

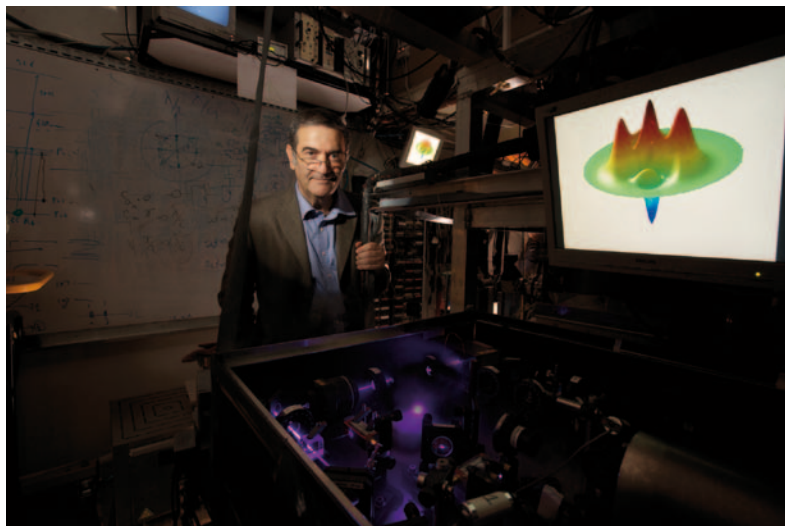
Zauberer im Quantenreich

Für ihre grundlegenden Experimente zu einzelnen Quantensystemen erhalten Serge Haroche und David Wineland den Physik-Nobelpreis 2012.

Ferdinand Schmidt-Kaler und Dietrich Leibfried

It is fair to state that we are not experimenting with single particles, any more than we can raise Ichthyosauria in the zoo – diese Worte von Erwin Schrödinger stammen aus dem Jahr 1952. Sechzig Jahre später erhalten David Wineland vom National Institute of Standards and Technology (NIST) in Boulder, Colorado, USA, und Serge Haroche von der École Normal Supérieure (ENS) in Paris den Nobelpreis für ihre bahnbrechenden Experimente mit einzelnen Quantenteilchen. Eine theoretische Beschreibung dieser Experimente ist nicht schwer: Es genügt, Zwei-Niveau-Systeme, harmonische Oszillatoren und ihre Kopplung aneinander zu verstehen, also ausschließlich Bestandteile einer Anfängervorlesung in Quantenmechanik (Infokasten). Diese trügerisch simplen Elemente in einem Labor sauber herauszudestillieren und ihre Botschaften auf leicht ablesbaren Geräten anzuzeigen, erfordert dagegen einen Grad von Experimentierkunst, den Schrödinger schlicht für unmöglich gehalten hat. Aber genau das ist gelungen. Dave Wineland und Serge Haroche haben dazu entscheidend beigetragen.

Unweit des wunderschönen Jardin du Luxembourg und des Pantheon liegt in Paris ein Zentrum der französischen Physik, das Laboratoire Kastler-Brossel der ENS. Hier hat in der Tradition der Nobelpreisträger Alfred Kastler (1966) und Claude Cohen-Tannoudji (1997) auch Serge Haroche seine Experimente durchgeführt. Im Zentrum der bahnbrechenden Arbeiten aller dieser Forscher steht die Wechselwirkung von Licht mit Atomen. Aber erst Haroche ist es gelungen, die „experimentellen Methoden so weit zu entwickeln, um Quantensysteme zu manipulieren“, wie es in der Laudatio des Nobelkomitees heißt.



Serge Haroche im Labor ...

Serge Haroche wurde 1944 in Casablanca geboren und studierte in Paris an der ENS, die – ganz anders als die direkte Übersetzung ins Deutsche vermuten lässt – nach einem streng auf Leistung ausgelegten hochselektiven Auswahlverfahren nur die allerbesten Studierenden aufnimmt. Dort finden sie dann hervorragende Studienbedingungen vor. Haroche wurde 1971 in Paris promoviert, der Betreuer der Doktorarbeit war Claude Cohen-Tannoudji.

