



# Kohärenzkontrolle über zwölf Größenordnungen

**Diodenlaser mit maßgeschneiderter Kohärenzlänge**

Anselm Deninger und Thomas Renner

Die Kontrolle der Kohärenzeigenschaften von Laserlicht ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei Anwendungen in der Spektroskopie, Interferometrie oder bei laserbasierter Bildgebung. Bisher ließen sich mit Diodenlasern jedoch nur einzelne Punkte im „Kohärenzlängenspektrum“ realisieren. Neuartige Methoden zur Kohärenzkontrolle schließen die verbliebenen Lücken und erlauben es, die Laser-Linienbreite und somit Kohärenzlänge gezielt zu variieren: vom Mikrometerbereich bis zu mehreren Hunderttausend Kilometern.

## Linienbreite und Kohärenz

Der Ausdruck „Kohärenz“ ist aus dem lateinischen Verb *cohaerere* (zusammenhängen) abgeleitet. Eine Lichtwelle gilt als kohärent, wenn zwei zusammengesetzte Teilwellen interferenzfähig sind. In der Laserphysik unterscheidet man hierbei zwischen zwei unterschiedlichen Aspekten von Kohärenz, nämlich zeitlicher und räumlicher Kohärenz. Räumliche Kohärenz entspricht dem Abstand zwischen zwei Punkten innerhalb der Welle, über den hinweg sie noch miteinander interferieren können. Diese räumliche Kohärenz bestimmt die Strahlqualität und Fokussierbarkeit eines Laserstrahls. Zeitliche Kohärenz andererseits beschreibt die Fähigkeit einer Welle, mit einer zeitverzögerten Kopie ihrer selbst zu interferieren. Als Kohärenzzeit bezeichnet man dabei dasjenige Intervall, das einer signifikanten Phasenänderung der Welle entspricht (und somit die Interferenzfähigkeit reduziert). Die innerhalb dieser Zeit zurückgelegte Wegstrecke ist die Kohärenzlänge der Welle. In

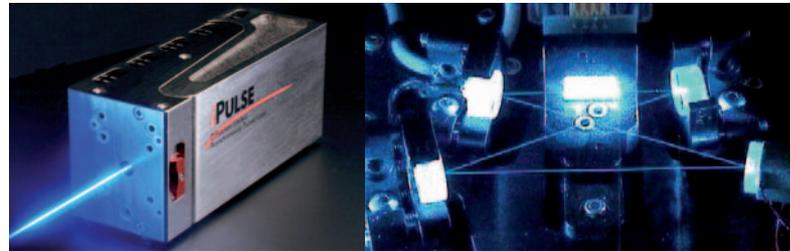


Abb. 1 Links: Freilaufender Diodenlaser bei 405 nm mit 110 mW Leistung und 100 µm Kohärenzlänge. Rechts: Durch Frequenzverdopplung nahinfraroter

Diodenlaser lässt sich blaues und ultraviolette Licht mit 200 mW Leistung und 100 m Kohärenzlänge erzeugen.

diesem Artikel bezeichnet der Term „Kohärenz“ ausschließlich die letztgenannten, zeitlichen Kohärenzeigenschaften.

Je größer das Spektrum vorhandener Frequenzen innerhalb einer Welle, desto schneller geht die Phasenkorrelation verloren. Mathematisch ausgedrückt: Linienbreite und Kohärenzlänge sind zueinander invers proportional. Die zeitliche Kohärenz eines Lasers lässt sich somit auch in Einheiten der Linienbreite (MHz oder pm) angeben. Im Fall einer gaußförmigen spektralen Verteilung ist die Kohärenzlänge  $L_c$  ungefähr gegeben durch

$$L_c = 132 \text{ m} / \Delta\nu, \quad (1)$$

wobei  $\Delta\nu$  die Linienbreite in MHz ist. Gl. (1) ist unabhängig von der absoluten Wellenlänge des Lasers.

## Was beeinflusst die Kohärenzlänge?

Die Kohärenzlänge eines idealen (theoretischen) Lasers lässt sich aus der Schawlow-Townes-Formel ableiten und ist proportional zur Ausgangsleistung, dividiert durch das Quadrat der Photonen-Umlaufzeit im Resonator. In realiter wird dieses Limit durch den Einfluss verschiedener Rauschquellen nicht erreicht. Ist das Rauschen primär

durch spontane Emission bedingt („Quantenrauschen“), so führen eine hohe Intracavity-Leistung, große Resonatorlänge und geringe Resonatorverluste gleichermaßen zu einer höheren Kohärenzlänge bzw. geringeren Linienbreite.

