

PHYSIK-NOBELPREIS 2005

Eine Leidenschaft für Präzision

THEODOR W. HÄNSCH, SEIT 1991 ORDENTLICHES MITGLIED DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN, ERHIELT FÜR SEINE BAHNBRECHENDEN ARBEITEN ZUR FREQUENZMESSUNG VON LASERLICHT DEN PHYSIK-NOBELPREIS 2005.



**Nobelpreisträger
Theodor W. Hänsch,
seit 1991 ordentliches
Mitglied der Bayerischen Akademie der
Wissenschaften.**

VON HERBERT WALTHER

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 Gitterspektroskopie 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 so genannte 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.

Theodor W. 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 Verfahren eindrucksvoll bewiesen.

Grenzen der Längendefinition

Es zeigte sich bei dieser Entwicklung der Spektroskopie, dass die Definition der Länge in der Physik, die mit Hilfe der Wellenlänge einer Krypton-Spektrallinie vorgenommen wurde und einen relativen Fehler von 1×10^{-10} hatte, nicht mehr für die erhöhten Anforderungen in der Laserspektroskopie ausreichend war. Da die Zeit in der Physik mit Hilfe des Cäsium-Frequenzstandards wesentlich genauer definiert ist, war es deshalb zweckmäßig, zu einer Frequenzmessung überzugehen. Wellenlänge und Frequenz einer Spektrallinie sind durch die Lichtgeschwindigkeit verknüpft; um die volle Genauigkeit der Frequenzmessung 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. Auf diese historischen Entwicklungen muss hier eingegangen werden, um die modernen Entwicklungen von Theodor Hänsch im Zusammenhang mit der Frequenzmessung von Spektrallinien deutlich zu machen.

Frequenz statt Wellenlänge

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 war.

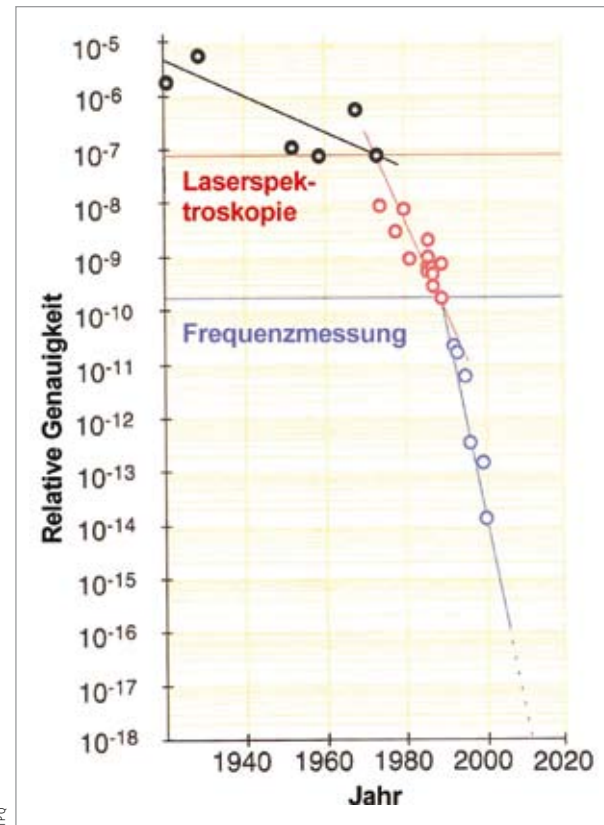
Die Frequenz von sichtbarem Laserlicht ist sehr hoch, und es war eine Herausforderung, geeignete Methoden der Messung zu entwickeln. Lichtdetektoren mit sehr hoher Zeitaufösung wurden damals in den Metall-Metall-Dioden gefunden, mit denen Frequenzdifferenzen zwischen Laserquellen bis in den Bereich von etwa 900×10^9 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 9×10^9 Hz vorzustoßen. Auf diese Weise konnte durch Kombination verschiedener Laserlichtquellen der Anschluss an das Frequenznormal 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.

Höchste Genauigkeit

Die Steigerung der Genauigkeit durch die Frequenzmessung in der Spektroskopie ist eindrucksvoll in Grafik 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 zu einer Steigerung der relativen Genauigkeit um 4 Größenordnungen in einem Zeitintervall von etwa 15 Jahren.



