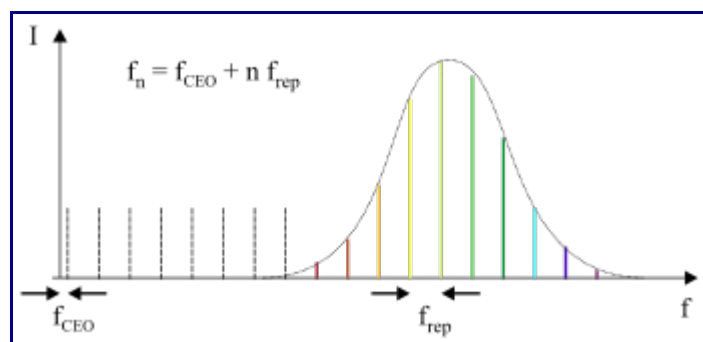


# Frequenzkamm

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzkamm>

Der **Frequenzkammgenerator** ist eine Messeinrichtung für die hochgenaue Frequenzmessung; indirekt werden damit auch hochgenaue [Entfernungsmessungen](#) möglich. Dieses Instrument erzeugt einen Lichtstrahl, den sogenannten **Frequenzkamm**, mit dem sich die Schwingungsfrequenz eines anderen [Lichtstrahls](#) um fünf [Größenordnungen](#) genauer als mit den bis dahin bekannten Methoden bestimmen lässt.

Mit einem Frequenzkamm kann die [Frequenz](#) einer elektromagnetischen Strahlung (unter anderem auch [Licht](#)) sehr präzise gemessen werden. Das Gerät wurde 1998 in der Arbeitsgruppe von [Theodor W. Hänsch](#) am [Max-Planck-Institut für Quantenoptik](#) erfunden, der dafür 2005 den [Nobelpreis für Physik](#) erhielt.



Das Frequenz-Spektrum des Lichts aus einem Frequenzkammgenerator besteht aus diskreten und streng periodischen Linien (hier farblich dargestellt), den „Zinken“ des Frequenzkamms. (Details zu den Formelzeichen unter [Träger-Einhüllenden-Phase](#))

Die Forscher hatten das Problem, eine Frequenz von fast  $10^{15}$  Hz zu messen, was bislang unmöglich war für die gängige Elektronik. Damit kann man zurzeit Frequenzen bis etwa  $10^{11}$  Hz messen. Der Frequenzkamm arbeitet entsprechend der Analogie eines optischen [Getriebes](#): Die zu messende Frequenz wird in eine niedrigere Frequenz übersetzt wie beispielsweise in [Radiowellen](#). Das Herzstück ist ein [Laser](#), der Lichtwellen von sehr genau bekannter Frequenz liefert, die mit dem zu vermessenden Lichtstrahl interferieren. Es bildet sich ein [Interferenzmuster](#) mit einer Frequenz im Radiobereich (eine sogenannte [Schwebung](#)), aus der sich dann auf die unbekannte Frequenz schließen lässt. Ein Frequenzkamm arbeitet nicht nur mit einer einzigen Frequenz, sondern mit mehreren scharfen Linien im sichtbaren Bereich, den „Zinken eines Kamms“, daher die Namensgebung.

## Aufbau

Zusammengesetzt ist der Frequenzkammgenerator aus einem [Femtosekundenlaser](#), dessen [Träger-Einhüllenden-Phase](#) mit Hilfe eines nichtlinearen [Interferometers](#) ( $f$ - $2f$  Interferometer, [Frequenzverdopplung](#)) gemessen und konstant gehalten wird.

Das relativ breite optische [Spektrum](#) dieses Lasers setzt sich aus mehreren sehr scharfen Linien in

exakt konstantem Frequenz-Abstand zusammen. Mit dem  $f$ - $2f$  Interferometer wird nun sowohl der Abstand dieser „Frequenz-Nadeln“ voneinander als auch die absolute Lage des gesamten Kammes gemessen. Diese beiden Messgrößen sind einfacher messbar, weil sie im Radiofrequenz-Bereich liegen, und können durch Vergleich mit einer [Atomuhr](#) sehr exakt bestimmt werden. Dadurch ist die absolute Frequenz jeder einzelnen Frequenz-Nadel im Spektrum dieses Lasers jetzt exakt bekannt. Durch die Messung einer [Schwebung](#) kann nun die Frequenz-Differenz zwischen einer auf diese Weise kalibrierten Frequenz-Nadel und einer nicht so genau bekannten Frequenz eines anderen Lichtstrahls bestimmt werden.

