

Roy J. Glauber



John L. Hall



Theodor W. Hänsch (Foto Verlag)

Pünktlich durch gekämmtes Licht

Der Physik Nobelpreis 2005

Marianne Peroutka, Kirsten Römer und Wolfram Adlassnig

Der Nobelpreis 2005 ist wieder fest in der Hand der Quantenoptik!

Eine Hälfte des Preises 2005 geht an den US-Amerikaner Roy J. Glauber für seine Pionierarbeit, die Quantenphysik auf optische Phänomene anzuwenden. Die Juroren der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften ehren ihn für seine quantenmechanische Theorie der optischen Kohärenz.

Die andere Hälfte des Preises geht zu gleichen Teilen an den US-Amerikaner John L. Hall und an den Deutschen Theodor W. Hänsch für ihre Entwicklung der auf Lasertechnik basierenden Präzisionsspektroskopie einschließlich der optischen Frequenzkammtechnologie.

Glauber und die Quantenoptik

Bereits 1963 hat Glauber die kohärenten Zustände des Lichts mathematisch untersucht und dadurch die Basis für die Welle – Teilchen-Beschreibung gelegt.

Glauber hat die Kohärenz des Lichtes, also den Zusammenhang der elektromagnetischen Schwingungen an verschiedenen Orten und/oder zu verschiedenen Zeiten, analysiert, indem er vom Detektionsprozess der Photonen ausging. Man muss demnach berücksichtigen, dass sich der Zustand des Lichtes ändert, sobald ein Photon detektiert wird.

Mag. M. Peroutka, K. Römer und Mag. W. Adlassnig, Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität Wien, haben diesen Artikel für das Seminar „Moderne Physik und Schule“ erstellt.

Wenn man die Korrelation des Lichtes an n verschiedenen Orten messen will, so müssen in einem Lichtfeld n Photonen absorbiert werden. Eine Korrelation kann auch dann nur bis zur n -ten Ordnung angegeben werden. Eine Errungenschaft von Glauber ist, dass klare Voraussagen über Experimente mit n Photonen gemacht und die Messergebnisse genau interpretiert werden können. Hier stellt sich die Frage: Wie kann ein Photonenstrahl aus voneinander unabhängigen Teilchen ein Interferenzmuster erzeugen? Der Welle-Teilchen-Dualismus kommt in diesem Phänomen deutlich zum Vorschein: Das Transmissionsmuster der elektromagnetischen Energie wird von der klassischen Optik festgelegt. Diese Art der Energieverteilung bildet den Hintergrund für die Photonverteilung. Es handelt sich um getrennte Teilchen, die aber einem gemeinsamen Pfad folgen, den die Optik beschreibt. Daher kommt der Begriff „Quantenoptik“, der die Quantentheorie mit der Optik vereint.

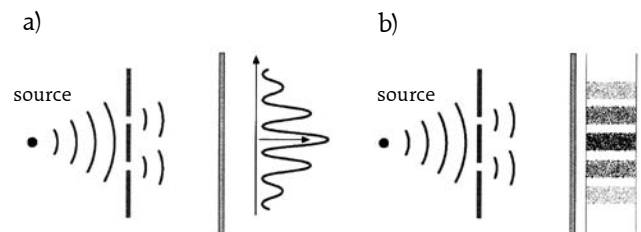


Abb. 1: Der Unterschied zwischen einer klassischen und einer quantenphysikalischen Beobachtung des Lichts. Der Durchgang von Licht durch zwei Spalten in unterschiedlicher Betrachtung: a) als Bewegung einer elektromagnetischen Welle und b) als Partikelfluss. Dasselbe Interferenzmuster erscheint im ersten Fall als Interaktion zweier Wellen während es im zweiten Fall als Verteilung individueller Partikel auftritt. (Abbildung entnommen aus "The Nobel Prize in Physics 2005, Supplementary information to press release")

„Gequetschte“ Zustände

Die Photonen des thermischen Lichts halten geringere Abstände ein, als bei einer rein statistischen Verteilung zu erwarten wäre. Dieses „Zusammenklumpen“ steht mit den Gesetzen der klassischen Optik zunächst im Einklang. Nach E.M. Purcell stützt sich diese Interpretation teilweise auf das klassische Modell, bestätigt aber auch grundsätzlich den Quantencharakter des Lichtes. Im Gegensatz zu klassischem Licht tritt bei ideal kohärenten Laserlicht-Photonen kein Zusammenklumpen auf, d.h. die Photonen meiden einander. Dieses Phänomen wird auch „anti-bunching“ genannt und wurde ebenfalls experimentell bestätigt.

