

# Miniaturisierter Diodenlaser mit externem Resonator

Konventionelle Diodenlaser mit externem Beugungsgitterresonator sind aufgrund vieler beweglicher Komponenten zu anfällig und komplex für viele Anwendungen. Wir präsentieren ein miniaturisierten Diodenlaser mit externem Volumen-Bragg-Gitter bei 780 nm, der mit hoher Ausgangsleistung, geringer Linienbreite und fast beugungslimitiertem Strahlprofil eine stabile, kompakte Alternative auch für Distributed-Feedback-Laser darstellt.

Simon Rauch, Joachim Sacher,  
Sacher Lasertechnik GmbH, Marburg

Diodenlaser mit externen Resonatoren (ECDLs) sind ein Standardwerkzeug für Untersuchungen in der experimentellen Atom- und Quantenphysik sowie in biomedizinischen Anwendungen: Sie werden unter anderem zum Fangen und Kühlen von Atomen [1], in der Raman-Spektroskopie [2] und zur Festlegung neuer Frequenzstandards eingesetzt [3]. Die Ursache für das große Anwendungsfeld liegt in der Tatsache, dass ECDLs eine schmale spektrale Linienbreite kombiniert mit einer hohen optischen Ausgangsleistung in der Größenordnung von 100 mW aufweisen. Zudem emittieren sie bei geeigneter Resonatorkonfiguration auf nur einer einzigen longitudinalen Mode.

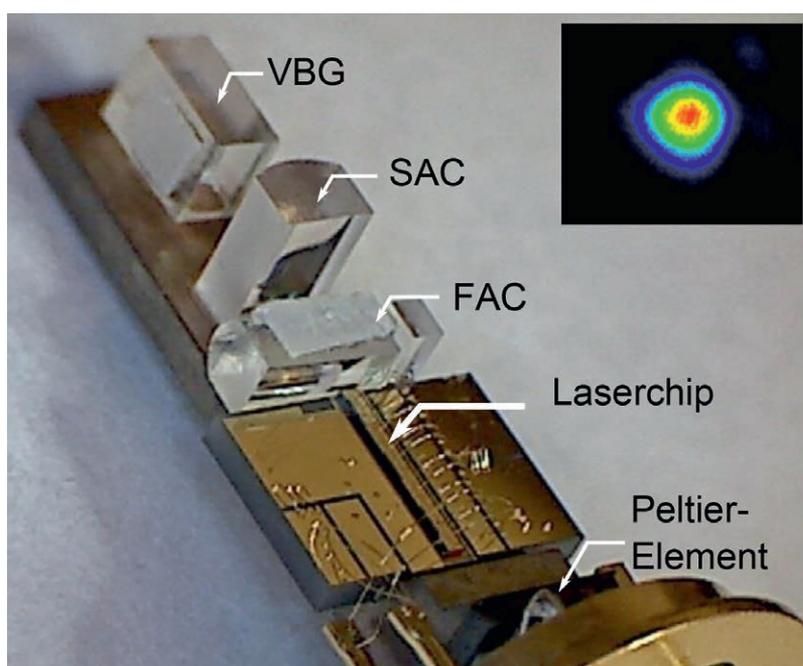
Konventionelle ECDL-Systeme in Littrow- oder Littman/Metcalf-Konfiguration arbeiten mit Beugungsgittern zur Wellenlängenselektion, deren erste Beugungsordnung in die Laserdiode zurückreflektiert wird und deren nullte Beugungsordnung, der Gitterreflex, als optische Nutzleistung aus dem System gekoppelt wird [4]. Die Strahlgeometrie benötigt recht komplexe und unförmige Aufbauten mit präziser und gleichzeitig robuster Mechanik, was potentiell einen hohen Justage- und Installationsaufwand bedeutet. Um diese Nachteile zu vermeiden wurde versucht, das frequenzselektierende Gitter direkt auf dem Chip zu integrieren [5]. Die so entstandenen Distributed-Bragg- (DBR) und Distributed-Feedback-Strukturen (DFB) reichen allerdings in Ausgangsleistung bzw. optischer Linienbreite [6] nicht an die Performanz von konventionellen ECDLs

heran. Um einen kompakteren Aufbau bei gleichzeitig vergleichbaren Leistungsdaten zu erreichen, wurden mikrointegrierte Diodenlasermodule mit Volumen-Bragg-Gittern (VBGs) als dispersive Rückkoppelemente entwickelt [7].

