



Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Faseroptische Referenzen für die absolute Frequenzmessung
und Stabilisierung von Lasern

Faseroptische Referenzen für die absolute Frequenzmessung und Stabilisierung von Lasern

Im Rahmen des durch die Baden-Württemberg Stiftung finanzierten Projekts „FASOR“ wurden neue optische Faser-Resonatoren für die hochpräzise Messung und Stabilisierung von Laserfrequenzen entwickelt. Die Lichtwellenleiterbasierte Technologie gewährleistet eine einfache Handhabung, hohe Stabilität und Einsetzbarkeit in industriellen Umgebungen. Im Forschungsprojekt wurden Dispersions-eigenschaften von Faser-Resonatoren systematisch untersucht. Die absolute Stabilisierung des freien Spektralbereichs und der Länge eines Faser-Resonators erfolgte mithilfe eines Einmodenlasers auf hochpräzise Radiofrequenz-Referenzen. Mit einer kompakt integrierten atomaren Spektroskopie-Referenz konnte eine absolute Frequenzkalibration des Systems erzielt werden.

Für die Messung der Wellenlängen von Lasern haben sich Techniken auf der Grundlage von Gitterspektrometern [1] sowie Michelson- und Fizeau-Interferometern [2] erfolgreich etabliert. Kommerziell sind derartige Instrumente im Genauigkeitsbereich zwischen 10^{-5} und 10^{-8} der optischen Wellenlänge erhältlich [3,4]. Grenzen für die Genauigkeit werden durch Materialeigenschaften der optischen Komponenten und Grenzen für ihre Messgeschwindigkeit durch die mechanische Bewegung von Spiegeln (Michelson-Interferometer) bzw. durch die Zeitdauer der numerischen Auswertung von Interferogrammen (Fizeau-Interferometer) gesetzt. Für eine schnelle und absolute Frequenzstabilisierung von Lasern werden daher überwiegend spektroskopische Techniken eingesetzt, wobei diese auf schmale Spektralbereiche um atomare oder molekulare Resonanzen beschränkt sind.

Der neue Lösungsansatz für die Messung von Laserfrequenzen beruht auf

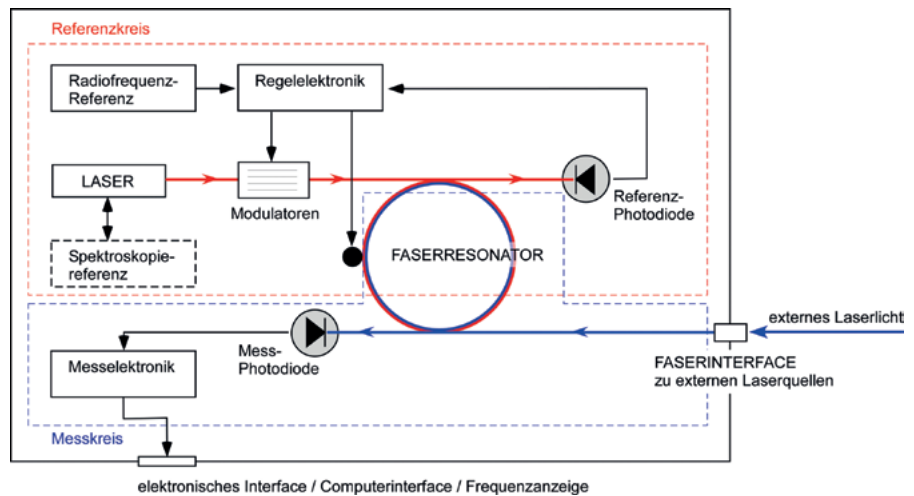


Abb. 1: Systemdiagramm
Die Länge eines Faser-Resonators wird mit Hilfe von Radiofrequenz- und spektroskopischen Referenzen stabilisiert und gemessen (Referenzkreis). Die Absolutfrequenz von externen Laserquellen wird am Faser-Resonator gemessen (Messkreis)