Bei Diodenlasern wird die Kohärenz weiterhin durch eine Kopplung zwischen Intensitäts- und Phasenrauschen („Henry-Faktor“ oder Linienverbreiterungs-Faktor), Driften und technisches Rauschen beeinträchtigt. Im Fall externer Resonatoren führen zudem Temperaturschwankungen, Umweltfaktoren wie Luftdruck und Feuchte sowie mechanisches Driften zu Frequenzveränderungen auf Zeitskalen von Sekunden bis Stunden. Auf kürzeren Skalen (ms oder µs) tragen zudem Stromrauschen und akustische Störungen zur Linienverbreiterung bei.

Dr. Anselm Deninger und Dr. Thomas Renner, TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 Gräfelfing

### Typische Kohärenzlängen

Lasertyp	Kohärenzlänge
Lampengepumpter Nd:YAG	1 cm
HeNe (unstabilisiert)	20 cm
HeNe (stabilisiert)	1 km
Argon/Krypton	1 cm
Argon/Krypton + Etalon	1 m
Farbstofflaser	5 – 250 m
Faserlaser (unstabilisiert)	50 µm
Faserlaser (stabilisiert)	100 km
Freilaufender Diodenlaser	< 1 mm
Diodenlaser mit externem Resonator	100 – 1000 m

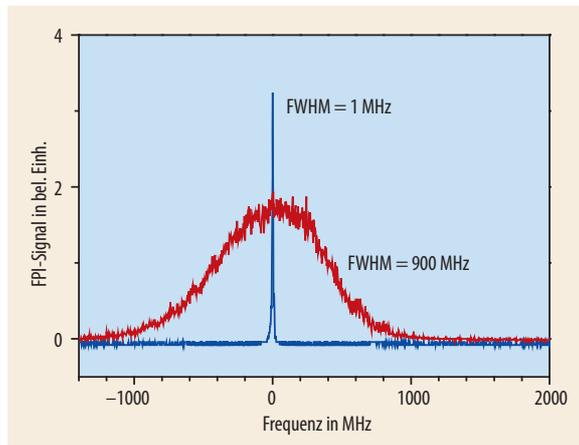


Abb. 2 Fabry-Perot-Modenspektrum eines DFB-Diodenlasers mit und ohne Linienverbreiterung.

Eine effiziente Kohärenzkontrolle muss auf der Zeitskala der entsprechenden Störung erfolgen, oder anders gesagt: Hohe elektronische Bandbreite ist der Schlüssel zur gezielten Linienverbreiterung oder -reduktion. Dabei profitierten die Diodenlaser – im Gegensatz zu Gas- oder Kristalllasern – von der Möglichkeit, hochfrequente elektrische Felder direkt an den Laserchip anzulegen.

### Kohärenzkontrolle von Diodenlasern

Diodenlaser lassen sich in verschiedenen Konfigurationen betreiben. „Freilaufende“ Dioden<sup>1)</sup> eignen sich für Anwendungen, in denen eine spektrale Kontrolle von nur nebensächlicher Bedeutung ist. Beispiele hierfür sind die Laser-mikroskopie, Flusszytometrie oder Mikrolithographie. Hier verwendet man oftmals violette Lasermodule ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ , Abb. 1), deren Emissionsspektrum eine Halbwertsbreite von ca.  $0,5 \text{ nm}$  oder  $900 \text{ GHz}$  hat. Aus Gl. (1) folgt dann eine Kohärenzlänge von ca.  $150 \mu\text{m}$ , die auch tatsächlich gemessen wird.

Externe Resonatoren („external cavity diode lasers“, ECDLs) werden hingegen verwendet, wenn monofrequente Emission und spektrale Abstimmbarkeit gefordert sind. Wird die erwähnte violette Diode in einer ECDL-Konfiguration mit Beugungsgitter betrieben, so reduziert sich die

Linienbreite auf typischerweise  $0,0005 \text{ pm}$  oder  $1 \text{ MHz}$ , und die Kohärenzlänge wächst auf über  $100 \text{ m}$ . Das Gitter ändert somit die Kohärenzeigenschaften um nahezu sechs Größenordnungen.

