

# Frequenzkämme und Frequenzverteilung für Anwendungen in Wissenschaft und Industrie

Michael Mei, Ronald Holzwarth, Ida Z. Kozma,  
Menlo Systems GmbH, Martinsried

**Frequenzkämme erlauben es, die Schwingungen von sichtbarem Licht hochpräzise zu zählen und zu vermessen. Die patentrechtlich geschützte Frequenzkammtechnologie wurde unter anderem bezeichnet als „die bedeutendste Erfindung auf dem Gebiet der elektromagnetischen Präzisionsmessungen seit den siebziger Jahren“. Sie ist eng verbunden mit dem Nobelpreis für Physik des Jahres 2005. Professor Theodor W. Hänsch und Professor John L. Hall erhielten diese höchste wissenschaftliche Auszeichnung für die Entwicklung der laserbasierten Präzisionspektroskopie.**

Pioniere der Frequenzkammtechnologie sind Prof. Theodor W. Hänsch, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching bei München, und seine Mitarbeiter. Mit ihrem Doktorvater Hänsch gründeten Michael Mei und Ronald Holzwarth 2001 die Menlo Systems GmbH, um die Frequenzkammtechnologie zu kommerzialisieren und einem breiten Anwendungsspektrum zukommen zu lassen. Dabei haben sie die Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung mit Hilfe der Faserlasertechnologie schnell zu einem erfolgreichen Produkt weiterentwickelt: dem faserbasierten optischen Frequenzsynthesizer. Die als „Nebenprodukt“ entstehenden Faserlasersysteme finden vielfältige Einsatzbereiche in Wissenschaft und Industrie.

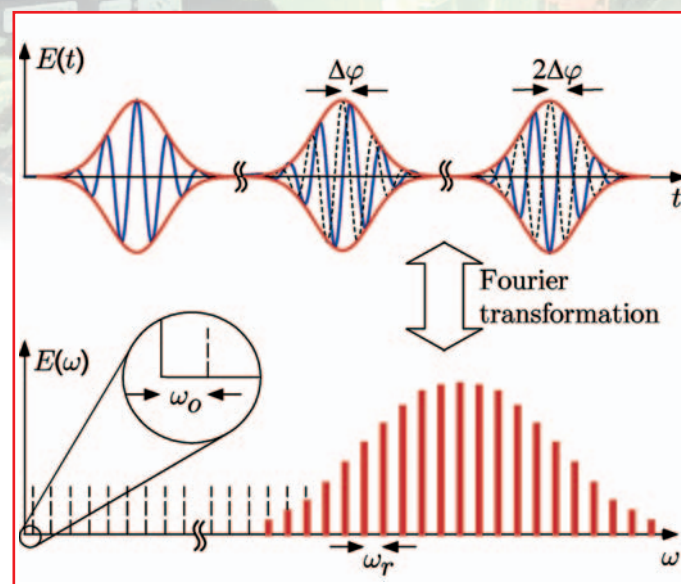
## 1 Optische Frequenzkämme

Mit der Erfindung des optischen Frequenzkammes wurde eine Revolution in der Präzisionspektroskopie eingeleitet. Die konventionelle interferometrische Bestimmung der Wellenlänge von Laserlicht wird nun durch eine um Größenordnungen präzisere Messung optischer Frequenzen ersetzt [1,2,3].

Radiofrequenzen lassen sich mittels elektronischer Zähler mit hoher Genauigkeit bestimmen und vergleichen. Zusätzlich ist eine breite Palette an Referenzquellen vom einfachen Quarzoszillator bis zur hochgenauen Cäsium-Atomuhr für diesen Frequenzbereich kommerziell verfügbar. Eine

Frequenzmessung ist die genaueste uns zur Verfügung stehende Messmethode – es werden schließlich Schwingungen pro Zeiteinheit gezählt, und die Zeit ist die am präzisesten zu messenden SI-Einheit. Daher versucht man, auch andere physikalischen Größen auf eine Zeit oder Frequenz zurückzuführen. Da das Meter über die Laufzeit des Lichtes und die Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  definiert ist, ermöglichen präzise Frequenzmessungen auch Längenmessungen mit entsprechender Genauigkeit. Die Frequenz  $f$  des elektromagnetischen Signals legt dabei über  $\lambda = c_0/f$  die Wellenlänge  $\lambda$  fest, die als Grundeinheit bei Längenmessungen fungiert. Praktisch realisiert werden derartige Längenmessungen dann mit Interferometern. Die erreichbare Genauigkeit von Frequenz- und Längenmessungen ist umso größer, je höher die Frequenz des zugrunde liegen-