Bedeutsam ist auch die handliche Größe des Gerätes; es ist nicht größer als ein Schuhkarton. Vorgänger-Experimente zur exakten Frequenzmessung (die „Frequenzkette“) nahmen mehrere Räume ein.

## Anwendungen

Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind:[\[1\]](#)

- um mehrere Größenordnungen höhere Datenübertragungsraten in Lichtleitern bei geringerer Interferenz zu Nachbarkanälen und verbesserter Abhörsicherheit, so dass z.B. mehr Telefongespräche gleichzeitig mit einem Übersee-Lichtkabel übertragen werden können
- billigerer und wahrscheinlich um mehrere Größenordnungen genauerer Ersatz für mobile Atomuhren, die u.a. für die [Satellitennavigation](#) wichtig sind
  - höchst empfindliche chemische Detektoren
- Erweiterung der Möglichkeiten der "Designer-Chemie" im Bereich ultrakalter chemischer Reaktionen.
- Verbesserung von auf der [Lidar](#)-Technik basierenden Abstandsmesssystemen um mehrere Größenordnungen. Mit diesem Gerät können zum Beispiel die sehr geringen [Dopplerverschiebungen](#) im Spektrum sich umeinander drehender Sterne so genau gemessen werden, dass sogar nachgewiesen werden kann, wenn Planeten um ferne Sonnen kreisen; denn wenn sich ein kleiner Planet um eine schwere Sonne dreht, drehen sich beide um einen gemeinsamen Schwerpunkt, der nicht weit von der Sonnenmitte liegt. Das ergibt dann nur ein leichtes Schwingen des Hauptsterns, das eine geringe Dopplerverschiebung verursacht, die sich aber mit dem Frequenzkamm messen lässt, sodass daraus die Planetenbahn errechnet werden kann[\[2\]](#).

## Quellen

1. [↑](#) Steven Cundiff, Jun Ye und John Hall: *Lineale aus Licht*. In: *Spektrum der Wissenschaft*. 8/2009 ([Online](#)).
2. [↑](#) [Frequenzkamm in astronomischen Beobachtungen](#)
3. [http://www1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/WS08/FP-Seminar/handouts/Handout\\_Frequenzkamm.pdf](http://www1.kph.uni-mainz.de/Vorlesungen/WS08/FP-Seminar/handouts/Handout_Frequenzkamm.pdf)

## Weblinks

- [Frequency Combs: High Precision Measurements for fundamental Physics](#)
  - [Der Frequenzkamm](#) (PDF-Datei; 653 kB)

# Frequenzkamm einsatzbereit für astronomische Beobachtungen

von [Helmut Dannerbauer](#), 07. September 2008, 18:45

Quelle: <http://www.scilogs.de/kosmo/blog/galaxienentwicklung/entdeckungen-und-methoden/2008-09-07/frequenzkamm-einsatzbereit-f-r-astronomische-beobachtungen>



Momentan erreichen die besten Spektrographen Messgenauigkeiten von etwa 20 Meter pro Sekunde. Damit ist es heutzutage möglich Planeten mit Jupiter oder Neptun-Masse um sonnenähnliche Sterne aufgrund ihrer Doppler-Bewegung durch spektroskopische Beobachtungen nachzuweisen. Um jedoch Exoplaneten mit Erdmasse um Sterne a la unserer Sonne zu finden sind Messgenauigkeiten von etwa 5 cm pro Sekunden (der Dopplerverschiebung) nötig. Aktuelle Spektrographen haben jedoch noch nicht die technischen Voraussetzungen (Kalibrationsmethoden) um dies zu erreichen. Genauso wenig ist es zur Zeit möglich die beschleunigte Expansion des Universums direkt in extragalaktischen Objekte wie Galaxien und Quasare nachzuweisen. Astronomen müssten die Rotverschiebung (~Geschwindigkeit mit der sich das extragalaktische Objekt aufgrund der Expansion des Universums von uns wegbewegt) über einen Zeitraum von um die 20 Jahre regelmäßig messen. Die jährliche Veränderung der Fluchtgeschwindigkeit beträgt weniger als 1 Zentimeter pro Sekunde. Dies sind nur zwei Anwendungen in denen Hochpräzisions-Spektrographen in Verbindung mit Teleskopen der nächsten Generation wie dem von der ESO geplanten 42-m E-ELT (European Extremely Large Telescope) von den Forschern weltweit benötigt werden.



