

Kohärenz und Präzision

Physik-Nobelpreise für Pionierleistungen in Quantenoptik und Laserspektroskopie

Wolfgang P. Schleich und Herbert Walther

Der diesjährige Nobelpreisträger Roy J. Glauber hat mit seinen Beiträgen zur Quantentheorie der optischen Kohärenz die Fundamente für die moderne Quantenoptik gelegt. Die zweite Hälfte des Preises teilen sich John L. Hall und Theodor W. Hänsch für ihre Entwicklung der Präzisionsspektroskopie auf der Grundlage des Lasers und insbesondere des optischen Frequenzkammes. Die Autoren dieses Beitrages und die Physiker-Gemeinde in Deutschland gratulieren den neuen Nobel-Laureaten.

Von der Kernphysik zur Quantenoptik

In den ersten Tagen des Januar 1944 verließ ein 19-jähriger Mann den Zug an der einsamen Bahnstation Lamy in New Mexiko. Hier kommt die Santa Fe Railroad der Stadt Santa Fe am nächsten. Der junge Mann war nicht allein. Ein etwas dicklicher Herr schloss sich ihm auf dem Weg nach Santa Fe an. Erst als sich beide der ihnen angegebenen Adresse 109 East Palace Avenue näherten, vermuteten sie, dass sie dasselbe Ziel hätten. Der ältere Herr trug sich bei der Leiterin, Dorothy McKibbin [1], unter dem Namen Jonny Newman ein, der jüngere unter dem Namen Roy Glauber. Der erste war der berühmte Mathematiker, Physiker und Entwickler des Computers John von Neumann, der zweite hatte sich unter seinem eigenen Namen eingetragen und ist einer der drei diesjährigen Preisträger des Physik-Nobelpreises. Das Ziel der beiden war Los Alamos.

Erste Erfahrungen

Während seiner Zeit in Los Alamos forschte Glauber in der Arbeitsgruppe von Robert Serber über Neutronendiffusion. Damit befand er sich ganz in der Nähe der Gruppe von Richard Feynman, der ebenfalls eine Theorieabteilung leitete.

Nach seiner Zeit in Los Alamos begann Glauber unter der Anleitung des späteren Nobelpreisträgers Julian Schwinger seine Dissertation



Roy Glauber erhielt eine Hälfte des diesjährigen Nobelpreises für seine Arbeiten zur Quantentheorie der optischen Kohärenz. (Foto: Paul Horowitz)

über Mesonentheorie in Harvard zu verfassen. Danach ging er im Herbst 1949 mit einem Stipendium nach Princeton an das Institute for Advanced Studies. Ein paar Monate vorher hatte er in einem Hotel in Berkeley eine interessante Beziehung über die Multiplikation von zwei Exponentialoperatoren, die Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren enthalten, gefunden. Diese Beziehung beeindruckte den Direktor des Institutes, Robert Oppenheimer, enorm. Auch das Buch von Albert Messiah über Quantenmechanik verweist in diesem Zusammenhang auf Glauber [2]. Erst später stellte sich heraus, dass diese Beziehung, die gerade im Zusammenhang mit den durch den Nobelpreis gewürdigten Arbeiten wichtig werden sollte, ein Spezialfall einer Lie-Algebra ist.

Während seines ersten Jahres in Princeton traf Glauber Wolfgang Pauli, der für einige Zeit am Institut weilte. Pauli bot Glauber eine Stelle für den Sommer 1950 an. Dieser akzeptierte und reiste mit dem französischen Luxussschiff „Ile de France“ nach Europa. Noch heute spricht er von dem beeindruckenden Leben, das sich ihm auf diesem Schiff bot. Champagner, Cocktails und eine un-

gewöhnliche Palette von Gerichten zu jeder Tages- und Nachtzeit sowie eine Vielzahl von jungen Damen, die sich im Heiligen Jahr 1950 auf einer Pilgerfahrt nach Europa befanden, waren ganz nach seinem Geschmack. In Europa angekommen, machte er zunächst in Paris Station, wo im Institute Poincaré eine große europäische Tagung stattfand. Bei dieser Gelegenheit lernte er die sehr direkte Art von Pauli kennen. Glauber hatte sich während der ersten Tage in Paris eine Erkältung zugezogen und seine Stimme verloren. Als er Pauli bei der Tagung wieder sah, sagte er mit kaum vernehmbarer Stimme „I have lost my voice“ und Pauli antwortete grinsend „Yeah, you have lost your voice and you don't look so good either“.