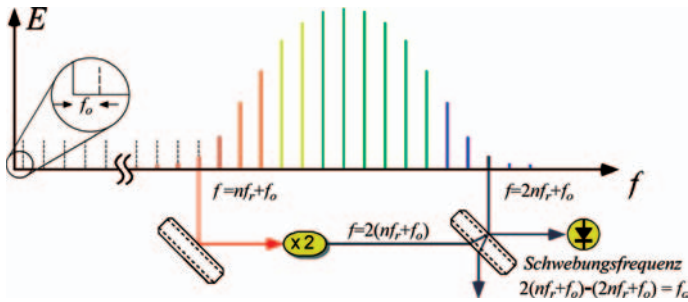
den Standards ist. Aus diesem Grund ist eine hochpräzise Messung optischer Frequenzen von großem Interesse. Diese Frequenzen liegen aber so hoch, dass es lange Zeit nicht möglich war, sie direkt zu zählen. Grünes Licht mit einer Wellenlänge von 532 nm hat beispielsweise eine Frequenz von 564 THz ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ). Die höchsten elektronischen Frequenzen, die man zur Zählung verwenden könnte, sind mehr als vier Größenordnungen niedriger. Erst durch optische Frequenzkämme wurde es möglich, über einen breiten Frequenzbereich optische Frequenzen durch Messungen im Radiofrequenzbereich zu bestimmen. Das Signalspektrum einer periodisch gepulsten Laserquelle besteht aus diskreten optischen Moden. Mathematisch darstellen lässt sich dies über eine Fouriertransformation des zeitlichen Signalverlaufs (**Bild 1**). Der Frequenzabstand zwischen



**Bild 1:**

Darstellung eines sehr kurzen Pulses in Zeit- und Frequenzraum. Während sich

die Einhüllende mit der Gruppengeschwindigkeit bewegt, läuft die Trägerwelle mit der Phasengeschwindigkeit, sodass sich von Puls zu Puls die relative Phase zwischen der Trägerwelle und der Einhüllenden um einen Winkel  $\Delta\varphi$  vergrößert. Durch die Fourier-Transformation der periodischen Einhüllenden ergibt sich das im unteren Teil dargestellte Spektrum. Es besteht aus Moden im Abstand der Pulswiederholrate  $\omega_r$ , die um  $\omega_0$  von den Harmonischen von  $\omega_r$  verschoben sind



**Bild 2:** Schematisches Spektrum des optischen Synthesizers. Sein weißes Licht besteht aus einem gleichmäßigen Kamm hunderttausender scharfer Spektrallinien, deren Abstand genau gleich der Pulsrepetitionsfrequenz  $f_r$  ist. Die absolute Frequenz jeder Kammlinie,  $f_n = n f_r + f_0$  ist durch eine ganze Ordnungszahl  $n$ , die Pulsrate  $f_r$  und eine Radiofrequenz  $f_0$  bestimmt, die von einem Phasenschlupf der Lichtwelle von Puls zu Pulse herrührt. Um  $f_0$  zu messen werden Kammlinien am roten Ende des Spektrums frequenzverdoppelt und mit den entsprechenden blauen Kammlinien auf einem Photodetektor überlagert, so dass ein Schwebungssignal bei der Frequenz  $f_0$  entsteht

den einzelnen Moden oder „Zinken“ ist dabei identisch mit der Pulswiederholfrequenz. Im abgedeckten Spektralbereich der Laserquelle stellen die Lasermoden somit eine Art Lineal im Frequenzraum dar. Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die Lasermoden dabei leider nicht einfach ein Vielfaches der Pulswiederholfrequenz sind, sondern dass die Moden zusätzlich um eine Offsetfrequenz relativ zum Nullpunkt verschoben sind. Zurückzuführen ist dieser Offset auf die Dispersion im Laserresonator. Durch die Differenz von Phasen- und Gruppengeschwindigkeit kommt es zu einem Phasenschlupf zwischen elektrischem Trägerfeld und der Pulseinhüllenden. Ein regelmäßiger Phasenabstand entspricht aber gerade einer Frequenzverschiebung, der sog. CEO-Frequenz (carrier envelope offset). Für eine Frequenzmessung ist somit eine Bestimmung und Stabilisierung sowohl der Pulswiederholrate als auch der CEO-Frequenz erforderlich.