VBGs sind in photorefraktives Glas eingeschriebene, holographische Gitter. Sie besitzen eine hohe thermische Belastbarkeit, sodass sie vorrangig zur spektralen Stabilisation von Breitstreifenlasern und Laserbarren verwendet wurden [8, 9, 10]. Diese Hochleistungsmodu-

le alleingemäß an einer schlechten Strahlqualität und breiten Linienbreite [11]. Deswegen können diese Laser meist nicht für präzise Manipulation von Atomen eingesetzt werden oder benötigen weitere Optiken zur Strahlkorrektur.

Wir stellen in diesem Bericht unsere innovativen Entwicklungen zu miniaturisierten ECDLs mit VBGs vor. Wir präsentieren einen wartungsarmen, kompakten, VBG-stabilisierten Rippenwellenleiter-Diodenlaser mit einem fast



**Bild 1:** Miniaturisierter Diodenlaser mit externem Volumen-Bragg-Gitter (VBG) im TO39-Gehäuse: Zylindrische Linsen (FAC + SAC) sorgen für einen fast beugungslimitierten Ausgangsstrahl, von dem ein Anteil durch das VBG zurück in den Laserdiodenchip reflektiert wird. Durch eine effektive Wärmeabfuhr durch das Peltierelement und keine beweglichen Komponenten ist ein stabiler Laserbetrieb gewährleistet.

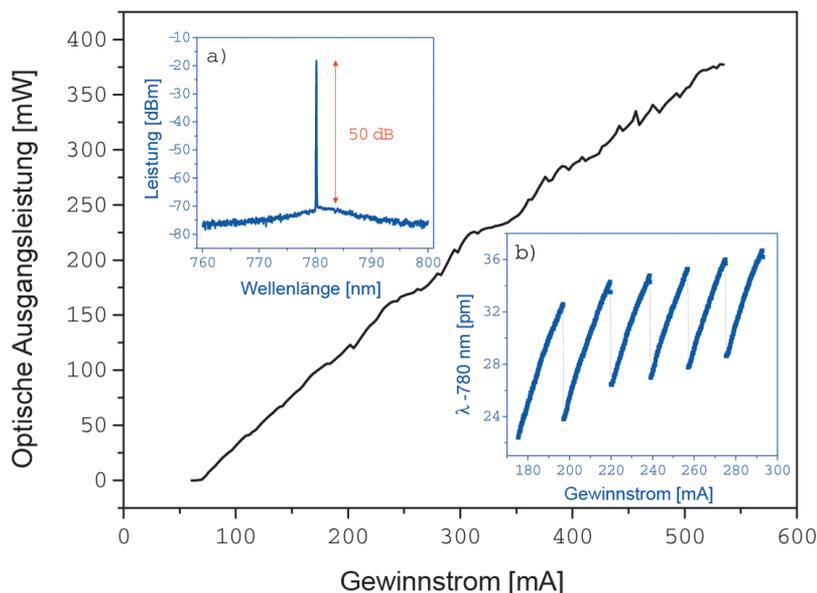
beugungslimitierten Strahlprofil, einer hohen Ausgangsleistung und einer niedrigen spektralen Linienbreite bei einer Wellenlänge von 780 nm. Wir diskutieren die Abhängigkeit der Ausgangsleistung und der Wellenlänge vom injizierten Gewinnstrom. Zudem ermitteln wir die optische Linienbreite durch die Überlagerung zweier identischer Laser. Abschließend demonstrieren wir eine mögliche Applikation der bis dahin herausgearbeiteten Eigenschaften in der Doppler-freien Absorptionsspektroskopie.