Nach der Tagung genoss Glauber noch einige Tage das Pariser Leben. Da er vorher noch nie in Paris gewesen war, kam jetzt die „Realität Paris“ zum Leben, wie er es selbst einmal nannte: „The postcards came to life“. Deshalb traf er auch erst einige Wochen nach Pauli in Zürich ein. Inzwischen hatte sich Glaubers Mutter auch schon Gedanken gemacht, wo ihr Sohn abgeblieben war, da sie seit seiner Abreise nichts mehr von ihm gehört hatte. Sie hatte deshalb an Professor Pauli geschrieben und sich nach dem Befinden ihres Sohnes erkundigt. Pauli kümmerte sich selbst darum, dass Glauber umgehend einen Brief an die Mutter verfasste. Auch später nutzte Pauli jede Gelegenheit, um Glauber mit dieser Geschichte zu necken, so unterbrach er oft die Vorlesung, wenn Glauber den Saal betrat, um sich nach dem Wohlbefinden seiner Mutter zu erkundigen.

Ein Beispiel für die schelmische Natur von Pauli liefert ein Vorfall bei dem Abteilungsausflug nach Stansstad. Am späten Nachmittag wurde Fußball gespielt und im See geschwommen. Ab und zu schoss Pauli, begleitet von seinem Gelächter, den Ball in den See und die Studenten und Assistenten mussten hinausschwimmen, um ihn zu holen. Schließlich suchte er sich ein neues Ziel aus. Glauber hatte den ganzen

Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich, Abteilung Quantenphysik, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm

Prof. Dr. Herbert Walther, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching

Nachmittag eine große Kamera mit herumgetragen und jetzt begonnen, Pauli beim Fußballspielen zu fotografieren. Eine bemerkenswerte Aufnahme [3] zeigt Pauli, der auf die Kamera zielt. Dabei sieht man den Ball, kurz bevor er die Kamera und Glauber trifft, der von dem Impulsübertrag zu Boden ging.

Eine neue Streunäherung

Nach seinen Abenteuern in Paris und einem weiteren Jahr in Princeton erhielt Glauber im Sommer 1951 seine erste feste Anstellung. Caltech hatte gerade Feynman von Cornell eingestellt. Dieser hatte sich jedoch ausbedungen, dass er das erste Jahr als Forschungssemester in Brasilien verbringen würde. Glauber übernahm dessen Vorlesung über Quantenmechanik. Bei dieser Gelegenheit hat er auch im Frühjahr 1952 mit der Chemikergruppe von Linus Pauling zusammen gearbeitet. Dabei hat ihn insbesondere die Streuung von Elektronen an Gasmolekülen interessiert. Diese Experimente von Verner Schomaker zeigten verblüffende Ergebnisse, die mit der üblichen Störungstheorie erster Ordnung (Born-Näherung) nicht zu erklären waren. Deshalb entwickelte Glauber eine neuartige Näherung, die auch bei kurzen Wellenlängen gültig war. Diese Theorie hat Anwendungen in vielen Bereichen der Physik gefunden und ist in der Streutheorie als Glauber-Näherung bekannt.

Inzwischen hatte Schwinger mit der Verwaltung von Harvard ausgehandelt, dass ihm ein Assistent zugeteilt wurde. Diese Stelle wurde Glauber angeboten, und er kam zurück nach Harvard. Nach dem ersten Jahr als Assistent wurde er Assistenzprofessor und blieb bis heute in Harvard, wo er seit 1976 Mallinckrodt-Professor ist. In den folgenden Jahren beschäftigte sich Glauber vorwiegend mit den Problemen der Streutheorie und insbesondere mit der Vielfachstreuung von Teilchen. Sehr wichtig ist in diesem Zusammenhang seine Entdeckung der diffraktiven Dissoziation [4].

Geburt der Quantenoptik

In den frühen 60er-Jahren wandte sich Glauber einer völlig anderen Thematik zu. Er entwickelte die Quantentheorie für den Nachweis von Photonen, für die er jetzt mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Mit seiner Quantentheorie der Kohärenz [5, 6] schuf er die Grund-

lagen der heutigen Quantenoptik.

Obwohl die Quantentheorie des Strahlungsfeldes schon in den ersten Tagen der Quantenmechanik von Max Born, Pascual Jordan, Werner Heisenberg und Paul A. M. Dirac geschaffen worden war, konnte sie nicht angewandt werden, da die Formeln für bestimmte Effekte unendliche Werte produzierten. Die Experimente von Willis E. Lamb und Polykarp Kusch zur Verschiebung der Wasserstofflinien und dem anomalen magnetischen Moment bestätigten 1947, dass Licht quantenmechanisch behandelt werden muss. Diese revolutionären Experimente führten schließlich zur Quantenelektrodynamik, die hauptsächlich auf Hochenergieprozesse angewendet wurde. Deshalb war die generelle Meinung, dass die Quantisierung des Strahlungsfeldes auf die üblichen optischen Beobachtungen keinen Einfluss hätte.

