



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Juni 2015
Stellungnahme

Perspektiven der Quantentechnologien

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina | www.leopoldina.org
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften | www.acatech.de
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften | www.akademienunion.de

Impressum

Herausgeber:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. (Federführung)
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
Residenz München, Hofgartenstraße 2, 80539 München

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V.
Geschwister-Scholl-Str. 2, 55131 Mainz

Redaktion

Dr. Christian Anton, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Dr. Kedar S. Ranade, Universität Ulm
Kontakt: Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft (Leitung: Elmar König)
politikberatung@leopoldina.org

Lektorat

Niels Boeing, Hamburg
Martin Radke, Bremen

Gestaltung und Satz

unicommunication.de, Berlin

Druck

druckhaus köthen GmbH & Co. KG
Friedrichstraße 11/12
06366 Köthen (Anhalt)

1. Auflage

ISBN: 978-3-8047-3343-5

Bibliographische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zitiervorschlag:

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg) (2015): Perspektiven der Quantentechnologien. Halle (Saale), 64 Seiten.

Perspektiven der Quantentechnologien

Vorwort

Die Quantentechnologien sind ein relativ junges und sehr interdisziplinäres Forschungs- und Entwicklungsfeld, das jedoch hinsichtlich der Erforschung seiner Grundlagen in Deutschland auf eine lange Geschichte zurückblicken kann. Daher könnte die stärkere Verzahnung von Grundlagenforschung, Entwicklung und Anwendung gerade hierzulande sowohl wissenschaftlich als auch wirtschaftlich vielversprechende Perspektiven eröffnen.

Wir verkennen nicht, dass die Quantenphysik und die Quantentechnologien die Wissenschaftskommunikation vor große Herausforderungen stellen. Den Autoren dieser Stellungnahme ist es aber gelungen, die grundlegenden physikalischen Phänomene, die den neuen Quantentechnologien zugrunde liegen, für Nicht-Experten soweit verständlich zu machen, dass auch sie über die Zukunftsaussichten dieses Forschungsfeldes eine gute Übersicht gewinnen können.

Wir würden uns freuen, wenn es uns mit dieser Stellungnahme gelänge, auf das hohe Innovationspotenzial der Quantentechnologien aufmerksam zu machen. Wir möchten dazu anregen, auf diesem Forschungs- und Entwicklungsfeld neue Wege der Förderung zu gehen, um in der engen Kooperation verschiedener Disziplinen eine Innovationsdynamik zu schaffen, dank welcher der Weg zur Anwendung und wirtschaftlichen Umsetzung leichter gebahnt werden könnte.

Die Stellungnahme „Perspektiven der Quantentechnologien“ gliedert sich in zwei Teile. Teil A beschreibt die wissenschaftlichen Grundlagen der Quantentechnologien, gibt einen Überblick über das Forschungsgebiet und seine Anwendungsfelder und skizziert Wege zu einer Nutzbarmachung quantenphysikalischer Effekte. In Teil B werden die einzelnen Forschungsgebiete ausführlich erläutert.

Allen Mitwirkenden der Arbeitsgruppe und den Gutachtern möchten wir hiermit ganz herzlich für ihre Beiträge zur vorliegenden Stellungnahme danken.

Halle (Saale) und Berlin, im Juni 2015



Prof. Dr. Jörg Hacker
Präsident
Nationale Akademie der
Wissenschaften Leopoldina



Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl
Präsident
acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften



Prof. Dr. Günter Stock
Präsident
Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften

Inhalt

Teil A: Perspektiven der Quantentechnologien.....	6
1 Einleitung.....	6
2 Grundlagen der Quantentechnologien.....	9
2.1 Die Quantenphysik als wissenschaftliche Theorie.....	10
2.2 Prinzipien der Quantentechnologien	12
3 Ansätze in Forschung und Anwendung	16
3.1 Themen der Grundlagenforschung	16
3.2 Anwendungsfelder	17
3.3 Integration von Forschung und Anwendungsentwicklung	18
4 Zusammenfassung und Ausblick	20
Teil B: Zur Vertiefung: Schwerpunkte der aktuellen Forschung	22
1 Einleitung.....	22
2 Quantenkommunikation und -kryptographie.....	24
2.1 Sicherheitsaspekte der Quantenkryptographie	25
2.2 Photonische Quantensysteme	25
2.3 Perspektiven der Quantenkommunikation und -kryptographie.....	26
3 Quanteninformatik und Quantencomputer	28
3.1 Ionenfallen	29
3.2 Neutrale Atome und Moleküle.....	30
3.3 Hohlraum-Quantenelektrodynamik	32
3.4 Photonen.....	32
4 Quanteninformationsverarbeitung in Festkörpern.....	34
4.1 Qubits in Supraleitern	35
4.2 Störstellen in Halbleitern oder Isolatoren	35
4.3 Nanomechanische Quantensysteme.....	37
4.4 Hybride Quantensysteme.....	38

5	Theoretische und mathematische Grundlagen	39
5.1	Quantenfehlerkorrektur	39
5.2	Quanteninformationstheorie	39
5.3	Berechenbarkeits- und Komplexitätstheorie.....	40
5.4	Nichtgleichgewichtsprozesse und Quantenbiologie	40
5.5	Verschränkungstheorie und die Dynamik mehrkomponentiger Quantensysteme..	41
6	Quantenkontrolle	42
6.1	Entwicklung und Methoden	42
6.2	Anwendungen und Perspektiven	43
7	Atomare Quantensensoren und Materiewellenoptik.....	45
7.1	Erdbeobachtung.....	45
7.2	Anwendungen im Weltall.....	46
7.3	Standards im Messwesen.....	46
8	Spezielle Quantentechnologien.....	47
8.1	Quantenelektronik	47
8.2	Vielteilchen-Korrelationen	48
8.3	Quantenmaschinen.....	49
8.4	Phononische Quantensysteme.....	50
8.5	Energiespeicherung in quantisierten Systemen	51
	Methodik.....	52
	Mitwirkende in der Arbeitsgruppe	52
	Gutachter.....	53
	Vorgehensweise.....	54
	Literatur	54
	Anhang	55
	Internationale Konferenz „Quantum Technologies“	55
	Förderprogramme und Projekte	58
	Weiterführende Literatur	59

Teil A: Perspektiven der Quantentechnologien

1 Einleitung¹

Das Wichtigste auf einen Blick

- Der Begriff Quantenphysik bezeichnet Phänomene, die für atomare und subatomare Systeme charakteristisch sind und im Rahmen der „klassischen Physik“ nicht zu erklären sind. In Deutschland hat die Quantenphysik eine lange Tradition, die hundert Jahre zurückreicht.
- Die Quantenphysik ist Grundlage vieler moderner Technologien. So ist die erste Generation der Quantentechnologien die Basis u. a. von Halbleiter- und Lasertechnik.
- An den „neuen Quantentechnologien“ – basierend auf der Beeinflussung individueller Quantensysteme – wird seit etwa 20 Jahren geforscht.
- Weltweit wird an Quantentechnologien geforscht. Hierfür werden spezialisierte Quantentechnologiezentren gebildet oder umfassende Forschungsprogramme aufgelegt. Wegen ihres großen wirtschaftlichen Potenzials sollte die Forschungsinfrastruktur in Bezug auf die Erforschung der neuen Quantentechnologien in Deutschland verbessert werden.

Wer sich mit Quantentechnologien und ihren physikalischen Grundlagen beschäftigt, sieht sich schnell großen Herausforderungen gegenüber. Quantenphysikalische Effekte sind zunächst nicht mit unseren Alltagserfahrungen in Einklang zu bringen. Es erscheint kaum nachvollziehbar, dass ein Teilchen zwei verschiedene Wege nehmen kann, wenn man in der Zwischenzeit nicht hinschaut und dass zwei Teilchen, die Millionen von Lichtjahren voneinander entfernt sind, sich so verhalten sollen, als seien sie durch ein unsichtbares Band verbunden.

Auch die Physik haben diese Phänomene lange vor Rätsel gestellt und zu intensiven Diskussionen geführt. Insofern wird auch die vorliegende Stellungnahme viele Leser vor Herausforderungen stellen. Zu zeigen, dass es dennoch lohnt, sich mit quantenphysikalischen Phänomenen bzw. mit den hierauf ba-

sierenden Technologien zu beschäftigen, dass letztere bereits in Teilen vor konkreten Anwendungen stehen und in anderen Bereichen das Potenzial haben, bisherige technische Lösungen wesentlich zu verbessern, ist das Ziel dieser Stellungnahme.

Die Quantentechnologien haben sich in den vergangenen Jahrzehnten als neues Forschungsgebiet etabliert, das auf Erkenntnissen aus Physik, Mathematik und Informatik aufbaut und zahlreiche neue Ideen und Konzepte für technische Anwendungen hervorgebracht hat.

Grundlage aller Quantentechnologien sind die Erkenntnisse der Quantenphysik. Diese umfasst alle Theorien und formalen theoretischen Konzepte sowie deren Interpretation, die zur Beschreibung atomarer und subatomarer Systeme entwickelt wurden. Sie ist unter anderem die Grundlage für die Festkörper-, Atom- und Molekülphysik sowie der theoretischen Chemie.

¹ In dieser Stellungnahme wird das generische Maskulinum verwendet. Selbstverständlich sind dabei beide Geschlechter gleichermaßen angesprochen.

Ohne die Quantenphysik wären viele Entdeckungen und Erfindungen des 20. Jahrhunderts nicht möglich gewesen, bei denen quantenmechanische Prinzipien eine bedeutende Rolle spielen. Dazu gehören der Laser, Atomuhren oder die Ortsbestimmung mittels Satelliten (GPS) – besonders aber die gesamte Elektronik einschließlich Computer, Internet und Mobilfunk. Diese Technologien werden auch als Quantentechnologien der „ersten Generation“ bezeichnet.

In den vergangenen Jahren wurde deutlich, dass die Nutzung weiterer quantenmechanischer Effekte, die weit über die bisher genutzten Prinzipien der Quantenmechanik hinausführen, vielfältige neue technische Anwendungen in Aussicht stellt. Aufbauend auf Ergebnissen der Grundlagenforschung werden erste technische Anwendungen der „zweiten Generation“ der Quantentechnologien entwickelt. Diese **neuen Quantentechnologien** stehen im Mittelpunkt der vorliegenden Stellungnahme.

