



# Vom Wellenmessen zum Frequenzzählen

Neuartige Wellenlängen-Messgeräte setzen Maßstäbe hinsichtlich Präzision und Messgeschwindigkeit

Anselm Deninger, Manfred Hager, Frank Lison und Thomas Fischer

Seit der Erfindung des Lasers gehören Wellenlängen-Messgeräte (WLM) zum unverzichtbaren Instrumentarium in Forschung, Entwicklung, Produktion und Qualitätssicherung von Lasertechnologien. Dieser Artikel fasst wesentliche Verfahren zur hochauflösenden Wellenlängenmessung zusammen und zeigt aktuelle Entwicklungen und neue Einsatzgebiete von WLMs auf.

Im Laborjargon werden häufig die Eigenschaften von WLMs und Spektrometern vermischt. Ein Spektrometer nutzt die Dispersion eines Prismas oder Gitters zur räumlichen Ablenkung und Aufspaltung eines Lichtstrahls und bestimmt aus dem Strahlversatz des untersuchten Teststrahls und der resultierenden räumlichen Breite die Wellenlänge. An die Lichtquelle werden keinerlei Anforderungen hinsichtlich der Kohärenz gestellt. Ein WLM benötigt hingegen kohärentes Laserlicht, da das Messprinzip

auf der Auswertung eines Interferenzmusters basiert. Historisch wurden Spektrometer bereits lange vor der Erfindung des Lasers verwendet und später vor allem für die optische Telekommunikation weiterentwickelt („Optical Spectrum Analyzers“). Obgleich für die Laser-Wellenlängenmessung technisch überholt, sind Spektrometer nach wie vor im Einsatz, beispielsweise zur Charakterisierung der (industriell relevanten) Breitstreifen-Laserdioden, deren Licht nur sehr geringe Kohärenz besitzt.

Die beiden wichtigsten Ausgabeparameter eines WLMs sind üblicherweise Wellenlänge und Linienbreite des zu vermessenden Lasers. Wird die Wellenlänge unter definierten Bedingungen, d. h. in einem Medium mit bekanntem Brechungsindex, gemessen, so lässt sich die Laserfrequenz und damit die Photonenenergie berechnen. Linienbreite und hochfrequentes Driften des Lasers („Jitter“) charakterisieren hingegen die zeitliche Kohärenz des Laserlichts.

## Verfahren zur Wellenlängen-Messung

Die ältesten WLMs waren Michelson-Interferometer, bei denen die Länge eines der Arme veränderlich war. Eine unbekannte Wellenlänge wurde durch den gleichzeitigen Vergleich mit einem Laserstrahl bekannter Wellenlänge bestimmt, etwa einem (Jod- oder Zeeman-stabilisierten) HeNe-Laser. Um eine hinreichende Wellenlängenpräzision im Referenzlicht zu erhalten, ist eine genaue Kenntnis der atmosphärischen Bedingungen am Ort der Messung unabdingbar.

In der Folgezeit haben Diplomanden und Doktoranden weltweit zahllose Derivate dieses Messprinzips aufgebaut. Das bekannteste kommerzielle Modell ist sicherlich das „Wavemeter“ der Firma Burleigh, das auf Arbeiten von John Hall und seinen Mitarbeitern am NIST zurückgeht [1]. Die Messrate liegt hier typischerweise in der Größenordnung einiger Hertz; die minimal erforderliche Laserleistung beträgt einige mW. Die allermeisten Experimente haben es jedoch trotz der hohen Messgenauigkeit nicht erlaubt, die Wellenlänge synchron mit spektroskopischen Messdaten zu erfassen – die Datenakquisition war für eine „online“-Messung zu langsam. Zudem machten die beweglichen Komponenten eine aufwändige optische und mechanische Isolierung des Wavemeters vom eigentlichen Experiment notwendig.

In jüngerer Zeit haben Messinstrumente auf der Basis von Festkörper-Etalons die technologische Vorreiterrolle übernommen. Hochpräzise WLMs, wie beispielsweise die von TOPTICA vertriebene WS-Serie des Herstellers High Finesse/Angstrom, bestehen aus mehreren Etalons, deren Oberflächen keilförmig angeordnet sind (sog. Fizeau-Interferometer). Zum schnellen und hochgenauen Auslesen der Interferenzmuster werden mo-