Bereits in seiner Doktorarbeit beschäftigte sich Haroche mit der Wechselwirkung von Atomen und dem elektromagnetischen Feld. Wenn ein Atom an das Feld in seiner Umgebung koppelt, können sich seine Eigenschaften stark verändern. Gleichzeitig sind die neuen Eigenzustände Linearkombinationen von Zuständen des Atoms und des Felds. Dies drückt ganz anschaulich der Begriff „dressed states“ aus. Auf den ersten Blick mag es überraschen, aber bereits das elektromagnetische Vakuumfeld in der Umgebung des Atoms kann dessen Übergangsfrequenzen und die Linienbreiten bzw. Zerfallsraten verändern. Als Gastprofessor

in Yale, USA, beobachtete Serge Haroche den Purcell-Effekt, eine Änderung der Linienbreite von Atomen allein aufgrund einer geänderten Modendichte des Vakuums. In Paris startete er daraufhin mit dem Aufbau einer Gruppe, um ein visionäres und langfristig angelegtes Forschungsprogramm zu verfolgen. Er setzte sich zum Ziel, die Kopplung von atomaren Dipolen an das Strahlungsfeld des elektromagnetischen Vakuums gewaltig zu erhöhen. Dafür wollte er die tausendfach größeren Dipolmomente von Rydberg-Atomen nutzen, welche durch einen Mikrowellenresonator aus zwei supraleitenden Spiegeln fliegen und mit dem dort gespeicherten Mikrowellenfeld wechselwirken. Das Modell der Wechselwirkung eines Zwei-Niveau-Atoms mit einem quantisierten Feld lässt sich experimentell nicht noch sauberer realisieren, erlaubt dieser Ansatz es doch, genau in das „Getriebe“ der Atom-Licht-Wechselwirkung zu schauen.

Im ersten Schritt untersuchten Haroche und sein Team den kohärenten periodischen Austausch der Energie zwischen atomarem Dipol und Strahlungsfeld. Diese

Rabi-Oszillationen liefern einen experimentellen Nachweis der Quantisierung des elektromagnetischen Feldes gemäß $E = h \nu_e (n + 1/2)$, mit der Frequenz ν_e und der Photonenzahl n [1].

Viele Entwicklungen waren nötig, um eine Falle für Photonenfelder zu bauen. Kongeniale und ausdauernde Mitarbeiter bei dieser Aufgabe waren und sind noch heute Jean Michel Raimond und Michel Brune, die jedes kleinste Detail der Apparatur beherrschen und jeden Kniff an die Doktoranden und Postdocs weitergeben können. Nach Jahren der Detailarbeit waren die Resonatoren so gut, dass sich darin Photonen bis zu 130 ms lang speichern ließen. Die gewünschten kohärenten Kopplungen zwischen Atom und Feld sind dann viel größer als die Kopplungen an den Außenraum, die zu Dekohärenz führen. Während der Lebenszeit des Mikrowellenfeldes ist es möglich, viele hundert Atome durch das Feld zu schicken (ein Transit dauert rund 50 μ s) und dabei die Quantensysteme zu manipulieren und zu messen.

Ist die Übergangsfrequenz der Atome resonant mit der Mikrowellenfrequenz im Resonator, so tritt ein periodischer Energieaustausch auf, die Rabi-Oszillationen. Völlig anders ist die Situation hingegen, wenn die Frequenzen nicht übereinstimmen. Dann ist jeder Energieaustausch ausgeschlossen, und die Photonenzahl bleibt erhalten. Allerdings führt das im Resonatorfeld zu einer nicht-resonanten Wechselwirkung, welche die Energiezustände von durchfliegenden Atomen verschiebt. Indem man die Phasenverschiebung misst, die eine Superposition eines Atoms in Grund- bzw. angeregtem Zustand, $|g\rangle$ bzw. $|e\rangle$, erfährt, ist es möglich, die im Resonator enthaltene Photonenzahl zerstörungsfrei zu messen! Die Messung projiziert den Zustand in einen Eigenzustand der Photonenzahl n , einen Fock-Zustand. Mit dieser Methode beobachteten Serge Haroche und sein Team die Entstehung und den Zerfall eines einzelnen Photons – ein Experiment, welches zu den schönsten und