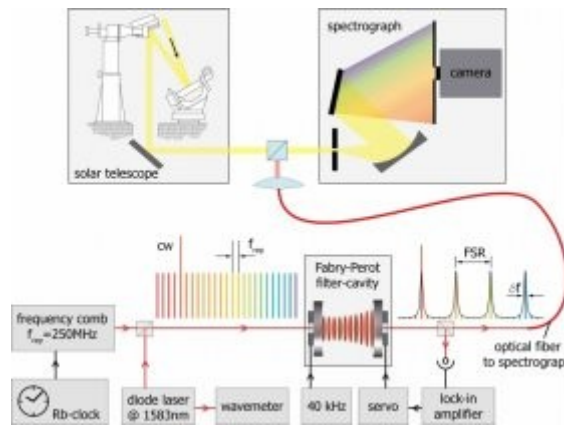
A Laser Comb for Astronomy

ESO Press Photo: 08/08-11 October 2008



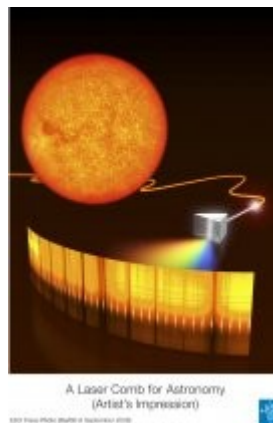
Teammitglieder Til Steinmetz und Constanza Araujo-Hauck bereiten den Frequenzkamm im VTT (Vacuum Tower Telescope) Optiklabor auf Teneriffa für seinen Einsatz vor [3].

In dieser Woche berichtete ein internationales Forscherteam (bestehend aus Quanten- und Astrophysikern) um den deutschen Quantenphysiker Tilo Steinmetz über ein neues Kalibrationssystem mit dem die gewünschten Messgenauigkeiten in Zukunft erreicht werden sollen [1,2,3,4]. Die Wissenschaftler wendeten dabei die mit dem [Physik Nobelpreis 2005](#) gewürdigte Frequenzkammtechnik an. Der dabei ausgezeichnete deutsche Nobelpreisträger Prof. Th. W. Hänsch ist auch Ko-Autor des im Wissenschafts-Magazin *Science* [1] veröffentlichten Artikels.



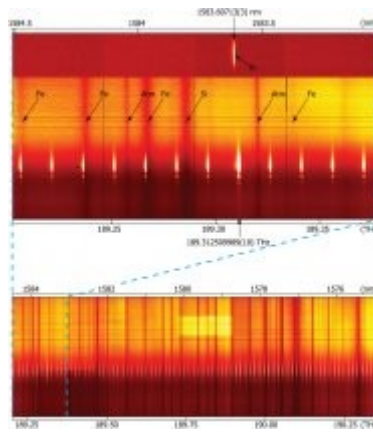
Diese Abbildung zeigt links oben schematisch das VTT Sonnenteleskop auf Teneriffa welches für diese Arbeit verwendet wurde. Die Überlagerung mit dem Frequenzkamm, der unten dargestellt ist, erfolgt mit Hilfe eines Strahlteilers. Gemeinsam werden beide Lichtquellen dem Spektrometer zugeführt (rechts dargestellt). Um den Frequenzkamm für diesen Zweck verwenden zu können, muss die Frequenzdifferenz der Spektrallinien soweit erhöht werden, dass sie vom Spektrometer aufgelöst werden können. Dies geschieht in einer "Fabry-Perot filter cavity" (Abbildung/Text übernommen von [1,4]).

Ihre ersten astronomischen Beobachtungen machten die Quanten- und Astrophysiker am 8. März mit dem VTT (Vacuum Tower Telescope) Sonnenteleskop. Beim beobachteten astronomischen Objekt handelte es sich um die Sonne. Die Forscher führten die Beobachtungen im nahen Infraroten bei 1,5 Mikrometer durch. Sie erreichten dabei eine beeindruckende Messgenauigkeit von 9 Meter pro Sekunde. Vereinfacht stellt man sich den Frequenzkamm als ein Lineal vor mit einer absoluten Skala. Mit einem so genannten Frequenzkammgenerator erzeugen die Physiker in dem zu messenden Wellenlängenbereich Spektrallinien mit gleichbleibenden Abstand ähnlich zu den Skalen für die Längenmessung auf einem Lineal. Diese Kalibration ist auch über einen Zeitraumen von einigen Dekaden exakt wiederholbar.



