

## Ein hochgenaues optisches Frequenznormal

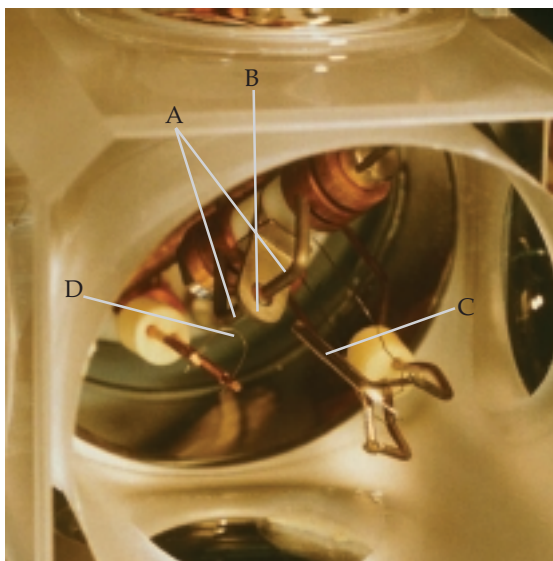
Mit Hilfe eines einzelnen gespeicherten Ytterbium-Ions wurde die Frequenz von blauem Laserlicht mit einer Genauigkeit von wenigen Hertz stabilisiert. Damit wurde eine der gegenwärtig weltweit genauesten Referenzfrequenzen im optischen Wellenlängenbereich etabliert.

Die SI-Einheiten für Zeit (Sekunde) und Frequenz (Hertz) sind die mit weitem Abstand am genauesten darstellbaren Maßeinheiten. Mit den besten Caesium-Atomuhren, die gegenwärtig an der PTB und in anderen Metrologie-Instituten routinemäßig betrieben werden, erreicht man bei der Darstellung von Zeittakten und Normalfrequenzen eine relative Genauigkeit von nahezu  $10^{-15}$  (siehe PTB-news 01.3). Für Präzisionsmessungen zur Bestimmung von Naturkonstanten sowie für Tests von grundlegenden physikalischen Theorien, die auf dem Vergleich präziser Uhren beruhen, sind allerdings atomare Frequenznormale mit noch höherer Genauigkeit und Kurzzeit-Stabilität dringend erwünscht. Erreichen lässt sich dieses Ziel, indem die Frequenz des Taktsignals gesteigert wird, mit dem die als Referenz dienenden Atome angeregt werden. Besonders vorteilhaft ist hier der Sprung vom Mikrowellen-Bereich (Caesiumuhr: 9,2 GHz) in den optischen Frequenzbereich (100 THz bis 1000 THz). Die Genauigkeit eines optischen Frequenznormals kann mit optischen Frequenzkamm-Generatoren (siehe PTB-news 00.3) in den Mikrowellenbereich und auf beliebige andere optische Frequenzen übertragen werden.

Ein einzelnes lasergekühltes Ion, das in einer Hochfrequenz-Ionenfalle gespeichert wird, bietet ein besonders hohes Genauigkeitspotenzial für optische Frequenznormale. Das an der PTB untersuchte  $^{171}\text{Yb}^+$  gehört zu den Ionen, bei denen die systematischen Störungen der atomaren Übergangsfrequenz bis zu einer relativen Messunsicherheit von  $10^{-18}$  kontrollierbar erscheinen. In den Experimenten dient das Resonanzsignal eines gespeicherten  $^{171}\text{Yb}^+$ -Ions dazu, die Frequenz eines spe-

ziellen 435,5 nm-Halbleiterlasersystems zu stabilisieren. Die auf diese Weise atomar festgelegte Laserfrequenz wird mit Hilfe eines Frequenzkamm-Generators und des Caesium-Referenznormals CSF1 der PTB gemessen. Bei der bisher erreichten  $1\text{-}\sigma$ -Unsicherheit von 6 Hz des Messwerts (688 358 979 309 312 Hz) überwiegt der Anteil der statistischen Messunsicherheit; die innerhalb mehrerer Wochen gemessenen Frequenzwerte unterscheiden sich nur um  $\pm 2,6$  Hz.