... und im Jardin du Luxembourg

klarsten in der gesamten Quantenphysik zählt [2].

Große Sichtbarkeit haben auch die Messungen von Schrödinger-Katzen-Zuständen des Photonenfelds erlangt. Dazu wird zunächst ein klassischer Zustand des Felds, ein kohärenter Zustand, präpariert. Fliegen nun Atome in einer Überlagerung $|g\rangle + |e\rangle$ durch den Resonator, so erhält der kohärente Zustand für die beiden Anteile eine unterschiedliche Phase. Somit befindet sich das Feld (die „Katze“), in einer Überlagerung aus zwei Zuständen, je nach Zustand des Atoms. Der allmähliche Zerfall der Schrödinger-Katzen-Zustände lässt sich mit den später ebenso durch den Resonator fliegenden Atomen nachweisen [3]. Dadurch gelingt es, das Verständnis des quantenmechanischen Messprozesses, die Dekohärenz von Quantenzuständen hin zu klassischen Feldern in unvergleichlicher Weise experimentell zu analysieren. Der konsequente nächste Schritt ist die Rückkopplung auf Quantenfelder, sodass nichtklassische Zustände beliebig lange „am Leben bleiben“ [4]. Die Bedeutung dieser Fehlerkorrektur für mögliche Anwendungen in einem zukünftigen Quantenprozessor ist Thema aktueller Forschung.

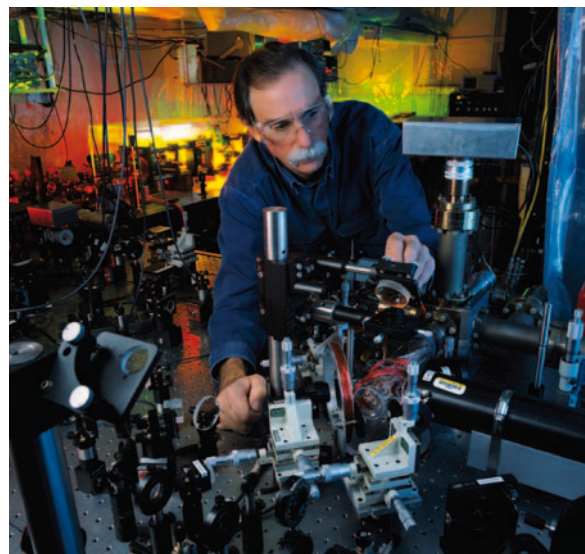
Die bahnbrechenden Experimente von Serge Haroche zielen auf das grundlegende Verständnis der Quantenmechanik. Dabei geht ihre

Bedeutung weit über die Quantenoptik hinaus, denn auch in der Festkörperphysik werden die Ideen von Serge Haroche mit supraleitenden Bauelementen in mikrostrukturierten Schaltkreisen weitergeführt.

Es ist ein Genuss, einen Vortrag von Haroche zu hören, weil er in unvergleichlicher Klarheit die Phänomene der Quantenphysik darstellt. Serge Haroche und seine Frau Claudine sind sehr gastfreundlich, und wer zu ihnen nach Hause eingeladen ist, kann erleben, dass Serge nicht nur für physikalische Experimente, sondern auch für gute Gerichte ein großes Talent besitzt. Dabei sind die Gespräche sehr anregend, denn er ist vielseitig interessiert und beeindruckt mit genauen Kenntnissen der Geschichte. Seine Aufgeschlossenheit zeigt sich auch in seiner internationalen Arbeitsgruppe, die alle als Fortsetzung der Familie betrachten, Kinder und Familienangehörige eingeschlossen.

