

Aussagekräftige Definition

Definition und Messung der Linienbreite von Lasern

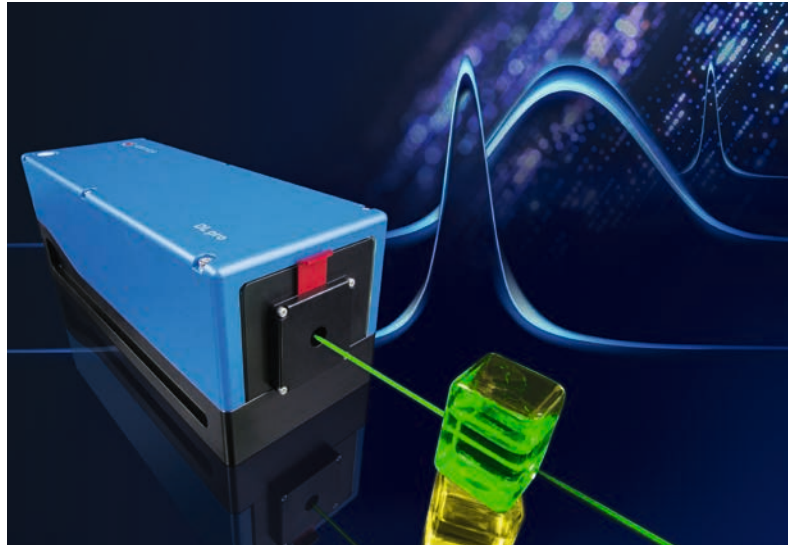
Steffen Schmidt-Eberle

Die spektrale Reinheit eines Lasers unterscheidet ihn wesentlich von anderen Lichtquellen. Sie ermöglichte eine Revolution beim Experimentieren mit Atomen und initiierte viele technische Innovationen. Eine hohe spektrale Reinheit ist etwa essenziell für Technologien wie Quantencomputer und optische Uhren. Jedoch ist es schwierig, eine Messgröße zu finden, welche die spektrale Reinheit vollständig charakterisiert. Stattdessen haben sich in den einzelnen Disziplinen verschiedene Größen etabliert, die diese Reinheit beschreiben und gleichzeitig aussagekräftig sind für die jeweilige Anwendung.

Eine für alle Anwendungen aussagekräftige Größe zu finden, scheint unmöglich. Aber es ist durchaus erstrebenswert, eine Größe zu definieren, die zumindest einen Teil der spektralen Eigenschaften eines Lasers zusammenfasst, die nicht von der Messmethode abhängt und es erlaubt, verschiedene Laser zu vergleichen. TOPTICA verwendet zwei Definitionen für die Linienbreite, um die Frequenzstabilität von Diodenlasern zu charakterisieren. Beide Größen spiegeln die konzeptionellen Quellen von Phasen- und Frequenzrauschen in Diodenlasern wider und lassen sich zusammen mit der Messmethode auf alle Lasertypen übertragen.

Ursache des Rauschens

Die fundamentale Grenze für die Linienbreite eines jeden Lasers ist durch den Shawlow-Townes-Ausdruck gegeben, der den Einfluss von Phasenänderungen aufgrund spontaner Emission auf die La-



serlinienbreite beschreibt [1]. Bei Diodenlasern hängt diese Grenze unter anderem von der Resonatorgeometrie des Lasers, den Eigenschaften des Halbleiters und der Laserleistung ab. Diese Grenze manifestiert sich als weißes Frequenzrauschen und erzeugt ein Plateau in der Frequenzrauschdichte des Lasers. Verschiedene Effekte können dieses White-Noise-Limit erhöhen. Dieses Rauschen ist intrinsisch, da es von fundamentalen Eigenschaften des Lasers abhängt.

Hinzu kommt das technische Rauschen, das alle Einflüsse aus der Umgebung umfasst wie mechanisch übertragene Vibrationen und akustische Störungen. Auf längeren Zeitskalen treten Störungen durch Temperatur- und Luftdruckschwankungen auf. Um das technische Rauschen zu minimieren, sind eine hervorragende mechanische Stabilität und bestmögliche Isolierung von äußeren Einflüssen anzustreben.