Den Zusammenhang zwischen klassischer Optik und Photonen-Optik hat Glauber über die Einführung der kohärenten Zustände, die auch als „Glauber-Zustände“ bezeichnet werden, hergestellt. Kohärente Zustände besitzen gleiche Amplitude und gleiche Phase mit einer Heisenbergschen Unschärfe. Durch Minimieren dieser Unschärfe erzeugt man so genannte „gequetschte“ Zustände, die mit Glaubers Theorie im Einklang sind. Diese Zustände finden Anwendung bei Präzisionsmessungen wie z.B. den Gravitationswellendetektoren. Glauber lieferte mit seinen mathematischen Theorien die Basis für praktisch alle nachfolgenden Überlegungen in der Quantenoptik und damit auch für die Jahre später folgenden Experimente von Hall und Hänsch.

Von der Pendeluhr zur optischen Laseruhr

Das Grundprinzip fast aller unserer Instrumente zur Zeitmessung beruht darauf, dass man die Frequenz eines oszillierenden Körpers kennt und durch Abzählen der Schwingungen des Oszillators möglichst genau die verstrichene Zeit abschätzt. Dabei ist es wichtig, störende Einflüsse so gut wie möglich zu minimieren.

Bei den beiden Preisträgern Hall und Hänsch geht es um Präzisionsmessungen der Eigenschwingungen von Atomen, den atomaren Frequenzen. Damit eine Frequenz bestimmt werden kann, muss die Anzahl der Schwingungen in einer bestimmten Zeitspanne ermittelt werden. Umgekehrt kann man durch das Abzählen von Schwingungen die Zeit messen. Der limitierende Faktor bei einer solchen Messung ist die Gleichförmigkeit der Schwingung. Der Fortschritt der letzten 80 Jahre beruht im Prinzip darauf, dass man immer schnellere und präzisere Oszillatoren für die Zeitmessung nutzbar macht.

Pendeluhr schwingen mit etwa 0,5 Hz, Quarzuhren mit 32000 Hz und Atomuhren schließlich mit 9 GHz. Der Gangfehler wurde dadurch von einer Sekunde in hundert Tagen bei der Pendeluhr auf eine Sekunde in 30 Millionen Jahren bei der Atomuhr reduziert. Für eine noch höhere Genauigkeit müsste man einen noch schnelleren Oszillator finden - und den kennt man schon seit über 100 Jahren: sichtbares Licht. Dieses schwingt in einem Frequenzbereich von 10^{15} Hz. Aber wie soll man eine Billionen Schwingungen in einer Sekunde zählen?

Mit elektronischer Unterstützung sind Messungen nur bis zu einem Bereich von 10^{11} Hz möglich. Die Lösung ist ein „optisches Getriebe“, das die zu messenden sehr hohen Frequenzen in niedrigere zählbare Frequenzen übersetzt.

Wie fange ich Teilchen?

Als junger Forscher versuchte Hänsch 1972 zusammen mit dem späteren Nobelpreisträger Arthur L. Schawlow Übergänge zwischen dem 1s- und dem 2s-Zustand von Wasserstoff mittels Lasern zu messen. Dabei zeigte es sich, dass die Frequenzstabilität des benutzten Lasers von größter Wichtigkeit ist. Der entscheidende Durchbruch gelang Hänsch aber erst 10 Jahre später in Zusammenarbeit mit Hall. Sie entwickelten ein Verfahren, mit dem sich die Stabilität der in der optischen Spektroskopie verwendeten Laser auf eine Präzision von 10^{-15} erhöhen ließ. Damit war auch klar, dass die gängigen Cäsium-Atomuhren, die auf der Basis von Mikrowellen arbeiten, bald durch optische Atomuhren abgelöst werden. Der Trick war die Entwicklung der Frequenzkammoptik. Mit dieser Methode ist es ihnen gelungen, optische Frequenzen mit einer Genauigkeit von 10^{-18} stabil zu halten.