Das Messverfahren zur Bestimmung der CEO-Frequenz, das federführend am MPQ in der Gruppe von Prof. Hänisch entwi-

## 2 Faserkämme

Besonders für präzise Langzeitmessungen und für die Realisierung optischer Frequenzstandards ist ein Frequenzkamm-system erforderlich, das einen ununterbrochenen Betrieb über Tage oder Wochen gewährleisten kann. Diese Forderung kann mit Ti:Sa-Lasern nur schwer erfüllt werden, u.a. aufgrund der eingesetzten frequenzverdoppelten Vanadat-Pump-laser, die im grünen Spektralbereich bei 532 nm 5-10 W Leistung emittieren. Die typische Lebensdauer dieser Pump-laser beträgt nur einige tausend Stunden, dann wird ein teurer und aufwendiger Bauteiltausch nötig.

ckelt wurde, ist in **Bild 2** schematisch dargestellt. Sowohl CEO-Frequenz als auch Pulsrate werden über entsprechende Rückkoppelkreise auf eine Referenz stabilisiert und sind somit genau bekannt. Damit sind auch die optischen Moden mit der gleichen Genauigkeit bekannt. Die ersten derartigen Frequenzkamm-systeme wurden auf der Basis modengekoppelter Titan:Saphir- (Ti:Sa-) Systeme realisiert (**Bild 3**).

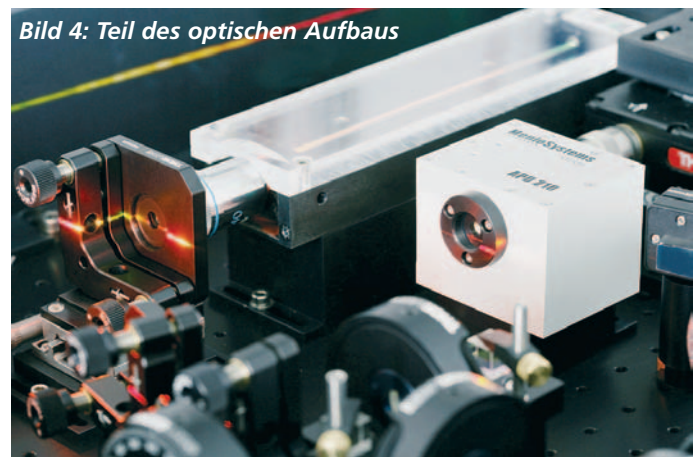
bau. Insbesondere stehen als Pumpquelle Laserdioden mit jahrzehntelangen Lebensdauern zur Verfügung. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit sowie des geringen Wartungs- und Energiebedarf eignen sich faserbasierte Frequenzkämme besonders für Langzeitmessungen im Eichwesen und zur Realisierung optischer Frequenzstandards.

## 3 Anwendungsgebiete

Durch hochgenaue Frequenzmessungen werden auch hochgenaue Zeit- und Entfernungsmessungen möglich. Der Umfang potentieller Einsatzbereiche ist momentan noch nicht abzusehen. Im Folgenden nennen wir einige der momentan häufigsten Anwendungen: Längen- und Zeitnormale. Das österreichische Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen in Wien war der erste Kunde für ein optisches Frequenzkamm-system (**Bild 4**). Vor dieser Erfindung wurden in Wien Maßstäbe (sogenannte Endmaße) mittels eines roten Helium-Neon-Lasers vermessen, der auf einen molekularen Übergang stabilisiert war. Einmal pro Jahr wurde dieser Referenzlaser in



**Bild 3:** Titan:Saphirlaser-basiertes Frequenzkamm-system

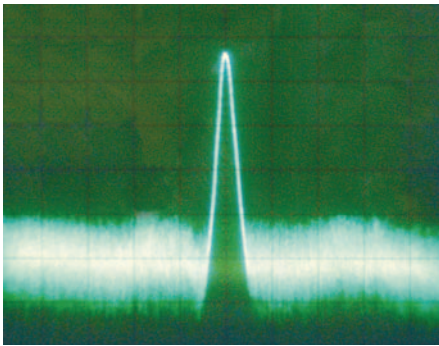


**Bild 4:** Teil des optischen Aufbaus

Deshalb wurde ein neuartiger Frequenzkamm auf der Basis Erbium-dotierter Faserlaser entwickelt. Die Verwendung von Komponenten aus der Telekommunikationsindustrie ermöglicht einen kompakten, zuverlässigen und kostengünstigen Auf-

