

Rauscharme Revolution

Das Diodenlaser-Labor profitiert von innovativer, digitaler Steuerelektronik.

Marion Lang, Rudolf Neuhaus und Jürgen Stuhler

Dank einer neu entwickelten Generation von Steuerelektronik für Diodenlaser erobern moderne Bedienkonzepte wie die intuitive Multi-Touch-Steuerung oder die Computer-unterstützte Fernbedienung die Laborwelt. Gleichzeitig werden Rekordwerte für Drift und Rauschen der Laserfrequenz erreicht.

Schmalbandige Diodenlaser haben in den letzten Jahren insbesondere das Feld der kalten Atome und Ionen stark geprägt. Sie dienen als zentrale Werkzeuge, z. B. in der Quanteninformationstechnologie oder in der Präzisionsspektroskopie, um die interne Struktur der Atome zu untersuchen und fundamentale Naturkonstanten genau zu bestimmen. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet sind optische Atomuhren, die durch eine hohe optische Frequenz und eine schmale Linienbreite der verwendeten Übergänge eine hochpräzise Zeitmessung erlauben [1].

Nach der kommerziellen Verfügbarkeit von Halbleiterlaserdioden in den späten 1970er-Jahren wurden erste Diodenlaser entwickelt. Heute ermöglichen gitterstabilisierte Diodenlaser (External Cavity Diode Lasers, ECDLs) Wellenlängen von 190 bis 3000 nm mit schmaler Linienbreite und einem breiten kontinuierlichen Durchstimmbereich. Die Ausgangswellenlänge kommt dabei entweder direkt aus dem Halbleiter oder lässt sich mittels effizienter nichtlinearer Frequenzkonversion erzeugen.

In den letzten Jahren gelang es, gitterstabilisierte Diodenlaser kontinuierlich zu verbessern. Der DL pro beispielsweise bietet eine hohe Durchstimmbarkeit bei gleichzeitig ausgezeichneter Stabilität gegenüber Vibrationen oder Änderungen der Umgebungsbedingungen sowie geringer Linienbreite.



Abb. 1 Die neue Diodenlaser-Stuerelektronik verbindet interaktive Touch-Bedienung mit ausgezeichneten Rauscheigenschaften.

nung mit ausgezeichneten Rauscheigenschaften.

Lasersteuerung auf Fingerzeig

Eine neue Steuerelektronikgeneration ergänzt nun die ausgezeichneten opto-mechanischen Eigenschaften der Laserköpfe durch ein modernes digitales Konzept zur Ansteuerung bei gleichzeitig verbesserten Rauschwerten (Abb. 1). Die neue Steuereinheit verbindet ein modernes „Look-and-Feel“ mit zusätzlichen Freiheitsgraden aus der „digitalen Welt“, wie Computer-/Netzwerk-Steuerung, Speicherung von wichtigen Systemparametern und vereinfachte Integration in digitale Experimentsteuerungen. Die Elektronik beinhaltet einen Strom- und Temperatur-Controller für die Laserdiode sowie einen Piezo-Controller für die Steuerung des Gitters im ECDL. Ein FPGA Main Controller übernimmt die Kommunikation mit den Controllern und erzeugt Scan-Signale zur modensprungfreien Durchstimmung oder zur „Lock-In“-Modulation der Laserfrequenz. Er ist auch in der Lage, Eingangssignale weiterzuverarbeiten.

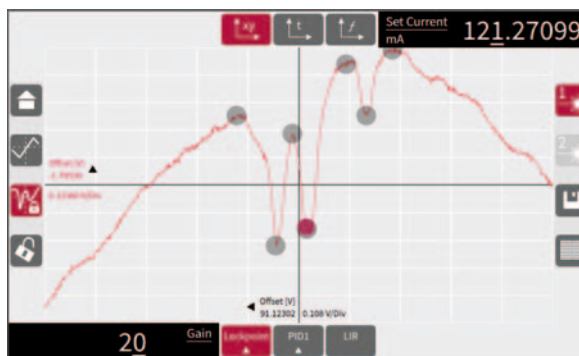
Die neue Bedienphilosophie bietet neben klassischen haptischen Bedienelementen wie Taster und Drehgeber zur „Blindbedienung“ nun auch einen kapazitiven Multi-Touch-Screen sowie die Möglichkeit zur Fernsteuerung mittels Computer. Ein Touch-Screen erlaubt es, Signale wie in einem Oszilloskop graphisch darzustellen und den Laser besonders intuitiv direkt zu steuern. Einfache Touch-Gesten verändern interaktiv, z. B. Scan-Amplitude und Scan-Offset.