### Laserdesign und Eigenschaften

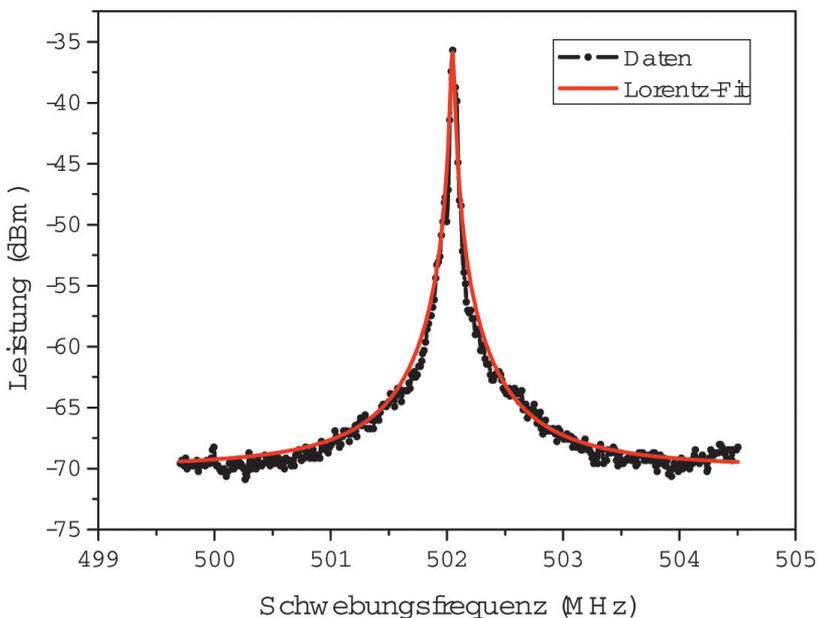
Unser Laserdesign ist in **Bild 1** dargestellt. Es basiert auf einem kommerziellen TO39-Gehäuse, an welches ein Peltierelement mitsamt einem Heißleiter-Widerstand montiert ist, um eine stabile Temperatur des Moduls zu gewährleisten. An das Peltierelement ist eine Mikrobank befestigt, auf der der Laserchip, die Kollimationslinsen für die schnell (FAC) und langsam (SAC) divergierende Strahlachse sowie das VBG für die optische Rückkopplung fixiert sind.

Der Diodenchip weist eine Länge von 3,9 mm auf und ist auf einem Aluminiumnitrid-Laserträger montiert. Die aktive Zone besteht aus einem GaAsP-Quantentopf, welcher von  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As$ -Wellenleiterschichten umgeben ist. Aus diesem Aufbau resultiert, dass das Gewinnmaximum der Laserdiode bei 775 nm liegt. Die beiden Austrittsfacetten des Laserchips sind derart mit Beschichtungen bedampft, dass die Rückfacette hochreflektierend und die Austrittsfacette entspiegelt ist. Dies hat den Vorteil, dass das kohärente Laserlicht die Diode fast ausschließlich in Richtung Austrittsfacette verlässt und gleichzeitige der Rückreflex des VBGs in die aktive Schicht eindringen kann.

Zur Kollimation des divergenten Lichts der Diode werden zwei zylindrische Linsen (FAC, SAC) verwendet, um beide Achsen separat kollimieren und damit ein gaußförmiges Strahlprofil erzeugen zu können. Das so erreichte Intensitätsprofil ist in der rechten oberen Ecke von Bild 1 gezeigt. Als Referenzmaß für die Abweichung eines realen Laserstrahls im Vergleich zur idealen Gaußgrundmode dient der Strahlpropagationsfaktor. Dieser gibt das Verhältnis der Strahlparameterprodukte von realem zum gaußförmigen Strahl an. Für unser Laserdesign erhalten wir bei Messungen



**Bild 2:** Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Gewinnstroms: Eine Maximalleistung von 380 mW kann erreicht werden. Einschub a) zeigt ein exemplarisches optisches Spektrum, Einschub b) illustriert das Wellenlängenabstimmverhalten mit dem Gewinnstrom.



**Bild 3:** Schwebungsspektrum zweier identisch konstruierter Lasermodule: Die schmale Breite des lorentzförmigen Fits unterstreicht die geringe Linienbreite der Laser.

mit einem kommerziellen Strahlanalysator einen Wert von 1,3 für die horizontale und vertikale Achse. Der so kollimierte Strahl trifft so in einem geringen Abstand auf das VBG, wodurch ein Anteil des Strahls bei 780 nm mit einer geringen spektralen Halbwertsbreite in die Diode zurückreflektiert wird. Die Facetten des VBGs sind entspiegelt und das Gitter ist unter einem Winkel in das photo-

thermisch brechende Glas eingeschrieben, sodass ein möglicher Facettenreflex aus dem System geleitet wird.