einem Faser-Resonator, dessen freier Spektralbereich und dessen Länge mit Hilfe eines integrierten Lasers auf eine hochpräzise Radiofrequenz-Referenz stabilisiert werden. Mit einer atomaren Spektroskopie-Referenz wurde eine absolute Messgenauigkeit im Bereich von 10^{-10} erreicht. Die Systemkomponenten sind kompatibel mit einem Faserinterface zu externen Lasersystemen und versprechen daher eine einfache Handhabung. Das Messprinzip ist in einem großen optischen Spektralbereich ($0,488 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}$) anwendbar und kompatibel mit einer hohen Messrate bis zu mehreren Megahertz. Der Faser-Resonator wurde gemeinsam mit der kanadischen Firma Evanescent Optics entwickelt und basiert auf verlustarmen, evaneszenten Faser-Kopplern [5].

Messschema

Im durchgeführten Messbeispiel wurde die Frequenz eines gitterstabilisierten Einmodenlasers mit einer Wellenlänge von 780 nm auf einen atomaren Hyperfeinübergang der Rubidium D2 Linie mit einer absoluten Genauigkeit von 10^{-10} stabilisiert [6, 7]. Die mit einem fasergekoppelten elektro-op-

tischen Modulator erzeugten Seitenbänder wurden nach dem Pound-Drever-Hall-Verfahren (PDH) genutzt, um ein Fehlersignal zwischen der Länge des Resonators und der Wellenlänge des Referenzlasers zu erzeugen [8]. Durch einen Piezo-Aktor, der die Länge des Faser-Resonators verändert, konnte diese mit der relativen Genauigkeit des Referenzlasers konstant gehalten werden. Die Messung der effektiven optischen Länge L_{eff} wurde durch eine Messung des freien Spektralbereichs FSR durchgeführt.

$$FSR = c / L_{\text{eff}} \quad (1)$$

Dazu wurden durch den elektro-optischen Modulator weitere Seitenbänder erzeugt, die zusätzliche Moden des Resonators ausleuchteten. Mit einem Regelkreis basierend auf dem Lock-In-Verfahren konnte die Präzision von Radiofrequenzreferenzen genutzt werden, um den FSR und damit auch die Länge des Resonators präzise zu bestimmen. Da nun die Länge konstant gehalten wurde, die Frequenz einer Resonatormode und der Frequenzabstand der anderen Resonatormoden bekannt war, konnten externe,

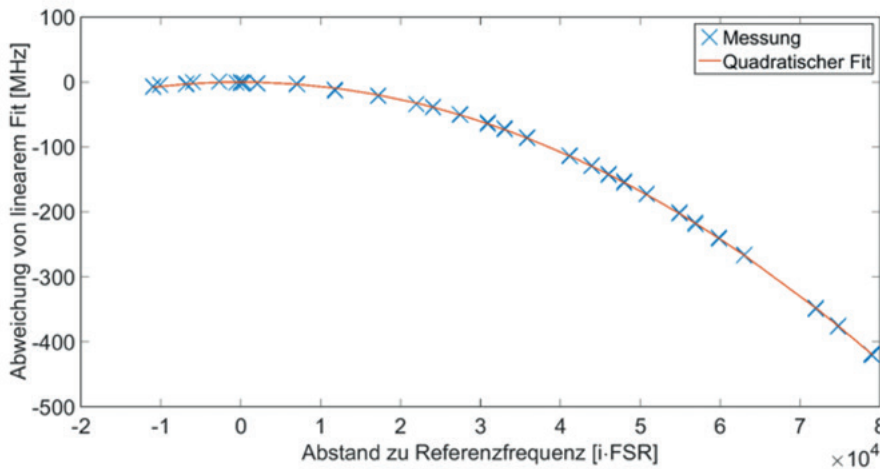


Abb. 2: Dispersionsmessung mit quadratischer Anpassungsfunktion

In dieser Darstellung wurde auf der X-Achse der Frequenzabstand zum Referenzlaser in Anzahl FSR dargestellt, auf der Y-Achse der Frequenzabstand. Die Abweichungen betragen bis zu 10⁻⁶ (450 MHz) bei dieser Messung. Gut zu erkennen ist auch, dass sie sich durch eine quadratische Funktion präzise beschreiben lassen