Ein Anwendungsbeispiel ist die sichere Übertragung von Informationen. Eine solche ist in der digitalen Gesellschaft von zentraler Bedeutung. Die Verschlüsselung von Daten mit Hilfe der Quantenkryptographie könnte die Sicherheit der Datenübertragung auf ein neues Niveau heben. Bereits im April 2004 wurde in Wien die erste Banküberweisung mit Hilfe eines Quantenkryptographie-Protokolls übermittelt.² Bei den Nationalratswahlen in der Schweiz im Jahr 2007 nutzte man die Quantenkryptographie erstmals, um die Netzwerke zur Stimmenauszählung gegen Eingriffe zu sichern.³ Während sich beispielsweise in England (TOSHIBA Technologies, Cambridge), Frankreich (THALES und SeQureNet, Paris), der

Schweiz (idQuantique, Genf) und den USA (MagiQ Technologies, New York) bereits Firmen auf Quantenkryptographie spezialisiert haben, gibt es in Deutschland generell noch kein Unternehmen, das Produkte auf quantentechnologischer Grundlage entwickelt.

Weiter sind Quantensensoren denkbar, die die Schwerkraft, das Magnetfeld der Erde oder die Erdrotation genauer messen können als bisher verwendete Sensoren. Quantentechnologische Anwendungen könnten so bei der Suche nach Rohstoffen oder bei der Vorhersage von Erdbeben eingesetzt werden. Umweltveränderungen – wie zum Beispiel das Ansteigen des Meeresspiegels infolge des Klimawandels – könnten mit Quantensensoren mit sehr hoher Genauigkeit erfasst werden.

Bei der Aufzählung dieser Anwendungsbeispiele fällt bereits auf, dass im Zusammenhang mit der Nutzung der neuen Quantentechnologien derzeit zu meist nur Möglichkeiten skizziert werden können. Anders als in vielen anderen wissenschaftlichen Bereichen sind in Bezug auf die Quantentechnologien die wissenschaftlichen Grundlagen der Anwendungen bislang noch nicht in Gänze verstanden. Dies erklärt die im Folgenden zum Teil vagen Formulierungen.

Die Forschung im Bereich der neuen Quantentechnologien ist in der Regel Grundlagenforschung, auch wenn sich einzelne Anwendungen abzeichnen oder schon im Labormaßstab umgesetzt werden. Deutschland sollte auf diese Forschungen gleichwohl nicht verzichten: Zum einen aufgrund des langfristigen technologischen Potenzials – konkrete Anwendungsfelder werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Zum anderen haben quantentechnologische Forschung und Entwicklung Auswirkung auf benachbarte, nicht minder wichtige technologierelevante Bereiche, etwa die Informations- und Kommunikationstechnologie.

² http://www.wissenschaft.de/technik-kommunikation/physik/-/journal_content/56/12054/1119998/Weltweit-erste-quantenkryptografisch-verschl%C3%BCsselte-Bank%C3%BCberweisung/ (Stand: 17.2.2015).

³ <http://www.heise.de/tr/artikel/Photonen-als-Wahlhelfer-280423.html> (Stand: 17.2.2015).

Zur Erforschung der Grundlagen für technische Anwendungen sind in den letzten Jahren in Kanada, USA, Korea, Russland und Japan mehrere Zentren für Quantentechnologien entstanden.⁴ Auch in der Privatwirtschaft – vorwiegend in der amerikanischen – entdeckt man zunehmend das Innovationspotenzial der Quantentechnologien.⁵

In Deutschland hat die wissenschaftliche Beschäftigung mit der Quantenphysik eine lange Tradition. Aufbauend auf den gewachsenen Strukturen in diesem Bereich haben sich in verschiedenen Regionen Deutschlands in den letzten Jahren Forschungsgruppen mit unterschiedlichen Schwerpunkten herausgebildet. Ausgewählte Beispiele für eine derartige regionale Schwerpunktbildung sind:

- München und Erlangen auf dem Gebiet der Quanteninformatik,
- Ulm und Stuttgart für integrierte Quantenwissenschaften und -technologien,
- Berlin, Braunschweig, Bremen, Hamburg und Hannover für Quantensensorik und -metrologie sowie
- Aachen und Jülich auf dem Gebiet des Quantenrechnens.

Als erster Schritt zur Vertiefung der Zusammenarbeit wurden gemeinsame Institute, Exzellenzinitiativen oder Kooperationen gebildet, darunter das *Center for Integrated Quantum Science and Technology* (IQST) in Stuttgart und Ulm, das *Hannover Institut für Technologie* (HITec) in Hannover und das *Center for Optical Quantum Technologies* in Hamburg.

Diese regionalen Forschungsschwerpunkte zu unterstützen und zu Forschungszentren mit tragfähigen und international bedeutenden Strukturen auszubilden, ist eine wichtige Zukunftsaufgabe. Darüber hinaus ist es mittel- und langfristige wünschenswert, den Austausch und die Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Industrie anzuregen und zu fördern.

Die verstärkte Zusammenarbeit vieler Disziplinen, insbesondere von ingenieurwissenschaftlich arbeitenden Gruppen, könnte der technologischen Entwicklung in Deutschland bis hin zur Produktion neue Perspektiven eröffnen. Dies anzuregen und den Wissensaustausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu unterstützen, ist ein weiteres Ziel dieser Stellungnahme.

Die vorliegende Stellungnahme erläutert die physikalischen Grundlagen der Quantentechnologien und skizziert das Anwendungspotenzial und die wissenschaftlichen Herausforderungen. Im Teil B der Stellungnahme („Zur Vertiefung“) werden die Schwerpunkte der aktuellen Forschung dargestellt.

4 Darunter ist das kanadische „Institute for Quantum Computing“ in Waterloo, das mit einer Anlauffinanzierung von rund 300 Millionen Dollar das weltweit größte Zentrum auf dem Gebiet der Quanteninformatik ist. Das „Center for Quantum Technologies“ in Singapur ist seit 2007 der Nationaluniversität angegliedert und wird über zehn Jahre mit einer Startfinanzierung von 158 Millionen Singapur-Dollar unterstützt. In den USA ist das „Joint Quantum Institute“ durch eine Kofinanzierung des „National Institute of Standard and Technology“ (NIST) und der Universität von Maryland (College Park) entstanden. Es steht jetzt Pate für eine Gründung in Südkorea, an der auch die Max-Planck-Gesellschaft beteiligt ist. In Japan wird die Quantenkryptographie in einem Verbund, an dem Toshiba, Mitsubishi und die japanische Telekom beteiligt sind, gefördert. In Großbritannien werden aktuell durch das Engineering and Physical Sciences Research Council 270 Millionen Euro für ein Programm aufgewendet, mit dem quantenphysikalischen Technologien zur Anwendung verholfen werden soll.

5 So haben die ehemaligen Vorstände von BlackBerry-RIM, Mike Lazaridis und Douglas Fregin, einen Investitionsfonds von 100 Millionen Dollar aufgelegt, um Quantentechnologie-Gründer und -Ableger in Kanada zu fördern („Quantum Valley“). Mit dem Quantum Wave Fund gibt es bereits eine Wagniskapitalgesellschaft in den USA, die gezielt in die Quantentechnologien investiert (<http://qwcap.com>; Stand 18.02.2015).

2 Grundlagen der Quantentechnologien

Das Wichtigste auf einen Blick

- Die Quantenmechanik entstand zu Beginn des 20. Jahrhunderts und wurde wegen ihrer Widersprüchlichkeit zu den klassischen Vorstellungen der Physik anfangs kritisiert. Heute ist sie eine der unumstrittenen Grundlagen der Physik.
- Eine charakteristische Eigenschaft der Quantenmechanik ist, dass sich ein Teilchen, etwa ein Elektron, wie eine Welle verhalten kann.
- Weitere wichtige Quanteneffekte, die in jüngerer Zeit besondere Beachtung finden, sind Überlagerungen, Verschränkung, Unschärferelationen und Vielteilcheneffekte.
- Quantentechnologien, die bereits heute eine breite Anwendung finden, sind die Halbleitertechnik, der Laser und auch die Satellitennavigation. Diese Quantentechnologien der ersten Generation gründen vor allem auf dem quantenphysikalischen Prinzip der Kohärenz.
- Potenzielle Technologien der zweiten Generation, die neuen Quantentechnologien, basieren auf der Handhabung individueller Quantensysteme und nutzen Vielteilcheneffekte und Verschränkung.

Die Quantenphysik gehört neben der Relativitätstheorie zu den wichtigsten physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts. Ihre Erkenntnisse haben weitreichende Auswirkungen auf alle Gebiete der Natur- und Ingenieurwissenschaften, vor allem in der Physik, der Chemie, der Elektrotechnik, der Informationstechnik und der Medizintechnik sowie zunehmend auch in der Biologie.

Die Vorstufen zur Entwicklung der Quantenmechanik waren wichtige theoretische Arbeiten seit Beginn des 20. Jahrhunderts, insbesondere

- die Planck'sche Erklärung des Spektrums eines idealen schwarzen Körpers (1900),
- Einsteins Erklärung des photoelektrischen Effekts (1905),
- das Bohr-Sommerfeld'sche Atommodell (ab 1913), dessen Weiterentwicklung zum quantenmechanischen Modell den Grundstein für unser heutiges Verständnis vom Aufbau der Materie legte,

- de Broglies Hypothese der Materiewellen (1924).

Die eigentliche Entwicklung der Quantenmechanik geschah in den Jahren 1925 und 1926 in zwei zunächst scheinbar ganz verschiedenen Formulierungen: der Matrizenmechanik⁶ (Werner Heisenberg,⁷ Max Born und Pascual Jordan) und der Wellenmechanik⁸ (Erwin Schrödinger). Anfang 1926 sah es für eine kurze Zeit so aus, als ob es zwei ganz verschiedene Erklärungssysteme für die Welt der Atome gäbe. Kurze Zeit später zeigte aber Schrödinger selbst die völlige Übereinstimmung der Matrizen- und der Wellenmechanik.⁹

6 M. Born, W. Heisenberg und P. Jordan. Zur Quantenmechanik II. Zeitschrift für Physik **35** (1926), 557.

7 Einen weiteren wichtigen Schritt zum Verständnis der allgemeinen Struktur des Heisenberg'schen Ansatzes lieferte Paul Adrien Maurice Dirac im Jahr 1925.

8 E. Schrödinger. Quantisierung als Eigenwertproblem. Ann. Phys. **79** (1926), 361.

9 E. Schrödinger. Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordan'schen Quantenmechanik zu der meinen. Ann. Phys. **79**: 734-756 (1927).

Bis in die 1930er Jahre wurde die Quantenmechanik dann zu einem in sich geschlossenen Gedankengebäude ausgebaut.

Auch mehr als acht Jahrzehnte nach den bahnbrechenden Arbeiten sind die Aussagen und Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik für den Laien schwer verständlich, da sie in der Alltagswelt oft keine Entsprechung haben und mit den menschlichen Sinnen nicht zu fassen sind (s. Abb. 1). Auf der anderen Seite üben diese Effekte oft eine sehr große Faszinati-

on aus, so dass sie auch in populärwissenschaftlichen Medien vielfach aufgegriffen werden.