Für eine Reihe von Anwendungen reicht solch eine einfache Gitterstabilisierung jedoch nicht aus. Extrem schmale Linienbreiten sind beispielsweise in der Präzisionsspektroskopie, Quantenoptik oder Metrologie gefragt. „Verbotene“ Übergänge zwischen langlebigen atomaren Energieniveaus haben Halbwertsbreiten zwischen einigen zehn kHz und einigen Hz (z. B. hat die berühmte  $1s - 2s$ -Interkombinationslinie von Wasserstoff bei  $243 \text{ nm}$  eine natürliche Linienbreite von  $1,3 \text{ Hz}$ ). Um derart schmale Linien auflösen zu können, muss die Laserlinienbreite somit um mehrere Dekaden schmäler sein als die von gängigen ECDLs.

Eine so weitgehende Reduktion der Linienbreite erfordert einerseits eine hochstabile Referenz (z. B. einen Resonator mit einer Finesse von  $10^5 - 10^6$ ), andererseits eine extrem schnelle Stabilisierungselektronik. Die von Toptica entwickelten Module (Fast Analog Linewidth Control module FALC 110 und als digitales Gegenstück DigiLock 110) beinhalten einen Proportional-Integral-Differential-Regler mit  $10 \text{ MHz}$  Bandbreite, dessen Ausgang den Treiberstrom eines ECDLs kontrolliert. Ein zweiter, langsamer Regelkreis wirkt zudem auf die Resonatormechanik und gleicht somit mögliche Langzeit-Frequenzdriften aus. Bei ge-

meinsamen Tests am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching gelang es zu zeigen, dass sich mit dem FALC 110 die Linienbreite eines ECDLs auf  $0,5 \text{ Hz}$  reduzieren lässt [1]. Als Kohärenzlänge ausgedrückt sind dies  $264\,000 \text{ Kilometer}$  – oder zwei Drittel der Strecke bis zum Mond.

Bemerkenswerterweise verlangen andere Anwendungsfelder genau das Gegenteil: eine kontrollierte und reproduzierbare Aufweitung des spektralen Profils. So sind etwa die Absorptionslinien von Molekülen oder Dopplerverbreiterten Gasen mehrere  $100 \text{ MHz}$  breit. Hier bevorzugt man eine künstlich verbreiterte Laserlinie – was bislang mit Diodenlasern nicht zu erreichen war. ECDLs sind spektral zu schmal, freilaufende Dioden hingegen viel zu breit.

Eine neuartige Modulationsquelle (TOPTICA Laser Coherence Control, LCC) zeigt nun einen möglichen Lösungsansatz auf. Dabei verbreitert eine spezielle hochfrequente Strommodulation das Emissionsprofil eines ECDLs oder Distributed Feedback (DFB) Diodenlasers. Durch Variation der Modulationsamplitude lässt sich die Laserlinienbreite präzise einstellen, und zwar von wenigen MHz bis in den GHz-Bereich (Abb. 2). So kann die Linienbreite eines Diodenlasers an eine molekulare Absorptionsbande angepasst und unabhängig von der Zentralfrequenz variiert werden.

Eine faszinierende Anwendung ist die Magnetresonanztomographie der menschlichen Lunge mittels spinpolarisiertem Helium-3-Gas [2]. Helium-3, eine Million mal seltener als das gängige Helium-4, hat einen Kernspin von  $\frac{1}{2}$ , der ein magnetisches Moment trägt. Richtet man diese Kernspins parallel aus, so entsteht eine makroskopische Magnetisierung, und das Gas lässt sich zur in-vivo Bildgebung der menschlichen Atemwege und Lunge benutzen (Abb. 3). Die Ausrichtung („Polarisation“) der Kernspins erfolgt dabei durch optisches Pumpen, und dieser Prozess funktioniert am effektivsten, wenn die Linienbreite des Lasers an das Doppler-Absorp-