### Charakterisierung des Lasermoduls

Zunächst betrachten wir die Lichtleistungskennlinie in Abhängigkeit vom Gewinnstrom in **Bild 2**. Die solitäre Diode

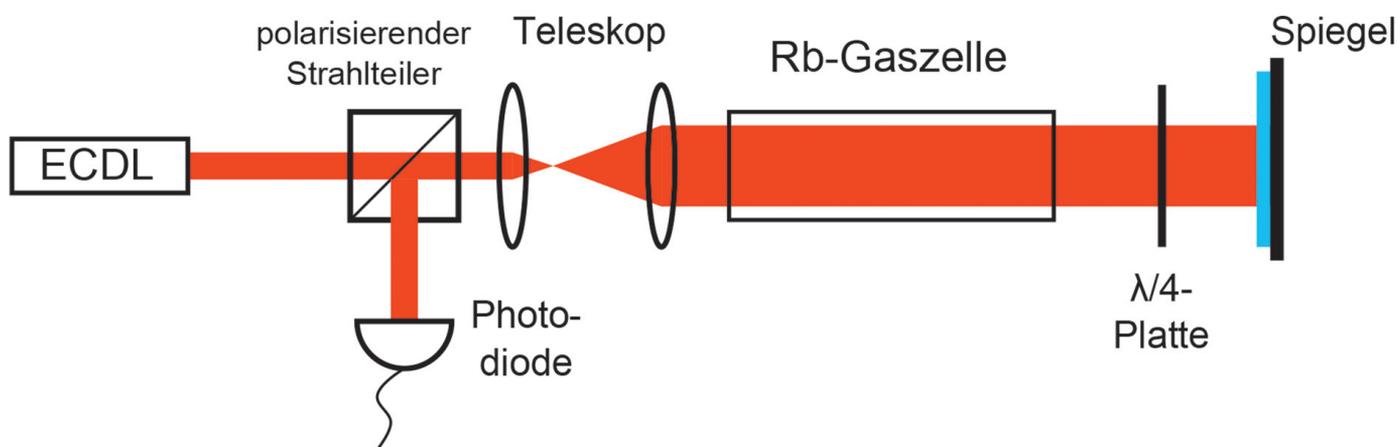


Bild 4: Aufbau und Strahlverlauf für die Doppler-freie Sättigungsspektroskopie mit Rubidium (Rb).

ohne Rückkopplung weist eine Laserschwelle von 113 mA auf (nicht gezeigt). Mit VBG kann die Laserschwelle an dem Knick in der Leistungskennlinie bei 78 mA identifiziert werden. Folglich ist das Emissionsverhalten des Moduls durch den externen Resonator dominiert.

Im Mittel zeigt die Kennlinie in Bild 2 eine lineare Abhängigkeit der Leistung vom Gewinnstrom. Diese erreicht bei 535 mA ihr Maximum von 380 mW. Ein weiteres Erhöhen des Stroms führt zu keiner weiteren Leistungserhöhung, sondern einer thermisch bedingten Sättigung der Kurve und damit auch einer Abnahme der Effizienz. Diese liegt im linearen Bereich der Leistungskennlinie bei 0,8 W/A. Abgesehen vom linearen Verlauf der Kennlinie sind darauf kleine Rippel zu sehen, welche auf Modensprünge zurückzuführen sind. Deren Auftreten kann anhand eines einfachen Modells [12] zum Abstimmverhalten des internen Resonators, der durch die Diode selbst gebildet wird, und des

externen Resonators, der von der Auskoppelfacetten der Diode bis zur Gitterposition im VBG reicht, veranschaulicht werden. Wird der Gewinnstrom variiert, so verändert sich der effektive Brechungsindex und damit auch die optische Länge des internen Resonators. Angenommen, dass interner und externer Resonator anfangs resonant auf einem Modenpaar auf dem Reflexionsmaximum des VBGs laufen, so driften diese Moden bei einer Stromänderung auseinander und die Ausgangsleistung verändert sich, was zu den besagten Rippeln führt. Mit jener Längenänderung stimmt die Wellenlänge des Moduls kontinuierlich durch, bis die nächste Mode des internen Resonators stärker vom VBG reflektiert wird und somit ein Modensprung stattfindet.