Besonders komfortabel wird die Verarbeitung von Feedback aus dem Experiment. So lässt sich ein Spektroskopie-Signal direkt auf dem Touch-Screen darstellen und die Laserfrequenz sich per Fingerzeig auf das gewünschte „Feature“ schieben. Schnelle Digital-Analog (16 bit Auflösung, 100 kHz Bandbreite) und Analog-Digital (24 bit, 20 kHz) Wandler sorgen für die reibungslose Kommunikation zwischen Main-Controller und Laser/Experiment. Die hohe Auflösung der verwendeten Wandler erlaubt dabei eine präzise Digitalisierung

Dr. Marion Lang,
Dr. Rudolf Neuhaus,
Dr. Jürgen Stuhler,
TOPTICA Photonics
AG, Lochhamer
Schlag 19, 82166
Gräfelfing



Abb. 2 Das neuartige Gerätekonzept (DLC pro) besitzt ein Touch-Display (links), das nicht nur Messdaten anzeigt, sondern es auch erlaubt, Parameter wie Scan-Offset, Scan-Amplitude oder Lock-Merkmale interaktiv einzustellen. Automatisch



ermittelte Lock-Punkte (rechts, gekennzeichnet durch Kreise im Spektrum) lassen sich einfach durch Antippen auswählen. Dadurch wird der Laser auf das ausgewählte Merkmal stabilisiert.

Best of

von Photodiodensignalen und anderen Steuer- und Fehlersignalen aus der Anwendung sowie die exakte Ausgabe von Analogsignalen, etwa für Laserstrom und Piezospaltung.

Die neue Bedienphilosophie geht jedoch noch einen Schritt weiter und revolutioniert den mit Abstand häufigsten Anwendungsfall: die aktive Stabilisierung der Laserfrequenz auf ein „Spektroskopie“-Signal. Hierfür enthält die Steuerelektronik einen digitalen Lock-In-Verstärker sowie zwei digitale Proportional-Integral-Differential-Regler mit 20 kHz Regelbandbreite. Regler und Verstärker lassen sich über den Touch-Monitor oder auch ferngesteuert am Computer bedienen. Die Steuerelektronik ermittelt automatisch geeignete Lock-Punkte (je nach Vorauswahl eine Flanke oder Maxima und Minima eines Spektrums) und stellt diese am

Monitor durch Kreise im Spektrum dar (Abb. 2, rechts). Die Frequenzstabilisierung des Lasers ist einfach durch Antippen eines dieser Merkmale auf dem Touch-Display (bei Ansteuerung über die mitgelieferte PC-Software per Mausclick) zu starten. Der Scan wird automatisch beendet, der Laser auf das ausgewählte spektrale Merkmal gefahren und dort aktiv stabilisiert.

Das konsequent digitale Konzept ermöglicht zudem die Lasersteuerung aus der Ferne. Dafür steht eine graphische Computersoftware zur Verfügung, die über eine der integrierten Schnittstellen (USB/Ethernet) mit der Steuerelektronik kommunizieren kann. So kann man den Laser inkl. Frequenzstabilisierung bequem vom Steuerrechner aus bedienen. Dabei kann das eigentliche Experiment auch tausende Kilometer weit entfernt stattfinden.

Verbesserte Eigenschaften

Der Schritt in die „digitale Welt“ bietet aber nicht nur eine bequeme und zeitgemäße Lasersteuerung, sondern erzielt – richtig durchgeführt – gleichzeitig verbesserte Rausch- und Stabilitätseigenschaften im Vergleich zu allen bisher kommerziell erhältlichen Systemen.

Die integrierten Stromtreiber liefern Ströme bis zu 500 mA mit einer Auflösung von 0,2 μ A (>20 Bit) und einer Modulationsbandbreite von 30 kHz. Abb. 3 zeigt die Rauschleistungsdichte des neuen Diodenlaser-Stromtreibers im Vergleich mit dem nächstbesten analogen 500-mA-Treiber. (Bei niedrigen Frequenzen sowie bei 50 Hz und Vielfachen ist die Messung durch die verwendete Messapparatur limitiert.) Der neue digitale Treiber zeigt in allen Frequenzbereichen niedrigeres Strom-