Wissenschaft und Technik haben es dank neuer Geräte gelernt, sich die Mikro- und Nanowelt immer besser zunutze zu machen. Ohne die Quantenphysik wären viele Entdeckungen und Erfindungen des 20. Jahrhunderts wie der Transistor, der Laser (s. Kasten 1-1), Atomuhren oder die Ortsbestimmung mittels Satelliten (GPS) nicht möglich gewesen.

Kasten 1-1: Neue Technologien – Die Geschichte des Lasers

Ein Beispiel dafür, wie die Einführung einer neuen Technologie einen dauerhaften Wettbewerbsvorteil sichern kann, ist die Entwicklung der Lasertechnik. Im Jahre 1979 führte die Firma Trumpf die Lasertechnik in die industrielle Materialbearbeitung ein. Später übernahm sie hierfür den 1994 von Adolf Giesen an der Universität Stuttgart entwickelten Scheibenlaser. Auf diese Weise gelang es Trumpf, zum Weltmarkt- und Technologieführer in der Lasertechnik aufzusteigen. Sehr positiv für diese Entwicklung war die enge Kooperation mit Forschungsinstitutionen wie dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen und dem Institut für Strahlwerkzeuge an der Universität Stuttgart. Der Wissensvorsprung in der Lasertechnik führte gleichzeitig zu weiteren Innovationen und Firmengründungen in Deutschland. Als Beispiele seien hier die Produktionstechnik (z. B. Lasermaterialbearbeitung wie Fügen, Trennen und Bohren), Medizintechnik (z. B. optische Kohärenztomographie und lasergestützte Operationsmethoden) und auch die Messtechnik (Laserentfernungsmesser) genannt. Dieser breitgefächerte Wissensvorsprung auf Schlüsselgebieten wie der Lasertechnik trägt noch heute zur nachhaltigen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie bei.

Quelle: Ralf Grötter. Wie der Laser ans Licht kam. Max Planck Forschung 4/2009.

2.1 Die Quantenphysik als wissenschaftliche Theorie

Es ist nicht nur die Unanschaulichkeit der Quantenmechanik, die schon den großen Physikern des 20. Jahrhunderts Kopfzerbrechen bereitete. Sie stellte auch die gesamte Weltsicht der klassischen Mechanik infrage. Viele Physiker zweifelten deshalb – ähnlich wie bei der Relativitätstheorie – ob sie tatsächlich die richtige Beschreibung der Natur sei. Eines der bekanntesten Beispiele dafür ist eine Arbeit von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan

Rosen aus dem Jahre 1935. In ihr gaben die Verfasser ein Gedankenexperiment an, das heute als Einstein-Podolsky-Rosen- oder kurz *EPR*-Paradoxon bekannt ist: Sie betrachteten ein quantenmechanisches System aus zwei benachbarten Teilchen, die anschließend getrennt und in unterschiedliche Richtungen ausgesendet werden. Nach der Quantenmechanik bilden sie aber ungeachtet ihrer Entfernung – und seien es Lichtjahre – ein einziges System, das z. B. einen festen Gesamtimpuls besitzt, solange keines der Teilchen gestört wird. Allerdings ist die Verteilung

des Gesamtimpulses auf die beiden Teilchen noch nicht determiniert. Erst eine Messung an einem der Teilchen „zwingt“ das System dazu, sich für eine Verteilung zu entscheiden, so dass die entsprechende Eigenschaft sofort auch für das andere Teilchen festliegt. Kennt man etwa den Gesamtimpuls des Teilchenpaares, so kennt man durch eine Impulsmessung an einem Teilchen auch den Impuls des

anderen. Einstein, Podolsky und Rosen schlossen daraus, dass die beiden Teilchenimpulse schon vor der Messung festliegen müssen, denn sonst hätten die nun weit voneinander entfernten Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit kommunizieren müssen. Dies jedoch verbietet die Relativitätstheorie, und Einstein sprach spöttisch von einer „spukhaften Fernwirkung“¹⁰ in der Quantenmechanik.



Abbildung 1: Ein Teilchen kann gleichzeitig zwei Wege nehmen, wenn man es in der Zwischenzeit nicht beobachtet. [Charles Addams, *The New Yorker* 1940]

Als mögliche Lösung des Paradoxons wurden „verborgene lokale Parameter“ vorgeschlagen, die den Ausgang eines solchen Experiments von vornherein festlegen würden. Im Jahre 1964 stellte John Bell eine Ungleichung auf, die zeigt, dass die klassische Anschauung in Form einer Theorie verborgener lokaler Parameter bestimmten Bedingungen genügt, die von der Quantenphysik verletzt werden. Es ist möglich, diese Ungleichung durch ein Experiment zu überprüfen und festzustellen, ob dabei verborgene lokale Parameter eine Rolle spielen oder – wie die Quantenmechanik es annimmt – nicht. Seit den 1970er Jahren haben Physiker immer weiter verfeinerte Experimente hierzu

durchgeführt. Auch wenn noch nicht alle Fragen abschließend geklärt sind, sprechen doch alle bisherigen Ergebnisse für die Richtigkeit der Quantenmechanik und gegen die Bedenken zum Beispiel von Einstein. Der Test dieser Ungleichung gehört zu den wesentlichen Voraussetzungen für die sichere Nachrichtenübertragung mittels Quantensystemen (Quantenkommunikation und Quantenkryptographie).

Die Quantenmechanik ist demnach eine Theorie, die Experimente aus weiten Teilen der Physik qualitativ und quantita-

¹⁰ A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen Can quantum-mechanical description be considered complete?“, *Physical Review*, **47**, S. 777 (1935).

tiv richtig beschreiben kann. Auf ihr beruht, wenn auch zum Teil nur mittelbar, fast die gesamte moderne Physik.

2.2 Prinzipien der Quantentechnologien

Charakteristisch für die Quantenmechanik ist, dass sich ein Teilchen, etwa ein Elektron, wie eine Welle verhalten kann. Die Eigenschaft dieser Wellen, sich zu überlagern, bezeichnet man als Kohärenz oder Interferenzfähigkeit. Grob könnte man diesen Begriff als „Quantenhaftigkeit“ eines Systems verstehen. Diese geht verloren, wenn das System seine Interferenzfähigkeit verliert, wofür man das Wort Dekohärenz geprägt hat. Im Gegensatz zu Schall- oder Wasserwellen handelt es sich bei dieser Welle jedoch nicht um eine unmittelbar beobachtbare Größe. Ohne weitere Hilfsmittel ist nur die Amplitude, also die Schwingung, messbar, nicht aber die Phase dieser Welle.

Die Doppelnatur von Welle und Teilchen, den Welle-Teilchen-Dualismus, erkennt man sehr gut an Nachwahl-Experimenten (Abb. 2). In diesen wird ein

einzelnes Photon (Lichtteilchen) durch einen Strahlteiler¹¹ geschickt, und die beiden Teilstrahlen werden über zwei Spiegel auf einen Punkt gelenkt. Der Beobachter kann nun entscheiden, ob er am hinteren Kreuzungspunkt einen zweiten Strahlteiler aufstellt oder nicht. Im ersten Fall misst er das Überlagerungsmuster der beiden Teilstrahlen, also die Welleneigenschaften des Photons. Diesen Aufbau nennt man auch Mach-Zehnder-Interferometer. Im zweiten Fall ermittelt der Beobachter, welchen Weg das Photon am ersten Strahlteiler genommen hat, also die Teilcheneigenschaft des Lichts; dieser Aufbau ist nach Hanbury-Brown und Twiss benannt.

Nun kann man den zweiten Strahlteiler auch in den Strahlengang stellen, nachdem das Photon bereits den ersten Strahlteiler durchlaufen hat. Nach der falschen klassischen Vorstellung müsste sich das Photon dann schon für einen Weg „entschieden“ haben. Tatsächlich erhält man aber wieder die Interferenz des Photons mit sich selbst, die sich aus der Überlagerung der beiden Teilwellen ergibt, die man nach mehreren Durchläufen einzelner Photonen erkennt.

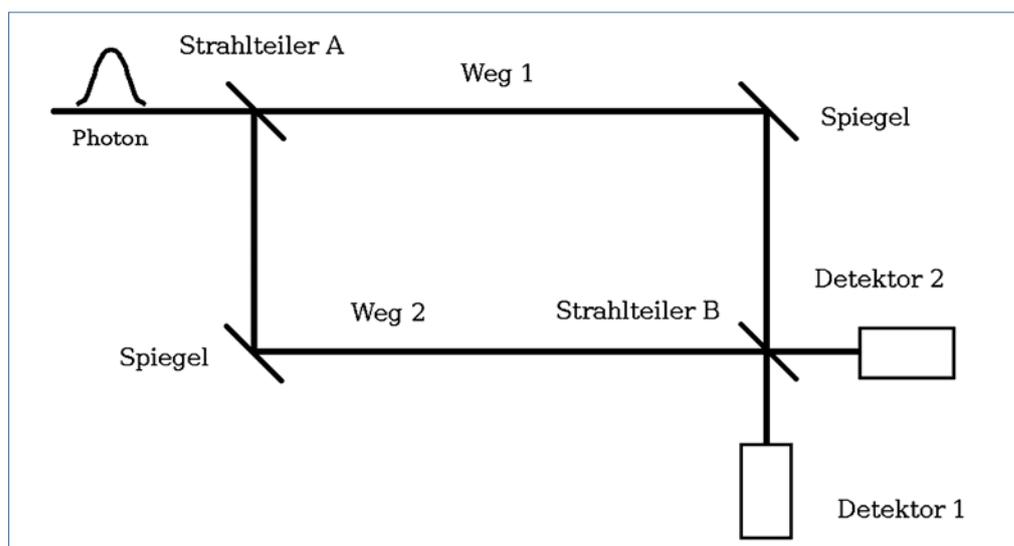


Abbildung 2: In einem Nachwahl-Experiment kann ein Photon am Strahlteiler A zwei verschiedene Wege einschlagen. Je nachdem, ob man den Strahlteiler B einsetzt oder entfernt, misst man Wellen- oder Teilcheneigenschaften des Photons.

¹¹ In diesem Fall ein halbdurchlässiger Spiegel, der eine Welle teilweise durchlässt und teilweise reflektiert.

Im Folgenden werden vier wesentliche Phänomene der Quantenmechanik kurz angesprochen: Überlagerungen, Verschränkung, Unschärferelationen und Vielteilcheneffekte. Bereits heute nutzen die Quantentechnologien der ersten Generation Überlagerungszustände. In den Quantentechnologien der zweiten Generation wird die Verwendung verschränkter Zustände und von Vielteilchenzuständen stärker in den Vordergrund treten.