Ein Perfektionist

Dave Wineland wuchs in Sacramento, Kalifornien, auf. Der ausdauernde Perfektionist zeigte sich schon früh, als er in der 7. Klasse so lange übte, bis er mit seinem Fahrrad beliebig lange nur auf dem Hinterrad fahren konnte und damit „wheeler champion“ der Howe Grammar School wurde. Dem Fahrradfahren, meist auf



David Wineland gilt als begnadeter Experimentator

beiden Rädern, ist er bis heute treu geblieben. Technische Fertigkeiten erwarb er im Flugmodellbau (Amerikanischer Meister in zwei Klassen für freifliegende Modelle mit Verbrennungsmotor 1980 und 1981) und beim Herrichten alter Autos und Motorräder. „Alles, was einen Motor hatte, zog mich magisch an“, sagt Dave heute darüber. Ein Kurs in der High School weckte sein Interesse für die Physik, das er im Studium an der University of California at Berkeley und während seiner Doktorarbeit in Harvard bei Norman Ramsey vertiefte. Schon

damals war seine Experimentierkunst gefragt: Die Teile einer von ihm aufgebauten Apparatur haben seine Kollegen schon wenige Tage nach der Freigabe komplett in ihre Experimente übernommen.

In seiner Zeit als Postdoc bei Hans Dehmelt beschäftigte er sich mit der Isolation und Kontrolle eines einzelnen Elektrons in einer Penning-Falle, dem Urahn der hochgenauen Tests der Quantenelektrodynamik anhand des Elektronen-g-Faktors [5]. Aus dieser Zeit stammen auch Ideen, die ganze Forschungsrichtungen geprägt ha-

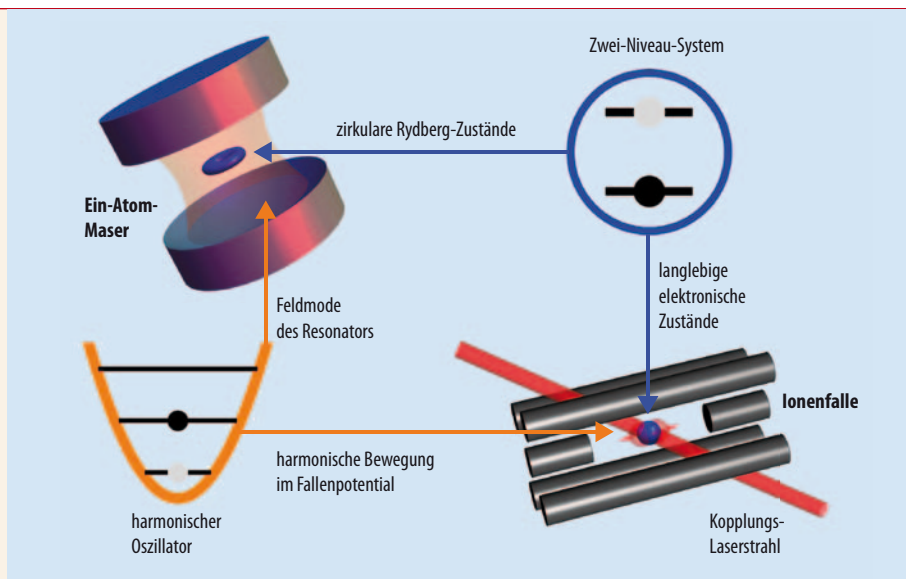
ben und bis heute Früchte tragen: Dazu zählen der Vorschlag, einzelne Ionen für genaue Zeitstandards zu benutzen, vor allem aber die Laserkühlung, die Wineland und Dehmelt 1975 zeitgleich mit Hänsch und Schawlow erstmals vorschlugen. Bald kamen Anfragen nach dem begabten Postdoc, und bei mindestens einem Anruf soll Dehmelt den Hörer mit einem knappen „Dave Wineland is not available!“ auf die Gabel geknallt haben. Vermutlich wusste er genau, dass er seinem Postdoc gerade eine glühende Empfehlung gegeben hatte.