Gegenwärtig wird ein Experiment zum direkten Vergleich zweier  $^{171}\text{Yb}^+$ -Normale durchgeführt, um unabhängig von den Genauigkeits- und Stabilitätsgrenzen der Caesium-Referenz Informationen über den Einfluss der Speicherbedingungen auf die  $^{171}\text{Yb}^+$ -Übergangsfrequenz und die zu erwartende Messunsicherheit zu erhalten. Zukünftige Arbeiten zielen auf eine signifikante Reduzierung der Messunsicherheit hin.



Die im Experiment verwendete Ionenfalle: A) Kappenelektroden und B) Ringelektrode (Durchmesser 1,3 mm) zur Erzeugung des Quadrupol-Fallenfeldes; C) Ofen gefüllt mit Ytterbium, D) Glühdraht als Elektronenquelle

Weitergehende Informationen von C. Tamm, Tel. (05 31) 592-44 15, E-Mail: christian.tamm@ptb.de

## Nationales Netzwerk für die Rückführung in der chemischen Analytik

Chemische Analysen sind nicht nur außerordentlich zahlreich und vielfältig, sondern auch gesellschaftlich und kommerziell bedeutsam. Um diesen Messungen einen gemeinsamen und verlässlichen Bezugsrahmen zu geben, hat die PTB mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), dem Umweltbundesamt (UBA) sowie der Deutschen Gesellschaft für Klinische

Chemie (DGKC) ein Rückführungssystem für die chemische Analytik aufgebaut. Dieses nationale Netzwerk sichert in zunehmendem Maße die Rückführung der Messergebnisse auf das internationale Einheitensystem (SI). Damit werden die Glaubwürdigkeit und Akzeptanz erhöht und kostspielige Mehrfachmessungen in vielen Le-

Fortsetzung auf Seite 2

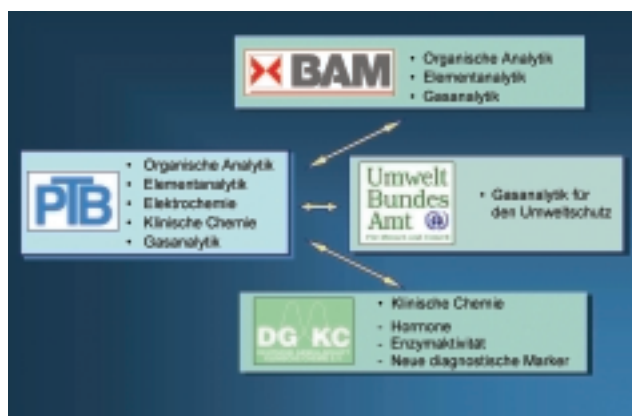
**bensbereichen (z. B. in der Medizin) überflüssig. Die Voraussetzungen für einen ungehinderten, weltweiten Handel und wirtschaftlichen Wettbewerb werden verbessert.**

In der chemischen Analytik verlangen deshalb immer mehr Kunden, Akkreditierstellen und Behörden, dass Messunsicherheiten anzugeben und die Messergebnisse auf anerkannte Bezugspunkte zurückzuführen sind. Dies findet seinen Ausdruck auch in der Anwendung der weltweit akzeptierten Norm ISO/IEC 17025 „Allgemeine Anforderungen an Kalibrier- und Prüflaboratorien“. Ein metrologisches Rückführungssystem in der Chemie gibt es bis jetzt in Teilbereichen: etwa für die klinische Chemie, für bestimmte Bereiche der Elektrochemie (pH-Wert, elektrolytische Leitfähigkeit) und für die Gasanalytik. Für die Elementanalytik wird ein solches Rückführungssystem gerade aufgebaut. Die Laboratorien auf der Arbeitsebene erhalten die für die Rückführung benötigten Kalibriermittel über eine Zwischenebene (z. B. im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) akkreditierte chemische Kalibrierlaboratorien) oder direkt von den Instituten der nationalen Bezugsebene (z. B. in Form von zertifizierten Referenzmaterialien).