Diese Erfahrungstatsache wurde jedoch Mitte der 50er-Jahre durch die Experimente von Robert Hanbury Brown und Richard Q. Twiss widerlegt. Sie beobachteten mit interferometrischen Methoden die Ausdehnung von weit entfernten Sternen. Dazu benutzten sie die Intensitätskorrelationen in den Photostromen von zwei räumlich getrennten Detektoren. Diese zeigten eine Erhöhung, wenn die optische Weglängendifferenz zwischen den beiden Signalen verschwand. Die Autoren interpretierten diese Erhöhung als einen Quanteneffekt. Licht kommt in „Klumpen“ und zeigt „Bunching“. Ein zweites Photon wird daher mit größerer Wahrscheinlichkeit unmittelbar nach dem Nachweis eines ersten Photons detektiert als später. Dieses Photon-Bunching-Experiment mit der Sonne als Lichtquelle kann als die Geburtsstunde der Quantenoptik angesehen werden.

Quantentheorie der Kohärenz

Mit der Erfindung des Masers und des Lasers in den frühen 60er-Jahren eröffneten sich völlig neue Lichtquellen, und Quanteneffekte dieser neuen Strahlung wurden vermutet. Jedoch fehlte eine Theorie für die Messung. Diese Quantentheorie der optischen Kohärenz wurde 1963 von Glauber entwickelt [5, 6]. Eine zentrale Rolle spielt dabei das Konzept des kohärenten Zustandes. Er war zum ersten Mal von Erwin Schrödinger 1927 eingeführt worden, um zu zeigen, dass ein

Wellenpaket nicht immer zerfließen muss. Glauber baute aus diesen Zuständen den gesamten Formalismus der Quantenoptik auf. Insbesondere zeigte er, dass für kohärente Felder alle Korrelationsfunktionen faktorisieren. Als Konsequenz ist die Intensitätskorrelationsfunktion unabhängig von der Verzögerungszeit. Dieser Effekt wird auch bei Laserlicht, das näherungsweise durch einen kohärenten Zustand beschrieben werden kann, beobachtet.

Darüber hinaus gibt es auch den sog. Anti-Bunching-Effekt, bei dem die Intensitätskorrelation für kurze Verzögerungszeiten fast zu Null wird. Die Wahrscheinlichkeit, zwei Photonen nacheinander nachzuweisen, verschwindet. Anti-Bunching von Licht tritt z. B. bei der Resonanzfluoreszenz eines Atoms auf und wurde unabhängig voneinander in den Gruppen von Leonard Mandel (Rochester) und Herbert Walther (Garching) nachgewiesen. In diesem Fall liegt ein nicht-klassischer Zustand des Strahlungsfeldes vor. Diese Charakterisierung ist ebenfalls durch die kohärenten Zustände möglich geworden. Sie erlaubten nämlich die Einführung von Verteilungen im quantenmechanischen Phasenraum. Somit gelang es auch, die Brücke zwischen klassischer und quantenmechanischer Beschreibung des Strahlungsfeldes zu schlagen.

Die Glauber-Darstellung des Dichteoperators mit Hilfe von kohärenten Zuständen war für die Entwicklung der Quantentheorie des Lasers durch die Gruppen von Lamb und Marlan O. Scully (damals Yale) sowie Hermann Haken und Hannes Risken (damals Stuttgart) ausschlaggebend. Sogar die Theorie des Atomlasers basiert auf den frühen Arbeiten von Glauber. Es ist daher nicht verwunderlich, dass er auch sehr aktiv an diesen Forschungen mitgearbeitet hat.

Der von Glauber eingeführte Formalismus der Kohärenz gilt nicht nur für Licht, sondern auch für jedes bosonische Feld, und lässt sich somit auch auf ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) anwenden. In der Tat gelang es vor kurzem, die Intensitätskorrelationen an einem BEC zu messen. Glauber hat seine Kohärenztheorie mit Hilfe von Grassmann-Algebren sogar auf fermionische Felder verallgemeinert, sodass sie auch mit fermionischen Atomen getestet werden kann. Die ersten Schritte hierzu wurden bereits durchgeführt.

Die ewige Frage: Was ist ein Photon?

Auf der Sommerschule 1964 in Les Houches stellte Lamb, der 1955 für die Entdeckung der Energieverschiebung im Wasserstoff, d. h. für eine Manifestation der Quantisierung des elektromagnetischen Feldes, den Nobelpreis bekommen hatte, seine semiklassische Theorie des Lasers vor. Hierbei wurde das Licht durch klassische Elektrodynamik und die Materie durch Quantenmechanik beschrieben. Das Photon war in Lambs Theorie nicht notwendig. Dennoch benutzten viele Wissenschaftler unentwegt das Wort „Photon“, auch wenn sie von Effekten sprachen, die nichts mit der Quantentheorie der Strahlung zu tun hatten. Aus dieser Verärgerung heraus führte Lamb eine Art „Lizenz“ ein, die den Inhaber berechnete, das Wort Photon zu benutzen. Wissenschaftlern ohne Lizenz war es nicht erlaubt, diesen Begriff in den Mund zu nehmen. Glauber war einer der ganz wenigen Kollegen, die eine solche Lizenz von Lamb erhielten.