ATOM-LICHT-WECHSELWIRKUNG

Die Physik der Experimente von Serge Haroche und David Wineland lässt sich auf zwei elementare quantenmechanische Bausteine und deren Kopplung reduzieren: Ein **Zwei-Niveau-System**, das durch einen Pseudo-Spin 1/2 mit Pauli-Operatoren $\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\}$ beschrieben werden kann, $\hat{H}_a = \hbar\omega_a \hat{\sigma}_z/2$, koppelt an einen **harmonischen Oszillator** mit $\hat{H}_o = \hbar\omega_o (\hat{a}^\dagger \hat{a} + 1/2)$. Die Kopplung wird durch das Produkt der Auf- und Absteigeoperatoren \hat{a}^\dagger bzw. \hat{a} des Oszillators mit denen des Spin-1/2-Systems, $\sigma_\pm = 1/2 (\sigma_x \pm i\sigma_y)$ beschrieben, $\hat{H}_k = g (\sigma_+ \hat{a} + \sigma_- \hat{a}^\dagger)$, wobei g die Kopplungskonstante ist. Das gekoppelte System mit Hamilton-Operator $\hat{H}_{JC} = \hat{H}_a + \hat{H}_o + \hat{H}_k$ heißt **Jaynes-Cummings-Modell** und ist einer der Grundpfeiler der Quantenoptik.

In alltäglichen Licht-Atom-Wechselwirkungen wird die unitäre, reversible Dynamik des Jaynes-Cummings-Hamiltonians massiv von der Umwelt gestört, angeregte Zustände zerfallen in wenigen Nanosekunden durch Spontanemission, und ein Atom reabsorbiert praktisch niemals die zuvor von ihm emittierten Photonen. Daher ist es schwer, die mehrfachen Umwandlungen der Anregung eines Atoms in ein Photon (beschrieben durch $\sigma_- \hat{a}^\dagger$) und zurück (beschrieben durch $\sigma_+ \hat{a}$) unter Energieerhaltung zu realisieren. Haroche und Wineland haben dennoch Wege gefunden, sodass die Jaynes-Cummings-Dynamik nicht völlig von der Umwelt überwältigt wird.

■ In Haroches Fall regt eine trickreiche Kombination von Laser- und elektrischen Feldern die Atome in zirkulare Rydberg-Zustände an. Zwei dieser Niveaus mit jeweils etwa 10 ms Lebensdauer bilden das Spin-1/2-System. Die Rydberg-Elektronendichte ist ein ausgeschmierter Torus, weit vom Kern entfernt (Abb.). Da das Elektron nur noch schwach gebunden ist, lässt sich seine Bahn leicht mit einem externen elektrischen Feld deformieren; die Rydberg-Zustände haben also ein enormes Dipolmoment (ca. 1250-mal größer als ein typischer atomarer Übergang). Außerdem liegt die Energiedifferenz zwischen Rydberg-Zuständen im Mikrowellenbereich um



Beim Ein-Atom-Maser von Haroche ist der harmonische Oszillator durch die Feldmode des im Resonator gefangenen Mikrowellenfeldes realisiert (links oben), bei den Ionenfallen von Wineland durch die harmonische Bewegung des Ions in der Falle (rechts unten). Das Zwei-Niveau-System wird hingegen durch zwei zirkulare Rydberg-

Zustände bzw. elektronische Grund- oder metastabile Zustände angenähert. Während beim Maser die elementare Feld-Dipol-Kopplung die Elemente verknüpft, nimmt man in der Ionenfalle ein klassisches Laserfeld zu Hilfe, das gleichzeitige Übergänge von elektronischen und Bewegungszuständen (Seitenbänder) antreibt.