Zwei Definitionen

Der Unterschied zwischen intrinsischem und technischem Rauschen offenbart sich beim Betrachten der spektralen Leistungsdichte (Power Spectral Density) des Frequenzrauschens des Lasers. Diese Frequenzrauschdichte ist das Betragsquadrat der Fourier-Transformation der zeitabhängigen Frequenzabweichung des Lasers von seiner Zentralfrequenz. Sie enthält fast alle relevanten spektralen Eigenschaften des Lasers. Zwar geht durch das Betragsquadrat die Phaseninformation des Spektrums verloren. Für die meisten Anwendungen ist das Phasenspektrum jedoch nicht von zentraler Bedeutung. Die Frequenzrauschdichte eines durchstimmbaren Diodenlasers mit externem Resonatorteil (TOPTICA DL pro mit Narrow Linewidth-Option bei 725 nm) ist für kleine Fourier-Frequenzen am größten und nimmt zu höheren Frequenzen ab, bis sie zwischen 100 kHz und 1 MHz in weißes Rauschen

übergeht (**Abb. 1**). Dieses Plateau entspricht dem White-Noise-Limit. Das höhere Rauschen bei niedrigen Frequenzen entspricht dem technischen Rauschen. Dieses exemplarische Spektrum ist charakteristisch für den Verlauf der Frequenzrauschdichte von Diodenlasern.

Im Folgenden wollen wir zwei Linienbreitendefinitionen vorstellen, die jeweils ein Maß für diese beiden Rauschquellen sind. Die instantane Linienbreite ist ein Maß für das intrinsische Rauschen, das bei hohen Fourier-Frequenzen dominiert:

$$\Delta\nu_{\text{inst}} = \pi \cdot \text{PSD}_{\text{white}}. \tag{1}$$

Das Niveau des weißen Frequenzrauschens (in Hz²/Hz) begrenzt die Frequenzrauschdichte von unten. Dieser Wert entspricht idealerweise dem White-Noise-Limit nach Shawlow-Townes. In der Praxis wird PSD_{white} durch einen Fit der Funktion $y(f) = af^b + c$ an die gemessene Frequenzrauschdichte ermittelt. Diese Funktion beschreibt die Form der Frequenzrauschdichte der meisten Diodenlaser. Die Fit-Konstante c entspricht hierbei PSD_{white}.

Diese Definition leitet sich von der Betrachtung eines Lasers ab, dessen Frequenzrauschdichte reines weißes Rauschen aufweist. Sein Leistungsspektrum ist lorentzförmig. Die FWHM-Linienbreite, also die Breite des Linienprofils bei halber Höhe, eines solchen Lasers ist durch den obigen Ausdruck gegeben und ist als Lorentz-Linienbreite bekannt. Von instantaner Linienbreite ist die Rede, weil die Charakteristik des weißen Frequenzrauschens bei hohen Frequenzen, also auf kurzen Zeitskalen, auftritt.

Interpretieren lässt sich dieser Wert im Fall des Diodenlasers als theoretisches Minimum der Linienbreite ohne äußere Störungen. Eine direkte Messung, etwa durch Messung der Schwebung mit einem viel schmaleren Laser (Heterodyne Detection) ist in der Regel nicht

möglich. Denn die instantane Linienbreite ist meist so klein, dass die Integrationszeit, um die notwendige spektrale Auflösung zu erreichen, so groß ist, dass zwangsweise das auf längeren Zeitskalen dominante technische Rauschen überwiegt.

Für TOPTICA als Laserhersteller ist dies die primäre Definition der Laserlinienbreite, da sie wohldefiniert, unabhängig von der Messanordnung und ein Maß für die intrinsischen Eigenschaften des Lasers ist. Als standardisierte Definition würde sie es erlauben, verschiedene Laser zu vergleichen.