Überlagerungen

Der Zustand eines klassischen Systems ist eindeutig bestimmt. Beispielsweise kann eine Lampe entweder leuchten oder nicht leuchten. Ihren Zustand nimmt die Lampe auch dann ein, wenn niemand sie beobachtet. Die einfachsten Systeme haben zwei mögliche Zustände, etwa „an“ und „aus“ oder „0“ und „1“. In der Informatik spricht man bei solchen zweiwertigen Zuständen von einem Bit. Das quantenmechanische Analogon zu einem Bit, das Quantenbit oder kurz Qubit, kann nun neben den Zuständen „0“ und „1“ auch *Überlagerungszustände* einnehmen. Ein einzelnes Teilchen könnte zum Beispiel in einem Zustand sein, der sich als 80 Prozent „0“ und 20 Prozent „1“ bezeichnen lässt. Würde man nun viele Qubits in diesem Zustand herstellen und die Bitwerte bestimmen, so würde man in 80 Prozent der Fälle eine „0“ und in 20 Prozent der Fälle eine „1“ messen. Im Gegensatz zur alltäglichen Erfahrung, in der der Bitwert jedes einzelnen Bits schon vor der Messung feststeht, ist in der Quantenmechanik dieser Wert undefiniert und entsteht erst im Verlauf der Messung. Wichtig für alle Quantentechnologien ist die Möglichkeit, solche Überlagerungen zu verarbeiten, ohne zwischenzeitlich eine Messung vorzunehmen.

Man kann sich den Zustand mit Hilfe der nach dem Physiker Felix Bloch benannten Bloch-Kugel (Abb. 3) veranschaulichen. Vergleicht man diese mit der Erdkugel, so entsprechen den klassischen Zuständen „0“ und „1“ der Nord- bzw. der

Südpol, den quantenmechanischen überlagerten Zuständen hingegen alle Punkte der Kugeloberfläche. Die Wahrscheinlichkeiten, einen der beiden klassischen Werte zu messen, ergeben sich, indem man den Breitengrad auf die Erdachse projiziert. Der Längengrad, auf dem sich der Zustand befindet, gibt die Phase des Zustands an. Für die Messung des Bitwertes ist diese zwar unerheblich, sie hat aber in der Quantenmechanik eine wichtige Bedeutung.

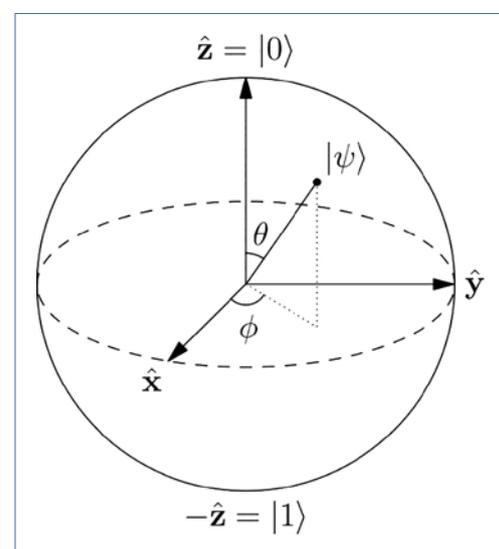


Abbildung 3: Auf der dreidimensionalen Bloch-Kugel (mit x-, y- und z-Achse) entsprechen den beiden klassischen Zuständen der Nord- und der Südpol, während ein Quantenzustand auf jedem Punkt der Kugeloberfläche liegen kann: Der Grad der Überlagerung eines Zustands $|\psi\rangle$ aus den klassischen Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$ auf der z-Achse wird durch den Polarwinkel θ angegeben, während der Azimutalwinkel ϕ die rein-quantenmechanische Phase beschreibt. [Bild aus: Wikipedia/Benutzer: Smite-Meister (Lizenz: CC BY-SA 3.0)]

Verschränkung

Eine weitere Erscheinung der Quantenmechanik, die in der klassischen Physik keine Entsprechung hat, ist die Verschränkung von Objekten. Sie folgt unmittelbar aus der Möglichkeit, Zustände auch in Systemen mehrerer Teilchen zu überlagern. Einge- führt wurde der Begriff der Verschränkung im Jahre 1935 durch den österreichischen Physiker Erwin Schrödinger, der in einem dreiteiligen Artikel auf das bereits erwähnte EPR-Paradoxon antwortete.

Die Verschränkung kann mit einem Gedankenexperiment veranschaulicht werden, das als „Schrödingers Katze“ (Abb. 4) bekannt geworden ist: Man sperre eine Katze in einen Kasten, in dem sich eine Giftkapsel befindet. Die Kapsel sei mit einem Detektor verbunden, der anschlägt, wenn ein bestimmter einzelner radioaktiver Atomkern zerfallen ist. Erkennt der Detektor den Zerfall, so tritt das Gift aus und tötet die Katze.

Physikalisch gesprochen hat die Katze zwei Zustände: lebendig und tot. Ebenso der Atomkern: zerfallen und nicht zerfallen. Der Zustand der Katze und der Zustand des Atomkerns sind allerdings nicht voneinander unabhängig: Entweder ist die Katze lebendig und der Kern nicht zerfallen, oder die Katze ist tot und der Kern zerfallen – man sagt, die Katze und der Atomkern sind verschränkt. Ein Beobachter, der in das Innere des Kastens nicht hineinschauen kann, kennt weder den Zustand der Katze noch den Zustand des Atomkerns. Er weiß auch nicht, ob der Atomkern nach fünf Minuten oder nach

hundert Jahren zerfällt, denn für jeden Zeitpunkt gibt es nur eine Wahrscheinlichkeit dafür, dass der Atomkern zerfallen ist. Der Beobachter kann nur den Gesamtzustand aus Katze und Atomkern als Überlagerung angeben – die Teilsysteme sind untrennbar miteinander verbunden. Die Art der Korrelation ist sogar noch stärker, als es hier den Anschein hat: Man kann zeigen, dass die Quantenkorrelationen für bestimmte Messungen stärker sind als klassisch möglich.

In den Quantentechnologien der zweiten Generation, den neuen Quantentechnologien, will man nun gezielt die Eigenschaften verschränkter Zustände nutzen. Voraussetzung hierfür ist, dass diese sich experimentell erzeugen, verarbeiten und auslesen lassen müssen. Neben einer vollständigen Verschränkung wie oben kann man auch teilweise verschränkte Zustände erzeugen und verarbeiten. Die Theorie der Verschränkung ermöglicht es, den Grad der Verschränkung mittels mathematischer Methoden zu beschreiben und in Experimenten zu messen.

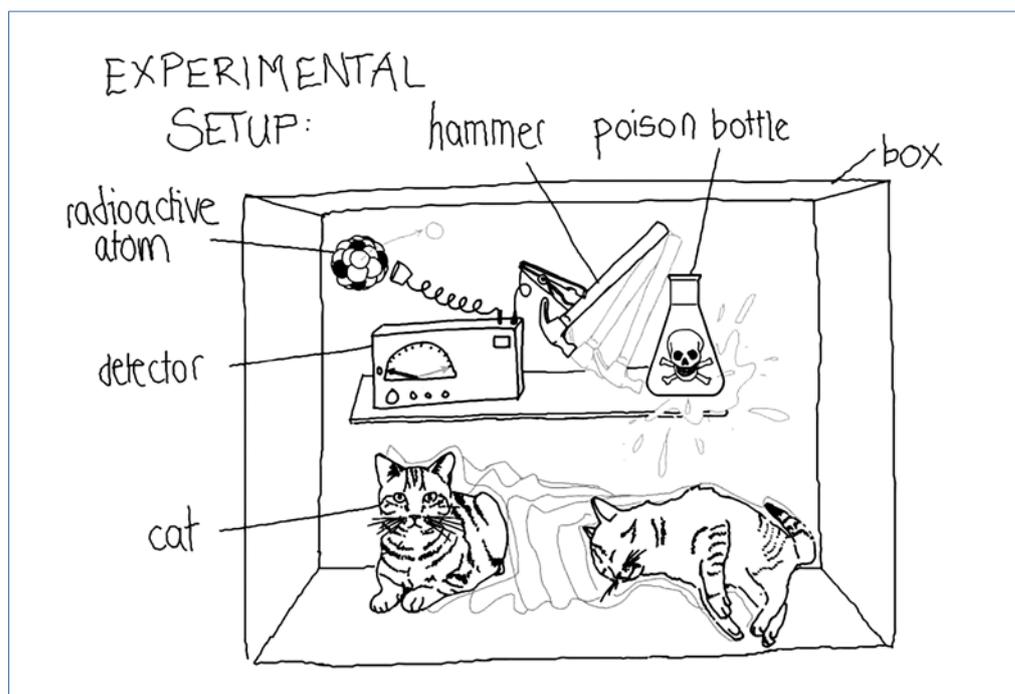


Abbildung 4: Schrödingers Katze: Vor der Messung befindet sich die Katze in einer Überlagerung aus 1. Katze lebendig, Atomkern nicht zerfallen und 2. Katze tot, Atomkern zerfallen. [Text aus: Die Naturwissenschaften 23 (1935), 807 – 812, mit Genehmigung des Springer-Verlags; Bild – Lara Hartjes, Ulm]

Unschärferelationen

Ein drittes wichtiges Phänomen der Quantenmechanik sind die Unschärferelationen, deren bekannteste Werner Heisenberg 1927 formulierte. Allgemein besagen sie, dass es Größen gibt – etwa Ort und Geschwindigkeit eines einzelnen Teilchens – die nicht gleichzeitig exakt messbar sind. Misst man etwa den Aufenthaltsort eines Teilchens, so beeinflusst diese Messung die Geschwindigkeit des Teilchens (und umgekehrt). Auf den ersten Blick erscheint dieser Effekt als störend, aber erst die Existenz solcher nicht gleichzeitig exakt messbarer Größen ermöglicht etwa die Quantenkryptographie (vgl. Abschnitt B 2). Die Kryptographie will die sichere Übermittlung von Daten zwischen einem Sender und einem Empfänger ermöglichen. Da das Mithören einer Nachricht immer auch eine Messung darstellt, verursacht ein Lauscher zwingend eine merkliche Störung der Nachrichtenübertragung, die von Sender und Empfänger erkannt werden kann. Dieses Prinzip macht sich die Quantenkryptographie zunutze.

Vielteilcheneffekte

Quantensysteme haben zudem die Besonderheit, dass sie sich nur durch Messungen unterscheiden lassen. Während man einen klassischen makroskopischen Gegenstand durch eine Markierung von anderen gleichartigen Gegenständen unterscheiden kann, ist dies bei einem Quantensystem nicht möglich. Man kann zum Beispiel die Elektronen in einem Atom nicht durchnummerieren; sie sind daher nicht unterscheidbar.

Quantenmechanische Teilchen besitzen eine innere Eigenschaft, zu der es kein klassisches Gegenstück gibt: den Eigendrehimpuls oder Spin. Dieser kann nur diskrete Werte annehmen, nämlich entweder das halbzahlige ($1/2, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2}, \dots$) oder ganzzahlige Vielfache ($0, 1, 2, \dots$) des Wertes \hbar (\hbar ist das durch 2π geteilte Planck'sche Wirkungsquantum h). Teilchen mit halb-

zahligem Spin nennt man Fermionen, Teilchen mit ganzzahligem Spin Bosonen.¹² Zu den Fermionen gehören die Bausteine eines Atoms wie Protonen, Neutronen und Elektronen, während etwa das Photon (Lichtteilchen) ein Boson ist.