50 GHz, für den sich extrem gute supraleitende Resonatoren mit Photonen-Lebensdauern von bis zu 130 ms herstellen lassen. Dagegen beträgt die typische Zeit für einen Austausch der Energie eines Photons zwischen Feld und Atom gerade einmal etwa 10 μ s ($g \approx 2\pi$ 50 kHz). Dies ermöglicht viele Austauschvorgänge, bevor das Photon schließlich in der Umgebung verschwindet.

■ Bei Winelands Experimenten wird die (quanten-)mechanische Oszillation eines einzelnen Ions im harmonischen Potential der Falle, die im MHz-Bereich liegt, zuerst mit Lasern in ihren Grundzustand gekühlt. Ein weiteres Laserfeld bei ω_l koppelt die Oszillation an zwei langlebige (Lebensdauern zwischen einer Sekunde und vielen Jahren) elektronische Zustände des Ions (Frequenzab-

stand GHz bis viele THz). Die harmonische Bewegung des Ions führt zu einer Phasenmodulation des Lasers, die neue Frequenzkomponenten (Seitenbänder) bei $\omega_a \pm \omega_o$ erzeugt. Das bewegte Ion kann daher auch resonant elektronische Übergänge ausführen, falls $\omega_l = (\omega_a \pm \omega_o)$ gilt. Die Stärke der Phasenmodulation und damit der Seitenbänder hängt vom Verhältnis der Oszillationsamplitude zur Wellenlänge des Lichts und der Intensität des Laserfelds ab und beträgt typisch 10 bis 100 kHz. Die Kopplung g lässt sich also durch den Laser verändern. Weiterhin kann man, durch Einstrahlen des Seitenbands bei $\omega_l = \omega_a + \omega_o$, auch Prozesse realisieren, bei denen der harmonische Oszillator und das Atom gleichzeitig Energie gewinnen.

Schließlich ging Dave 1975 an das National Bureau of Standards (heute NIST), dem er, trotz lukrativer Angebote verschiedener Eliteuniversitäten, bis heute treu geblieben ist. Anfangs arbeitete er am hauseigenen Cäsiumstandard, bekam aber bald die Chance, eine eigene Gruppe aufzubauen, um den Ideen aus der Postdoc-Zeit nachzugehen. Die erste Realisierung der Laserkühlung gelang zusammen mit Bob Drullinger und Fred Walls an einer Wolke von Magnesiumionen in einer Penning-Falle, etwa zeitgleich mit einem Experiment an Bariumionen von Neuhauser, Toschek, Hohenstett und Dehmelt an der Universität Heidelberg [6]. In den Folgejahren stießen Jim Bergquist, Wayne Itano und John Bollinger zu der neu etablierten Ion Storage Group am NIST, einzelne Ionen wurden isoliert (1981), und die Gruppe war immer vorne mit dabei, wenn es darum ging, elegante und originelle Experimente mit gefangenen Ionen durchzuführen. Gleichzeitig wurden auf Ionen beruhende Frequenzstandards immer besser. Im Jahr 1989 gelang es Daves Gruppe erstmals, die harmonische Bewegung eines einzelnen Quecksilberions in den quantenmechanischen Grundzustand zu kühlen [7]. Dieses Experiment war der Anstoß zu vielen theoretischen Arbeiten und Experimenten zur Quantenkontrolle einzelner Ionen. Der harmonische Oszillator der Bewegung des Ions in der Falle war nun in einem nahezu reinen quantenmechanischen Zustand, dem Grundzustand, und entspricht daher dem Vakuum des elektromagnetischen Felds im Resonator des Mikromasers.