Die Beta-Separation-Linienbreite basiert auf der Beta-Separation-Linie [2]:

$$\Delta\nu_{\beta} = \sqrt{8 \ln(2)A}, \tag{2}$$

wobei A die Fläche unter PSD_v(f) ist, für welche die Frequenzrauschdichte PSD_v(f) die Beta-Separation-Linie überschreitet [2]

$$A = \int_{f_0}^{\infty} H\left(\text{PSD}_{\bar{v}}(f) - \frac{8 \ln(2)f}{\pi^2}\right) \text{PSD}_{\bar{v}}(f)df. \tag{3}$$

Dabei ist $H(x)$ die Heaviside-Stufenfunktion $H(x) = 1$, wenn $x \geq 0$ und $H(x) = 0$, wenn $x < 0$ und f_0 ist eine frei wählbare untere Integrationsgrenze. Die Beta-Separation-Linienbreite ist eine Näherung der FWHM des tatsächlichen Leistungsspektrums bei einer Integrationszeit von $T_0 = 1/f_0$. Das tatsächliche Leistungsspektrum lässt sich etwa durch Schwebung mit einem viel schmaleren Laser ermitteln. Da jedoch in den meisten Laboren kein viel schmalere Laser derselben Wellenlänge zur Verfügung steht, bzw. der Nachweis der spektralen Reinheit eines solchen Referenzlasers schwierig ist, bietet die Näherung durch die Beta-Separation-Linienbreite zusammen mit der Ermittlung der Frequenzrauschdichte eine gute Lösung.

Für das Beispiel in **Abb. 1** trägt nur Rauschen unter 20 kHz zur FWHM-Linienbreite bei, während Rauschen darüber nur zum Sockel des Linienprofils beiträgt.

Während die instantane Linienbreite ein Maß für die Frequenzstabilität bei hohen Fourier-

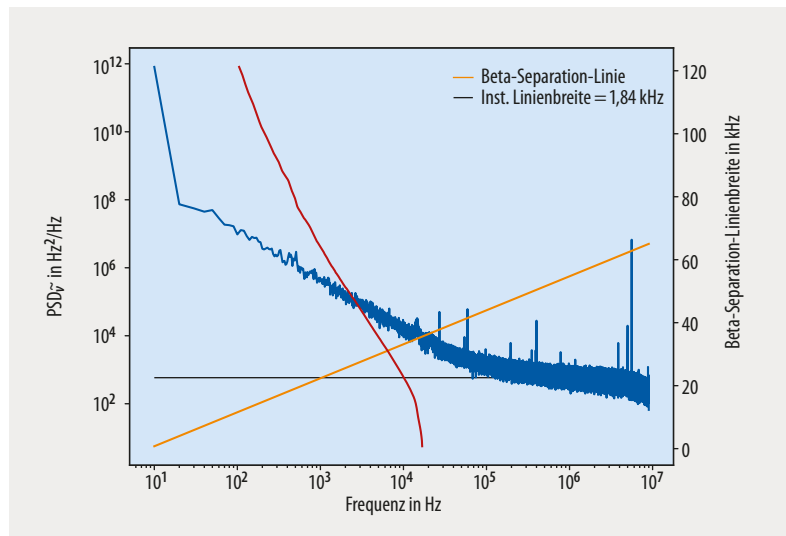


Abb. 1 Die Frequenzrauschdichte eines Diodenlasers (blaue Kurve) ist für kleine Fourier-Frequenzen am größten und nimmt zu höheren Frequenzen ab. Die schwarze, horizontale Linie zeigt das durch intrinsisches Rauschen verursachte Niveau des weißen Rauschens. Die orange Linie ist die Beta-Separation-Linie. Nur Komponenten der Frequenz-PSD, die über dieser Linie liegen, tragen dazu bei. Die rote Linie ist die Beta-Separation-Linienbreite als Funktion der unteren Integrationsgrenze.

Frequenzen ist, beschreibt die Beta-Separation-Linienbreite die Frequenzstabilität bei niedrigen Fourier-Frequenzen. TOPTICA bestimmt die Beta-Separation-Linienbreite für verschiedene untere Integrationsgrenzen, um für konkrete Anwendungsfälle praxisorientierte Angaben machen zu können.