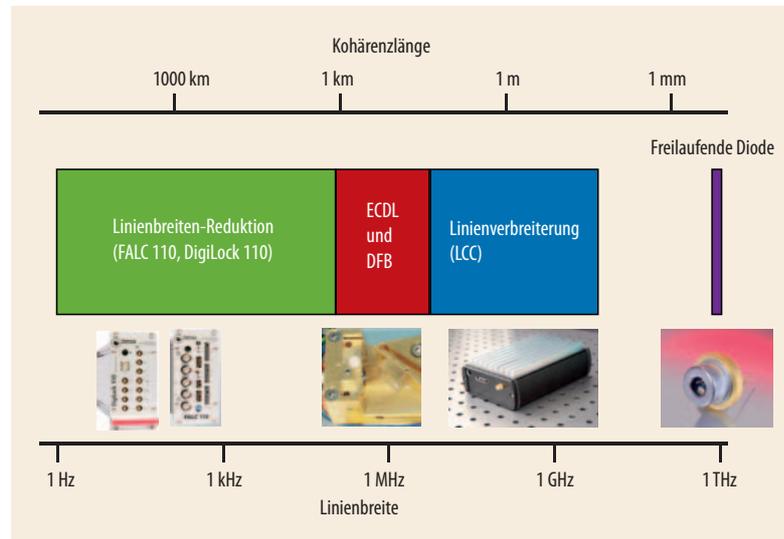


Abb. 3 Kernspinresonanz-Aufnahme einer menschlichen Lunge, aufgenommen mit spinpolarisiertem Helium-3 Gas.

1) Hierunter verstehen wir Laserdioden mit räumlicher Grundmode ( $\text{TEM}_{00}$ ), aber ohne spektral selektives Element.

tionsprofil des Heliums angepasst ist. Idealerweise wird also das Emissionsprofil eines DFB-Lasers bei 1083 nm um einen Faktor 1000 auf rund 2 GHz verbreitert.

Die spektrale Breite einer Laserdioden ist letztlich nur durch ihr Verstärkungsprofil limitiert. Die breitesten Dioden (zugegebenermaßen keine echten Laser) sind superlumineszente LEDs (SLEDs). Ihr spektrales Profil ist bis zu 50 nm breit, was einer Kohärenzlänge in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$  entspricht. SLEDs kommen beispielsweise in der Optischen Kohärenztomographie zum Einsatz, wo die räumliche Auflösung durch eine geringe zeitliche Kohärenz (aber zugleich hohe räumliche Kohärenz) gesteigert wird. Und falls es noch breiter sein soll, so ermöglichen Ultrakurzpuls-Laser die Erzeugung eines „Superkontinuums“: ein mehrere hundert Nanometer breites Spektrum reduziert die Kohärenzlänge auf nur mehr 1  $\mu\text{m}$ .



DPG-Tagung

Abb. 4 Zwölf Größenordnungen der Kohärenzvariation bei Diodenlasern.

Optische und elektronische Rückkopplung, hohe Bandbreiten, kurze Signalverarbeitungszeiten: Das sind die Werkzeuge, mit denen sich die Linienbreite von Halbleiterlasern über mehr als zwölf Größenordnungen variieren lässt (Abb. 4). Anwendungen von der Lasermikroskopie bis zur Präzisionspektroskopie von Was-

serstoff-Atomen können davon profitieren.

- [1] J. Alnis et al., Phys. Rev. A 77, 53809 (2008)  
 [2] H.-U. Kauczor, R. Surkau und T. Roberts, Eur. Radiol. 8, 820 (1998)

## The book you want.

When you need it. Wherever you are.

Designed to provide you with a dynamic desktop library, Wiley InterScience OnlineBooks™ gives access to thousands of Wiley books in an instant.

- ▶ Read and print PDF files of book chapters when and where you want
- ▶ Don't wait! Get immediate access to the book that you need
- ▶ Target the information you want by searching down to the chapter level
- ▶ View Table of Contents and Chapter Summaries FREE
- ▶ Access full-text Chapters through a library license or on a Pay-Per-View basis

For all your research needs - visit Wiley InterScience and contact your library to ensure you have access.  
[www.interscience.wiley.com/onlinebooks](http://www.interscience.wiley.com/onlinebooks)



0083

OnlineBooks™

Vakuummeter



## MicroPirani™

- 10<sup>-5</sup> bis 1000 mbar
- + kompakt
- + bis zu 3 Relais
- + 1 - 9 VDC Analogausgang
- + RS232 oder RS485

= **925**



MKS Instruments Deutschland GmbH  
 Schatzbogen 43, 81829 München, Tel 089-4200080, Fax 089-424106  
[http:// www.mksinst.com](http://www.mksinst.com), e-mail: [mks-germany@mksinst.com](mailto:mks-germany@mksinst.com)