Diese zwei Klassen unterscheiden sich nun grundlegend in ihrem Verhalten nahe dem absoluten Nullpunkt. Kühlt man Bosonen auf sehr tiefe Temperaturen, so nehmen alle Bosonen den gleichen Zustand ein, einen makroskopischen Quantenzustand, und es bildet sich ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat. Zwei Fermionen hingegen können niemals den gleichen Zustand einnehmen. In bestimmten Fällen können sie jedoch Paare bilden, die sich wie Bosonen verhalten. Dieser Effekt ist etwa für die Supraleitung verantwortlich, bei der der elektrische Widerstand vieler Metalle unterhalb der sogenannten Sprungtemperatur verschwindet. Diese Metalle leiten dann den Strom ohne Verluste.

¹² Nach Enrico Fermi (1901–1954) bzw. Satyendranath Bose (1894–1974).

3 Ansätze in Forschung und Anwendung

Das Wichtigste auf einen Blick

- In einer digitalisierten Gesellschaft ist Sicherheit bei der Übertragung von Daten von zentraler Bedeutung. Die Quantenkryptographie könnte hierzu durch die Verbesserung der Verschlüsselungstechnik einen wichtigen Beitrag leisten. Um in diesem sensiblen Bereich nicht von anderen Staaten abhängig zu sein, empfiehlt sich eine quantenkryptographische Forschung auch auf nationaler und europäischer Ebene.
- Die aktuelle Debatte um Datensicherheit, Privatheit und Ausspähung unterstreicht die Bedeutung einer frühzeitigen und umfassenden Technikfolgenabschätzung, da ein möglicher Quantencomputer und die Quantenkryptographie den Standard der Datensicherheit gravierend ändern könnten.
- Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien haben auch Auswirkungen auf die Entwicklung wichtiger Begleittechnologien, z. B. von Kühlsystemen, Laserchemie, Mess- und Verarbeitungsverfahren.
- Die Gründung von regionalen Förderzentren könnte wissenschaftliche Kompetenzen bündeln und ein Umfeld schaffen, das technologische Ausgründungen ermöglicht und fördert.

3.1 Themen der Grundlagenforschung

Das Forschungsgebiet der Quantentechnologien stellt insofern eine Besonderheit dar, als dass sich Anwendungen unmittelbar aus der Grundlagenforschung ergeben können.¹³ Vom Verständnis der quantenphysikalischen Konzepte der Überlagerung, Verschränkung und der Vielteilcheneffekte profitieren verschiedene **Forschungsbereiche**, darunter

- die Quantenkryptographie mit der Entwicklung von Protokollen,
- die Quanteninformationstheorie,
- die Miniaturisierung in der Elektronik,
- die Quantenbiologie, etwa bei der Her-

stellung eines „künstlichen Blattes“ zur Energieumwandlung durch Photosynthese.

Angesichts des gegenwärtigen Erkenntnisstandes, aber auch wegen ihres neuartigen Charakters, ist zurzeit nicht absehbar, welches dieser Teilgebiete bei künftigen Anwendungen die größte Rolle spielen wird. Die Entwicklung des gesamten Gebietes sollte deshalb aufmerksam verfolgt werden, auch um frühzeitig zu erkennen, in welchen Feldern sich vielversprechende Aussichten eröffnen.

In der anwendungsorientierten Grundlagenforschung gibt es bereits Versuche, für einfache Anwendungen Modellsysteme zu entwickeln. Hier sind folgende Bereiche zu nennen:

- die Übertragung der Quanteninformation über weite Strecken und die Stei-

¹³ Die Industrie fördert beispielsweise seit 2012 eine Alcatel-Lucent-Bell-Labs-Gastprofessur an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, die zusammen mit dem dortigen Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts praktische Anwendungen erforscht.

gerung der Übertragungs- und Wiederholraten,

- die verbesserte Nutzung quantenmechanischer Effekte für Präzisionsmessungen,
- die Entwicklung thermoelektrischer Generatoren,
- die Machbarkeit von Quantenmaschinen und
- die Entwicklung von nanomagnetischer Logik (Spinlogik).

Auch in der Anwendungsforschung bzw. in der Entwicklung sind auf dem Gebiet der Quantentechnologien zurzeit im besten Fall Versuchsapparaturen im Labormaßstab vorhanden, mit denen sich aber nachweisen lässt, dass technologische Ziele grundsätzlich erreichbar sind. Im folgenden Abschnitt werden besonders vielversprechende Bereiche näher beschrieben.

3.2 Anwendungsfelder

Quantenkommunikation und -kryptographie

Einen Beitrag zur Sicherheit der Datenübertragung leistet die Quantenkryptographie. Sollten die im Internet eingesetzten klassischen Sicherheitssysteme, für deren Sicherheit es keinen mathematischen Beweis gibt, zusammenbrechen, entstünde ein kaum überschaubarer Schaden. Die Quantenkryptographie ermöglicht (in Verbindung mit klassischen Verfahren) die sichere Datenübertragung zwischen zwei Punkten und (z. B. durch Quantenrepeater) zukünftig auch in Quantennetzwerken. Ein wesentlicher Aspekt der Quantenkryptographie ist, dass mit ihrer Hilfe verschlüsselte Nachrichten, auch wenn sie abgefangen und gespeichert werden sollten, selbst in Zukunft mit besserer Technologie nicht entschlüsselt werden können. Hierdurch ermöglicht die Quantenkryptographie langfristige Sicherheit von Daten (s. auch „Schwerpunkte der aktuellen Forschung“, S. 24).

Quantencomputer

Um die möglichen Bedrohungen klassisch-kryptographischer Systeme realistisch einschätzen zu können und um gegebenenfalls Abwehrmaßnahmen zu ergreifen, ist die Erforschung von Quantencomputern notwendig.

Im Bereich der Quantentechnologien gehören die Datenübertragung sowie die Entwicklung von Quantencomputern zu den konkreteren zukünftigen Anwendungsfeldern (s. auch S. 28).

Bislang existieren allerdings nur Modellsysteme, mit denen sich die Grundprinzipien nachweisen lassen. Hier ist Entwicklungsarbeit notwendig, um Komponenten wie Ionenfallen, neutrale Atome und Festkörper (etwa als Träger von Quantenpunkten) als Basiselemente solcher Rechner zur Anwendungsreife zu entwickeln. Das gilt ebenso für die erforderlichen Verfahren zur Fehlerkorrektur und den Aufbau großer Systeme, die leistungsfähige Rechner erst ermöglichen.

Ein erster Schritt zur experimentellen Umsetzung hinreichend großer Allzweck-Quantencomputer könnten Quantencomputer für spezielle Probleme sein, etwa zur Faktorisierung.¹⁴ Eine enge Kooperation mit der Informatik ist unabdingbar.

Quantensensorik und Quantenmetrologie

Heute ist es möglich, Quantenzustände einzelner Atome sehr genau zu kontrollieren. Solche kontrollierte Quantenzustände können dabei in der Sensorik angewendet werden. Sensoren in der Größenordnung von Atomen können präzise und weitgehend störfreie nanometergenaue Messungen von magnetischen und elektrischen Feldern liefern. Genau deshalb können sie eine essentielle Rolle in Technologien, wie der hochempfindlichen magnetischen Resonanz, spielen (s. auch S. 45). Weitere

¹⁴ Das Zerlegen einer natürlichen Zahl in ein Produkt von Primzahlen ist für Verschlüsselungsverfahren von großer Bedeutung.

wichtige Bausteine für solche Technologien sind nicht-klassische Lichtzustände und die Quantenverschränkung.¹⁵ Nicht-klassisches Licht würde es erlauben, hochauflösende bildgebende Verfahren in der Mikroskopie und neuartige Sensorik zu verwirklichen. Darüber hinaus könnten neue Quantentechnologien im Messwesen dabei helfen, die Basiseinheiten physikalischer Messungen zuverlässiger zu definieren. Derzeit gibt es Anstrengungen, für die Basiseinheit der Masse ein geeignetes und praktikables Verfahren zu finden, um das bisher verwendete Urkilogramm durch die Messung elementarer Größen zu ersetzen. Bei der Messung von Länge und Zeit ist dies schon lange üblich.

Begleittechnologien

Eine weitere Besonderheit der Quantentechnologien ist, dass sie zahlreicher hochentwickelter „Begleittechnologien“ bedürfen, um Quantensysteme herzustellen und über längere Zeit zuverlässig in Betrieb zu halten. Das heißt, eine Investition in die Entwicklung bestimmter Quantentechnologien hat auch Auswirkungen auf die Weiterentwicklung anderer wichtiger Technologien. Dazu gehört die Entwicklung von

- Kühlsystemen,
- Mikrofertigungsverfahren,
- festkörperphysikalischen Quantensystemen,
- Quantenelektronik (u. a. Ein-Elektron-Transistor),
- Laserchemie (Synthese, Analytik) und
- Mess- und Verarbeitungsverfahren.

Dabei ist mit Synergieeffekten zu rechnen, da sich die für quantentechnologische Verfahren entwickelten Begleittechnologien auch auf die Weiterentwicklung der klassischen Informationstechnologie, der Sensorik und Robotik bis hin zu hochempfindlicher Diagnostik auswirken.

3.3 Integration von Forschung und Anwendungsentwicklung

Aufgrund der skizzierten Unsicherheiten ist es für die Industrie eine besondere Herausforderung, Ergebnisse der quantentechnischen Grundlagenforschung in marktfähige Produkte umzusetzen. Maßgebliche Impulse zur industriellen Umsetzung müssen daher zunächst aus wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen erfolgen. Voraussetzung ist, dass die umfangreichen und höchst komplexen, speziell entwickelten Versuchsapparaturen der Forschungseinrichtungen auch dafür genutzt werden können, Prototypen quantentechnologischer Produkte zu entwickeln.¹⁶

Aktuelle Förderprogramme wie der EXIST-Forschungstransfer¹⁷ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie bieten wiederum die Möglichkeit, Ausgründungen aus Forschungseinrichtungen zu unterstützen.

Quantentechnologisch orientierte Firmen entstehen vor allem dort, wo Fachwissen, Geräte und eine administrative Unterstützung durch die Forschungseinrichtungen der Region zur Verfügung stehen. Mit der Einrichtung von Quantentechnologiezentren könnte, ähnlich wie in den USA, Kanada, England oder der Schweiz, die Entwicklung einzelner Technologien auf der Basis existierender Forschungsgruppen etabliert und gefördert werden. In diesen Zentren würden jeweils bestimmte Aspekte der Quantentechnologien von ihren Grundlagen bis hin zu Anwendungen konzentriert bearbeitet werden.