Die beiden Linienbreitendefinitionen spielen eine wichtige Rolle bei der Frequenzstabilisierung von Lasern. Die instantane Linienbreite ist ein Maß für das Restrauschen des stabilisierten Lasers, da die Lockbandbreite meist auf einige MHz limitiert ist. Die Beta-Separation-Linienbreite gibt an, wie gut sich ein Laser innerhalb der Lockbandbreite stabilisieren lässt, da Laser mit niedrigem Anfangsrauschen häufig besser zu stabilisieren sind. Natürlich hängt die Qualität der Laserstabilisierung auch von anderen Eigenschaften des Feedback-Loops ab, etwa von der Referenz und der Bandbreite des PID-Reglers.

Ein weiterer Parameter, der sich aus der Frequenzrauschdichte ableitet, ist die Frequenz ν_{cross} , bei der sich Rauschdichte und Beta-Separation-Linie schneiden. Als Faustregel gilt, dass die Linienbreite durch Frequenzstabilisierung nur dann zu

verringern ist, wenn die Lockbandbreite deutlich größer als ν_{cross} ist. Dann ergibt sich ein neuer Schnittpunkt bei deutlich kleinerem ν_{cross} und damit ein viel kleinerer Integrationsbereich in Gleichung (3).

Gemessene Leistungsdichte

Der einfachste Weg, die Frequenzrauschdichte zu erhalten, besteht darin, zwei Laser mit identischen Rauscheigenschaften bei leicht unterschiedlichen Zentralfrequenzen zu überlagern und das Schwebungssignal als Funktion der Zeit mit einer Fotodiode aufzuzeichnen. Aus diesem Signal leiten sich die zeitabhängigen relativen Frequenzschwankungen zwischen den beiden Lasern ab. Ist die Rauschcharakteristik beider Laser identisch, so ist die Frequenzrauschdichte eines Lasers halb so groß wie die relative Frequenzrauschdichte.

Meist steht jedoch nur ein Laser zur Verfügung oder es ist schwierig nachzuweisen, dass zwei Laser eine identische Rauschcharakteristik aufweisen. Daher misst TOPTICA die Frequenzrauschdichte mithilfe der verzögerten selbstheterodynen Detektion (delayed self-heterodyne detection, **Abb. 2**). Der Aufbau besteht im Wesentlichen aus einem asymmetrischen Mach-Zehnder-Interferometer und einer Fotodiode hinter einem Ausgang des Interferometers. Diese Methode nutzt aus, dass in einem asymmetrischen Interferometer Änderungen der Laserfrequenz zu Änderungen der Amplitude des Interferenzsignals hinter dem Interferometer führen. Die Messung der zeitlichen Amplitudenänderung erlaubt es also, auf die Laserfrequenz rückzuschließen.

Ein nichtpolarisierender Strahlteiler (NPBS) teilt das Licht hierzu in zwei Teile ähnlicher Leistung auf. Ein Teil wird durch eine optische Faser mit einer Länge von etwa 3 bis 20 Metern geführt. Die gewählte Länge ist ein Kompromiss aus

Sensitivität und Bandbreite der Frequenzmessung (vgl. Gleichung 4). Den anderen Teil verschiebt ein akustooptischer Modulator (AOM) um Δf . Ein zweiter NPBS überlagert beide Strahlen wieder. Eine Fotodiode zeichnet das Schwebungssignal bei einer Frequenz von Δf auf.

Statt das Signal im Frequenzraum mit einem Spektrumanalysator auszuwerten, wird das zeitabhängige Schwebungssignal mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Aus diesem Signal berechnet sich das zeitabhängige Phasenrauschen $\varphi(t)$ des Interferometersignals. Das Betragsquadrat der Fourier-Transformation von $\varphi(t)$ ergibt die spektrale Leistungsdichte PSD.