Die Problematik des Photons ist auch schon in dem Ausspruch von Albert Einstein 1951 zusammengefasst: „Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Frage ‚was sind Lichtquanten‘ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.“ Glaubers Theorie des Photodetektors hat hier einen wesentlichen Fortschritt erzielt. Er konnte die Lichtquanten in einem Feld mit dem Nachweis in einem Detektor verbinden. Die relevante Theorie muss berücksichtigen, dass sich bei der Absorption eines Photons im Detektor der Zustand des Photonenfeldes verändern muss. Diese Bedingung führt auf die sog. Normalordnung von Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren des Feldes hin. Glauber hat seine Photodetektionstheorie einmal so umschrieben: „I don't know anything about photons, but I know one when I see one.“ Diese prägnante Zusammenfassung erinnert an den amerikanischen Verfassungsrichter Potter Stewart, der 1964 Pornografie definieren sollte und sagte: „I know it when I see it.“

Der Lehrer und Mensch

Glauber hatte eine eindrucksvolle Liste von Doktoranden und Assistenten, die eigene berühmte Schulen der Theoretischen Physik

gegründet haben. Sein Doktorand Dan Walls, der leider viel zu früh verstorben ist, hat die Quantenoptik in Neuseeland und in Australien etabliert und zum Erfolg geführt. Hier in Deutschland sind Fritz Haake (Essen) und Maciej Lewenstein (früher Hannover, jetzt Barcelona) zu nennen. Mit Deutschland hatte Glauber immer ein enges Verhältnis. So war er Humboldt-Preisträger am Max-Planck-Institut für Quantenoptik. Auch hat er viele Sommer an der Universität Ulm verbracht.

Glauber besitzt eine gehörige Portion Humor. Deshalb ist er ein gefragter After-Dinner-Sprecher, der sein Können eindrucksvoll in seinen Reden z. B. zum 60. Geburtstag von M. O. Scully [7] und anlässlich des 70. Geburtstages von Herbert Walther in diesem Frühjahr unter Beweis gestellt hat. Ein Beispiel von einer Nato-Sommerschule über Gravitation und gequetschte Zustände 1981 soll dies illustrieren. Die Tagung fand in dem fränkischen Ort Bad Windsheim statt. Glauber hatte erfahren, dass die Stadt erst nach dem Zweiten Weltkrieg zu einem Bad erhoben wurde. In seiner Rede sagte er dann: „We have no idea what this city has done to deserve the name ‚bad Windsheim‘ but we have had such a great time here that from now on we will call it ‚good Windsheim‘“.

WOLFGANG P. SCHLEICH

- [1] Zur Rolle von Dorothy McKibbin als Pfortnerin für Los Alamos, siehe *J. Conant*, 109 East-Palace: Robert Oppenheimer and The Secret City of Los Alamos, Simon and Schuster, New York (2005)
- [2] *A. Messiah*, Quantum Mechanics, North-Holland, Amsterdam (1961)
- [3] *R. J. Glauber*, Physics Today **54** (2), 49 (2001)
- [4] *R. J. Glauber*, Phys. Rev. **99**, 1515 (1955)
- [5] *R. J. Glauber*, Phys. Rev. **130**, 2529 (1963); *ibid* **131**, 2766 (1963)
- [6] *R. J. Glauber* in: Quantum Optics and Electronics, hrsg. von *C. DeWitt*, *A. Blandin* und *C. Cohen-Tannoudji*, Gordon and Breach, New York (1965)
- [7] Diese Rede ist abgedruckt in: *W. P. Schleich*, *H. Walther* und *W. E. Lamb*, *Ode to a Quantum Physicist*, Elsevier, Amsterdam (2000)

„A Passion for Precision“

Unser Wissen über den Aufbau der Materie beruht sehr wesentlich auf der genauen Untersuchung der Atomspektren, die zudem entscheidende Impulse für die Entwicklung der Quantenphysik geliefert hat. Während die Wellenlängen der Spektrallinien zunächst mit



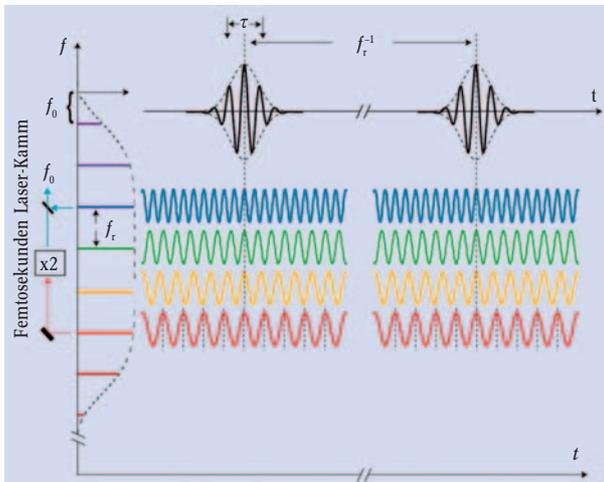
John „Jan“ Hall, Thomas Udem, John Dreuer und Theodor „Ted“ Hänsch (von links) in einem Münchner Biergarten. Thomas Udem (der einzige übrigens mit Bier!) ist in der Gruppe von Theodor Hänsch sehr wesentlich an der Entwicklung des Frequenzkamms beteiligt gewesen.