Schema des Experiments: Das Licht der Sonne oder eines anderen Sterns wird mit Hilfe eines Teleskops in eine Glasfaser eingekoppelt und einem Spektrometer, dargestellt durch das Prisma, zugänglich gemacht. Auf dem Schirm des Spektrometers erkennt man die dunklen Spektrallinien der Sonne (Fraunhofer Linien) die durch die Absorption in der Photosphäre der Sonne entstehen. Überlagert dazu erkennt man die Spektrallinien des Laser Lasers als helle Streifen. Wegen der regelmäßigen Struktur dieser Streifen und weil man diese mit Hilfe der Frequenz einer Atomuhr stabilisiert, wird das Ganze Frequenzkamm genannt (Abbildung/Text übernommen von [2,4]).

Dieser präsentierte Prototyp macht große Hoffnung, dass es in Zukunft mit den Teleskopen und Spektrographen der nächsten Generation tatsächlich möglich sein wird zum Beispiel die beschleunigte Expansion des Universums direkt in extragalaktischen Objekten nachzuweisen. Es ist großartig zu sehen, dass interdisziplinäre Zusammenarbeiten für substantielle Durchbrüche in der Wissenschaft sorgen können, die Förderung interdisziplinärer Arbeiten absolut richtig ist und weiter vorangetrieben werden sollte. Der nächsten Einsatz dieser neuen und zukunftsweisenden Kalibrationstechnik wird nun am [ESO 3.6 m Teleskop](#) in La Silla, Chile sein. Die Forscher werden eine überarbeitete Version des jetzt präsentierten Prototypen für den seit einigen Jahren eingesetzten [Planetenfinder HARPS](#) bauen. Ich bin schon sehr auf die ersten wissenschaftlichen Ergebnisse dieser neuen Technologie mit dem Instrument HARPS am ESO 3.6 m Teleskop gespannt.



Ein Ausschnitt des gemessenen Spektrums mit Vergrößerung (oben). Die dunklen Linien entstehen durch Absorption von gasförmigen Elementen in der Photosphäre der Sonne und durch Absorptionen in der Erdatmosphäre. Überlagert dazu erkennt man die Spektrallinien des Frequenzkamms als helle Streifen. Diese dienen der präzisen Kalibrierung des gesamten Sonnenspektrums mit Hilfe einer an den Frequenzkamm angeschlossenen Rubidium Atomuhr (Rb-clock) (Abbildung+Text übernommen von

[1,4]).

Bis zum nächsten Blog.

Euer Helmut Dannerbauer

Quellen:

[1]: [Artikel in Science \(Preprint\)](#)

[2]: [Max-Planck-Institut für Quantenoptik Pressemitteilung, 5. September 2008](#)

[3]: [ESO Press Release 26/08, 5. September 2008](#)

[4]: Zusatzmaterial auf [deutsch](#) und [englisch](#)

T. Steinmetz, T. Wilken, C. Araujo-Hauck, R. Holzwarth, T. W. Hansch, L. Pasquini, A. Manescau, S. D'Odorico, M. T. Murphy, T. Kentischer, W. Schmidt, T. Udem (2008). Laser Frequency Combs for Astronomical Observations *Science*, 321 (5894), 1335-1337 DOI: [10.1126/science.1161030](https://doi.org/10.1126/science.1161030)

Ähnliche Artikel:

- [Service Mode am VLT](#)
- [Astronomen stehen auf 3D](#)
- [Kann Hubble "wiederbelebt" werden?](#)
- [Paranal bekommt weiteren Spiegel](#)
- [WANTED - Wer hat GRB080319b gesehen?](#)

# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK

Garching, 05.09.08 [Presse-Information](#)

Quelle: [http://www.mpg.mpg.de/cms/mpq/news/press/pdf/2008/PM\\_08\\_09\\_05.pdf](http://www.mpg.mpg.de/cms/mpq/news/press/pdf/2008/PM_08_09_05.pdf)

## **Ein präzises astronomisches Tachometer**

**Quantenoptische Methoden ermöglichen es, extraterrestrische Planeten zu entdecken und kosmologische Fragen zu beantworten.**