Die Beziehung zwischen dieser Größe und dem Leistungsspektrum des Laserfrequenzrauschens lautet:

$$PSD_{\varphi}(f) = \frac{4}{f^2} \sin^2(\pi f \tau_0) PSD_{\bar{v}}(f), \tag{4}$$

wobei τ_0 die relative Verzögerung zwischen den beiden Interferometerarmen ist [3]. Somit kann das Interferometer als Laserfrequenzdetektor dienen, dessen Empfindlichkeit für $f \rightarrow 0$ am größten ist und für Frequenzen mit $f = \frac{N}{\tau_0}$ verschwindet. Bei einer Faserlänge von 20 m liegt die erste Frequenz verschwindender Sensitivität bei $f = 10$ MHz.

Diese Methode erlaubt es also, sehr langsame Frequenzschwankungen zu detektieren. Theoretisch ist das hiermit bestimmte Frequenzrauschspektrum zu niedrigen Frequenzen durch die Messdauer limitiert. In der Praxis dominieren bei rauscharmen Lasern bei niedrigen Frequenzen aber oft akustische Störeinflüsse, die den Messaufbau selbst stören. Insbesondere die optische Faser ist anfällig dafür. Aufgrund der Anfälligkeit bei niedrigen Frequenzen eignet sich die Methode nicht für gelockte Laser.

Andererseits ist die Sensitivität gegenüber Laserfrequenzrauschen größer für längere Fasern.

Zwei Definitionen

Instantane Linienbreite / Lorentz-Linienbreite

$$\Delta\nu_{\text{inst}} = \pi \cdot PSD_{\text{white}}$$

- vergleicht die intrinsischen Eigenschaften von Lasern
- Maß für Restrauschen von frequenzstabilisiertem Laser

Beta-Separation-Linienbreite

$$\Delta\nu_{\beta} = \sqrt{8 \ln(2)A}$$

- vergleicht die Stabilität des Lasers gegenüber äußeren Einflüssen
- Indikator für Stabilisierbarkeit des Lasers

Für niedrige Frequenzen $f \rightarrow 0$ ist Gleichung (4) gegeben durch $(2\pi\tau_0)^2$. Je größer die Verzögerung τ_0 , also je länger die Faser, desto stärker übertragen sich Frequenzänderungen in interferometrische Phasenänderungen.

Die obere Grenze des mit dieser Methode ermittelbaren Frequenzrauschspektrums ist durch die erste Frequenz verschwindender Sensitivität gegeben. Eine längere Faser führt also zu einer niedrigeren Bandbreite der Frequenzrauschmessung.

Anders definiert

Um die Linienbreite eines Lasers zu ermitteln, gilt es, zwei Laser mit identischen Rauscheigenschaften zu überlagern und das Schwebungssignal mit einem Spektrumanalysator im Frequenzraum darzustellen. Die vom Spektrumanalysator abgelesene FWHM-Linienbreite entspricht dem Doppelten der Linienbreite des einzelnen Lasers, wenn die Linie lorentzförmig ist, bzw. dem $\sqrt{2}$ -fachen des einzelnen Lasers, wenn das Spektrum gaußförmig ist. Die ermittelte Linienbreite entspricht der Beta-Separation-Linienbreite. Die untere Integrationsgrenze ist die Integrationszeit des Spektrumanalysators.

Es gibt viele Methoden, um die Linienbreite mit nur einem Laser zu bestimmen. Eine Technik basiert auf delayed self-heterodyne detection, jedoch mit einer deutlich längeren optischen Faser. Die ursprüngliche Idee dabei bestand darin, eine so lange Faser zu verwenden, dass die relative Verzögerung die Kohärenzzeit des Lasers deutlich überschreitet [4]. Dann sollten die am zweiten NPBS überlagerten Felder komplett unkorreliert sein. Die Schwebung hinter dem Interferometer entspricht somit einer Schwebung zweier identischer, aber unkorrelierter Laser. Diese Methode ist für die meisten

Diodenlaser von TOPTICA nicht nutzbar, da deren Kohärenzzeit so lang ist, dass optische Fasern mit einer Länge von vielen Kilometern notwendig wären. Diese wären jedoch sehr anfällig für äußere Störeinflüsse, sodass das durch den Messapparat verursachte Rauschen größer wäre als das des Lasers.