Die Frequenzkammtechnik

In einem Frequenzkammgenerator wird zunächst Licht in Form eines einfarbigen Laserstrahls erzeugt, dessen Frequenz exakt bekannt ist. Dieser wird durch Überlagerung des Laserlichtes mit sich selbst in ein Bündel hunderttausender gleicher Frequenzen aufgespalten, wodurch es zu sehr kurzen Laserpulsen kommt. Das gepulste Licht wird nun mit dem zu messenden Licht überlagert. Wie in der Akustik erreicht man dabei eine Schwebung mit weit geringerer Schwingungszahl. Diese Frequenzen können nun mit den herkömmlichen Abzählmethoden erfasst und auf die ursprüngliche Frequenz zurückgerechnet werden.

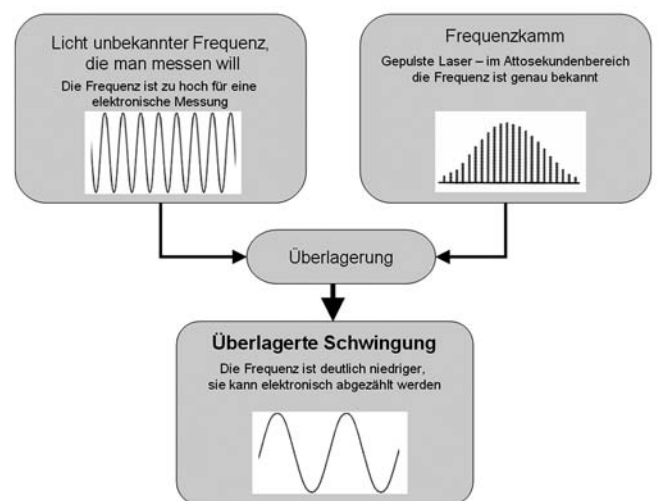


Abb. 2: Prinzip der Frequenzkammtechnik. Durch Überlagerung der zu messenden unbekannt Frequenz mit gepulstem Licht entsteht eine überlagerte Schwingung mit viel geringerer Frequenz, die gemessen werden kann.

Im Prinzip wird also nicht eine absolute Frequenz gemessen, sondern eine Frequenzdifferenz. Statt der Frequenz ω wird der Abstand zu ihrer eigenen Harmonischen 2ω gemessen, was zu $2\omega - \omega = \omega$ führt. Die Größe dieser so genannten Frequenzlücke ist somit genau die zu messende Frequenz. Die Frequenzlücke befindet sich jedoch noch immer in einem Bereich von einigen 10^{14} Hz. Daher muss man zusätzlich das Prinzip der optischen Intervallteilerstufen anwenden, um messbare Ergebnisse zu bekommen: mit zwei Eingangslasern wird in einem nichtlinearen Kristall die Summenfrequenz $\omega_1 + \omega_2$ erzeugt. Zusätzlich wird die zweite Harmonische eines dritten Lasers $2\omega_3$ auf die Summenfrequenz phasenstabilisiert, und es folgt: $2\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$. Daraus ist ersichtlich, dass der dritte Laser genau in der Mitte des Frequenzintervalls der ersten beiden oszilliert und somit dieses Intervall in zwei gleiche Teile teilt. Wenn man eine Kette von n solcher Intervallteilerstufen bildet, lässt sich die ursprüngliche Frequenzlücke um einen Faktor 2^n reduzieren.

Ein Frequenzkamm besteht aus einer Vielzahl von Moden, kurze Laserpulse unterschiedlicher Intensität, die einen konstanten Abstand und eine feste Phasenbeziehung zu einander haben. Dafür wird ein sehr kurzer Puls erzeugt, der zwischen den Endspiegeln des Laserresonators hin und her läuft. Die Frequenz der einzelnen Moden ergibt sich aus der Umlaufbedingung $2k_n L = n2\pi$, wobei L die Resonatorlänge und n die Anzahl der Halbwellen einer Mode im Resonator ist. Nimmt man an, dass die Pulseinhüllende $A(t)$ streng periodisch, unabhängig von ihrer Erzeugung und die Pulswiederholungsrate $\omega_r = 2\pi/T$ ist, dann wird $A(t) = A(t+T)$ definiert. Ist dieser Vorgang nicht periodisch, dann lässt sich die Einhüllende durch eine Fourier-Reihe entwickeln:

$$E(t) = A(t)e^{-i\omega_c t} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n e^{-i(\omega_r n + \omega_c)t}$$