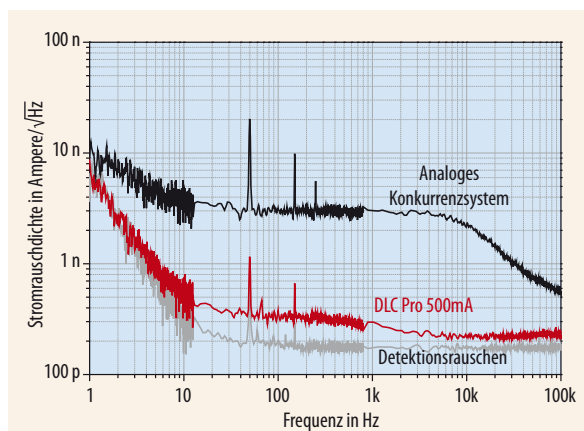


Abb. 3 Rauschleistungsdichte des neuen digitalen Diodenlaser-Stromtreibers im Vergleich zu einer analogen Steuerelektronik: In allen Frequenzbereichen ist die neue Elektronik (rot) rauschärmer als bisherige Geräte (schwarz).

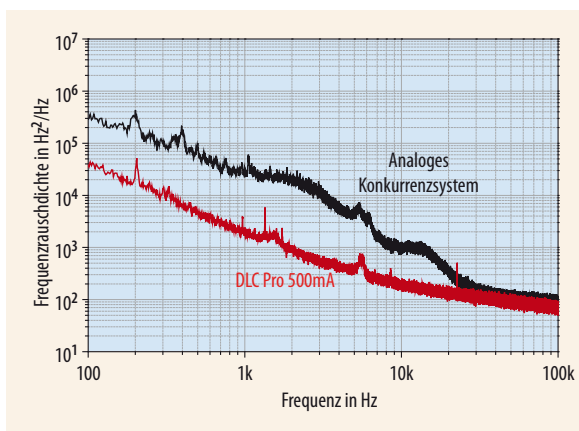


Abb. 4 Frequenzrauschspektrum [2] eines DL pro mit digitaler bzw. analoger Treiberelektronik (Strom und Piezo) im Vergleich: Verbesserte Strom- und Spannungsrauschwerte von Stromtreiber bzw. Piezotreiber führen zusammen zu einem deutlich geringeren Frequenzrauschen.

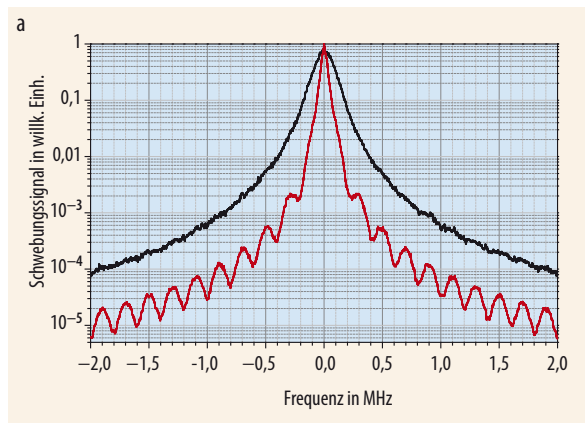
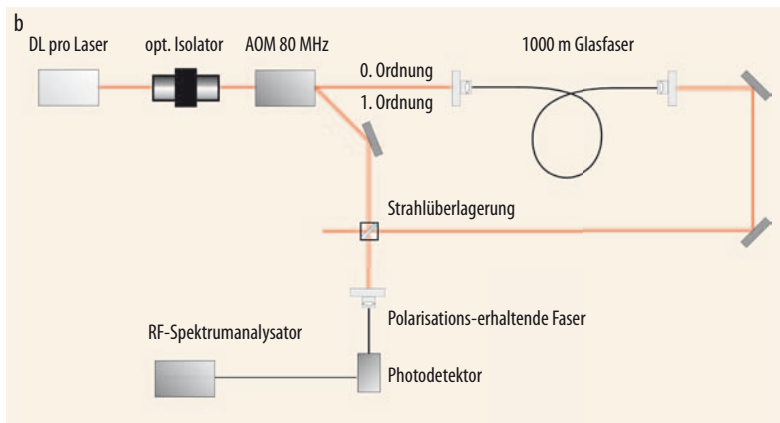


Abb. 5 Selbst-heterodyne Linienbreitenmessung eines nicht frequenzstabilisierten Diodenlasersystems (DL pro bei 729 nm) mit einer Faserverzögerungsstrecke von 1 km (a). Die Messung demonstriert eine schnelle Linienbreite (5 μ s) von 50 kHz mit



konventioneller Steuerelektronik (schwarz) und von 5 kHz mit der digitalen Elektronik (rot). Zur Linienbreitenmessung dient der dargestellte Aufbau (b).

rauschen. Insbesondere liegen etwaige digitale Takte unterhalb des Detektionslimits. Es werden Stromrauschdichtewerte von 280 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 kHz, bzw. niederfrequente Stromrauschamplituden von weniger als 50 nA peak-peak (im Bereich von 0,1 bis 10 Hz) erreicht. Eine ebenso wichtige Rolle für die Feinabstimmung und die Rausch-armut eines ECDL (z. B. DL pro) spielt die Qualität des Piezocontrollers. Der integrierte Piezotreiber besitzt eine Auflösung von 20 Bit und zeigt eine Spannungsrauschdichte von weniger als 150 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei 1 kHz. Dank dieser Treiber-verbesserungen kann der DL pro seine optomechanischen Qualitäten nun voll ausspielen. Das verdeutlicht das Frequenzrauschspektrum eines DL pro mit der neuen Steuerelektronik (Abb. 4).