Eine andere Methode nutzt rund 1 km lange optische Fasern und berücksichtigt die partielle Kohärenz der beiden Pfade [5]. Wenn die Form der Frequenzrauschdichte des Lasers bekannt ist, lässt sich die Laserlinienbreite direkt mithilfe einer von der Frequenzrauschdichte abgeleiteten Fit-Funktion an das gemessene Spektrum hinter dem Interferometer ableiten. Allerdings ist hierbei die Form der Frequenzrauschdichte meist nicht bekannt. Häufig wird angenommen, dass das Frequenzrauschspektrum durch reines weißes Rauschen gegeben ist. Das trifft typischerweise aber nicht zu. Die abgeleiteten Linienbreiten sind daher nur eine Abschätzung für die instantane Linienbreite, da die Methode hauptsächlich hochfrequente Rauschanteile berücksichtigt. Meist liegt diese Abschätzung deutlich zu hoch.

Fazit

Beide hier vorgestellten Definitionen der Linienbreite leiten sich aus der Frequenzrauschdichte des Lasers ab. Sie hängen nicht von einer bestimmten Messmethode ab, sondern nur von der gemessenen Frequenzrauschdichte des Lasers. Diese enthält fast alle Informationen über die spektralen Eigenschaften und ist für alle Anwendungen aussagekräftig. Zudem ergänzen sich die beiden Linienbreiten, da die instantane Linienbreite kurze Zeitskalen und die Beta-Separation-Linienbreite lange Zeitskalen abdeckt. Zusammen liefern sie ein aussagekräftiges Bild über die spektralen Eigenschaften eines Lasers.

Zudem wurde eine Methode präsentiert, die es ohne weitere optische Referenz ermöglicht, die Frequenzrauschdichte eines Lasers zu messen. TOPTICA nutzt die Definitionen und die Messmethode als Standard für freilaufende Diodenlaser.

Andere, auch auf delayed self-heterodyne detection basierende Methoden bilden die hohe Stabilität moderner Laser nicht mehr ab. Zudem hängen die daraus abgeleiteten Ergebnisse von den Details des Messaufbaus und Details der Auswertung (z. B. Wahl der Fit-Funktion) ab. Diese Details sind weniger charakteristisch für den Laser als für die Messmethode und sollten daher nicht Teil einer Linienbreitendefinition sein.

Daher sind die instantane Linienbreite und die Beta-Separation-Linienbreite die beste Wahl für einen Standard in Industrie, Anwendung und Forschung.

- [1] A. L. Schawlow und C. H. Townes, Phys. Rev. **112**, 1940 (1958)
- [2] G. Di Domenico, S. Schilt und P. Thoman, Appl. Opt. **49**, 4801 (2010)
- [3] H. Tsuchida, Opt. Lett. Vol. **36**, 681 (2011)
- [4] T. Okoshi, K. Kikuchi und A. Nakayama, Electron. Lett. **16**, 630 (1980).
- [5] H. Ludvigsen und E. Bødtker, Opt. Commun. **110**, 595 (1994)

Der Autor

Dr. Steffen Schmidt-Eberle, TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing, www.toptica.com

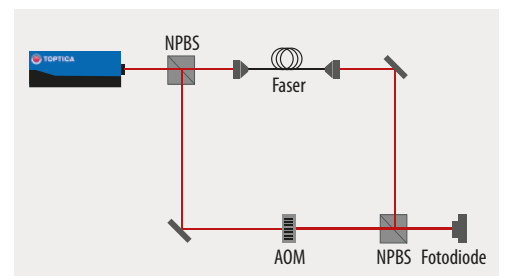


Abb. 2 Dieser Aufbau erlaubt die Messung der Frequenzrauschdichte von Diodenlasern und basiert auf einem asymmetrischen Interferometer. Dadurch werden Frequenzschwankungen des Lasers in Amplitudenfluktuationen übertragen.