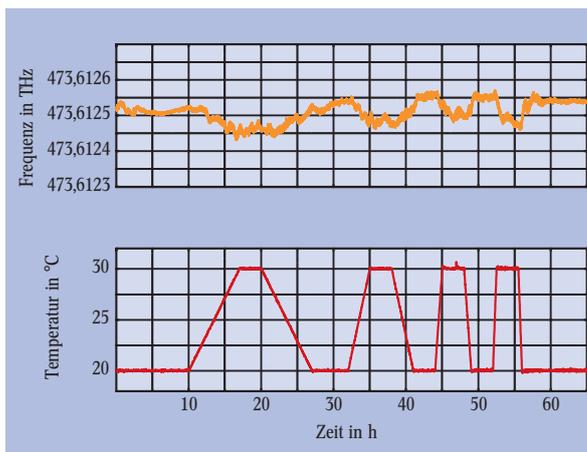


Abb. 1: Test eines WS/7 in der Klimakammer. Die obere Kurve zeigt die gemessene Frequenz eines stabilisierten HeNe-Lasers, die untere Kurve den an der Klimakammer eingestellten Temperaturverlauf.

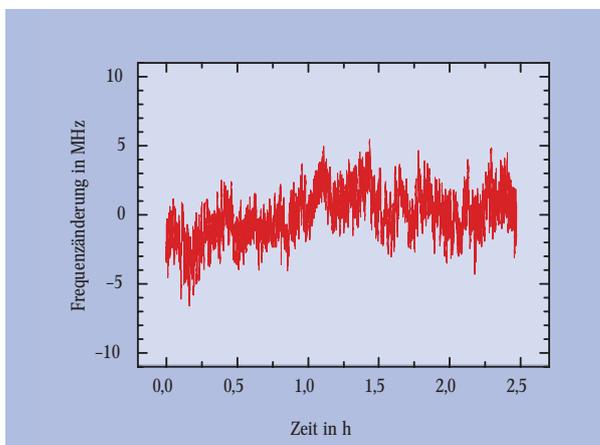


Abb. 2: Frequenzstabilität eines Diodenlasers, stabilisiert auf ein WS/Ultimate. Die Frequenzabweichung wurde mit einem Quadratur-Interferometer gemessen („iScan“) [2].

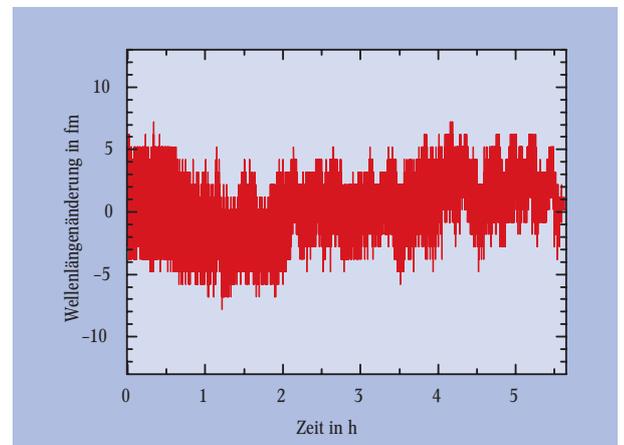


Abb. 3: Frequenzmessung eines stabilisierten HeNe-Lasers über fünf Stunden. Der Laser wurde über eine Single-Mode-Faser in ein WS/Ultimate eingekoppelt.

Dr. Anselm Deninger, Dipl.-Ing.  
Manfred Hager und  
Dr. Frank Lison,  
TOPTICA Photonics  
AG, Fraunhoferstraße  
14, 82152 Martinsried;  
Dr. Thomas Fischer,  
HighFinesse GmbH und  
Angstrom Ltd., Auf der  
Morgenstelle 14, 72076  
Tübingen



derne CCD-Detektoren verwendet. Derartige Systeme erlauben Messraten von bis zu 400 Hz; andererseits lässt sich bei sehr schwachen Laserintensitäten die „Belichtungszeit“ verlängern. Auf diese Weise reduziert sich die minimal erforderliche Laserleistung auf eine Größenordnung von nur mehr 10 nW, und diese Verlustleistung ist für die meisten Anwender problemlos akzeptabel.

**Stabile und robuste WLMs**

Obleich das zugrundeliegende Messprinzip auch hier eine akurate Abstandsmessung voraussetzt – der Abstand der spiegelnden Flächen der Festkörperetalons muss genau bekannt sein – wird der Einfluss des Brechungsindex des Zwischenmediums deutlich reduziert, da das gesamte System aus festen Blöcken mit bekannten Eigenschaften gefertigt ist. Lediglich die Temperatur muss am Ort der Messung präzise erfasst werden. Die WLMs der WS-Serie sind thermisch gekapselt, was wesentlich zur Erhöhung der Langzeitstabilität beiträgt. Ein interner Tem-

peratursensor bestimmt die verbleibenden thermischen Schwankungen, die in der Auswertung berücksichtigt werden (Abb. 1). Die schnelle Datennahme gewährleistet nicht nur eine synchrone Wellenlängenaufzeichnung während eines typischen Frequenz-„Scans“ des Lasers, sondern erlaubt darüber hinaus die Verwendung des Messsignals zur aktiven Wellenlängenstabilisierung (Abb. 2). Anwender in der Atmosphärenphysik, beispielsweise beim sog. Differential-Absorptions-LIDAR-Messverfahren, das die Intensitäten von rückgestreutem Laserlicht auf und neben einer Absorptionslinie vergleicht, profitieren von einer hochgenauen, langzeitstabilen Wellenlängenreferenz, die eine Abstimmung der Laseremission auf die gewünschte resonante oder nicht-resonante Wellenlänge ermöglicht.