Prismen- oder Gitterspektroskopie bestimmt wurden, standen bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts die genaueren interferometrischen Methoden im Mittelpunkt der Spektroskopie. Mit der Entwicklung des Lasers erlebte die Spektroskopie einen weiteren Durchbruch. Inzwischen erlauben es die Laserlichtquellen, die Genauigkeit der Messungen auf die so genannte natürliche Linienbreite zu steigern. Damit ist die Genauigkeit nur noch durch die Verweilzeit eines Atoms im angeregten Zustand eingeschränkt – der theoretischen Grenze der erreichbaren Präzision (Abb. auf S. 24). Der diesjährige Nobelpreisträger Theodor Hänsch hat in den 70er-Jahren ganz wesentlich zur Entwicklung neuer Methoden der Laserspektroskopie beigetragen. Insbesondere konnte er durch seine Untersuchungen zum Wasserstoff-Atom die Leistungsfähigkeit der neuen Verfahren eindrucksvoll beweisen.

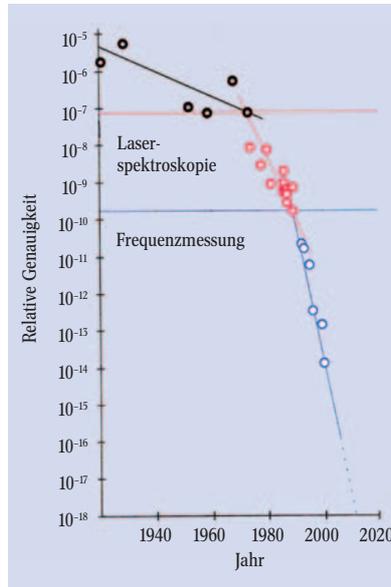
Um die modernen spektroskopischen Entwicklungen der beiden diesjährigen Nobelpreisträger Theodor Hänsch und Jan Hall richtig würdigen zu können, muss man den Zusammenhang zwischen Längen- und Frequenzmessung verdeutlichen. Bei der Entwicklung der Spektroskopie zeigte sich, dass die mit einem rela-

tiven Fehler von 1×10^{-10} behaftete Definition der Länge mit Hilfe der Wellenlänge einer Krypton-Spektrallinie nicht mehr für die erhöhten Anforderungen in der Laserspektroskopie ausreichte. Da die Zeit mit Hilfe des Cäsium-Frequenzstandards wesentlich genauer definiert ist, war es deshalb zweckmäßig, die Längenmessung auf eine Frequenzmessung zurückzuführen. 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 Messung der Lichtgeschwindigkeit ebenfalls eine Längenmessung benötigt wird, bedeutet dies noch keinen besonderen Fortschritt. Dieses Problem ließ sich jedoch für alle Zeiten beseitigen, indem man die Lichtgeschwindigkeit festlegte und als Längennormal eine Strecke wählte, 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.

Durch diese Entwicklung rückte die Messung der Lichtfrequenz in den Mittelpunkt des Interesses. Der



Frequenzsynthesizer 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 dafür notwendigen Frequenzen eines solchen „Kammes“ 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. Um eine stabile Synthese zu bekommen, müssen die Phasen der einzelnen kohärenten Komponenten stabil gehalten werden. In der Messanordnung geschieht diese Synchronisation mit dem Phasenvergleich zwischen Komponenten, die sich um einen Faktor 2 in der Frequenz unterscheiden.



Durch die Messung der Lichtfrequenz in der Laserspektroskopie gelang es in etwa 15 Jahren, die Genauigkeit um rund vier Größenordnungen zu steigern.

Laser als kohärente Lichtquelle besitzt eine geringe Spektralbreite und damit eine sehr große Kohärenzlänge; er emittiert eine ideale kohärente Welle, wie sie auch aus dem Radiofrequenzbereich bekannt war. Die Frequenz von sichtbarem Laserlicht ist jedoch sehr hoch, und es war eine Herausforderung, geeignete Methoden zu ihrer Messung zu entwickeln. Metall-Metall-Dioden eigneten sich als Lichtdetektoren mit sehr hoher Zeitauflösung und erlaubten es, Frequenzdifferenzen zwischen Laserquellen bis in den Bereich von etwa 900×10^9 Hz zu messen. Ali Javan, einer der Laserpioniere, der bei den Bell-Laboratorien den ersten Gaslaser entwickelt hatte und später am MIT arbeitete, hat diese Messungen 1967 erstmals durchgeführt. Das ermöglichte es später, durch die Kombination verschiedener Laserlichtquellen und fortgesetzte Messung der Schwebungsfrequenz zwischen diesen Quellen, die hohe Lichtfrequenz an das Cäsium-Frequenznormal bei 9×10^9 Hz anzuschließen. Mit diesen Anordnungen gelang es schließlich, sowohl die Frequenz einer Linie des Helium-Neon-Lasers mit sehr hoher Genauigkeit zu bestimmen als auch die Wellenlänge dieses Lasers sehr präzise im Vergleich zu dem Längennormal zu messen. Als Pioniere dieser Messungen haben Ken Evenson und D. Jennings vom National Institute of Standards and Technology und Jan Hall am Joint Institute for Laboratory Astrophysics, ebenfalls in Boulder, Colorado,

