

**Laudatio Theodor W. Hänsch anlässlich der  
Verleihung der Ehrendoktorwürde der Freien Universität Berlin  
am 28.4.2006**

H. Walther

*Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
und Dep. für Physik, Universität München  
85748 Garching b. München*

Die genaue Untersuchung der Atomspektren hat sehr wesentlich zu unserem Wissen über den Aufbau der Materie beigetragen und außerdem zu den entscheidenden Impulsen bei der Entwicklung der Quantenphysik geführt. Bei der Untersuchung der Spektren hat man die Wellenlängen der Spektrallinien bestimmt, was zunächst mit Prismen- oder Gitterspektralapparaten geschah, später ist man zu genaueren interferometrischen Methoden übergegangen. Diese Verfahren standen noch bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts im Mittelpunkt. Mit der Entwicklung des Lasers haben sich die Möglichkeiten der Spektroskopie sehr wesentlich geändert. Die Laserlichtquellen erlauben es, die Genauigkeitsgrenzen der Messung auf die sogenannte natürliche Linienbreite zu steigern, d. h. dass die Genauigkeit nur noch durch die Verweilzeit eines Atoms im angeregten Zustand eingeschränkt ist – der theoretischen Grenze der erreichbaren Präzision. Herr Hänsch hat in den siebziger Jahren sehr wesentlich zur Entwicklung der neuen Methoden der Laserspektroskopie beigetragen und insbesondere durch seine Untersuchungen zum Wasserstoff-Atom die Leistungsfähigkeit der neuen Laser-Verfahren eindrucksvoll bewiesen.

Diese Arbeiten hat Theodor Hänsch an der Universität Stanford durchgeführt, wo er zunächst als NATO-Stipendiat im Labor von Prof. A. Schawlow, einem der großen Laserpioniere, gearbeitet hat. Später wurde er dann dort Associate Professor und im Jahre 1975 Full Professor. Seine Doktorarbeit hatte Herr Hänsch an der Universität Heidelberg angefertigt, dies im Institut von Prof. Christoph Schmelzer und unter Anleitung von Peter Toschek. Diese Arbeit befasste sich unter anderem mit den Eigenschaft kohärent angeregter Drei-Niveau-Atome. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben in den letzten Jahren sehr große Bedeutung im Zusammenhang mit der Erzeugung von Laserlicht ohne Besetzungsinversion und insbesondere auch bei der Erzeugung von Licht mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit weit unterhalb der normalen Lichtgeschwindigkeit gewonnen.

Die Arbeiten in Stanford umfassen im wesentlichen drei Gruppen von Problemen. Einmal die Entwicklung von schmalbandigen Farbstofflasern, den Einsatz der hochauflösenden nichtlinearen Spektroskopie und insbesondere die Untersuchungen des Spektrums des Wasserstoffatoms. Die nichtlineare Spektroskopie beruht auf der Besonderheit, dass zwei Laserstrahlen aus entgegen gesetzten Richtungen mit dem gleichen Atom wechselwirken. Wegen der höheren Intensität des Laserlichtes gegenüber einer normalen Lichtquelle tritt eine Sättigung der Anregung derjenigen Atome auf, die zur gleichen Geschwindigkeitsuntergruppe gehören; hierdurch wird der Dopplereffekt und die entsprechende Verbreiterung der Linienbreite ausgeschlossen, so dass die natürliche Linienbreite zur Auflösungsgrenze wird.

Herr Hänsch hat damals viele interessante Varianten der nichtlinearen Spektroskopie entwickelt, die insbesondere für die praktische Spektroskopie sehr nützlich waren und damit diesen neuen Methoden zum Durchbruch verholfen. Ähnlich war es mit der sog. zwei-Photonen-Spektroskopie, die ebenfalls auf dem gleichen Prinzip beruht. Es gelang ihm mit der Zweiphotonen-Spektroskopie erstmals, die Lamb-Shift des Grundzustands des Wasserstoffatoms erstmals direkt zu messen, später führten diese Messungen zu einer genaueren Bestimmung der Rydberg-Konstante. Bei der Steigerung der Präzision, die diese

neuen Methoden erlaubten, zeigte sich bald, dass die Wellenlängenmessung in der Spektroskopie an eine Grenze stößt, da das Wellenlängennormal nur mit einer Genauigkeit von  $10^{-10}$  definiert ist.