unbekannte Laserfrequenzen gemessen werden. Zur absoluten Frequenzmessung ist es zusätzlich nötig, den Abstand von $i \cdot \text{FSR}$ ($i \in \mathbb{N}$) zur Referenzmode des Resonators zu bestimmen. Am einfachsten ist dies mit einem Wellenlängenmessgerät möglich, bei dem die Genauigkeit besser als der FSR des Faser-Resonators sein muss. In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung des Konzepts zu sehen.

Dispersion

Nach Gleichung (1) hängt der FSR eines Resonators nur von der konstanten Vakuumlichtgeschwindigkeit und der Länge für einen Umlauf im Resonator ab. Da der Brechungsindex der Glasfasern (Quarzglas) bei ungefähr $n = 1,45$ liegt, verlängert sich die effektive optische Resonatorlänge um diesen Faktor im Vergleich zur geometrischen Resonatorlänge. Die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge wird als Dispersion bezeichnet. Durch die Verwendung des Referenzlichts und der Messung des FSR bei dieser Wellenlänge spielt der absolute Wert des Brechungsindex keine Rolle. Wichtig ist jedoch ihre

relative Änderung, da sich dadurch Abweichungen bei der Wellenlängenmessung ergeben können. Die Untersuchungen wurden mit einem weiteren Einmodenlaser durchgeführt, indem seine Frequenz mit einer zweiten PDH-Stabilisierung auf unterschiedliche Moden des Faser-Resonators geregelt wurde. Um die stabilisierten Wellenlängen zu überprüfen, wurden sie mithilfe eines Wellenlängenmessgeräts vom Typ WS7 der HighFinesse GmbH gemessen [4]. Dabei kam ein Faser-Umschalter zum Einsatz, so dass gleichzeitig die Wellenlängen des Referenzlasers und des Testlasers gemessen werden konnten [9]. Die Messungen bestätigten, dass der FSR in erster Näherung konstant ist. Bei genauerer Betrachtung der Differenz der linearen Interpolation mit den Messdaten wurden die erwarteten Abweichungen deutlich, die bis zu 450 MHz und damit relativ 10⁻⁶ betragen (Abb. 2). Um die Dispersion im gegebenen Lichtwellenleiter zu modellieren, wurde eine lineare Änderung des Brechungsindex mit der Wellenlänge angenommen. Dadurch ergibt sich eine quadratische Anpassungsfunktion:

$$\Delta f(i) = -A \cdot i^2 + B \cdot i - C. \quad (2)$$

Dabei beschreibt Δf den Frequenzabstand zur Referenzfrequenz und i die Anzahl an FSR bis zur Referenzfrequenz. Durch Anpassen der Parameter A, B und C lässt sich die Dispersion des Faser-Resonators sehr gut charakterisieren und die maximalen Abweichungen zwischen Messungen und Fit sind kleiner als 5 MHz.

Genauigkeit der optischen Frequenzmessung

Um die Messgenauigkeit zu demonstrieren, wurde der Test-Laser auf unterschiedliche Moden des Faser-Resonators stabilisiert. Die Wellenlänge wurde mit dem Wellenlängenmessgerät überprüft. Abbildung 5 zeigt die gemessene Allan-Abweichung und demonstriert, dass nach Mittelungszeiten von mehr als 200 ms die Genauigkeit im Bereich von 10⁻¹⁰ liegt lag. Bei kürzeren Mittelungszeiten machen sich akustische Störungen, welche die Länge des Faser-Resonators beeinflussen, bemerkbar.