Wünschenswert wären in Deutschland Zentren, die sich auf Teilgebiete konzentrieren, in denen regional bereits wis-

¹⁵ Die klassische Optik behandelt Licht gewöhnlich als eine Welle. Betrachtet man Licht auf fundamentalem Quantenniveau, besteht diese Welle aus diskreten Teilchen (Photonen).

¹⁶ Wie das Center for NanoScience (CeNS) der Ludwig-Maximilians-Universität München beispielhaft zeigt, ist dies ein geeigneter Weg, um technologisch orientierte Ausgründungen zu ermöglichen. <http://www.cens.de/> (Stand: 18.02.2015).

¹⁷ <http://www.exist.de/exist-forschungstransfer/> (Stand: 18.02.2015).

senschaftliche und technische Expertise besteht. Eine bundesweite Koordinierung der Aktivitäten kann dabei sehr hilfreich sein. Theoretisch arbeitende Gruppen können hingegen neben der Anbindung an experimentell arbeitende regionale Zentren auch von einer „virtuellen“ Zentrenbildung stark profitieren.

Kasten 3-1: Technikfolgenabschätzung

Bei den Quantentechnologien lassen sich die Entwicklungen und Auswirkungen noch nicht klar abzeichnen. Fundierte Abschätzungen der möglichen Folgen sind daher mit großen Unsicherheiten verbunden. Daher ist es wichtig, Erwartungen, unterschiedliche Bewertungen und Sichtweisen frühzeitig zu thematisieren und ergebnisoffen zu diskutieren. In der Praxis der Technikfolgenabschätzung haben sich im Wesentlichen zwei Modelle etabliert. Das sogenannte Expertenmodell beruht auf der Annahme, dass Fragen der Technikfolgenabschätzung ausschließlich kognitiver Natur seien und daher mit dem Wissen von Experten z. B. in Form von Sachverständigen-Kommissionen beantwortet werden können. Das partizipative Modell der Technikfolgenabschätzung geht von der Annahme aus, dass die Fragen der Abschätzung des Nutzens gegenüber zu erwartenden negativen Begleitfolgen sowie der daraus resultierenden Akzeptanz nicht allein nach wissenschaftlichen Kriterien beantwortet werden können. Vor allem die voluntativen und normativen Aspekte können demnach nur unter Beteiligung der künftigen Nutzer und der legislativen Entscheidungsgremien (wie Parlamenten) beantwortet werden.

Umfragen unter Bürgern zeigen, dass Unbekanntes schnell als unwägbar und zu risikobehaftet eingeschätzt wird. Die Grundhaltung zu neuen Technologien ändert sich jedoch signifikant, sobald sich eine Nutzenperspektive abzeichnet.

Die Technikfolgenabschätzung der Quantentechnologien sollte beide Modelle, das Expertenmodell und das partizipative Modell, als sich ergänzende Perspektiven anwenden und die Interaktion zwischen Experten, gesellschaftlichen Interessenvertretern und der interessierten Öffentlichkeit suchen. Ziel sollte sein, eine konstruktive Debatte anzustoßen, in der über die Chancen und Erwartungen, aber auch über Risiken und Wissensdefizite diskutiert wird.

Für einen offenen Diskurs und die Vermittlung von Wissen und neuesten Entwicklungen der Quantentechnologien sollten dialogorientierte Formate entworfen werden, die über eine reine Vermittlung von Fachwissen hinausgehen. Denkbar wären hierfür:

- Diskursive, webbasierte Formate, die sich nicht auf die reine Darstellung beschränken.
- Expertenblogs (mit Kommentarfunktion).
- Zentrale Website, auf der sich Leser über neueste Entwicklungen aus Wissenschaft und Wirtschaft, Veranstaltungen und Termine informieren und über Foren austauschen können.
- Mitmachausstellungen und Besucherlabore könnten die Grundlagen der Quantenphysik, ihre aktuellen und möglichen Anwendungen interaktiv darstellen und auch als Wanderausstellungen umgesetzt werden. Hierbei kann man bereits auf Erfahrungen an verschiedenen Standorten (Stuttgart, Ulm, Erlangen) zurückgreifen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Quantentechnologien machen sich die Prinzipien der Quantenphysik zunutze. Sie sind interdisziplinär ausgerichtet und profitieren neben der Physik von weiteren Fachgebieten wie der Mathematik, Chemie, Elektrotechnik und Informatik.

Deutschland ist eines der Länder, in denen die Quantenphysik ihren Ursprung hat. Mehr als hundert Jahre nach den grundlegenden Entdeckungen ist die Quantenphysik die Basis vieler moderner Technologien wie der Halbleiter- und der Lasertechnik. Diese Technologien werden auch als Quantentechnologien der ersten Generation bezeichnet.

Das Potenzial der **neuen Quantentechnologien** ist groß: So etwa für die Informationsverarbeitung und die sichere Kommunikation sowie für die hochempfindliche Sensorik im Messwesen, bei der Standardisierung und in der Medizin. Um Quantentechnologien erfolgreich zu entwickeln, ist es unerlässlich, zahlreiche herkömmliche Technologiefelder zu verbessern und zu verfeinern – zum Beispiel bei Kühlsystemen und Mikrofertigungsverfahren, in der Laserchemie oder der Nanotechnologie –, d. h. die zielgerichtete Entwicklung der Quantentechnologien hat auch einen positiven Effekt bezüglich der Weiterentwicklung der Begleittechnologien.

Ein prominentes Beispiel für das Potenzial der neuen Quantentechnologien ist die Quanteninformationstheorie und ihre Anwendungen für die sichere Datenübertragung. Nach den Naturgesetzen der Quantenphysik verursacht ein dritter Teilnehmer (ein unberechtigter Lauscher)

zwingend eine Störung der Nachrichtenübertragung, die vom Sender und Empfänger registriert werden kann. Dieses Prinzip macht sich die Quantenkryptographie zunutze, z. B. bei der Datenübertragung mittels Quantenzuständen des Lichts. Anders als die heutige Kryptographie stützt sie sich nicht auf plausible, aber unbewiesene mathematische Annahmen, sondern auf Naturgesetze. Damit erreicht die Quantenkryptografie, die in ersten Modellversuchen bereits erprobt wird, ein neues Niveau der Übertragungssicherheit.

Die Quanteninformationstheorie könnte darüber hinaus in Zukunft auch leistungsfähigere Rechnerkonzepte und Rechenverfahren entwickeln. Die herkömmliche Rechner-technik, die die Basis für Datenverarbeitung und Kommunikation ist, wird aufgrund der zunehmenden Informationsdichte und Integration immer kleinerer Bauelemente unweigerlich an Grenzen stoßen. Für die fortschreitende Miniaturisierung in der Elektronik sind die Quantentechnologien unverzichtbar.

Für das Messwesen könnte durch die Nutzung von Quanteneffekten eine bislang ungeahnte Empfindlichkeit und Genauigkeit erreicht werden, die die Messung von Zeiten, Massen und Strömen wesentlich verbessert. Dies eröffnet Anwendungsperspektiven für hochgenaue Ortungs- und Navigationssysteme und für medizinische Diagnosegeräte.

Die neuen Quantentechnologien befinden sich in weiten Teilen noch im Stadium der Grundlagenforschung. Die Nutzbarmachung quantenphysikalischer

Effekte in den Quantentechnologien der neuen Generation bedarf daher noch großer Forschungsanstrengungen. Die Quantenkryptographie ist dabei derzeit das – auch im Hinblick auf die wirtschaftliche Nutzbarkeit – am weitesten entwickelte Teilgebiet der neuen Quantentechnologien.

Obwohl viele der grundlegenden Entdeckungen zu den neuen Quantentechnologien in Deutschland erfolgt sind, gibt es bislang in Deutschland kein Unternehmen, das versucht, die neuen quantenphysikalischen Effekte wirtschaftlich zu verwerten.

Diese Stellungnahme identifiziert als eines der Hauptprobleme die bestehende Forschungs- und Förderstruktur. Aufgrund des interdisziplinären Charakters ist die Förderung zu den einzelnen Aspekten der Quantentechnologien weit über die unterschiedlichen Fachgebiete verstreut. Entsprechend sind auch die Kompetenzen an verschiedenen Orten angesiedelt und werden daher von der Industrie nicht wahrgenommen. Diese Stellungnahme möchte aufzeigen, dass eine zielgerichtete systematische Förderung der Quantentechnologien insbesondere im Hinblick auf die technische Umsetzung Rahmenbedingungen schaffen könnte, in denen mittelfristig innovative Produkte entstehen könnten. Durch Bildung geeigneter Forschungszentren und -cluster sollten Strukturen entwickelt werden, in denen die unterschiedlichen Bearbeitungsschritte zur Entwicklung neuer Quantentechnologien möglichst gemeinsam in Angriff genommen werden.

Um auf dem Gebiet der Quantentechnologien international nicht den Anschluss zu verlieren, sollte zudem die Ausbildung von Ingenieuren inhaltlich ergänzt werden. Bereits in der Grundausbildung, d. h. bereits im Bachelor-Studiengang, sollte das Grundwissen über Quantenphänomene vermittelt werden

– und zwar mit derselben Selbstverständlichkeit, mit der etwa das Wissen der Mechanik vermittelt wird. Das gilt besonders für die Studienrichtungen Elektrotechnik und Informationstechnik, da sich vermutlich hier die ersten Anwendungen ergeben werden.

Teil B: Zur Vertiefung: Schwerpunkte der aktuellen Forschung

1 Einleitung

Die Aufgaben der neuen Quantentechnologien reichen von der Beantwortung abstrakter mathematischer Fragestellungen bis hin zu sehr konkreten Implementierungsaufgaben, an denen neben Physikern und Mathematikern auch Informatiker, Elektrotechniker und Chemiker, Biologen oder Geodäten arbeiten. Zu ihren Themengebieten gehören beispielhaft Informationstheorie, Berechenbarkeitstheorie, Kommunikationssicherheit, Signalverarbeitung und Erdvermessung. Die Quantentechnologien als neues Forschungsgebiet sind daher stark von einer interdisziplinären Zusammenarbeit verschiedener, einstmals getrennter Fachgebiete geprägt.