Paris mit den Referenzlasern der anderen europäischen und internationalen Standardlabors verglichen, um sicherzustellen, dass ein Meter in Wien gleich lang ist wie in Braunschweig, Paris oder London. Mit dem Frequenzkamm erübrigen sich diese Vergleiche. Die zur Längenmessung verwendeten Helium-Neon-Laser können jetzt direkt mit einer Cäsium-Atomuhr oder über GPS kalibriert werden. Das neue Messgerät vereinfacht damit die Bereitstellung eines präzisen Längennormals als gesetzliche Eichgrundlage. Dies führt zu den genauesten Längenmessungen, die momentan möglich sind.

Aus der Anwendung der optischen Zähler für die hochauflösende Spektroskopie [4] ergab sich die Möglichkeit der Realisie-

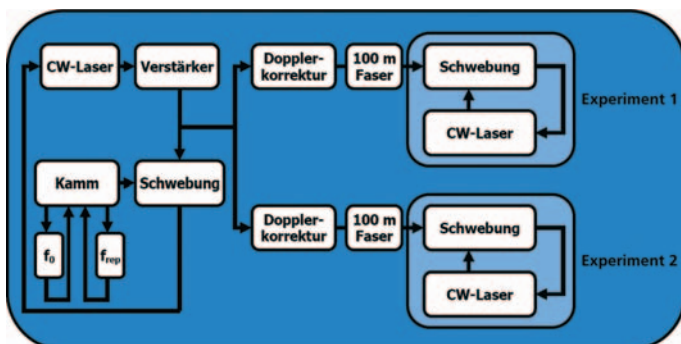


**Bild 5:** Schwebungssignal im Radiofrequenzbereich

Die Entwicklung der ersten optischen Uhr [5,6]. Jede Uhr besteht aus einem Taktgeber (z.B. dem Pendel) und einem Zählwerk, das die periodische Bewegung des Taktgebers zählt. Als Taktgeber für optische Uhren kommen einzelne gespeicherte Ionen in Betracht, wie sie für diesen Zweck 1982 von H. Dehmelt vorgeschlagen wurden [7]. Das Zählwerk einer solchen Uhr stellte bisher die größte Herausforderung dar, weil es in der Lage sein muss, den hochfrequenten, optischen Schwingungen zu folgen. Ermöglicht wird dies nun, indem Frequenzkämme die exakte phasenstarre Korrelation optischer Frequenzen zu elektronisch leichter zu verfolgenden Radiofrequenzen erlauben (**Bild 5**). Für die neuartigen optischen Uhren werden Unsicherheiten bis herab zu etwa  $10^{-18}$  abgeschätzt. Das heißt, sie sind um mindestens drei Größenordnungen genauer als die momentan präzisesten Cäsium-Atomuhren [8]. Die kompakten Lichtzähler könnten damit in der Satellitennavigation präzisere Ortsbestimmungen ermöglichen, denn die Zeitgenauigkeit bestimmt hier die mögliche Ortsauflösung. In der Grundlagenforschung wird mit ihrer Hilfe die Drift von Naturkonstanten untersucht.

## 4 Optische Frequenzverteilung

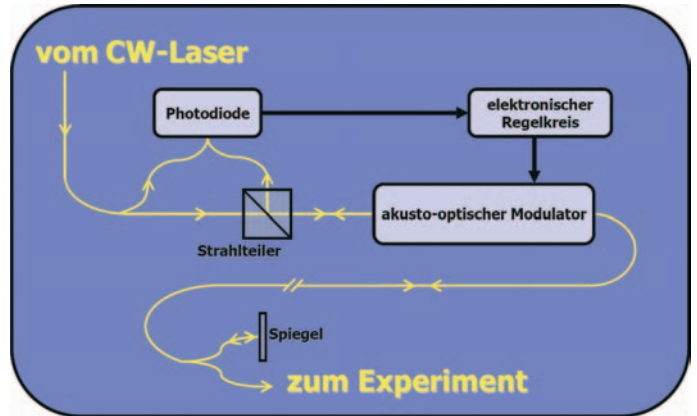
Mit der Entwicklung immer genauerer und stabilerer optischer Frequenzstandards wird