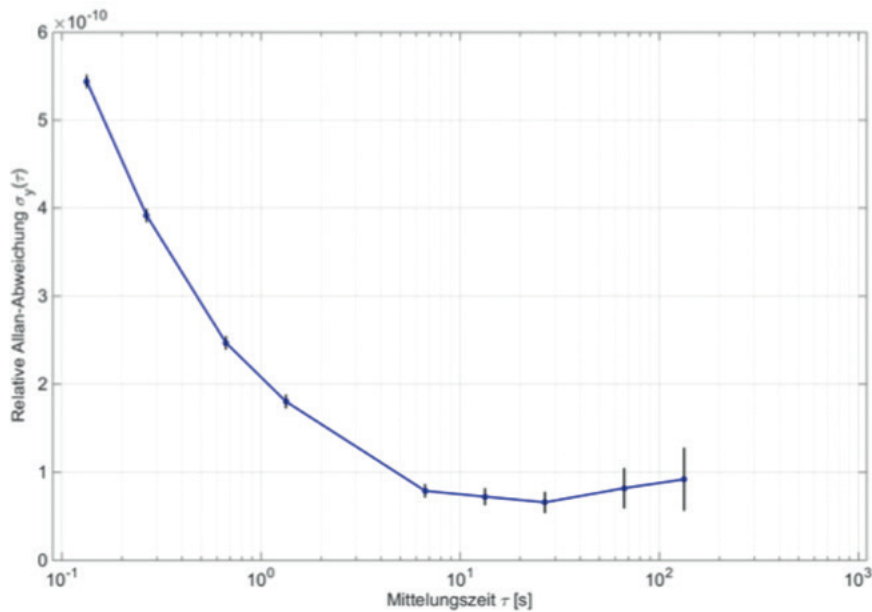


Abb. 3: Allan-Abweichung der Frequenz eines durch den Faser-Resonator stabilisierten Lasers

Ausblick

Mithilfe von Faser-Resonatoren und geeigneten Methoden lassen sich absolute Frequenzen von Lasern hochgenau bestimmen. Im Projekt „FASOR“ wurden dazu von uns geeignete Messtechniken entwickelt, die auf hochpräzisen Laser-Spektroskopien und Radio referenzen basieren. Diese Techniken können auch für die Anwendung mit klassischen Freistrahl-Resonatoren genutzt werden. Die Entwicklung von optimierten Faser-Resonatoren wird in Zukunft eine wichtige Rolle für den weiteren Erfolg der Laser-Frequenzmessung mithilfe dieser Methode spielen.

Referenzen

- [1] M. Czerny and A. F. Turner, Z. Physik (Zeitschrift für Physik) 61, 792 (1930).
- [2] W. Demtröder, Laserspektroskopie 1. Grundlagen (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011).
- [3] I. Bristol Instruments, Bristol Instruments | Wavelength Meters, Wavemeters, Laser Spectrum Analyzers, Thickness Measurement, Burleigh Support, 2015, www.bristol-inst.com/, accessed Dec 2, 2015.
- [4] HighFinesse GmbH, HighFinesse GmbH | Laser and Electronic Systems, 2015, www.highfinesse.com/, accessed Dec 2, 2015.
- [5] Evanescent Optics Inc., Evanescent Optics Inc., 2016, <http://www.evanescentoptics.com/>, accessed Nov 24, 2016.
- [6] D. J. McCarron, S. A. King, and S. L. Cornish, Meas. Sci. Technol. 19, 105601 (2008).
- [7] J. Ye, S. Swartz, P. Jungner, and J. L. Hall, Optics letters 21, 1280 (1996).
- [8] E. D. Black, Am. J. Phys. 69, 79 (2001).
- [9] K. Saleh et al., Applied optics 54, 9446 (2015).

Kontakt

Dr. Florian Karlewski,
florian.karlewski@uni-tuebingen.de

Prof. Dr. József Fortágh,
fortagh@uni-tuebingen.de

Adresse:
 CQ Center for Collective Quantum Phenomena and Their Applications,
 Physikalisches Institut, Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Auf der Morgenstelle 14
 72076 Tübingen

www.physik.uni-tuebingen.de
 Tel.: 07071 2976305