Die Forschung an den Quantentechnologien erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen, die sich nicht streng voneinander abgrenzen lassen:

- **Die Grundlagenforschung hat seit den 1980er Jahren den Grundstein zur Quanteninformation und -kommunikation gelegt**, also der Informationsverarbeitung und Kommunikation auf Basis der Quantenphysik. Die Quantenkryptographie nach Bennett und Brassard (1984) ist direkt mit Unschärferelationen (Heisenberg 1927) verbunden, eine verwandte Idee von Ekert (1991) geht auf das EPR-Paradoxon (Einstein, Podolsky und Rosen 1935) zurück. Ein bedeutender experimenteller Fortschritt hierzu war die Verarbeitung und Beobachtung eines einzelnen Quantensystems.
- Gleichwohl sind viele Grundlagenfragen noch offen, und ihre Beantwortung wird zweifellos wichtige neue Einsichten für künftige Quantentechnologien liefern.
- Je besser man einzelne Quantensysteme verschiedenster Art – Photonen, Atome, Ionen, Moleküle, Spins usw. – versteht und beherrscht, desto dringlicher wird es, **integrierte Architekturen von Quantensystemen zu entwickeln**. Hierbei werden einzelne Quantensysteme in eine Trägerstruktur eingebaut, um sie für konkrete Anwendungen zu nutzen (sogenannte hybride Quantensysteme). Mit Hilfe integrierter Bauteile wie Atom- und Ionenfallen, Wellenleitern oder optomechanischen Elementen kann man eine Vielzahl einzelner Quantensysteme kontrollieren.
- Wenn es gelingt, Quantensysteme in Architekturen zu integrieren, die sich mit gängigen Mikrofertigungsverfahren herstellen lassen, so würde dies die Entwicklung von Anwendungen stark vorantreiben.
- Die **Anwendungen der Quantentechnologien** machen die Methoden der Quantenphysik praktisch nutzbar. Während Anwendungen in Sensorik und Messtechnik recht schnell verwirklicht werden können, dürfte die Entwicklung von Quantensimulatoren und -computern noch einige Zeit in Anspruch nehmen. Durch sogenannte Quantensimulatoren könnten makroskopische Quantenphänomene wie die Supraleitung¹⁸ in neuen Materialien berechnet und optimiert werden, was selbst mit den besten heute verfügbaren Rechnern unmöglich ist. Für die Stromübertragung könnten so mög-

¹⁸ Supraleiter sind Materialien, deren elektrischer Widerstand beim Unterschreiten einer sogenannten Sprungtemperatur auf null abfällt.

cherweise Leitungen ohne elektrischen Widerstand auf der Basis supraleitender Materialien eingesetzt werden.

- Quantentechnologische Entwicklungen können aber auch für klassische Anwendungen nützlich sein. Bei der Forschung zum Quantencomputer möchte man etwa integrierte Schaltkreise für einzelne Photonen herstellen, die sowohl Quellen als auch Detektoren auf einem Chip beherbergen. Daraus können neue optische Bauteile mit sehr niedriger Lichtleistung entwickelt werden. Eine effiziente Simulation von Vielteilchensystemen kann helfen, zum Beispiel Transportprozesse in biologischen Systemen besser zu verstehen.
- Umgekehrt liefern technische Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien stets auch neue Impulse für die Grundlagenforschung.

Neben den unterschiedlichen Forschungsebenen lassen sich auch (nicht abschließend) Forschungsfelder unterscheiden, auf denen Wissenschaftler sowohl theoretisch als auch experimentell arbeiten:

- **die Übertragung von Quantenzuständen**, vornehmlich durch Licht (Photonen), die vor allem auf der Lasertechnologie und Lichtwellenleitern aufbaut und die neue Möglichkeiten wie Quantenkommunikation und -kryptographie eröffnet,
- **die Verarbeitung von Quantenzuständen** in Quantencomputern und die hierfür nötigen theoretischen Grundlagen wie Quantenalgorithmen und -informationstheorie,
- **die Verbesserung und Verfeinerung bestehender Technologien**, vor allem auf den Gebieten der Sensorik und Messtechnik sowie
- **die theoretische Grundlagenforschung** etwa zur Steuerung und Regelung von Quantensystemen oder zum Verständnis biologischer Vorgänge wie der Photosynthese.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilgebiete der Quantentechnologien im Detail aufgeführt, um dem Leser einen Überblick über die Breite des Gebiets zu verschaffen.

2 Quantenkommunikation und -kryptographie

Die Kryptographie soll die sichere Übermittlung von Nachrichten zwischen einem Sender und einem Empfänger ermöglichen, auch wenn ein Dritter die Übertragung belauscht. Hierfür ist bei sogenannten symmetrischen Verfahren notwendig, dass der Sender und der Empfänger die Nachricht mit einem Schlüssel ver- und entschlüsseln, der nur ihnen bekannt ist, nicht aber einem Lauscher. Ein solcher Schlüssel ist meist eine lange Kette zufällige aufeinanderfolgender Ziffern. Der Austausch der Schlüssel für die Kodierung stellt dabei ein Sicherheitsrisiko dar, er muss ebenfalls vor Lauschangriffen geschützt werden. Die Sicherheit der heute oft benutzten Verfahren mit einem öffentlichen Schlüssel für den Sender und einem nur dem Empfänger bekannten geheimen Schlüssel (public key cryptography) beruht darauf, dass es mathematische Operationen gibt, die in Bezug auf die Komplexität der Berechnung asymmetrisch sind. Ein Beispiel ist die Faktorisierung großer ganzer Zahlen, die ineffizient und damit schwierig ist, während die umgekehrte Operation, Multiplikation von Zahlen, einfach ist. So gesehen befindet sich die klassische Kryptographie immer noch auf der inzwischen Jahrtausende andauernden Spirale von immer besseren Verschlüsselungsverfahren und noch besseren Antworten der unerwünschten Abhörer. Solange beispielsweise der mathematische Beweis für die Nichtexistenz eines effizienten Algorithmus für die Faktorisierung fehlt, ist die klassische Kryptographie nicht am Ende der Spirale angekommen. Ein solcher Algorithmus, der auf klassischen Computern effizient läuft, kann aus heutiger Sicht jederzeit gefunden werden, oder er wurde schon gefun-

den, ist aber noch geheim – ein Gedanke, der verunsichern kann. Dies unterstreicht die große Bedeutung der Quantenkryptographie.¹⁹ Sie stellt beweisbar sichere Verfahren zur Erzeugung und Verteilung von geheimen Schlüsseln bereit. Im Gegensatz zu allen gebräuchlichen Verfahren der klassischen Kryptographie lässt sich also mit mathematischen Mitteln zeigen, dass bestimmte quantenkryptographische Verfahren sogar dann sicher sind, wenn der Lauscher alle mit den Naturgesetzen im Einklang stehenden Verfahren einsetzen darf, etwa auch einen Quantencomputer.²⁰

Dies ist eine bislang in der Geschichte geheimer Botschaften einmalige Situation. Den quantenphysikalisch relevanten Teil dieser Verfahren kann man in drei Schritte aufspalten:

1. Der Sender erzeugt (im Allgemeinen) Licht als Informationsträger (etwa eine Ein-Photon-Anregung einer bestimmten Lichtmode) in einem genau bestimmten Quantenzustand.
2. Das Licht wird über einen Kanal (Kabel, Freiluft) an den Empfänger übertragen.
3. Der Empfänger misst das Licht in einer genau festgelegten Weise.

¹⁹ Einen ausführlichen Report zum Thema Quantenkryptographie hat im September 2014 das European Telecommunication Standards Institute (ETSI) veröffentlicht. Der Bericht „Quantum Safe Cryptography and Security“ (ISBN 979-10-92620-03-0) ist unter dem folgenden Link erhältlich:
http://docbox.etsi.org/Workshop/2014/201410_CRYPT/Quantum_Safe_Whitepaper_1_0_0.pdf (Stand 19.02.2015).

²⁰ Unter dem Schlagwort „Post-Quantenkryptographie“ untersuchen Informatiker klassische Verfahren, die auch dann sicher sind, wenn Quantencomputer zur Lösung etwa des Faktorisierungsproblems verfügbar sind. Diese Verfahren erreichen nicht die prinzipielle Sicherheit der Quantenkryptographie, sind voraussichtlich jedoch einfacher einzusetzen.

Diese Technik ermöglicht es auch, einen echten Zufallszahlengenerator herzustellen, der selbst eine Reihe von Anwendungen besitzt.

2.1 Sicherheitsaspekte der Quantenkryptographie

Die ältesten und am besten untersuchten Verfahren der Quantenkryptographie sind das BB84- und das Ekert-Protokoll.²¹ Ersteres verwendet einzelne, letzteres verschränkte Photonen. Die Sicherheit der beiden Protokolle konnte bereits unter sehr allgemeinen Voraussetzungen bewiesen werden, jedoch ist ihre praktische Umsetzung schwierig, da die experimentellen Anforderungen sehr hoch sind.

Die Umsetzung des dreistufigen Verfahrens hat allerdings technische Grenzen. Vor allem die Lichtübertragung leidet unter Signalverlusten und Übertragungsfehlern. Da diese Fehler immer auch als Zugriffsversuch eines Lauschers gedeutet werden können, müssen die Messdaten weiterverarbeitet werden, um die Fehler zu beseitigen und um einer eventuellen Kenntnis des Mithörers von Teilen des Schlüssels entgegenzuwirken. Es gibt Modelle, mit denen die Erzeugungsraten der Schlüsselbits unter realistischen Bedingungen berechnet werden können. Die Berechnungen innerhalb dieses Modells sind oft schwierig, da Signale und Detektoren nicht durch einfache Qubits und Qubitmessungen beschrieben werden, sondern durch Systeme von Lichtzuständen. Jedoch konnte man für die wichtigsten Protokolle zeigen, dass nicht nur Einzelphotonenquellen, sondern auch einfachere Laserquellen für die sichere Schlüsselerzeugung geeignet sind. Eine Variante des BB84-Protokolls kann be-

reits mehrere Millionen geheimer Schlüsselbits pro Sekunde erzeugen. Ziel ist nun, bessere Kombinationen von Signalkodierungen und Messprozeduren zu finden, um auch über weite Übertragungstrecken eine hohe Schlüsselrate zu erzielen, wozu sich insbesondere auch Quantensysteme mit mehr als zwei Zuständen eignen. Von Bedeutung ist dabei auch die Weiterentwicklung der Detektionsverfahren.

Mit Hilfe neuer theoretischer Ansätze will man sich eine bessere Einsicht in die Funktionsweise der Protokolle verschaffen und ihre Sicherheit und Effizienz verbessern. In der klassischen Kryptographie gibt es Angriffe, die aus dem Stromverbrauch und der Rechendauer der technischen Geräte Rückschlüsse auf den Schlüssel oder den Klartext erlauben. Auch in der Quantenkryptographie gibt es solche sogenannten Seitenkanalangriffe, die erst durch eine unvollkommene Implementierung ermöglicht werden. Daher muss man die Sicherheit quantenkryptographischer Systeme bei einem praktischen Einsatz immer als Ganzes betrachten. Mit neuen „geräteunabhängigen Protokollen“ will man nun die Beweisannahmen über die exakte Funktionsweise der verwendeten Geräte vereinfachen. Dadurch sollen die Seitenkanäle geschlossen oder wenigstens beherrschbar werden.