Ein Ausschnitt dieses Wellenlängen-Abstimmverhaltens ist in der unteren rechten Ecke von Bild 2 dargestellt. Für einen Strombereich von 180 bis 300 mA ist die Differenz der Wellenlänge zu

780 nm aufgetragen. Es sind abschnittsweise stetig ansteigende Graden mit einer mittleren Steigung von 0,5 pm/mA erkennbar, die das kontinuierliche Abstimmen der Wellenlänge darstellen und durch Unstetigkeiten, also Modensprünge voneinander getrennt sind.

Der maximale modensprungfreie Abstimmbereich beträgt 10,5 pm, was 5,2 Hz entspricht. Der Ausschnitt in der oberen linken Ecke von Bild 2 zeigt ein beispielhaftes optisches Spektrum. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Untergrund um 50 dB unterdrückt ist und der Laser somit auf einer einzigen Mode arbeitet.

Da allerdings die Auflösung von optischen Spektralanalysatoren im Allgemeinen zu gering ist, um die spektrale Linienbreite darzustellen, nutzen wir folgende Technik um eine Einordnung zu erhalten. Wir überlagern die Strahlen zweier identisch konstruierter Lasermodule mittels eines Strahlteilers, sodass eine Schwebung entsteht. Dazu wir gleichen

- [1] S. Chu, "Laser manipulation of atoms and particles," *Science*, vol. 253, no. 5022, pp. 861–866, 1991.
- [2] K. Sowidnich, H. Schmidt, M. Maiwald, B. Sumpf, and H.-D. Kronfeldt, "Application of diode-laser Raman spectroscopy for in situ investigation of meat spoilage," *Food and Bioprocess Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 878–882, 2010.
- [3] C. Oates, F. Bondu, R. Fox, and L. Hollberg, "A diode-laser optical frequency standard based on laser-cooled Ca atoms: Sub-kilohertz spectroscopy by optical shelving detection," *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, vol. 7, no. 3, pp. 449–460, 1999.
- [4] C. J. Hawthorn, K. P. Weber, and R. E. Scholten, "Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam," *Review of Scientific Instruments*, vol. 72, no. 12, pp. 4477–4479, 2001.
- [5] B. Sumpf, J. Fricke, M. Maiwald, A. Müller, P. Ressel, F. Bugge, G. Erbert, and G. Tränkle, "Wavelength stabilized 785 nm DBR-ridge waveguide lasers with an output power of up to 215 mW," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 4, p. 045025, 2014.
- [6] D. J. Dougherty, R. C. Gutierrez, S. Dubovitsky, and S. Forouhar, "Semiconductor laser linewidth measurements for space interferometry applications," pp. 115–122, 1999.
- [7] E. Luvsandamdin, C. Kürbis, M. Schiemangk, A. Sahn, A. Wicht, A. Peters, G. Erbert, and G. Tränkle, "Micro-integrated extended cavity diode lasers for precision potassium spectroscopy in space," *Opt. Express*, vol. 22, no. 7, pp. 7790–7798, Apr 2014.
- [8] G. B. Venus, A. Sevan, V. I. Smirnov, and L. B. Glebov, "High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback," pp. 166–176, 2005.
- [9] G. J. Steckman, L. Wenhai, R. Platz, D. Schroeder, C. Moser, and F. Havermeier, "Volume holographic grating wavelength stabilized laser diodes," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 672–678, May 2007.
- [10] D. Vijayakumar, O. B. Jensen, J. Barrientos-Barria, D. Pabouf, G. Lucas-Leclin, B. Thestrup, and P. M. Petersen, "Narrow line width operation of a 980 nm gain guided tapered diode laser bar," *Opt. Express*, vol. 19, no. 2, pp. 1131–1137, Jan 2011.
- [11] A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov, D. A. Hostutler, and L. Glebov, "Continuous wave, 30 W laser-diode bar with 10 GHz linewidth for Rb laser pumping," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 702–704, Apr 2008.
- [12] R. Lang and K. Kobayashi, "External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 16, no. 3, pp. 347–355, 1980.
- [13] W. Zhou, K. M. Chong, and H. Guo, "Linewidth measurement of littrow structure semiconductor laser with improved methods," *Physics Letters A*, vol. 372, no. 23, pp. 4327–4332, 2008.
- [14] D. A. Steck, "Rubidium 87 D line data," revision 2.0.1, 2 May 2008. [Online]. Available: <http://steck.us/alkalidata>.
- [15] D. A. Steck, "Rubidium 85 D line data," revision 2.1.6, 20 September 2013. [Online]. Available: <http://steck.us/alkalidata>.