**Bild 6:** Prinzipieller Aufbau des Frequenzverteilungssystems

es immer wichtiger, präzise Transfermethoden zu schaffen, um die Standards miteinander vergleichen zu können. So ist zurzeit die Einrichtung und Charakterisierung optischer Netzwerke zur Übertragung optischer Frequenzen in mehreren Arbeitsgruppen Gegenstand von Untersuchungen: zum Beispiel wurden ein optischer und ein Radio-Frequenzstandard zwischen dem Forschungszentrum JILA (University of Colorado) und NIST (National Institute of Standards and Technology, beide in Boulder, Colorado, USA) über eine 3,5 km lange optische Faser übertragen und in beiden Laboren gleichzeitig gemessen. Nach einer aktiven Rauschunterdrückung konnte die Instabilität der Übertragung auf  $3 \times 10^{-15}$  festgelegt werden [9]. Auch am National Metrology Institute in Tsukuba, Japan, wird die Frequenzverteilung über ein optisches Glasfasernetz diskutiert [10]. In Frankreich wurde ein ultrastabiles Referenzsignal von 100 MHz in einem Telekommunikations-Fasernetzwerk übertragen, und verschiedene Methoden zur Rauschunterdrückung wurden untersucht [11].

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit Menlo Systems wurde am MPQ ein Glasfaser-Netzwerk aufgebaut, das eine vorgegebene optische Frequenz von 268 THz (entsprechend einer Wellenlänge von 1120 nm) verteilt [12]. Diese Strahlung wird am MPQ von zwei Experimenten zur Laserkühlung verwendet. Durch die hochpräzise Verteilung sind für beide Experimente nur noch ein Laser und eine Stabilisierungseinheit notwendig. Die erforderliche Frequenzstabilität wird durch die Regelung auf einen optischen Frequenzkamm erreicht. Diese Stabilisierungsmethode kann für jede beliebige Anwendung genutzt werden, für die ein stabiler Laser benötigt wird. Auch die Lage der Laserwellenlänge ist dabei unkritisch, solange sie im großen Bereich des Frequenzkamm-spektrums liegt. Der Aufbau des



**Bild 7:** „Dopplerkorrektur“-Aufbau zur Kompensation thermisch induzierter Frequenzabweichungen.

Frequenzverteilungssystem ist in **Bild 6** dargestellt. Ein Dauerstrich-Laser (engl. cw, continuous wave) stellt die zu verteilende optische Frequenz bereit. Um für die Experimente genügend Leistung bereitzustellen, wird die Ausgangsleistung dieses CW-Lasers mit Hilfe eines optischen Verstärkers erhöht. Ein Teil des Lichts wird ausgekoppelt um ein Schwebungssignal zwischen dem CW-Laser und dem Frequenzkamm zu erzeugen, das dazu dient, den CW-Laser entsprechend nachzuregeln. Der Frequenzkamm selbst ist auf eine Cäsiumuhr stabilisiert, indem dessen CEO-Frequenz und Repetitionsfrequenz über Phasenregelkreise kontrolliert werden. Der größte Teil des Lichts aus dem Verstärker wird über Glasfasern zu Experimenten in anderen Labors geführt. Die Fasern sind dabei ca. 100 m lang.

Für höchste Anforderungen ist zu beachten, dass Temperaturfluktuationen im Labor lokale Brechungsindex- und Längenänderungen der Glasfasern verursachen, was eine Frequenzverschiebung des Lichtes und damit eine Verringerung der Genauigkeit des Signals zur Folge hat. Bei einer Faserlänge von 70 m und einer Temperaturschwankung von  $1^\circ\text{C}$  pro Stunde errechnet sich eine Frequenzverschiebung von 3 Hz oder etwa  $10^{-14}$ . Diese Frequenzverschiebung kann mit Hilfe eines akusto-optischen Modulators korrigiert werden (**Bild 7**). Damit lassen sich Genauigkeiten von  $10^{-16}$  und besser übertragen. Die Frequenzverteilung entspricht im Prinzip einer neuartigen Dienstleistung: Das Meter aus der (optischen) Steckdose. Der faserbasierte Frequenzkamm ermöglicht einen ununterbrochenen Betrieb des Verteilungssystems, so dass die Experimente durchgehend mit Licht der erforderlichen Wellenlängen beliefert werden können. Ist das System erst einmal installiert, läuft es selbstständig und wartungsfrei.