Da die Zeit in der Physik mit Hilfe des Cäsium-Frequenzstandards wesentlich genauer definiert ist, war es deshalb zweckmäßig, zu einer Frequenzmessung überzugehen. Theodor Hänsch hat deshalb sehr bald auch Überlegungen angestellt, die Lichtfrequenz von Spektrallinien zu messen. Wellenlänge und Frequenz einer Spektrallinie sind durch die Lichtgeschwindigkeit verknüpft; um die volle Genauigkeit der Frequenzmessung auf die Bestimmung der Wellenlänge ausnutzen zu können, müsste deshalb die Lichtgeschwindigkeit entsprechend genau bekannt sein. Da für eine Lichtgeschwindigkeitsmessung ebenfalls eine Längenmessung benötigt wird, bedeutet dies noch keinen besonderen Fortschritt. Man hat deshalb, um diese Schwierigkeit zu lösen, eine Definition des Längennormals gewählt, die diese Problematik für alle Zeiten beseitigt hat. Man entschloss sich nämlich, die Lichtgeschwindigkeit zu definieren und als Längennormal eine Strecke zu wählen, die das Licht in einer definierten Zeit zurücklegt. Damit war die Längenmessung auf eine Zeitmessung zurückgeführt, und man konnte die Wellenlängenmessung durch eine Frequenzmessung ersetzen. Diese historische Entwicklung muss hier erwähnt werden, um die modernen Entwicklungen von Theodor Hänsch im Zusammenhang mit der Frequenzmessung von Spektrallinien deutlich zu machen.

Die Messung der Lichtfrequenz stand auch noch aus einem anderen Grund im Mittelpunkt des Interesses. Der Laser als Lichtquelle mit sehr geringer Spektralbreite und damit sehr großer Kohärenzlänge emittierte das Ideal einer kohärenten Welle, wie sie auch aus dem Radiofrequenzbereich bekannt ist. Die Frequenz von sichtbarem Laserlicht ist sehr hoch, und es war eine Herausforderung, geeignete Methoden der Messung zu entwickeln. Lichtdetektoren mit sehr hoher Zeitauflösung wurden damals in den Metall-Metall-Dioden gefunden, mit denen Frequenzdifferenzen zwischen Laserquellen bis in den Bereich von etwa  $900 \cdot 10^9$  Hz gemessen werden konnten. Diese Messungen wurden erstmals von A. Javan, einem der Laserpioniere, der bei den Bell-Laboratorien den ersten Gaslaser entwickelt hatte und später am MIT arbeitete, realisiert. Diese Arbeiten sind 1967 publiziert worden. Durch die Kombination verschiedener Laserlichtquellen gelang es später, durch fortgesetzte Differenzbildung von der hohen Lichtfrequenz in den Bereich des Cäsium-Frequenznormals bei  $9 \cdot 10^9$  Hz vorzustoßen. Auf diese Weise konnte durch Kombination verschiedener Laserlichtquellen der Anschluss an das Frequenznormal im Mikrowellenbereich erreicht werden. Mit diesen Anordnungen gelang es schließlich, mit sehr hoher Genauigkeit die Frequenz einer Linie des Helium-Neon-Lasers zu bestimmen. Die Wellenlänge dieses Lasers konnte ebenfalls sehr präzise im Vergleich zu dem Längennormal gemessen werden. Aus Wellenlänge und Frequenz wurde schließlich die Lichtgeschwindigkeit bestimmt. Diese Messung war die Basis für den Wert der Lichtgeschwindigkeit, der schließlich der Definition der Lichtgeschwindigkeit zugrunde gelegt wurde. Der Pionier dieser Messungen war K. Evenson vom National Institute of Standards and Technology in Boulder, Colorado, der die wesentlichen Grundlagen dieser Untersuchungen entwickelt hat. Es war dann im Jahre 1984, als die Conférence Générale de Poids et Mesures schließlich die Lichtgeschwindigkeit definiert hat und damit die präzise Längenmessung auf eine Zeitmessung zurückführte.

Die Steigerung der Genauigkeit durch die Frequenzmessung in der Spektroskopie ist eindrucksvoll in Abb. 1 gezeigt. Die klassische hochauflösende Spektroskopie führte zu einer relativen Genauigkeit von etwa  $10^{-7}$ . Die Lasermethoden haben dann eine Verbesserung gebracht, die schließlich durch die Definition der Länge eingeschränkt war; die Frequenzmessungen führten schließlich zu einer Steigerung der relativen Genauigkeit um 4 Größenordnungen; dieser Fortschritt wurde in einem Zeitintervall von etwa 15 Jahren erreicht.