Am NIST gelang es 1995, ein Berylliumion in allen drei Fallenachsen in den Grundzustand zu kühlen und mit Raman-Laserübergängen den Bewegungszustand kohärent zu manipulieren. Dies war der Ausgangspunkt zur Synthese von kohärenten und gequetschten sowie Fock-Zuständen der Ionenbewegung, die sich samt des zugehörigen Kollapses und Wiederauflebens durch die Kopplung an den internen Zustand des Ions charakterisieren ließen [8]. Weiterhin wurden

Schrödinger-Katzen-Zustände hergestellt [9] sowie Dichtematrizen und erstmals negative Wigner-Funktionen der nichtklassischen Bewegungszustände gemessen. Zu jedem dieser Experimente gab es ein Analogon in Serge Haroches Mikromaser.

Trotz dieser Erfolge beschäftigten sich in den späten 1990er-Jahren weltweit nur wenige Gruppen mit Ionenfallen, und es gab fast keinen Nachwuchs. Dies hat sich in den letzten 15 Jahren gründlich geändert, denn Ignacio Cirac und Peter Zoller haben dieses Forschungsgebiet in Daves eigenen Worten „vom Sterbebett wiedererweckt“. Ihren richtungsweisenden Vorschlag zur Quanteninformationsverarbeitung mit gefangenen Ionen griffen in den letzten zehn Jahren über zwanzig Nachwuchsgruppen auf. Die damals gerade erworbene Kontrolle über die Quantenfreiheitsgrade eines einzelnen Ions erlaubte es der NIST-Gruppe innerhalb weniger Monate, den wesentlichen Mechanismus des Vorschlages von Cirac und Zoller experimentell zu realisieren. Seit damals hat die Quanteninformationsverarbeitung mit Ionen stetig Fortschritte verzeichnet [10], und die Quantenkontrolle wurde auf größere Zahlen von Ionen und mehr Freiheitsgrade ausgedehnt. Diese Entwicklung hat das Nobelkomitee (vielleicht mit Hintergedanken) nur am Rande erwähnt. Auf eine andere unmittelbare Anwendung dieser Arbeiten, die quantenlogische Ionen-Uhr, geht die Laudatio näher ein. Diese Technik ist das Herz des derzeit weltbesten Frequenzstandards, der auf etwa 17 Stellen genau ist und damit empfindlich auf winzige Korrekturen durch Allgemeine und Spezielle Relativitätstheorie [11].

Fragt man Dave Wineland, worauf er am stolzesten ist, lautet die Antwort „die Gruppe, die wir am NIST aufgebaut haben“. Daves Bürotür ist immer offen, und der neue Doktorand bekommt dieselbe ungeteilte Aufmerksamkeit wie ein langjähriger Mitarbeiter. Dave gibt selten Anweisungen, aber man lernt schnell, seine Ratschläge ernst zu nehmen. In langen Messnächten



D. Leibfried

Auch heute noch fährt David Wineland begeistert Fahrrad.

kam Dave oft nach dem Abendessen ins Labor zurück. Wenn Sitzgelegenheiten knapp waren, drehte er kurzerhand einen der mausgrauen Metall-Regierungspapierkörbe um und setzte sich darauf, um zu beobachten und zu helfen. Ob es dann quietschende Ventilatoren zu wechseln gab oder komplizierte Signale zu enträtseln, nichts war zu banal oder zu schwierig.

Während seiner ganzen Karriere hatte Dave einen sechsten Sinn für das gerade noch Machbare und die Disziplin, das nicht Machbare erst gar nicht zu versuchen. In seinen Vorträgen redet er selten von der Bedeutung eines Ergebnisses, aber so ausführlich und schmerzhaft aufrichtig über die verbleibenden Probleme, dass man sich manchmal fragt, ob allen Zuhörern der Stellenwert des gerade Besprochenen bewusst wird. Oft war zu hören, dass dieser nüchtern zurückhaltende Stil wohl nicht die für einen Nobelpreis nötige „Werbewirksamkeit“ hätte. Es ist erfreulich für Dave und die Physik, dass diese Stimmen nicht Recht behalten haben.