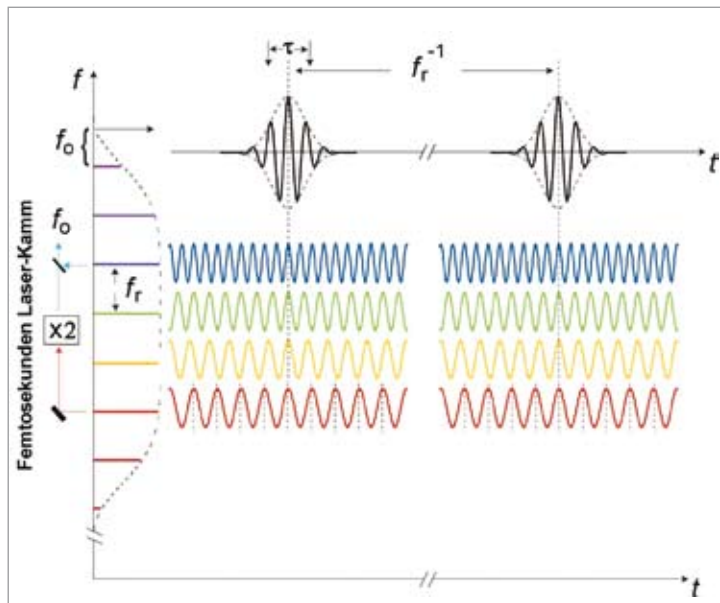
Die Leistung von Hänsch und Hall

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 jetzt mit dem Nobelpreis geehrt wurde, überbrückt diese Differenz auf viel einfachere Weise. Man geht von Laserpulsen 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.

Grafik 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.

Grafik 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 τ^{-1} . Die Zeichnung vereinfacht die Verhältnisse. In Wirklichkeit ist die Zahl der Elemente („Zinken“) eines solchen Kammes in der Größenordnung von einer Million.



Grafik 2 zeigt im oberen Teil zwei Pulse einer solchen Folge. Die Abbildung erläutert, dass ein solcher Puls durch eine Überlagerung vieler Einzel Frequenzen zusammengesetzt ist, wobei die Zahl der Frequenzen, die in dem Pulszug enthalten 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, Grafik 2, ist von vornherein nicht stabil, 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 die notwendige Phasensynchronisation des Kammes zu erreichen.

Diese Methode ist nur anwendbar, wenn die Frequenzausdehnung des Kammes eine volle Oktave umfasst. Dies war für lange Zeit ein Problem, bis es dann gelang, mit Hilfe von speziellen Glasfasern, die durch P. Russell von der Universität Bath und jetzt an der Universität

Erlangen entwickelt worden sind, die Kammbreite durch optisch nichtlineare Effekte zu vergrößern. Diese Möglichkeit hat den Durchbruch bei der Realisierung des Frequenzkammes gebracht. Durch die Kontrolle der beiden Frequenzen wird der gesamte Frequenzkamm stabil gehalten, und man kann die einzelnen Frequenzkomponenten des Kammes zum Herunterteilen einer Laserfrequenz benutzen. Die Frequenzmessung der Laserstrahlung ist damit sehr einfach geworden.

Zukünftige Anwendungsmöglichkeiten

Die vereinfachte Frequenzmessung mit Hilfe eines Frequenzkammes 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 ist als der heutige Standard

auf der Basis von Cäsium-Atomen, der im Mikrowellenbereich arbeitet. Diese Vereinfachung in der Frequenzmessung wird zu einer viel genaueren und einfacheren Navigation führen und auch bestehende technische Begrenzungen in der digitalen Datenübertragung beseitigen. Darüber hinaus ergeben sich noch viele andere interessante Probleme in der Geophysik, in den Grundlagen der Physik und in der Astrophysik, die nunmehr untersucht werden können. Zusammengefasst kann man sagen, dass mit der Technik ein neues Fenster in der Präzisionsmessung aufgestoßen worden ist.

Herzliche Gratulation

Theodor Hänsch hat an der Universität Heidelberg studiert und wurde dort 1969 promoviert. Das Thema der Doktorarbeit war die kohärente Wechselwirkung von Atomen mit Laserlicht. Danach war er Postdoc an der Stanford University bei Prof. Schawlow und wurde dort innerhalb kürzester Zeit zum Full Professor ernannt (1975). Im Jahre 1986 hat er den Ruf als Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und als Professor an der Ludwigs-Maximilians-Universität München angenommen und arbeitet seit dieser Zeit in München. Für seine Arbeiten hat er sehr viele Preise bekommen, die jetzt natürlich durch den Nobelpreis überstrahlt werden. Die Arbeiten zur Frequenzmessung von Laserlicht, die oben beschrieben worden sind, wurden im Wesentlichen in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts am Max-Planck-Institut für Quantenoptik durchgeführt.

Die Bayerische Akademie der Wissenschaften gratuliert ihrem ordentlichen Mitglied herzlich zu dieser höchsten Auszeichnung, die in der wissenschaftlichen Welt zu vergeben ist.