**Das Schicksal des Universums steht buchstäblich in den Sternen. Denn es sind die Lichtsignale weit entfernter Galaxien und Sterne, aus denen Astronomen und Kosmologen ableiten, dass das Weltall nicht statisch ist, sondern sich kontinuierlich ausdehnt. Neuesten Messungen zufolge vollzieht sich diese Expansion sogar beschleunigt.**

**Doch diesen Schlüssen liegen theoretische Modelle zugrunde, die noch keineswegs bewiesen sind. Die für modellunabhängige Auswertungen notwendigen Genauigkeiten bei der Bestimmung der Driftgeschwindigkeit können mit den Spektrographen derzeitiger Teleskope noch nicht erreicht werden. Ein internationales Wissenschaftlerteam aus Astronomen**

**(European Southern Observatory Garching, Centre for Astrophysics and Supercomputing Swinburne University, Melbourne, Australien, Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik Freiburg) und Quantenphysikern (Max-Planck-Institut für Quantenoptik Garching, Menlo Systems GmbH Martinsried) hat nun am VTT-Sonnen-Teleskop auf Teneriffa einen Prototypen getestet, bei dem erstmals die Frequenzkammtechnik, für deren Entwicklung Prof. Th. W. Hänsch 2005 den Nobelpreis für Physik bekam, zur Kalibrierung von Spektrographen eingesetzt wird. Damit erzielten die Forscher für Geschwindigkeitsänderungen stellarer Objekte bereits Genauigkeiten von rund neun Metern in der Sekunde. Durch weitere Verbesserung des Verfahrens können Genauigkeiten von Zentimetern pro Sekunden erreicht werden, mit denen nicht nur die These von der beschleunigten**

**Ausdehnung des Weltalls überprüft, sondern auch erdähnliche extraterrestrische Planeten nachgewiesen werden könnten. (Science, 5. September 2008)**

Bereits in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts entdeckte der Astronom Edwin Hubble, dass die Spektrallinien im Licht weit entfernter Himmelskörper zu größeren Wellenlängen hin verschoben sind. Diese „Rotverschiebung“ beruht auf dem Dopplereffekt, hervorgerufen dadurch, dass sich die Objekte von der Erde entfernen. (Dieses Phänomen kennt der Laie beispielsweise von Sirenen: wenn sie sich nähern, wird der Ton, d.h. die Frequenz höher, wenn sie sich entfernen, werden Ton und Frequenz niedriger.) Aus dieser Beobachtung schloss Hubble, dass sich das Universum unaufhaltsam ausdehnt. Verfolgt

man diese Entwicklung zurück, dann ist das Weltall vor etwa 15 Milliarden Jahren bei einer Art „Urknall“ entstanden.

Im Licht der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein legen neueste Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung mit der Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) nahe, dass sich diese Ausdehnung immer schneller, d.h. beschleunigt, vollzieht. Eine geheimnisvolle „Dunkle Energie“ bewirkt im Gegensatz zu allen anderen Energieformen nicht den gravitativen Zusammen-

Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit,  
Dr. Olivia Meyer-Streng  
Tel.: +49(0)8932 905-213  
E-Mail: olivia.meyerstreng@  
mpq.mpg.de  
Hans-Kopfermann-Str. 1  
D-85748 Garching  
Tel.: +49(0)8932 905-0  
Fax: +49(0)8932 905-200

halt des Universums, sondern treibt es auseinander. Nur eine direkte Messung der Änderung der Driftgeschwindigkeit des Weltalls erlaubt es, diese Vorstellungen zu überprüfen und damit auch eine Aussage über die Gültigkeit der experimentell nicht sehr gut belegten Allgemeinen Relativitätstheorie zu erhalten. Dazu muss man die Bewegungen entfernter Galaxien mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern pro Sekunde bestimmen und die Objekte über mehrere Jahrzehnte beobachten. Mit den Messfehlern, die dem gegenwärtigen Stand der Technik entsprechen, bräuchte man dafür etwa 10 000 Jahre.

Solche extrem genauen Messungen soll das zukünftige „European Extremely Large Telescope“ (E-ELT) durchführen, das gegenwärtig von der ESO entworfen wird. Der dafür konzipierte CODEX-Spektrograph muss zu diesem Zweck mit einer Genauigkeit von 1 zu 300 Milliarden kalibriert sein - das ist, als würde man den Umfang der Erde auf einen halben Millimeter genau messen.