Bisher kann in der Chemie nur ein Bruchteil der notwendigen Rückführungsketten mit den vorhandenen Strukturen abgedeckt werden. Das Rückführungssystem wird daher weiter ausgebaut. Im Rahmen des Netzwerks wird dabei die dezentral vorhandene Fachkompetenz auf dem Gebiet der chemischen Analytik gebündelt. Die PTB als gesetzlich

beauftragtes Institut, verantwortlich für Darstellung, Bewahrung und Weitergabe der Einheiten, hat darin eine Steuerungsfunktion. Innerhalb des Netzwerks werden die Aufgaben zwischen den Partnern nach Kompetenz und Kapazität aufgeteilt und alle Partner beteiligen sich selbstständig an internationalen Schlüsselvergleichen im Rahmen eines Abkommens der nationalen Metrologieinstitute. Neben dem Effizienzgewinn ermöglicht diese Struktur eine besonders zeit- und praxisnahe Einschätzung des metrologischen Bedarfs, der kontinuierlich mit den Anwendern abgestimmt wird. Ein nationales Netzwerk für die Metrologie in der Chemie ist ein neuer Ansatz zur Bewältigung der Vielfalt der Aufgaben in der Chemie. Die Strategie in Deutschland wird deshalb weltweit mit Interesse verfolgt.

Weitergehende Informationen von B. Güttler, Tel. (05 31) 592-32 00, E-Mail: bernd.guettler@ptb.de



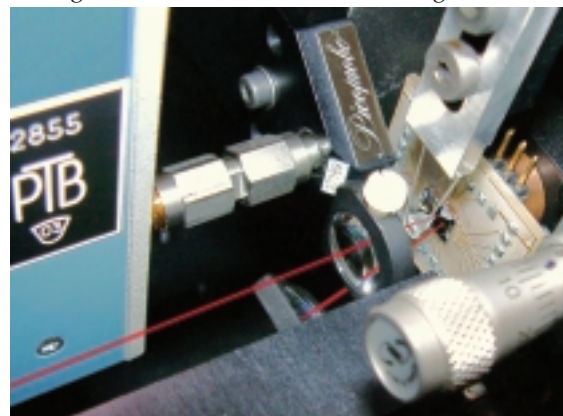
Die Partner im nationalen Netzwerk, das die metrologische Rückführung der chemischen Messungen in Deutschland sicherstellen soll. Die Pfeile symbolisieren die vertraglichen Beziehungen zwischen den Partnern.

## Messung ultrakurzer Oszilloskop-Anstiegszeiten

**Für eine korrekte Interpretation von Messungen mit Oszilloskopen muss deren Eigenanstiegszeit bekannt sein. Deshalb hat die PTB ein optoelektronisches Verfahren zur Bestimmung der Anstiegszeit von 50-GHz-Oszilloskopen entwickelt. Das Verfahren nutzt optische Femtosekunden-Pulse und erlaubt die rückführbare Messung von Oszilloskop-Anstiegszeiten von nur wenigen Pikosekunden.**

Breitbandige 50-GHz-Oszilloskope sind unentbehrliche Werkzeuge für die Entwicklung ultraschneller elektronischer Schaltungen in der Datenverarbeitungs- und Kommunikationstechnik. Diese Oszilloskope besitzen sehr kleine Eigenanstiegszeiten und erlauben daher die zeitliche Darstellung ultraschneller elektrischer Signale. Die Anstiegszeit ist jedoch nicht Null, sodass die Messkurven verzerrt sein können. Um die Verzerrung zu korrigieren, muss der Anwender die Anstiegszeit des Oszilloskops kennen. Zu deren Bestimmung bedarf es eines Messverfahrens mit noch höherer Zeitauflösung. Deshalb werden Methoden der Femtosekunden-Optik verwendet. Zur Bestimmung der Anstiegszeit von 50-GHz-Oszilloskopen werden etwa

1 ps kurze Spannungspulse auf einem koplanaren Wellenleiter erzeugt, indem ein fotoleitender Halbleiterschalter mit 100 fs kurzen Laserimpulsen kurzgeschlossen wird. Die Spannungspulse werden über eine Mikrowellen-Abtastspitze in das Oszilloskop eingekoppelt. Ein elektro-optisches Abtastverfahren erlaubt die Messung der Spannungspulse auf dem Wellenleiter mit einer Zeitauflösung von 300 fs. Aus solchen Messungen lässt



Halbleiterschaltung und Laserstrahlen (rot eingefärbt) zur Erzeugung und Vermessung ultrakurzer Spannungsimpulse.

