektrisch einstellbar ist.

Um den Frequenzbereich des Lasers genügend zu verkleinern, so daß immer nur eine Resonatoreigenschwingung erregt wird (s. o.), wurde die Laserschwelle durch Dejustieren eines Laserspiegels erhöht. Eine bessere Methode zur Veränderung der Laserschwelle geben SCHLEUSENER und READ⁷ an (Variable BREWSTER Angle Flat Used as Gas Laser Gain Control). Innerhalb eines kleinen Bereiches ließ sich die Laserschwelle auch durch die Entladungsstromstärke einstellen.

Da eine Dreiecksspannung nicht zur Verfügung stand, wurde mit einer Wechselspannung (30 V, 500 Hz) gewobbelt⁸. Der zeitliche Verlauf der Laserintensität wurde mit Hilfe eines Photoelements und eines Oszilloskopographen ermittelt. Der mittlere Spiegelabstand wurde so eingestellt, daß der zeitliche Abstand der beim Hin- und Rücklauf des Spiegels erscheinenden Intensitätsmaxima gleich groß war. D. h. die Laser-Emission erreicht ihr Maximum in der Mitte des Wobbelbereichs, wenn die Phase der Spiegelschwungung 0, π , 2π , 3π , ... ist. Dann ist die Geschwindigkeit der Spiegelverschiebung in einem genügend großen Bereich nahezu konstant, da bei einer sinusförmigen Schwingung die Amplitude in der Nähe der Phasen 0, π , 2π , 3π , ... annähernd

² A. D. WHITE, IEEE J. Quant. Electr. **1**, 349 [1965].

³ A. D. WHITE, Microwaves **6**, 51 [1967].

⁴ R. L. BYER, W. E. BELL, E. HODGES u. A. L. BLOOM, J. Opt. Soc. Am. **55**, 1598 [1965].

⁵ R. L. BYER, Private Mitteilung. Einen Festkörperlaser, dessen Frequenz durch die atomare Frequenz bestimmt ist, haben L. F. MOLLENAUER, G. F. IMBUSCH, H. W. MOOS u. A. L. SCHAWLOW beschrieben [Bull. Am. Phys. Soc. [2] **7**, 445 [1962]], s. a. R. V. AMBARTSUMYAN, N. G. BASOV, P. G. KRYUKOV u. V. S. LETOKHOV, JETP Letters **3**, 167 [1966].

⁶ L. F. MOLLENAUER, G. F. IMBUSCH, H. W. MOOS, A. L. SCHAWLOW u. A. D. MAY, Optical Masers, Ed. J. Fox, S. 51, Polytechnic Press, Brooklyn 1963.

⁷ S. A. SCHLEUSENER u. A. A. READ, Rev. Sci. Instr. **37**, 287 [1966].

⁸ HECKEN¹ und V. MET [Proc. IEEE **53**, 1780 [1965]] haben bereits — zu anderen Zwecken — die Frequenz eines He-Ne-Lasers gewobbelt.

eine lineare Funktion der Zeit ist. Die Geschwindigkeit der Spiegelverschiebung ist in der Nähe der Umkehrpunkte kleiner als im übrigen Bereich. So wird das Linienprofil der beobachteten Laserstrahlung in den Flanken etwas verformt. Da aber die Verformung symmetrisch ist, bleibt die Lage des Frequenzschwerpunktes erhalten.

Die Wellenlänge des gewobbelten Lasers wurde mit Hilfe eines Endmaßinterferenzkomparators⁹ und einer ⁸⁶Kr-Standardlampe ermittelt. Der auf das Vakuum bezogene Wellenlängenwert λ_0 ergab sich in Übereinstimmung mit früheren Messungen, bei denen ein anderes Laserrohr verwendet wurde¹⁰, zu