Man erhält als Summe genau die Frequenz $\omega_n = n\omega_r + \omega_c$ und damit den äquidistanten Modenabstand, der die einzige relevante Eigenschaft des Frequenzkammes ist. Die Idee der Herstellung solcher Frequenzkämme existiert bereits seit den 70er Jahren, jedoch scheiterte es bis jetzt an den zu erreichenden Pulsdauern. Die Forschung auf dem Gebiet der Attosekundenlaser erhielt auch entscheidende Impulse durch die Arbeiten von F. Krausz an der TU Wien. Zusammen mit Hänsch ist es ihm gelungen, Attosekundenpulse präzise zu steuern und zu messen – die Geburtsstunde der „Attosekundenphysik“. Krausz leitet seit 2003 die Abteilung „Attosekunden- und Hochfeldphysik“ am Max Planck Institut in Garching bei München.

Anwendung und Zukunftsperspektiven

Frequenzkammgeneratoren sind heute um 160000 Euro für die günstigste Ausführung erhältlich. Die Firma MenloSystem, ein Ableger des Entwicklerteams vom Max Planck Ins-

titut in Garching, erzeugt und verkauft die patentierten Präzisionsgeräte an Laboratorien der ganzen Welt. Durch die höhere Messgenauigkeit rücken ganz neue Fragestellungen ins Zentrum der Forschung: Sind etwa Naturkonstanten wirklich konstant oder unterliegen sie doch kleinsten zeitlichen Änderungen? Auch die lang gesuchten Gravitationswellen könnten nun messbar werden. Aber die Einsatzbereiche der Frequenzkammtechnik sind nicht auf die Grundlagenforschung beschränkt. Zeitmessung ist auch der kritische Schritt bei der GPS Navigation. Die Landung von Raumsonden auf anderen Planeten war bisher weitgehend Glückssache - optische Laseruhren würden die Kursbestimmung entscheidend optimieren. Aber auch mit kuriosen Effekten ist aufgrund der neu gewonnenen Genauigkeit zu rechnen: Zwei optische Laseruhren würden bereits bei Höhenunterschieden von wenigen cm unterschiedliche Zeiten anzeigen – weil sie die gravitative Zeitdilatation messen könnten.

Jubiläum im Jahr der Physik

1905 stellte Einstein in den „Annalen der Physik“ seine revolutionäre Abhandlung zur Lichtquantenhypothese vor. Den Nobelpreis für diese Theorie bekam er erst 1922 - als Nachtrag zum nicht verliehenen Nobelpreis 1921 - und zwar „für seine Verdienste um die Theoretische Physik und insbesondere für die Entdeckung des Gesetzes für den Photoelektrischen Effekt“ – die Lichtquantenhypothese wurde dabei nicht ausdrücklich erwähnt.

Auch 100 Jahre später wandert die mit 1,1 Millionen Euro (10 Millionen Schwedische Kronen) dotierte Auszeichnung noch immer und immer wieder ins Lager der Quantenphysik.

Literatur:

- Alle Informationen und Veröffentlichungen zu den aktuellen und vorangegangenen Nobelpreisträgern sind auf der Homepage der Königlichen Schwedischen Akademie der Wissenschaften abrufbar (www.kva.se).
- Advanced information on the Nobel Prize in Physics 2005, 4. October 2005, The Royal Swedish Academy of Sciences, 1-14.
- The Nobel Prize in Physics 2005, Supplementary information to press release 4 Oct 2005, 1-7. <http://www.nobel.org>
- Brachner, A., Hartl, G. & C. Schau (Hrsg.) (2005) Abenteuer der Erkenntnis - Albert Einstein und die Physik des 20. Jahrhunderts, Deutsches Museum, München, 176 S.
- Udem T., Reichert, T., Holzwarth, R. & T. Hänsch (1999) Auf dem Weg zur Laser-Uhr, Physik in unserer Zeit, 29 (5), S. 223.
- Udem, T., Holzwarth, R. & T. Hänsch (2002): Uhrenvergleich auf der Femtosekundenskala, Physik Journal, 2, 39 – 45.