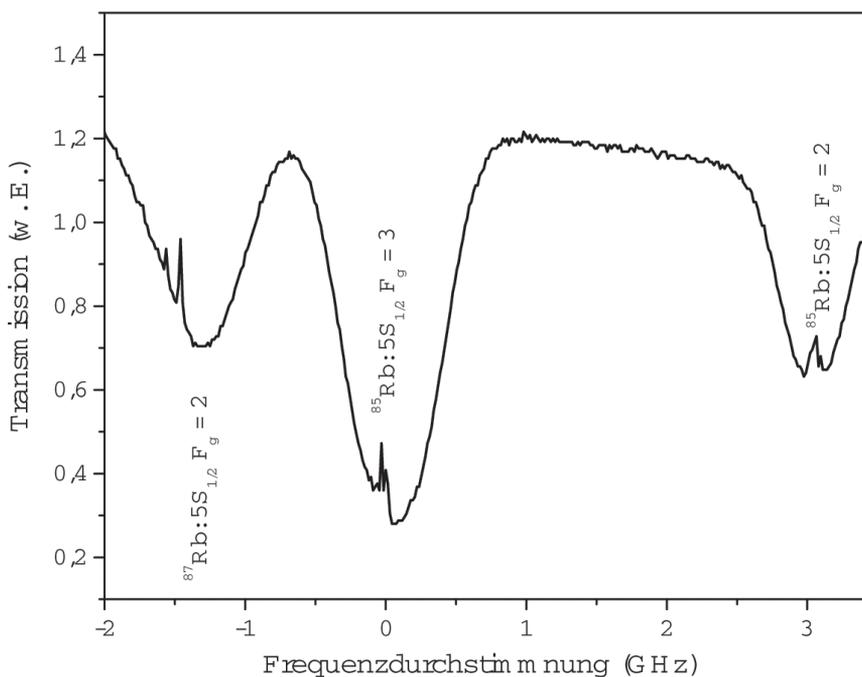
wir die Polarisation der beiden Teilstrahlen mit einer Halbwellenplatte an, stellen den Strom jedes Lasers so ein, dass sie beide die gleiche Leistung zu dem kombinierten Strahl beitragen und detektieren das Signal mit einer Photodiode. Das elektrische Spektrum dieses Signals enthält gemäß Theorie einen Peak, der bei der Differenz der optischen Frequenzen der Laser liegt und dessen Breite ein Maß für die Linienbreite ist (**Bild 3**). Es zeigt die experimentellen Daten und den zugehörigen lorentzförmigen Fit. Die 3 dB-Breite des Fits dividiert durch 2 [13] lässt auf eine Linienbreite für einen Laser im Bereich von 20 kHz schließen. Dieser Wert ist in vergleichbarer Größenordnung wie andere ECDLs basierend auf VBGs [7].

Diese Art der Linienbreitenbestimmung kann allerdings nur eine Momentaufnahme über einige Millisekunden bieten, da thermische Abweichungen die Laserfrequenz fluktuieren lassen. Die im folgenden gezeigte Applikation zeigt aber Möglichkeiten auf, den Laser auf einer Frequenz präzise zu stabilisieren.