Das reduzierte Frequenzrauschen führt zu einer schmalen Linienbreite (Abb. 5a). Zur Messung der Linienbreite des freilaufenden Lasers wurde der Laserstrahl in einem akusto-optischen Modulator (AOM) aufgespalten [3]. Der Teilstrahl erster Ordnung wird dabei um 80 MHz frequenzverschoben. Ein Teilstrahl durchläuft eine 1 km lange Glasfaser und erfährt eine Verzögerung um 5 μ s. An einem Strahlteilerwürfel werden beide Strahlen wieder überlagert. Das Schwebungssignal wird von einer schnellen Photodiode gemessen und von einem RF-Spektrumanalysator ausgewertet (Abb. 5b). Ist die Kohärenzlänge des Lasers größer als

die Faserlänge, ergibt sich statt einer Lorentz-Kurve ein Delta-Peak mit Modulationsmuster, aus dem sich die Linienbreite berechnen lässt [4]. Im dargestellten Fall eines freilaufenden DL pro bei 729 nm konnte durch die neue Steuerelektronik die schnelle Linienbreite um einen Faktor 10 auf 5 kHz reduziert werden.

Häufig spielt jedoch nicht nur die schnelle Linienbreite eine Rolle, sondern auch die Langzeitstabilität der Laserfrequenz. Diese wird durch Langzeitdriften der Temperatur-, Piezo- und Stromcontroller beeinflusst, die unter anderem durch Änderungen der Umgebungstemperatur verursacht sein können. Auch hier hat die digi-

tale Steuerelektronik mit Werten von 140 ppm/K (Temperatur), 40 ppm/K (Piezospannung) und <3 ppm/K (Strom) Vorteile. Abb. 6 zeigt exemplarisch und in eindrucksvoller Weise die resultierende Stabilität der Temperatur des Laserresonators bei verändernder Umgebungstemperatur der Steuerelektronik.

Zum Abschluss soll noch eine Beat-Messung zweier unabhängiger freilaufender DL pro Laser bei 1160 nm, die Auswirkungen der technischen Vorteile der digitalen Steuerelektronik zusammenfassen (Abb. 7). Bei einer Sweeptime von 2,5 s ergibt sich unter der Annahme gleichen aber unabhängigen

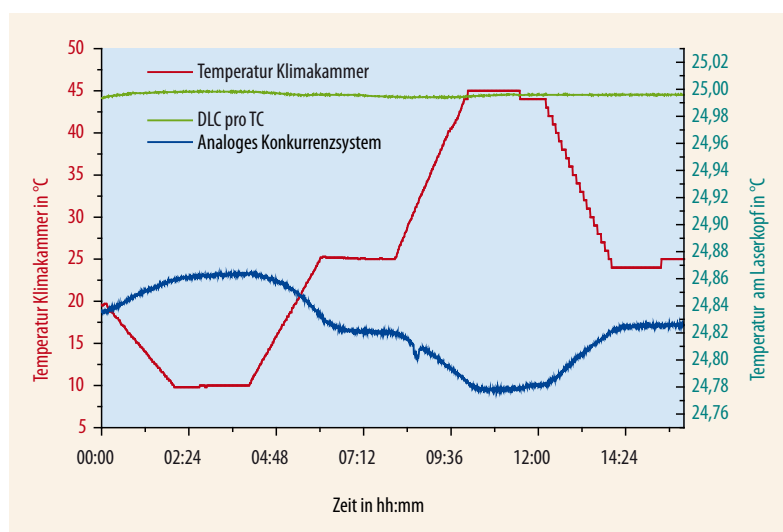


Abb. 6 Die Temperatur (rechte y-Achse) am Laserresonator (außerhalb der Klimakammer) wurde gemessen, während die Steuerelektronik in der Klimakammer einem Temperaturgang von 10 bis 45 °C (rot, linke y-Achse) ausgesetzt wurde.