Jetzt haben Physiker des MPQ und der Firma Menlo System am VTT (Vacuum Tower Telescope) Sonnen-Teleskop auf Teneriffa gezeigt, dass sich dieses Ziel mit Hilfe der Frequenzkammtechnik erreichen lässt. „Die Zeit ist die physikalische Größe, die am genauesten bestimmt werden kann“, erläutert Dr. Udem, der das Projekt am MPQ leitet. „Die heutigen Cäsium-Atomuhren würden nach einer Million Jahren nur etwa eine Sekunde falsch gehen“. Bei dem Frequenzkamm wird Laserlicht in ein Regenbogenspektrum aus ca. einer Million äquidistanter Spektrallinien umgewandelt, deren Frequenz jeweils über die Atomuhr normiert ist. Vergleicht man dieses „Lineal“ mit den Spektrallinien eines Sterns, dann werden deren

Frequenzen ebenfalls mit der Genauigkeit der Atomuhr bestimmt.

Die so kalibrierten Spektrographen werden Geschwindigkeitsänderungen so genau nachweisen, dass sie Fragen nach der Entwicklung des Kosmos beantworten können. Sie werden aber auch die Suche nach erdähnlichen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems erleichtern.

Denn diese verraten sich nur indirekt: Sie geben ihrem Zentralgestirn einen kleinen Schubs, so dass es sich, je nach Position des Planeten, mal auf die Erde zu und mal von ihr weg bewegt. Diese Auslenkung ist allerdings extrem gering – sie liegt nur bei einigen Zentimetern pro Sekunde. „Wir hoffen, dass wir in Zukunft so kleine Verschiebungen messen können“, sagt Dr. Udem. „Zum Vergleich: Die Sonne legt bei ihrem Weg um das galaktische Zentrum 220 Kilometer in der Sekunde zurück. Der Rückstoß, den die Erde auf die Sonne ausübt, beträgt dagegen nur zehn Zentimeter pro Sekunde.“

Bereits mit dem hier verwendeten Prototyp wurde eine Genauigkeit für Geschwindigkeitsänderungen

von etwa neun Meter pro Sekunde erreicht, was den jetzigen Stand der Technik übersteigt. „Wir haben hier an einem Sonnen-Teleskop getestet, das starke systematische Schwankungen aufweist, weil es nicht für diesen Zweck ausgelegt ist“, sagt Udem. „Wir sind sehr zuversichtlich, dass wir mit einem optimalen Aufbau - einem stabileren Teleskop und einem verbesserten Frequenzkamm - auch Geschwindigkeitsschwankungen von einem Zentimeter pro Sekunde nachweisen können.“

Mehr Informationen: <http://www.mpq.mpg.de/~haensch/comb/Astrocomb/>

**Originalveröffentlichung:**

Tilo Steinmetz et al.

*Laser Frequency Combs for Astronomical Observations*  
Science, 321, 1331 (2008).

**Kontakt:**

**Dr. Thomas Udem**

Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Straße 1  
85748 Garching  
Telefon: +49 - 89 / 32905 - 282  
Fax: +49 - 89 / 32905 - 311  
E-Mail: [thomas.udem@mpq.mpg.de](mailto:thomas.udem@mpq.mpg.de)

**Dr. Olivia Meyer-Streng**

Presse & Kommunikation  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Telefon: +49 - 89 / 32905 - 213  
Fax: +49 - 89 / 32905 - 200  
E-Mail:  
[olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de](mailto:olivia.meyer-streng@mpq.mpg.de)

Quellen bei google zu Frequenzkamm:

[http://www.google.at/#hl=de&cp=9&gs\\_id=1o&xhr=t&q=frequenzkamm&pf=p&scient=psy-ab&source=hp&pbx=1&oq=frequenzk&aq=0&aqi=g4&aql=&gs\\_sm=&gs\\_upl=&bav=on.2.or.r\\_gc.r\\_pw.,cf.osb&fp=b58fdc96ea114dc&biw=1366&bih=656](http://www.google.at/#hl=de&cp=9&gs_id=1o&xhr=t&q=frequenzkamm&pf=p&scient=psy-ab&source=hp&pbx=1&oq=frequenzk&aq=0&aqi=g4&aql=&gs_sm=&gs_upl=&bav=on.2.or.r_gc.r_pw.,cf.osb&fp=b58fdc96ea114dc&biw=1366&bih=656)