$$\lambda_0 = (6329,91385 \pm 0,00003) \cdot 10^{-10} \text{ m}.$$

2. Einfluß des Wobbelbereichs

Eine Änderung des mittleren Spiegelabstandes ist gleichbedeutend mit einer Phasenverschiebung der Spiegelschwingung. Dadurch wird die Verformung des Linienprofils unsymmetrisch, so daß sich der Frequenzschwerpunkt verschiebt. Um den Einfluß einer Änderung des mittleren Spiegelabstandes auf die Lage des Frequenzschwerpunktes zu untersuchen, wurde der mittlere Spiegelabstand so weit vergrößert oder verkleinert, daß sich die Phase der Spiegelschwingung um $\pm \pi/5$ änderte. Dabei ergab sich eine Frequenzverschiebung von $(\Delta\nu)/\nu = \pm 1 \cdot 10^{-8}$. Die Temperaturkonstanz des Lasers war so gut, daß der mittlere Spiegelabstand nicht öfter als etwa alle fünf Minuten nachgestellt werden mußte. Die Änderung der Phase der Spiegelschwingung innerhalb dieser Zeit betrug etwa $\pi/50$. Demnach bleibt die Abweichung der Laserfrequenz von der atomaren Frequenz innerhalb der Schranken von $(\Delta\nu)/\nu = \pm 1 \cdot 10^{-9}$, wenn der mittlere Spiegelabstand etwa alle fünf Minuten von Hand nachgestellt wird. Bei einer automatischen Regelung des mittleren Spiegelabstandes sollte sich der Betrag der Frequenzabweichung noch verringern lassen.

⁹ E. ENGELHARD, Z. Instrumentenk. **67**, 59 [1959].

¹⁰ E. ENGELHARD, Z. Angew. Phys. **20**, 404 [1966].

¹¹ HECKEN¹ und MET⁸ beobachteten offenbar deshalb unsymmetrische Linienprofile, weil weder die Geschwindigkeit der Spiegelverschiebung konstant war noch die Phase der Spiegelschwingung in einer Beziehung zum Maximum der Laser-Emission stand, und weil die Laser kein reines ²⁰Ne-Isotop, sondern natürliches Neon enthielten.

3. Einfluß des Linienprofils

Die Laserfrequenz wird — wie bei einer natürlichen Spektrallinie — intensitätsabhängig, wenn das Linienprofil unsymmetrisch ist. Um zu prüfen, ob die Ne-Linie bei 6328 Å symmetrisch ist, wurde die Höhe der Laserschwelle verändert. Dabei blieb die Laserfrequenz konstant (Grenze der Meßgenauigkeit: $(\Delta\nu)/\nu = 5 \cdot 10^{-9}$), d. h. die Laser-Linie war genügend symmetrisch¹¹.

Die Kohärenzlänge der Laserstrahlung betrug je nach der Höhe der Laserschwelle 1 bis 2 m.

Zusammenfassung und Diskussion

Bei einem Einfrequenzlaser beliebigen Typs läßt sich durch Wobbeln eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der Laserfrequenz und der atomaren Frequenz erzielen. Die Kohärenzlänge der gewobbelten Ne-Laserlinie bei 6328 Å liegt im Bereich von 1 bis 2 m.

Die atomare Frequenz der Ne-Laserlinie hängt vom Druck und von der Zusammensetzung des He-Ne-Gemisches ab¹²⁻¹⁵. Bei Lasern mit abgeschlossenem Volumen bleiben jedoch Druck und Gaszusammensetzung nicht konstant. ENGELHARD¹⁰ untersuchte die Wellenlängenstabilität eines He-Ne-Lasers. Nach 1000 Betriebsstunden hatte sich die Laserfrequenz um $(\Delta\nu)/\nu = 2 \cdot 10^{-8}$ geändert. Deshalb ist die Frequenzkonstanz der hier betrachteten Laserlinie nicht allein durch den Grad der Übereinstimmung von Laserfrequenz und atomarer Frequenz, sondern vor allem durch die Reproduzierbarkeit der atomaren Frequenz selbst bestimmt.

Als sekundärer oder primärer Wellenlängenstandard wird sich nur ein Laser eignen können, dessen atomare Frequenz von der gleichen Qualität ist wie die der ⁸⁶Kr-Standardlinie.

Herrn Professor E. ENGELHARD danke ich für wichtige Hinweise und eingehende Diskussionen. Herrn Ing. H. DARNEDE sei für die sorgfältige Ausführung der Wellenlängenbestimmungen gedankt.

¹² R. TURNER, K. M. BAIRD, M. J. TAYLOR u. C. J. VAN DER HOEVEN, Rev. Sci. Instr. **35**, 996 [1964].

¹³ R. TURNER u. C. J. VAN DER HOEVEN, Rev. Sci. Instr. **36**, 1003 [1965].

¹⁴ A. L. BLOOM u. D. L. WRIGHT, Proc. IEEE **54**, 1290 [1966].

¹⁵ A. D. WHITE, Appl. Phys. Letters **10**, 24 [1967].