Weitergehende Informationen von U. Siegner, Tel. (0531) 592-25 00, E-Mail: uwe.siegner@ptb.de

Fortsetzung auf Seite 3

sich die Verformung der Pulse auf dem Weg zum Oszilloskop bestimmen und ihre Form am Oszilloskopeingang berechnen. Die Entfaltung der Oszilloskopkurve mit den bekannten Eingangsimpulsen liefert die Übertragungseigenschaften des Oszilloskops, insbesondere dessen Anstiegszeit.

Erste Messungen an 50-GHz-Oszilloskopen ergaben Anstiegszeiten im Bereich von 7 ps; die erweiterte Messunsicherheit beträgt typisch 1,5 ps.

Derart kalibrierte Oszilloskope erlauben verlässliche Messungen in der Höchsthäufigkeitselektronik.

## Auszeichnungen für Andreas Bauch und Ekkehard Peik

Für Ihre Leistungen wurden Dr. Andreas Bauch und Dr. Ekkehard Peik, Mitarbeiter des Fachbereichs Zeit und Frequenz, auf dem diesjährigen IEEE Frequency Control Symposium, das gemeinsam mit dem Europäischen Forum für Zeit und Frequenz in Tampa veranstaltet wurde, ausgezeichnet.

Dr. Andreas Bauch erhielt den I. I. Rabi Award des IEEE „in recognition of outstanding contributions to the development, evaluation and operation of primary frequency standards“. Dr. Ekkehard Peik erhielt den „Prix Jeune Chercheur“ der Société Chronométrique de France „considering his achievements in several fields of frequency standards development“.

Herzlichen Glückwunsch!

## Neudefinition des Kelvin?

Die derzeitige Definition des Kelvin verknüpft die Temperatureinheit mit einer Materialeigenschaft. Vorteilhafter wäre es, stattdessen den Wert der Boltzmann-Konstanten geeignet festzulegen. Dazu muss dieser zunächst mit deutlich geringerer Unsicherheit als bisher bestimmt werden. Die PTB will dieses Ziel mit verbesserter Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie erreichen.

Durch die Festlegung der Temperatur des Wasser-Tripelpunkts auf 273,16 K ist das Kelvin derzeit mit einer eher „zufälligen“ Materialeigenschaft verknüpft. Wie bei anderen Einheiten böte es Vorteile, die Temperatureinheit stattdessen mit einer fundamentalen Naturkonstanten zu verknüpfen und deren Wert festzulegen, denn dadurch würde kein Temperaturwert (und auch kein Messverfahren) ausgezeichnet. Im Falle des Kelvin wäre die Boltzmann-Konstante  $k$  festzulegen, denn die Temperatur tritt in fundamentalen physikalischen Gesetzen stets als „thermische Energie“  $kT$  auf. So wäre eine denkbare Möglichkeit, das Kelvin als die Temperaturänderung zu definieren, die bei einem idealen Gas aus  $10^{30}$  Partikeln ohne innere Freiheitsgrade nach heutigem Kenntnisstand zu einer Änderung der inneren Energie um  $20\,709\,755\text{ J}$  führt.

Damit bei einer solchen Neudefinition der erreichte Stand bei der relativen Unsicherheit der Einheitenrealisierung von etwa  $3 \cdot 10^{-7}$  erhalten bleibt, muss auch die Boltzmann-Konstante ähnlich genau bekannt sein. Deren relative Unsicherheit liegt derzeit aber noch bei rund  $2 \cdot 10^{-6}$ , müsste also zunächst erheblich verringert werden.