Die analoge Vergleichselektronik (blau) erreicht dabei eine sehr gute Stabilität von < 0,1 K peak-peak. Die digitale Steuerelektronik (grün, DLC pro) erzielt um etwa einen Faktor 20 bessere Werte.

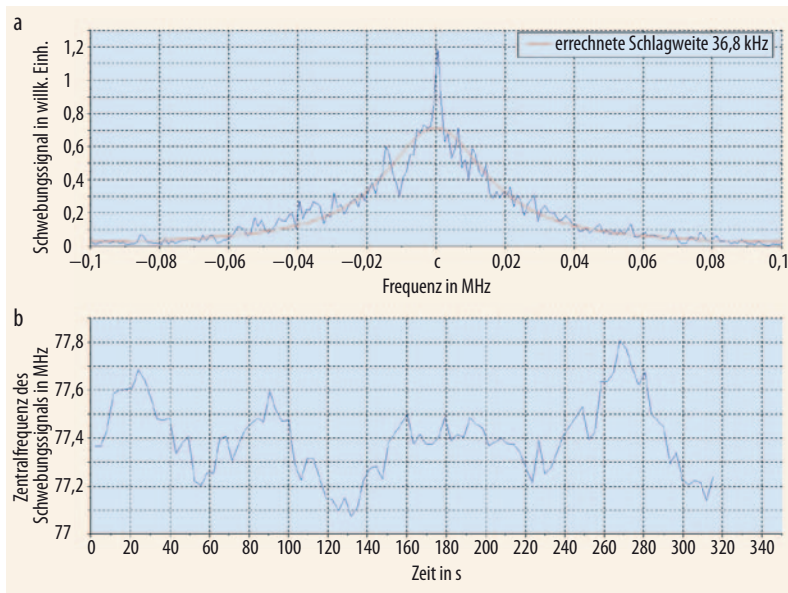


Abb. 7 Schwebungsmessung zweier freilaufender DL pro Laser bei 1160 nm mit neuer digitaler Steuerelektronik (a) und

Variation der ermittelten Zentralfrequenz des Schwebungssignals mit der Zeit (b).

Verhaltens beider Laser eine Linienbreite (halbe Schwebungsbreite) von <20 kHz. Der Absolutwert der Schwebungsfrequenz der beiden Laser ändert sich innerhalb von mehr als fünf Minuten um etwa 350 kHz peak-peak pro Laser.

Mögliche Anwendungen

Neben bequemer und moderner Bedienung im Labor bietet die digitale Steuerelektronik auch einfache Fernbedienung, z. B. aus einem Steuerzentrum. In Verbindung mit der Langzeitstabilität sind so hochpräzise Laseranwendungen an schwer zugänglichen Orten möglich. Ein Beispiel hierfür sind LIDAR (Light Detection And Ranging) Untersuchungen der Temperatur, Zusammensetzung und Bewegung verschiedener atmosphärischer Schichten in der Arktis. Hierfür werden schmalbandige ECDL-Laser auf Fabry-Perot Interferometer oder Atomübergänge frequenzstabilisiert und kommen als Seed-Laser für gepulste Hochleistungslaser zum Einsatz. Mit der neuen digitalen Steuerelektronik lässt sich der Seed-Laser von der ganzen Welt aus kontrollieren.

Die herausragenden technischen Eigenschaften der neuen digitalen Steuerelektronik sind für alle Expe-

rimente von Vorteil. Je mehr Laser im Spiel sind, desto wichtiger ist, dass jeder Laser eine hohe Stabilität aufweist und z. B. keine große Drift oder keinen Modensprung zeigt. Bei Anwendungen wie optischen Atomuhren [5], die Laser mit Linienbreiten im Bereich weniger Hertz oder darunter zuverlässig über lange Zeiträume einsetzen müssen, zeigt die neue Elektronik ihr ganzes Potenzial. Die geringe Rauscharmut vereinfacht es, die Laser auf Hz-Linienbreiten zu stabilisieren, während die geringen Driften zu extrem langen Modensprungstabilitäten führen.

Literatur

- [1] S. A. Diddams, J. C. Bergquist, S. R. Jefferts und C. W. Oates, *Science* **306**, 1318 (2004)
- [2] O. Llopis, P. H. Merrer, H. Brahim, K. Saleh und P. Lacroix, *Opt. Lett.* **36**, 2713 (2011)
- [3] H. Ludvigsen und E. Bodtker, *Opt. Commun.* **110**, 595 (1994)
- [4] G. Di Domenico, S. Schilt und P. Thoman, *Appl. Opt.* **49**, 4801 (2010)
- [5] M. Lang, *It's Time for New Clocks. Physics' Best*, April 2012, S. 22