die wesentlichen Grundlagen entwickelt und aus Wellenlänge und Frequenz die Lichtgeschwindigkeit bestimmt. Nachdem viele National-labors diese Messungen wiederholt hatten, hat die Conférence Générale de Poids et Mesures schließlich im Jahre 1984 die Lichtgeschwindigkeit definiert und damit die präzise Längenmessung auf eine Zeitmessung zurückgeführt.

Der Frequenzkamm

Die Anordnungen, mit denen die Frequenz des Laserlichts damals gemessen wurden, waren sehr aufwändig, da die Differenz zwischen der zu messenden Laserfrequenz und der Frequenz des Zeitnormals mit verschiedenen, in ihrer Frequenz stabilisierten Lasersystemen überbrückt wurde. Die von Hänsch und Hall benutzte Anordnung, die jetzt mit dem Nobelpreis geehrt wurde, überbrückt diese Differenz auf viel einfachere Weise. Man geht dazu 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 [1] (Abb. links). Eine solche Pulsfolge entspricht der Summe aus vielen Einzelfrequenzen, sie besteht also aus einem „Frequenzkamm“, dessen Abstand durch die Frequenz f_r vorgegeben ist. Eine Phasensynchronisation des Kamms ist dadurch möglich, dass man zwei Frequenzen herausgreift, die sich um eine Oktave unterscheiden. Dazu verdoppelt man die Frequenz des einen Signals und vergleicht die Phase mit der Komponente bei der doppelten Frequenz. Diese Methode lässt sich jedoch nur anwenden, wenn die Frequenzausdehnung des Kamms eine volle Oktave umfasst. Dies war für lange Zeit ein Problem, bis es spezielle Glasfasern ermöglichten, die Kammbreite durch optisch nichtlineare Effekte zu vergrößern [2]. Entwickelt wurden diese Fasern, die den Durchbruch bei der Realisierung des Frequenzkamms brachten, von Philip Russell, der damals an der Universität Bath war und heute an der Universität Erlangen forscht. Durch die Kontrolle der beiden Frequenzen wird der gesamte Frequenzkamm stabil gehalten, sodass man die einzelnen Frequenzkomponenten des Kamms für eine Schwebungsmessung mit

der Laserquelle unbekannter Frequenz benutzen kann. Da man die Schwebungsfrequenz mit üblichen Hochfrequenz-Methoden bestimmen kann, lässt sich somit auch der Anschluss an den Cäsium-Standard durchführen. Die Frequenzmessung der Laserstrahlung ist damit sehr einfach geworden [3, 4].

Die vereinfachte Frequenzmessung mit Hilfe eines Frequenzkamms wird die Anwendung der Laserspektroskopie in Zukunft wesentlich einfacher und präziser machen. Die genaueren spektroskopischen Informationen werden es ermöglichen, die physikalischen Grundkonstanten genauer zu messen und der Frage nachzugehen, ob diese Naturkonstanten auch tatsächlich konstant sind oder kleinen Veränderungen unterliegen, wie dies bereits vielfach vorhergesagt wurde. Darüber hinaus wird die Messmethode helfen, einen neuen Frequenzstandard im optischen Bereich zu realisieren, der bis zu drei Größenordnungen genauer erwartet wird als der heutige Cäsium-Standard im Mikrowellenbereich. Diese Vereinfachung in der Frequenzmessung wird auch zu einer viel genaueren und einfacheren Navigation führen und bestehende technische Begrenzungen in der digitalen Datenübertragung beseitigen. Schließlich ergeben sich noch viele andere interessante Probleme in der Geophysik, in den Grundlagen der Physik und in der Astrophysik, die sich nunmehr untersuchen lassen. Zusammengefasst kann man sagen, dass diese Technik ein neues Fenster in der Präzisionsmessung aufgestoßen hat.

Ein langer Weg zurück nach Deutschland

Mit der Laserphysik beschäftigt sich Theodor Hänsch bereits seit seiner Zeit an der Universität Heidelberg, wo er Physik studierte und 1969 mit einer Arbeit über die kohärente Wechselwirkung von Atomen mit Laserlicht promovierte. Die in seiner von Ch. Schmelzer und P. Toschek betreuten Doktorarbeit untersuchte kohärente Anregung von Drei-Niveau-Systemen hat später im Zusammenhang mit der Problematik der Dunkelzustände und der Erzeugung von Laserstrahlung ohne Inversion eine große Bedeutung erlangt.