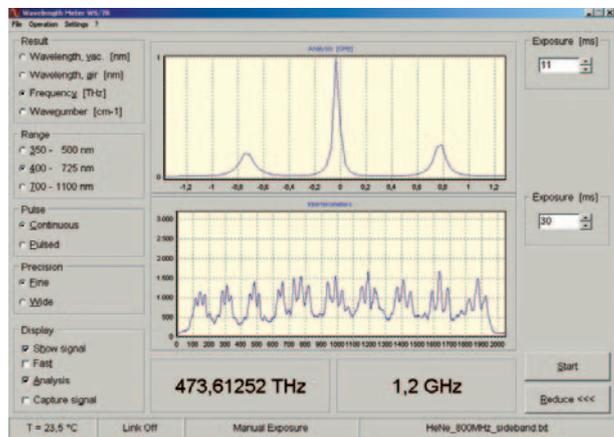


Abb. 4: Bildschirm Ausgabe der WS/7-Software mit Resolver-Option. Das obere Bild zeigt das Spektrum eines HeNe-Lasers (mit Seitenbändern), das untere die Interferenzmuster der Etalons.

peratursensor bestimmt die verbleibenden thermischen Schwankungen, die in der Auswertung berücksichtigt werden (Abb. 1).

Die schnelle Datennahme gewährleistet nicht nur eine synchrone Wellenlängenaufzeichnung während eines typischen Frequenz-„Scans“ des Lasers, sondern erlaubt darüber hinaus die Verwendung des Messsignals zur aktiven Wellenlängenstabilisierung (Abb. 2). Anwender in der Atmosphärenphysik, beispielsweise beim sog. Differential-Absorptions-LIDAR-Messverfahren, das die Intensitäten von rückgestreutem Laserlicht auf und neben einer Absorptionslinie vergleicht, profitieren von einer hochgenauen, langzeitstabilen Wellenlängenreferenz, die eine Abstimmung der Laseremission auf die gewünschte resonante oder nicht-resonante Wellenlänge ermöglicht.

Auch zur Messung der Wellenlänge gepulster Laser sind die Festkörperetalon-basierten WLMs geeignet. Sofern die Repetitionsfrequenz eines solchen Lasers unterhalb von 400 Hz liegt, lässt sich jeder einzelne Puls separat vermessen und analysieren. Einzige Bedingung ist eine hinreichende Kohärenz der gepulsten Lichtquelle (die aufgrund der Etalon-Geometrie erforderliche Linienbreite von < 40 GHz entspricht im Fourier-Limit einer Pulsdauer > 25 ps). Generiert man geeignete Zeitfenster, so lassen sich so-

gar zwei gepulste Wellenlängen gleichzeitig untersuchen. Damit können beispielsweise bei der Spektroskopie an Multi-Level-Atomen die Wellenlängen eines Pumpstrahls und eines Teststrahls („pump-and-probe experiment“) von einem einzigen WLM nicht nur kontrolliert, sondern auch einzeln stabilisiert werden. Die Absolutkalibrierung des Messgeräts lässt sich bei einer Standard-Auflösung von  $10^{-6}$  aufgrund der hohen Detektionsempfindlichkeit mit handelsüblichen Gasentladungslampen durchführen, deren Licht in eine Multi-Mode-Glasfaser eingekoppelt wird. Bei dem präzisesten kommerziell erhältlichen WLM mit einer Auflösung von  $4 \cdot 10^{-8}$  (WS/Ultimate) erfolgt hingegen die Kalibrierung mit einem frequenzstabilisierten Referenzlaser, dessen Licht über eine Single-Mode-Faser in das Messgerät eingekoppelt wird (Abb. 3). Die Langzeitstabilität dieser Messgeräte ist inzwischen nahezu ausschließlich durch die thermische Stabilität der integrierten Etalons begrenzt; atmosphärische Bedingungen spielen praktisch keine Rolle mehr.