Angesichts der großen Komplexität der Experimente und der

damit verbundenen Probleme, die nur in langfristig angelegten Forschungsprojekten zu überwinden waren, betonen beide Preisträger die besondere Bedeutung ihrer Institutionen für den Erfolg [12].

Aus deutscher Sicht dürfen auch die Beiträge von Peter Toschek und Herbert Walther (1935–2006) erwähnt werden, die Pionier-Experimente mit gefangenen Ionen durchgeführt haben. Herbert Walther hat zudem den ersten funktionsfähigen Ein-Atom-Maser betrieben [13] und ähnlich wie Serge Haroche nichtklassische Zustände eines Photonenfeldes erzeugt [14]. Dave Wineland und Serge Haroche waren auch die beiden ersten Empfänger des Herbert-Walther-Preises (2009/2010), den die Deutsche Physikalische Gesellschaft und die Optical Society of America gemeinsam vergeben.

Literatur

- [1] *M. Brune* et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 1800 (1996)
 [2] *S. Gleyzes* et al., Nature **446**, 297 (2007)

- [3] *S. Deléglise* et al., Nature **455**, 510 (2008)
 [4] *C. Sayrin* et al., Nature **477**, 73 (2011)
 [5] *D. Wineland*, *P. Ekstrom* und *H. Dehmelt*, Phys. Rev. Lett. **31**, 1279 (1973)
 [6] *D. J. Wineland*, *R. E. Drullinger* und *F. L. Walls*, Phys. Rev. Lett. **40**, 1639 (1978); *W. Neuhauser* et al., Phys. Rev. Lett. **41**, 233 (1978)
 [7] *F. Diedrich* et al., Phys. Rev. Lett. **62**, 403 (1989)
 [8] *D. M. Meekhof* et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 1796 (1996)
 [9] *C. Monroe* et al., Science **272**, 1131 (1996)
 [10] *R. Blatt*, Physik Journal, August/September 2012, S. 35; *D. Leibfried*, Physik Journal, Januar 2004, S. 23 und Dezember 2009, S. 45
 [11] *P. O. Schmidt*, Physik Journal, Juni 2012, S. 47
 [12] *S. Haroche*, Nature **490**, 311 (2012)
 [13] *D. Meschede*, *H. Walther* und *G. Müller*, Phys. Rev. Lett. **54**, 551 (1985)
 [14] *G. Rempe*, *F. Schmidt-Kaler* und *H. Walther*, Phys. Rev. Lett. **64**, 2783 (1990)

DIE AUTOREN

Ferdinand Schmidt-Kaler (FV Quantenoptik und Photonik) fertigte seine Diplomarbeit bei Herbert Walther an der TU München an (1989), seine Doktorarbeit bei Theodor Hänsch am MPQ in Garching (1989–92). Anschließend verbrachte er zwei spannende Jahre als Postdoc bei Serge Haroche an der ENS in Paris, bevor er 1995 als Assistent zu Rainer Blatt nach Innsbruck ging. Ab 2005 war er Professor in Ulm, 2010 wechselte er an die Johannes Gutenberg Universität Mainz.



Nach seiner Doktorarbeit bei Theodor Hänsch am MPQ in Garching verbrachte **Dietrich Leibfried** (FV Quantenoptik und Photonik) zwei aufregende Jahre (1996/97) als Postdoc bei Dave Wineland am NIST, gerade als die Quantenkontrolle einzelner Ionen dort dramatische Fortschritte machte. Nach drei Jahren als Assistent bei Rainer Blatt in Innsbruck kehrte er 2001 ans NIST zurück, um dem Traum eines Ionen-Quantencomputers nachzujagen. Davon konnten ihn bisher weder ein Ruf auf einen Lehrstuhl an der ETH Zürich noch der auf eine Humboldt-Professur an der Universität Ulm abbringen.