Danach war er bei Arthur Schawlow an der Stanford University zunächst als NATO-Stipendiat Postdoc, bevor er innerhalb kürzester Zeit zum Associate und Full Professor ernannt wurde (1975). In dieser Zeit hat Hänsch einen Farbstofflaser entwickelt, der mit einem Stickstoff-Laser gepumpt wird, und damit eine Reihe hochauflösender Messungen realisiert. Die dabei eingesetzte Methode der nichtlinearen Spektroskopie wird heute dank Hänschs Ideen und trickreichen Anordnungen für sehr viele Anwendungen eingesetzt. Zu den von ihm ebenfalls verfolgten Modifikationen der nichtlinearen Spektroskopie gehört z. B. die Polarisationspektroskopie, die ein damaliger Doktorand von ihm und Schawlow, Carl Wieman (Nobelpreis 2001 für Bose-Einstein-Kondensation), entwickelte. In dieser Zeit begann Hänsch auch die ersten hochauflösenden Messungen am atomaren Wasserstoff und führte erstmals eine direkte



Theodor Hänsch (Foto: Deutscher Zukunftspreis).

Messung des Lamb-Shifts des Wasserstoff-Grundzustandes durch. Schließlich geht auch die Laser-Doppler-Kühlung von atomaren Dämpfen auf einen Vorschlag von Hänsch aus dieser Zeit zurück.

Eine Serie sehr interessanter Messungen machte Hänsch damals schnell bekannt. Das erlebte ich schon als Teilnehmer auf einer Tagung Ende der 70er-Jahre in Hakone, Japan, im Rahmen eines amerikanisch-japanischen bilateralen Seminars über Laserspektroskopie. Chairman Boris Stoicheff aus Toronto stellte Ted Hänsch den im Hörsaal anwesenden Damen kurzerhand als „most demanded bachelor“ der Laserspektroskopie vor.

Ted Hänsch hat sich in den USA sehr wohl gefühlt. Sein Lebensstil blieb jedoch auch in amerikanischer Umgebung typisch deutsch. So fuhr er einen Sportwagen einer Stuttgarter Nobelmarke, der konstant

Physik Nobelpreisträger 2005 Prof. Theodor W. Hänsch

Wir gratulieren herzlich zur Verleihung der höchsten akademischen Auszeichnung und vergessen auch nicht Ihren Beitrag zu unserem Erfolg.



Coherent Inc. gratuliert
Theodor W. Hänsch
zum Nobelpreis für Physik 2005.
Vielen Dank für Ihre Unterstützung in den zurückliegenden Jahren bei der TuiLaser AG.

Coherent Inc.
5100 Patrick Henry Drive
Santa Clara, CA 95054
USA

Phone: 408-764-4000
Fax: 408-764-4800
www.coherent.com

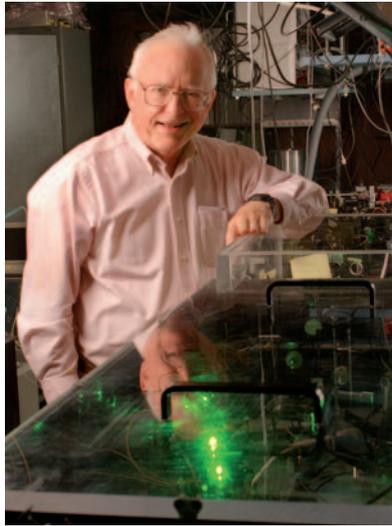
die Aufmerksamkeit der Sheriffs erregte; entsprechend zahlreich waren seine „speeding-tickets“, die er auf dem Camino Real, der Verbindungsstraße zwischen San Francisco und Paolo Alto, eingesammelt hat.

Viele Versuche, ihn nach Deutschland zu holen, schlugen damals fehl. Angebote der Universitäten Regensburg, Heidelberg und Stuttgart lehnte er ab. In München wurde 1976 die Projektgruppe für Laserforschung gegründet und 1981 in das Max-Planck-Institut für Quantenoptik überführt. Obwohl das Institut mit einer relativ geringen personellen Ausstattung versehen war, haben wir den Versuch unternommen, Ted Hänsch an das Münchner Institut zu berufen. Ein erster Schritt, um Hänsch für Deutschland zu gewinnen, war ein von mir beantragter Humboldt-Award, für den er nach zehn Jahren in den USA in Frage kam. So hat er die Sommer der Jahre 1978–1980 in München verbracht.