Der Messbereich dieser Wellenlängenmeter wird nur durch die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten CCD-Detektoren begrenzt. Ersetzt man die handelsüblichen, preisgünstigen Silizium-Chips durch Materialien mit einer höheren Effizienz für UV- oder IR-Licht (die gegenwärtig zwar teuer, aber immerhin verfügbar sind), so lässt sich der Messbereich sowohl zu kürzeren als auch zu längeren Wellenlängen hin erweitern.

Da die Interferenzmuster aller Etalons parallel ausgelesen werden, sind im gesamten Messgerät keine beweglichen Teile notwendig, sodass praktisch kein Wartungsaufwand anfällt. Die Robustheit des Designs hat sich u. a. am Zentrum für angewandte Raumfahrt-technologie und Mikrogravitation in Bremen bewährt, wo ein WS/6 bei Fallexperimenten eingesetzt wurde [3]. Ein weiteres Anwendungsbeispiel, das extreme Anforderungen an mechanische Stabilität stellt, umfasst LIDAR-Experimente an Bord eines Forschungsflugzeugs im Rahmen eines internationalen Verbundprojektes.

Ist neben der Messung der Wellenlänge eine Kenntnis der Linienbreite erforderlich, so kann bei Lasern mit einer Linienbreite zwischen 0,5 und 40 GHz die spektrale Verteilung unmittelbar aus dem Interferenzmuster errechnet werden (Option Resolver, Abb. 4) Für spektrometrische Anwendungen kann

in das Gehäuse der Festkörper-Interferometer zusätzlich ein optisches Gitter mit einer Auflösung von besser als 0,1 nm integriert werden. Bei gepulsten Lasern mit einer Linienbreite zwischen 0,5 und 40 GHz ist das Gitter nicht einmal erforderlich; hier lässt sich die spektrale Breite unmittelbar aus dem Interferenzmuster errechnen (Option „Resolver“, s. Abb. 4).

**Neue Entwicklungen**

Das ultimative Ziel bei der Charakterisierung eines Lasers ist die direkte Frequenzmessung.<sup>1)</sup> An die Stelle interferometrischer Verfahren tritt hier die Auszählung der Oszillationen eines kohärenten Laserstrahls innerhalb eines festen Zeitintervalls, üblicherweise innerhalb einer Sekunde. Dank moderner Elektronik ist eine solche Auszählung bis in den Radiofrequenz-Bereich (RF) von einigen GHz möglich. Das Regime optischer Frequenzen in der Größenordnung einiger 100 THz bleibt jedoch unzugänglich, sofern man sich nicht mit einem Trick behilft und die optischen Frequenzen in den RF-Bereich herunterkonvertiert. Nationale Metrologie-Institute wie PTB, NPL oder NIST haben in der Vergangenheit Radiofrequenzen, die aus atomaren Standards wie der Cäsium-Atomuhr abgeleitet wurden, phasenstarr an optische Frequenzen gekoppelt und damit die RF-Präzision für optische Wellenlängen erreicht. Durch nichtlineare Prozesse wie Frequenzverdopplung, Frequenzvervielfachung und Frequenzteilung konnten mit sog. „Frequenzketten“ die bislang genauesten Messungen von Emissionsfrequenzen bzw. optischen Übergängen realisiert werden. So wurde für ausgewählte Frequenzen eine Präzision der Größenordnung  $10^{14}$  erreicht, was bereits an die Genauigkeit des Zeitstandards der Cäsium-Uhr heranreicht.

Ein in jüngster Zeit demonstriertes Verfahren könnte auch diese Messmethoden revolutionieren. Das Konzept eines „Frequenzkamms“ basiert auf spektral breiten, moden- und phasengekoppelten Femtosekundenlasern, deren Emissionsspektrum im Frequenzraum aus äquidistanten, phasenstarr gekoppelten Linien besteht [4]. Frequenz und Phase dieses Laserlichts können wiederum auf RF-Quellen stabilisiert werden. Damit rückt bei allen optischen Frequenzen eine Präzision von  $10^{17}$  und mehr in greifbare Nähe – zunächst nur für Experten, aber in den nächsten zwei Jahrzehnten sicherlich auch zu erschwinglichen Preisen für Forschungsinstitute in aller Welt.

**Literatur**

[1] J. L. Hall und S. A. Lee, Patent US 4,165,183 (1979)  
 [2] A. Deninger, Th. Müller-Wirts und F. Lison, Beilage zu Physik Journal Dezember 2003, S. 3  
 [3] www.zarm.uni-bremen.de  
 [4] Th. Udem, R. Holzwarth und T. W. Hänsch, Nature 416, 233 (2002)

1) Obleich Wellenlänge und Oszillationsfrequenz eines Lasers über die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft sind, ist die Frequenz oftmals die bevorzugte Messgröße, da sie im Gegensatz zur Wellenlänge beim Übergang von einem Medium in ein anderes gleich bleibt.