Die Anordnungen, mit denen die Frequenz des Laserlichts damals gemessen wurden, waren sehr aufwändig. Die Differenz zwischen der zu messenden Laserfrequenz und der Frequenz des Zeitnormals wurde mit verschiedenen Lasersystemen überbrückt. Es waren deshalb viele unterschiedliche Laser notwendig, die zusammenschaltet werden mussten. Die von Hänsch und Hall benutzte Anordnung, die im letzten Jahr mit dem Nobelpreis geehrt wurde, überbrückt diese Differenz auf viel einfachere Weise. Man geht von Laserimpulsen aus, die nur aus wenigen Schwingungszyklen des Lichtes bestehen. Die Laseranordnungen, die solche Pulse aussenden, erzeugen eine regelmäßige Folge, wobei die Zeit zwischen zwei Pulsen durch die Laufzeit des Lichts im Laserresonator bestimmt wird. Abb. 2 zeigt im oberen Teil zwei Pulse einer solchen Folge. Die Abbildung erläutert, dass ein solcher Puls durch eine Überlagerung vieler Einzelfrequenzen zusammengesetzt werden kann, wobei die Zahl der Frequenzen, die zur Synthese notwendig sind, durch die Dauer des Einzelpulses bestimmt wird. Das Bild zeigt, dass die Folge von kurzen Pulsen aus einem Frequenzkamm besteht, dessen Abstand durch die Frequenz  $f_r$  vorgegeben ist. Ein Frequenzkamm, Abb. 2, ist von vornherein nicht konstant, so dass Vorkehrungen getroffen werden müssen, um eine zusätzliche Kontrolle zu erzielen. Zu diesem Zweck werden zwei Frequenzen herausgegriffen, die sich um eine Oktave unterscheiden. Man kann in diesem Falle durch Verdopplung der Frequenz des einen Signals einen Vergleich mit der Komponente bei der doppelten Frequenz erreichen und die Übereinstimmung überprüfen und kontrollieren. Auf diese Weise ist eine Phasensynchronisation des Kamms zu erreichen. Diese Methode ist nur anwendbar, wenn die Frequenzausdehnung des Kamms eine volle Oktave umfasst. Dies war für lange Zeit ein Problem, bis es dann gelang, mit Hilfe von speziellen Glasfasern, die Kammbreite durch optisch nichtlineare Effekte zu vergrößern. Diese Möglichkeit führte zum Durchbruch bei der Realisierung des Frequenzkamms. Durch die Kontrolle der beiden Frequenzen wird der gesamte Frequenzkamm stabil gehalten, und man kann die einzelnen Frequenz-Komponenten des Kamms zum Herunterteilen einer Laserfrequenz die Cäsium-Standardfrequenz benutzen. Die Frequenzmessung der Laserstrahlung ist damit sehr einfach geworden.

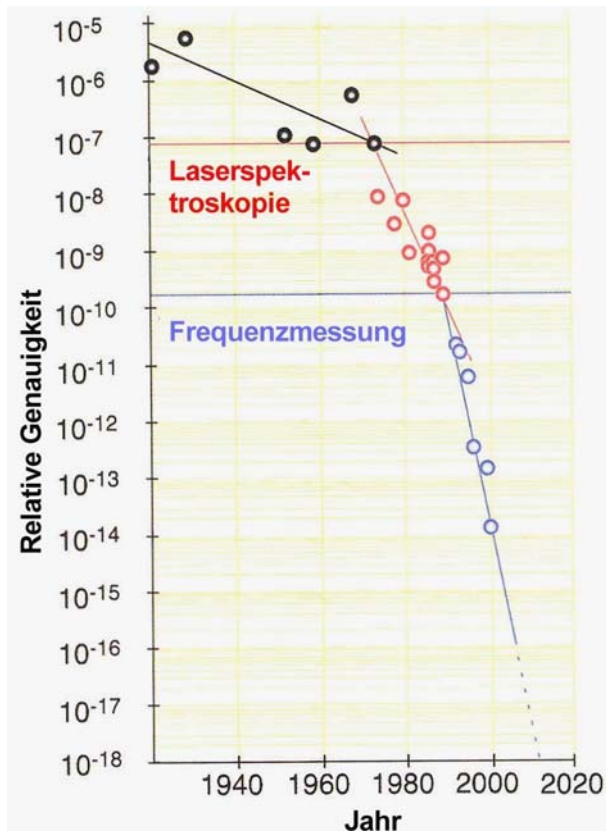
Die vereinfachte Frequenzmessung mit Hilfe eines Frequenzkamms wird die Anwendung der Laserspektroskopie in Zukunft sehr wesentlich vereinfachen und wesentlich präziser machen. Neben den genauen spektroskopischen Informationen, die zu genaueren physikalischen Grundkonstanten führen, wird es auch möglich sein, zu untersuchen, ob diese Naturkonstanten auch tatsächlich konstant sind und keinen Veränderungen unterworfen sind, wie dies bereits vielfach vorhergesagt wurde. Die Meßmethode wird auch helfen, einen neuen Frequenzstandard im optischen Bereich zu realisieren, der bis zu drei Größenordnungen genauer erwartet wird als der heutige Standard auf der Basis von Cäsium-Atomen. Diese Vereinfachung in der Frequenzmessung wird auch zu einer viel genaueren und einfacheren Navigation führen und auch bestehende technische Begrenzungen in der digitalen Datenübertragung beseitigen. Darüber hinaus erwartet man noch viele andere interessante Ergebnisse in der Geophysik, in den Grundlagen der Physik und in der Astrophysik. Zusammengefasst kann man sagen, dass mit der Technik ein neues Fenster in der Präzisionsmessung aufgestoßen worden ist.