Nachdem der Lehrstuhl von Josef Brandmüller an der Universität München nach dessen Emeritierung verfügbar geworden war, bereiteten die Max-Planck-Gesellschaft und die LMU München ein gemeinsames Angebot vor. Anfang der 80er-Jahre erhielt Hänsch Rufe als Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und als Professor an der Ludwigs-Maximilians-Universität München, die er schließlich 1986 annahm. Seine Rufannahme fiel mit der Fertigstellung des Neubaus des Instituts in Garching zusammen, so dass damit auch hinreichend Raum für seine geplanten Aktivitäten zur Verfügung stand. Die Zeitspanne zwischen Ruferteilung und Rufannahme zeigt, dass es trotz des sehr guten Angebotes nicht einfach war, Hänschs Zusage für München zu bekommen. Die oben beschriebenen Arbeiten zur Frequenzmessung von Laserlicht wurden im Wesentlichen in den 90er-Jahren am Max-Planck-Institut für Quantenoptik durchgeführt. Für seine Arbeiten hat Hänsch sehr viele Preise bekommen, die jetzt natürlich durch den Nobelpreis überstrahlt werden.

Werkstatt statt Büro

Jan Hall ist einer der Gründerväter des Joint Institute for Laboratory Astrophysics in Boulder, Colorado, das 1962 ins Leben gerufen wurde. Er war von dieser Zeit an mit der Entwicklung hochstabiler Laser beschäftigt. In den



John Hall (Foto: Univ. of Colorado at Boulder, Office of News Services).

60er-Jahren hatte er sehr wesentlich zur Entwicklung des Methan-stabilisierten Helium-Neon-Lasers beigetragen, der später auch bei der Grundlage der Lichtgeschwindigkeitsmessung eine sehr große Rolle gespielt hat. In enger Zusammenarbeit mit K. Evenson hat Hall in den 80er-Jahren entscheidende Beiträge zur Präzisionsmessung der Lichtgeschwindigkeit im Hinblick auf die oben genannte Definition der Länge geleistet. In diesem Zusammenhang muss auch Venia Chebotayev (Novosibirsk) erwähnt werden, der mit seiner Gruppe ebenfalls sehr wesentlich zur Entwicklung frequenzstabiler Laser und zum Laserkamm beigetragen hat. Leider ist Venia Chebotayev sehr früh an einem Herzinfarkt gestorben.

Jan Hall und Ted Hänsch sind in ihrer Experimentierweise sehr ähnlich. Beide haben sie extrem großes Interesse an den Details der Anordnung und haben auch durch viele eigene Ideen die jeweiligen Entwicklungen entscheidend vorangetrieben.

Hall verbrachte wenig Zeit in seinem Büro. Die wachsenden Poststapel drohten auf seinem Arbeitstisch fast schon in den daneben stehenden Papierkorb fallen und sich somit von selbst zu erledigen. Doch stets blieb Jan Hall Meister dieses Chaos und velor nie die Übersicht. Oft genug erlebte ich, wie er zielicher einen bestimmten Brief aus dem Papierhaufen herauszauberte. Von meinem Aufenthalt in Boulder Anfang der 70er-Jahre und meiner Zusammenarbeit mit Jan Hall weiß ich, dass er sich viel lieber in der Elektronikwerkstatt aufhielt. Dort arbeitete er auch noch spät abends oder auch an Wochenenden, um die

Schaltkreise für die Frequenzstabilisierung eigenhändig zu verbessern. Entsprechend kannte er die neuesten Entwicklungen von integrierten Schaltungen, die er optimal eingesetzt hat. Seine Vorträge waren denn auch gespickt mit Blockdiagrammen für die Rückkopplungskreise der Frequenzstabilisierungen, im gleichen Umfang, wie Theoretiker dies mit Gleichungen tun. Ein wesentlicher Fortschritt bei der Frequenzstabilisierung von Lasersystemen, der auf Hall und Drever zurückgeht, war die Modifikation einer Idee aus dem Mikrowellenbereich. Diese Anordnung wurde in den folgenden Jahren für praktisch alle Laserstabilisierungen benutzt.

Mit „A Passion for Precision“ hat Daniel Kleppner vor einigen Jahren einen Leitartikel für *Physics Today* überschrieben, in dem er die Bemühungen der Laserspektroskopie nach immer höherer Präzision diskutiert hat. Diese Überschrift trifft genau auf Ted Hänsch und Jan Hall zu, die im Laufe ihrer Karriere die Messgenauigkeit der vorhandenen Methoden stets gesteigert und die dafür benutzten Methoden konstant verbessert haben.

HERBERT WALTHER

- [1] *Jun Ye, Steven T. Cundiff, Femtosecond Optical Frequency Comb: Principle, Operation and Applications*, Springer Science + Business Media, Inc., New York (2005)
- [2] *T. A. Birks, W. J. Wadsworth and P. S. Russell, Opt. Lett.* **25**, 1415 (2000)
- [3] *D. J. Jones, S. A. Diddams, J. K. Ranka, A. Stentz, R. S. Windeler, J. L. Hall und S. T. Cundiff, Science* **288**, 635 (2000)
- [4] *R. Holzwarth, T. Udem, T. W. Hänsch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth und P. R. S. Russell, Phys. Rev. Lett.* **85**, 2264 (2000)