### Spektroskopie und Frequenzstabilisierung

Um einen Laser auf einer optischen Frequenz zu stabilisieren, ist eine Referenz nötig. Dazu bieten sich unter anderem hochauflösende Fabry-Perot-Interferometer und Absorptionslinien von Atomen an. Wir zeigen dies am Beispiel von Doppler-freier Absorptionsspektroskopie mit einer Gaszelle gefüllt mit Rubidium (Rb). Hierbei kommen alle Vorteile unseres Lasermoduls zum Tragen.

Der zugehörige experimentelle Aufbau ist in **Bild 4** gezeigt. Ein Teil der ECDL-Strahlung wird durch ein Teleskop aufgeweitet, um beim Passieren der Rb-Zelle möglichst viele Atome anzuregen. Der Strahl wird in sich zurückreflektiert und passiert dabei eine Viertelwellenplättchen zweimal, damit er durch einen polarisierenden Strahlteiler zu einer Photodiode geleitet werden kann. Auf dem Rückweg durch die Rb-Zelle wird ausgenutzt, dass der Strahl die Atome mit keiner Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung nach dem ersten Strahldurchlauf nicht weiter anregen kann, damit die Transmission für diese Atomgruppe steigt und die Hyperfeinniveaus unverbreitert sichtbar werden. Mittels bekannter Stabilisierungsverfahren



**Bild 5:** Doppler-freies Absorptionsspektrum von Rubidium (Rb). Die Einkerbungen in den Absorptionspeaks zeigen die Hyperfeinstruktur. Diese bieten eine präzise Referenz zur Frequenzstabilisierung.

kan der Laser dann auf den Frequenzen dieser Linien gehalten werden.

Um mit dem Aufbau aus **Bild 4** das Absorptionsspektrum von Rb zu erhalten, wurde der Laser bei einem Gewinnstrom von 210 mA mit einer Frequenz von 1 kHz und einer Amplitude von 10 mA moduliert und somit gemäß **Bild 2b** in seiner Wellenlänge durchgestimmt. Das so erhaltene Spektrum ist in **Bild 5** dargestellt. Auf einem Bereich von gut 5 GHz kann man hier drei Doppler-verbreiterte Absorptionspeaks erkennen. Zudem weisen diese Einkerbungen auf, die die Hyperfeinstruktur der Übergänge mit den folgenden Grundzuständen darstellen:  $^{87}\text{Rb } 5S_{1/2} F_g = 2$ ,  $^{85}\text{Rb } 5S_{1/2} F_g = 3$ ,  $^{85}\text{Rb } 5S_{1/2} F_g = 2$  [14, 15]. Diese manifestieren sich nun in der natürlichen Linienbreite.

### Fazit

Das Anwendungsbeispiel zeigt die Vorteile des entwickelten Laserdesigns. Zum einen macht es die geringe Linienbreite gepaart mit der einfachen Durchstimmbarkeit der Wellenlänge möglich, hochpräzise Hyperfeinlinien aufzulösen, was eine optimale Grundlage für eine Frequenzstabilisierung bietet. Darüber hinaus ist es Dank der hohen Ausgangsleistung, des guten Strahlprofils und Seitenmodenunterdrückungsverhältnisses

möglich, auch neben einer Frequenzstabilisierung Ausgangsleistungen über 100 mW in einer Monomodenfaser zur weiteren Verfügung zu haben.

Wenn die vorgestellte Abstimbarkeit im einstelligen GHz-Bereich ausreicht, stellt das hier vorgestellte Lasermodul eine kompaktere, stabilere und leistungsstarke Alternative zu konventionellen ECDLs mit Beugungsgitter dar. Durch den kompakten, stabilen Aufbau ohne bewegliche Komponenten ist er auch in mobilen Applikationen einsetzbar. Eine große Auswahl an unterschiedlichen Gitterperioden in den VBGs ermöglicht außerdem, unser Konzept auf verfügbare Diodenlaserchips im nahinfraroten Spektralbereich auszuweiten.

Dr. Joachim Sacher  
Simon Rauch  
Sacher Lasertechnik GmbH  
Rudolf-Breitscheid-Str. 1-5  
35037 Marburg  
Tel. +49 6421 305-0  
Fax +49 6421 305-299  
contact@sacher-laser.com  
www.sacher-laser.com