## Danksagung

Die Verleihung des Berthold Leibinger Innovationspreises an die Autoren Dr. Michael Mei und Dr. Ronald Holzwarth wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung der hochmotivierten Mitarbeiter der Menlo Systems GmbH über die letzten 5 Jahre. Wir sehen den Preis als Auszeichnung ihrer herausragenden Arbeit. Dies gilt in gleichem Maße für die Mitarbeiter am MPQ: Stellvertretend danken wir Dr. Thomas Udem und natürlich unserem Mentor Prof. Theodor W. Hänsch.

## Literaturhinweise:

- [1] S.A. Diddams, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff, J.L. Hall, J.K. Ranka, R.S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, T.W. Hänsch, *Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb*, Phys. Rev. Lett. 84 (22), 5102 (2000)
- [2] R. Holzwarth, T. Udem, T.W. Hänsch, J.C. Knight, W.J. Wadsworth, P.S.J. Russell, *Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy*, Phys. Rev. Lett. 85 (11), 2264 (2000)
- [3] R. Paschotta, *Frequenzkämme und optische Frequenzmetrologie*, Photonik 3/2006
- [4] M. Niering, R. Holzwarth, J. Reichert, P. Pokasov, T. Udem, M. Weitz, T.W. Hänsch, P. Lemonde, G. Santarelli, M. Abgrall, P. Laurent, C. Salomon, A. Clairon, *Measurement of the hydrogen 1S-2S transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock*, Phys. Rev. Lett. 84 (24), 5496 (2000)
- [5] S.A. Diddams, T. Udem, J.C. Bergquist, E.A. Curtis, R.E. Drullinger, L. Hollberg, W.M. Itano, W.D. Lee, C.W. Oates, K.R. Vogel, D.J. Wineland, *An optical clock based on a single trapped Hg-199(+) ion*, Science 293 (5531), 825 (2001)
- [6] T. Udem, S.A. Diddams, K.R. Vogel, C.W. Oates, E.A. Curtis, W.D. Lee, W.M. Itano, R.E. Drullinger, J.C. Bergquist, L. Hollberg, *Absolute frequency measurements of the Hg+ and Ca optical clock transitions with a femtosecond laser*, Phys. Rev. Lett. 86 (22), 4996 (2001)
- [7] H.G. Dehmelt, *Mono-ion oscillator as potential ultimate laser frequency standard*, IEEE Trans. Instrum. Meas. 31 (2), 83 (1982)
- [8] G. Santarelli, Ph. Laurent, P. Lemonde, A. Clairon, A.G. Mann, S. Chang, A.N. Luiten, C. Salomon, *Quantum Projection Noise in an Atomic Fountain: A High Stability Cesium Frequency Standard*, Phys. Rev. Lett. 82, 4619 (1999)
- [9] J. Ye, J.L. Peng, R.J. Jones, K.W. Holman, J.L. Hall, D.J. Jones, S.A. Diddams, J. Kitching, S. Bize, J.C. Bergquist, L.W. Hollberg, L. Robertsson, L.S. Ma, *Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network*, J. Opt. Soc. Am. B 20 (7), 1459 (2003)
- [10] M. Amemiya, M. Imae, Y. Fujii, T. Suzuyama, S.-I. Ohshima, *Time and frequency transfer and dissemination methods using optical fiber network*, in *Frequency Control Symposium and Exposition, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International*, 914
- [11] F. Narbonne, M. Lours, S. Bize, A. Clairon, G. Santarelli, O. Lopez, Ch. Daussy, A. Amy-Klein, Ch. Chardonnet, *High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network*, Rev. Sci. Instrum. 77, 065701 (2006)
- [12] B. Bernhardt, R. Holzwarth (Manuskript in Vorbereitung)

## Ansprechpartner:

Dr. Ida Z. Kozma  
Menlo Systems GmbH  
Am Klopferspitz 19  
D-82152 Martinsried  
Tel. 089/189166-0  
Fax 089/189166-11  
i.kozma@menlosystems.com  
www.menlosystems.com



www.photonik.de **Webcode 5002**