Die Boltzmann-Konstante kann im Prinzip mit jedem Primärthermometer bestimmt werden, indem bei bekannter Temperatur – idealerweise am Wasser-Tripelpunkt – das Produkt  $kT$  gemessen und daraus  $k$  berechnet wird. Der gegenwärtige Wert von  $k$  wurde am NIST mit akustischer Gasthermometrie bestimmt, also durch Messung der Schallgeschwindigkeit in einem Gas. Eine kürzlich von der PTB fertiggestellte Studie zeigt, dass eine andere Variante der Gasthermometrie, die Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie mit Helium, gute Aussichten zur erforderlichen weiteren Ver-

ringerung der Unsicherheit bietet, vor allem weil die benötigte Polarisierbarkeit des Heliumatoms mittlerweile quantenmechanisch sehr genau berechnet werden kann. Bei diesem Messverfahren wird die temperatur- und druckabhängige Dielektrizitätskonstante des Heliums aus der Kapazitätsänderung ermittelt, die beim Abpumpen des Gases aus einem heliumgefüllten Kondensator auftritt.

Die PTB hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, ihre seit Jahren erfolgreich im Tieftemperaturbereich eingesetzte Dielektrizitätskonstanten-Gasthermometrie so zu verbessern, dass die heute damit erreichbare relative Standardunsicherheit bei der Bestimmung der Boltzmann-Konstanten von  $15 \cdot 10^{-6}$  in einem ersten Schritt auf  $2 \cdot 10^{-6}$  reduziert und in einem zweiten Schritt um eine weitere Größenordnung gesenkt wird.

Dieses Vorhaben, das insgesamt sicher ein Jahrzehnt erfordern wird, ist jetzt mit ersten Untersuchungen an einem neu aufgebauten Gasthermometersystem in Angriff genommen worden. Spektrale Strahlungsmessungen auf der Basis des Planckschen Gesetzes werden das Vorhaben begleiten und die Ergebnisse absichern helfen.



Ludwig Boltzmann, 1844-1906

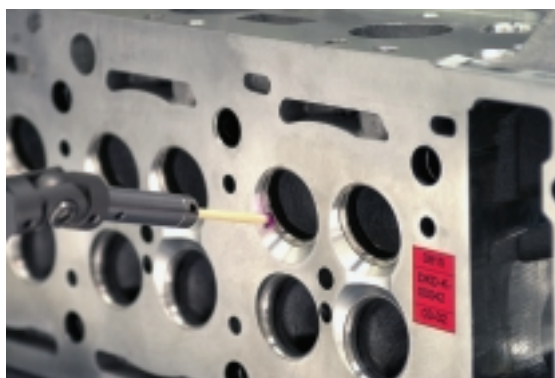
# Virtuelles KMG im Industrie-Einsatz

Das in der PTB entwickelte „Virtuelle Koordinatenmessgerät“ ist praxisreif. Ein Netz von Kalibrierlaboratorien wird dieses neue Verfahren einsetzen und für die Industrie verfügbar machen. Damit können nun realistische Messunsicherheiten für Koordinatenmessungen automatisch ermittelt werden.

Koordinatenmessgeräte (KMG) als universelle Messeinrichtungen sind in der industriellen Qualitätssicherung weit verbreitet. Sie dienen dazu, Motorblöcke und viele andere Werkstücke zu messen. Um die Eignung eines KMG für eine Messaufgabe zu ermitteln und um vernünftige Produkttoleranzen festzulegen – eine bedeutsame Anforderung besonders unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten –, ist es wichtig, für die Merkmale an einem Werkstück die Messunsicherheit zu kennen.

Das Virtuelle KMG ermöglicht nun, diese Messunsicherheiten zu ermitteln. Das Verfahren beruht auf Simulationsrechnungen, mit denen das messtechnische Verhalten des KMG in einem Rechnerprogramm nachgebildet wird. Dieses Softwaremodul, mittlerweile erhältlich bei zwei deutschen KMG-Herstellern, ist direkt in die KMG-Software integriert und liefert mit dem Messprotokoll automatisch die dem Messergebnis zugeordnete Messunsicherheit.