Nachdem Herr Hänsch im Jahre 1986 die Stanford-Universität verlassen hatte und den Ruf als Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik und auf ein Ordinariat an der Ludwig-Maximilians-Universität München angenommen hatte, konnte er seine Arbeiten wesentlich ausdehnen. Die Probleme, die er in München neu aufgegriffen hat, waren Experimente mit dem Tunnelmikroskop. Diese Arbeiten wurden teilweise in Zusammenarbeit mit Gerd Binnig durchgeführt, der ein Zweiglabor der IBM an der Ludwig-Maximilians-Universität in München eingerichtet hatte. Die Messung der Wasserstoffspektren wurden durch den Einsatz einer Atomstrahlapparatur verbessert. Die oben beschriebenen Arbeiten am Frequenzkamm sind Teil der hochauflösenden Spektroskopie am Wasserstoff. Ein weiterer neuerer Bereich, der von Herrn Hänsch aufgenommen wurde, war das Studium von optischen Gittern, die in stehenden Laserfeldern entstehen und aus regelmäßigen Strukturen von freien Atomen gebildet werden, die als Basis vieler interessanter Experimente dienen können. Später hat Theodor Hänsch dann eine interessante Aktivität auf dem Gebiet der Bose-Einstein-

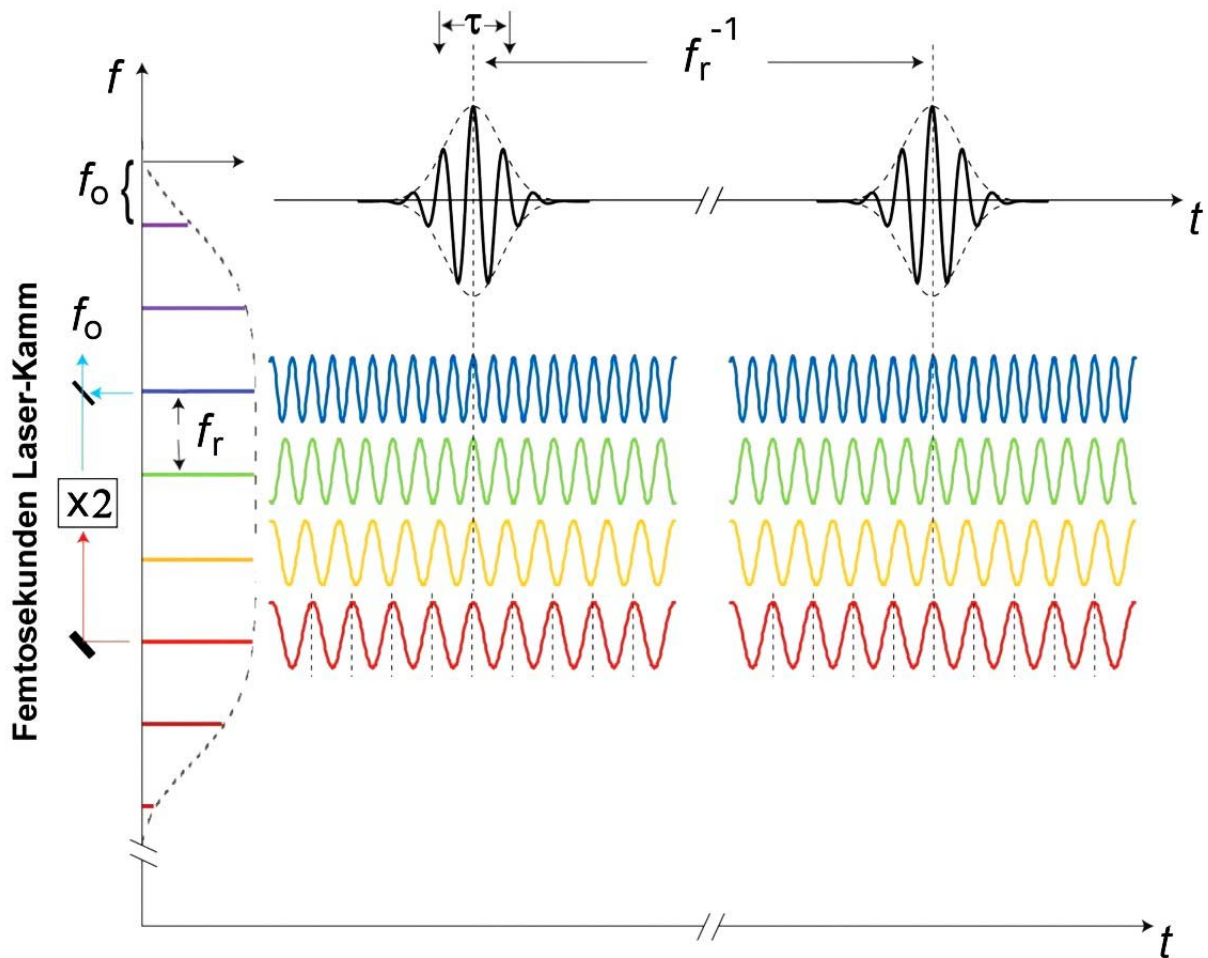
Kondensation und den dabei erzeugten kohärenten Atomstrahlen begonnen. Es gelang damals erstmals, den sog. Atomlaser mit zeitlich kontinuierlichem Strahl zu realisieren. Potentielle Anwendungen haben zur Entwicklung verschiedener Anordnungen von Mikrofallen und schließlich auch zur Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten in diesen Mikrofallen geführt, die insbesondere für Atomuhren und evtl. auch für die Realisierung des Modells eines Quantencomputers sehr interessant sind. Ein herausragendes Ergebnis war auch die Erzeugung der MOT-Gitter mit Bose-Einstein-Kondensaten, bei denen Gitter mit einzelnen Atomen realisiert werden konnten.

Neben den Ergebnissen, die Theodor Hänsch auf dem Gebiet der hochauflösenden Spektroskopie erzielt hat, sind diese übrigen Aktivitäten von ähnlich herausragendem wissenschaftlichem Gewicht und Bedeutung, so dass in Zukunft sicherlich noch viele Anstöße und Anregungen durch ihn für die Physik zu erwarten sind. Sein wissenschaftliches Werk zeugt von einem besonders ideenreichen Physiker, der Spaß an der Physik hat und mit großer Begeisterung und viel Freude seine Arbeit verfolgt. Daneben setzt er die von ihm entwickelten Methoden auch in praktische Messgeräte um und hilft somit, seine Erfahrung dem praktischen Einsatz zugänglich zu machen.

## Bildunterschriften:



**Abb. 1:** Relative Genauigkeit in der Spektroskopie. Die relative Genauigkeit der Messung wurde Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts durch die Genauigkeit des Längennormals in der Physik eingeschränkt. Durch die Messung der Lichtfrequenz in der Laserspektroskopie konnte die Genauigkeit um rund vier Größenordnungen gesteigert werden.



**Abb. 2:** Frequenzanalyse einer regelmäßigen Pulsfolge von Femtosekunden-Laserpulsen. Die Wiederholfrequenz der Pulse ist mit  $f_r$  bezeichnet (aus dem Pulszug sind nur zwei benachbarte Pulse dargestellt). Der Kehrwert dieser Frequenz  $f_r^{-1}$  ist der Zeitabstand zwischen zwei Pulsen. Die gezeigten Pulse kann man synthetisieren, indem diskrete Schwingungen (wie im unteren Teil durch verschiedene Farben gezeigt) addiert werden. Die Anzahl der Frequenzen eines solchen „Kammes“, die addiert werden müssen, um den Puls zu reproduzieren, ist durch die mittlere Dauer der Einzelpulse bestimmt, und zwar entspricht die Breite des Kammes  $\tau^{-1}$ . Die Zeichnung vereinfacht die Verhältnisse. In Wirklichkeit ist die Zahl der Elemente („Zinken“) eines solchen Kammes in der Größenordnung von einer Million.