In einem gemeinsamen Projekt mit Partnern aus der Industrie und Hochschulen wurde das Verfahren auf der Grundlage von mehr als 13 000 Vergleichsmessungen soweit abgesichert, dass der Deutsche Kalibrierdienst (DKD) mehrere Laboratorien für die Anwendung dieses Verfahrens akkreditieren konnte. Damit steht ein Netz von Kalibrierlaboratorien zur Verfügung, die in der Lage sind, beliebige prismatische Werkstücke als Bezugsnormale zu kalibrieren. Die Industrie kann so mit kalibrierten Normalen versorgt werden, um die Rückführung von produktionsnahen Messeinrichtungen sicherzustellen.



Kalibrierung eines Zylinderkopfes als Bezugsnormal

PTBnews 03.2  
Deutsche Ausgabe  
August 2003  
ISSN 1611-1621

Herausgegeben von der  
Physikalisch-Technischen  
Bundesanstalt (PTB)  
Braunschweig und Berlin

Chefredakteur Jens Simon  
PTB, Bundesallee 100  
38116 Braunschweig  
Telefon: (05 31) 592-30 06  
Fax: (05 31) 592-30 08  
E-Mail: [ptbnews@ptb.de](mailto:ptbnews@ptb.de)  
Webseite: <http://www.ptb.de/>

Weitergehende Informationen von M. Franke,  
Tel. (05 31) 592-53 24,  
E-Mail: [matthias.franke@ptb.de](mailto:matthias.franke@ptb.de)

## Zeit-Service der PTB verlängert

Auch in Zukunft werden Funkwecker, Bahnhofsuhren und viele Zeitdienste über den Sender DCF77 bei Frankfurt mit der gesetzlichen Zeit aus der PTB versorgt. Der bestehende Vertrag mit der Telekom-Tochter T-Systems MediaBroadcast wurde bis Ende 2013 verlängert.

Weil Langwellen praktisch keine Hindernisse kennen, lassen sie sich auch im Inneren von Gebäuden mit Hilfe kleiner Antennen und vergleichsweise einfacher Schaltungen empfangen. Daher ist es auch im Zeitalter von GPS immer noch attraktiv, Zeitsignale über Langwelle zu verbreiten. Der Dienst der PTB zeichnet sich außerdem durch große Zuverlässigkeit und zeitliche Verfügbarkeit aus. In dem jetzt verlängerten Vertrag sichert die Firma T-Systems – wie zuvor – der PTB zu, dass sie den Langwellensender DCF77 in Mainflingen bei Frankfurt in 99,7 % des Jahres uneingeschränkt nutzen kann. Im Jahr 2002 wurden sogar fast 99,95 % erreicht. Am Sender wird mit drei Atomuhren und einer aufwendigen Steuer- und Überwachungselektronik die Zeitinformation als Datenstrom kodiert und mit einer Leistung von rund 30 kW übertragen. Damit liefert die PTB – als Infrastrukturleistung des Staates – für ganz Deutschland die gesetzliche Zeit. Das Signal versorgt Bahnhofsuhren, Ampelanlagen, Schaltuhren der Energieversorger, private Funkuhren, Radio- und Fernsehanstalten sowie viele weitere Anwender mit der genauen Zeit.

Weitergehende Informationen von D. Piester,  
Tel. (05 31) 592-43 32,  
E-Mail: [dirk.piester@ptb.de](mailto:dirk.piester@ptb.de)

Auch die anderen Nutzungsmöglichkeiten von DCF77 bleiben uneingeschränkt erhalten. Neben der Übertragung der Zeitinformation wird für hochgenaue Anwendungen die zusätzliche Modulation der Trägerphase des DCF77-Senders verwendet. Des Weiteren wird die Trägerfrequenz der Aussendung (77,5 kHz) von den Atomuhren in Mainflingen abgeleitet, so dass die relative Abweichung der Trägerfrequenz vom Nennwert im Mittel über einen Tag bei  $1 \cdot 10^{-12}$  liegt. Ständige Vergleiche mit den primären Atomuhren in Braunschweig, die zu den genauesten der Welt gehören, sichern die Richtigkeit der ausgesendeten Signale.



Die Zeitsignale der PTB – ausgesendet vom Langwellensender DCF77 – können mit normalen Funkuhren in einem Umkreis von etwa 2000 km empfangen werden.