2.2 Photonische Quantensysteme

In der Quantenkommunikation und -kryptographie arbeitet man fast ausschließlich mit Quantenzuständen des Lichts (Photonen). Diese lassen sich mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand realisieren, über größere Distanzen verschicken und weisen nahezu ideales Quantenverhalten auf. Vor allem bei der Untersuchung von Grundlagenfragen der Physik haben sie sich in den letzten Jahrzehnten bewährt. So verwenden etwa experimentelle Überprüfungen der Bellschen Ungleichung sehr oft verschränkte Zustände von Photonen.

²¹ Nach Charles H. Bennett (*1943) und Gilles Brassard (*1955) bzw. Artur Ekert (*1961). Unter einem Protokoll versteht man hier einen Folge von Handlungsanweisungen, nach Abschluss derer entweder ein Erfolg (hier: ein Schlüssel) oder ein Misserfolg steht.

Für die Herstellung von Quantenzuständen wie einzelner Photonen oder verschränkter Photonenpaare werden meist nichtlineare Wechselwirkungsprozesse genutzt. Durch den Einsatz integrierter Optik wie Wellenleiterchips, Glasfaserkabel oder optisch gekoppelter Netzwerke wurde die Erzeugung der Quantenzustände effizienter und deren Qualität verbessert. Gleichzeitig ist damit auch die Miniaturisierung der für den Aufbau komplexerer Quantennetzwerke benötigten Komponenten vorangekommen. Doch sind weitere Anstrengungen nötig, um noch bessere Wellenleiter und Fasern (z. B. photonische Glasfaserkabel) für die Anwendung in Quantensystemen bereitzustellen. Dazu müssen gewisse relevante Parameter auf der Grundlage quantenoptischer Überlegungen an die Bedürfnisse der Quanteninformationsverarbeitung angepasst werden. Die Empfindlichkeit der Quantennatur des Lichts erfordert modernste technische Herstellungsverfahren sowie die Verbesserung der bestehenden, für den Einsatz in der klassischen nichtlinearen Optik konzipierten Strukturen. Wesentlich für die Quantenkommunikation ist zudem die Steigerung erreichbarer Übertragungsraten, indem es gelingt, Quantenzustände hoher Güte in einfachen Systemen schnell zu erzeugen. Eine gewisse Schwachstelle bilden hierbei noch die Lasersysteme, die man für die Erzeugung der benötigten ultrakurzen Lichtimpulse benötigt. Ihr Aufbau ist zum Teil noch recht aufwendig und nicht hinreichend stabil. Die nächste Generation solcher Systeme, an deren Grundlagen und Prototypen zurzeit gearbeitet wird, soll wesentlich robuster und rauschärmer sein. Auch sollen sie höhere Wiederholraten und größere mittlere Leistungen bei gleichzeitig verbesserten räumlichen und spektralen Eigenschaften aufweisen.

Um die Quanteneigenschaften des Lichts nachzuweisen, braucht man Detektoren, die die Photonenzahlen auch von sehr schwachem Licht (einzelne

Photonen) aufnehmen können und dabei geringe Fehler aufweisen. Gängige Photonendetektoren können noch nicht zwischen kleinen Photonenzahlen 1, 2, 3, ... unterscheiden. Detektoren, die auch die Anzahl der Photonen messen können, sind in der Entwicklung. Sie sind bisher aber in mindestens einer der relevanten Leistungsanforderungen wie Effizienz, Rauschfreiheit, Zeitauflösung, Wiederholraten oder Wellenlängen beschränkt und müssen bei sehr tiefen Temperaturen betrieben werden, so dass auch bessere Kühlverfahren nötig werden.

Auch die Analyseverfahren, die derzeit für den Nachweis von Quanteneigenschaften in Experimenten zur Verfügung stehen, lassen sich noch weiterentwickeln und verfeinern. Dies können auch alternative Charakterisierungsmethoden und vereinfachte Detektortypen sein. Hierzu können Fortschritte in der Wellenlängenumwandlung beitragen, um verbesserte Schnittstellen zwischen effizienter Übertragung in optischen Fasern und Messungen zu realisieren.

2.3 Perspektiven der Quantenkommunikation und -kryptographie

Soll die Quantenkryptographie breit anwendbar werden, so muss sie auch bei der Übertragung über große Strecken funktionieren. Während zurzeit Übertragungen über einige hundert Kilometer möglich sind, wird zur Überbrückung längerer Strecken der Einsatz quantenmechanischer Relaisstationen – sogenannter Quantenrepeater – erforscht, deren Technik eng mit der Möglichkeit der Fernübertragung von Quantenzuständen (Quantenteleportation) verwandt ist.²² Außerdem untersucht man, wie man aus

²² Das Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt die Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen der Quantenkommunikation im Rahmen des Förderprogramms „IKT 2020“.

Punkt-zu-Punkt-Verbindungen Quantennetzwerke aufbauen und in bestehende Telekommunikationsnetze integrieren kann. Es wird darüber hinaus versucht, satellitengestützte Quantenkommunikationskanäle aufzubauen.

Die Quantenkommunikation wird nicht nur zur Schlüsselerzeugung dienen. Auch weitere kryptographische Protokolle wie digitale Signaturen und anonyme Datenbankabfragen sind denkbar. Auch außerhalb der kryptographischen Anwendungen kann sie technische Verbesserungen ermöglichen, etwa wenn mit Quanteneffekten der Datendurchfluss durch Glasfasern gesteigert werden soll. In weiter Zukunft können sie auch Protokolle ermöglichen, die bestimmte Anwendungen mit deutlich geringerem Aufwand lösen können, als es mit klassischer Technik möglich ist, zum Beispiel die Synchronisierung von Kalendern oder den Vergleich langer Texte.

Die einfachsten quantenkryptographischen Verfahren kommen ohne die Verarbeitung verschränkter Zustände aus, und einige entsprechende Apparate sind bereits kommerziell erhältlich. So ist die Quantenkryptographie derzeit das – auch das im Hinblick auf die wirtschaftliche Nutzbarkeit – am weitesten entwickelte Teilgebiet der Quantentechnologien der zweiten Generation.

3 Quanteninformatik und Quantencomputer

Die Quanteninformatik entsteht aus der Einsicht, dass sowohl die Darstellung als auch die Verarbeitung von Information eng mit der Physik verknüpft sind. Einerseits begrenzen Naturgesetze die prinzipiellen Möglichkeiten der Informationsverarbeitung (etwa durch Unschärferelationen), andererseits ist es wichtig zu wissen, welche Rechenmodelle für eine effiziente Simulation der Natur geeignet sind. Beide Themen sind in Theorie und Praxis von großer Bedeutung:

- In der Praxis wird die Miniaturisierung der herkömmlichen halbleiterbasierten Rechnertechnik in naher Zukunft an thermodynamische und quantenmechanische Grenzen stoßen. Es stellt sich die Frage, ob und, wenn ja, wie das Moore'sche Gesetz – die Verdoppelung der Leistungsfähigkeit von integrierten Schaltungen und damit auch von Computern etwa alle 18 Monate – weiter aufrechterhalten werden kann.
- In der theoretischen Informatik werden hingegen die prinzipiellen Möglichkeiten und Grenzen der Informationsverarbeitung, ausgehend von einem abstrahierten und vereinfachten Modell, untersucht. Dabei geben die Naturgesetze vor, welches Modell verwendet werden kann. Nach dem gegenwärtigen Stand der Wissenschaft ist dieses Modell nicht länger nur eine Maschine mit einer Darstellung binärer Logik, sondern der *Quantencomputer*. Dafür gibt es mehrere Gründe: (i) Die Naturgesetze erlauben im Prinzip seine Konstruktion, (ii) wir kennen heute kein noch leistungsfähigeres Rechnermodell, das im Prinzip realisierbar ist, und (iii) er scheint für

bestimmte Anwendungen leistungsfähiger als herkömmliche Computer zu sein.

Die Leistungsfähigkeit eines Quantencomputers zeigt sich daran, dass er zuvor sehr zeitintensive Aufgaben effizient ausführen kann. So kann ein Quantencomputer den sogenannten Shor-Algorithmus ausführen, mit dessen Hilfe sich große Zahlen effizient in ihre Faktoren zerlegen lassen und diskrete Logarithmen berechnet werden können. Effiziente Algorithmen, um dieses Problem auf klassischen Computern zu lösen, sind nicht bekannt. Würde ein großer Quantencomputer wirklich wie erwartet gebaut werden, so könnte er alle wichtigen klassischen *Public-Key*-Verfahren (Kryptographie wie Authentisierung) brechen, was verheerende Folgen für die Sicherheit im Internet hätte.

Die wesentlichen Bauelemente eines klassischen Rechners sind Prozessor, Bussystem, Register und Speicher. Rechenoperationen werden mittels Gattern ausgeführt. Analog dazu besteht ein Quantencomputer aus Quantengattern, Quantenspeicher usw. Quantengatter sind jedoch sehr störungsanfällig. Die Wechselwirkung mit der Umgebung kann zur Dekohärenz führen und dem Verlust der Interferenzfähigkeit des Systems, was Fehlerkorrekturverfahren erforderlich macht. Es konnte gezeigt werden, dass ein Quantencomputer möglich ist, wenn nur die Güte der einzelnen Bauelemente über einer bestimmten Schwelle liegt. Neben dieser gitterbasierten Implementierung gibt es auch andere Vorschläge, zum Beispiel den Einweg-Quantencomputer, bei

dem ein geschickt präparierter Zustand nur einmal in einer bestimmten ausgeklügelten Weise gemessen wird und ein Ergebnis liefert.

Ein praktisch relevanter Zwischenschritt auf dem Weg zum „Allzweck-Quantencomputer“ könnte die Entwicklung von Quantensimulatoren sein, die nur gewisse Quantenalgorithmen, etwa die Dynamik anderer Quantensysteme, effizient simulieren können.

Ein System, das zur Realisierung eines Quantencomputers dienen soll, muss üblicherweise die folgenden DiVincenzo-Kriterien²³ erfüllen:

1. Das System besteht aus wohlbestimmten Qubits und erlaubt die Skalierung auf beliebig große Systeme.
2. Es ist möglich, dem System einen festen reinen Zustand aufzuprägen (Initialisierung).
3. Die Kohärenzzeit des Systems ist wesentlich länger als die Operationszeit eines Gatters.
4. Es ist ein universeller Satz von Quantengattern implementiert, aus denen sich alle Quantenoperationen zusammensetzen lassen.
5. Die einzelnen Qubits können gemessen werden.

Für den Einsatz in der Kommunikation stellt man noch zwei weitere Anforderungen:

1. Stationäre Qubits und fliegende Qubits (Photonen) können ineinander umgewandelt werden.
2. Die fliegenden Qubits können zwischen bestimmten entfernten Orten übertragen werden.

Zur Umsetzung von Quantencomputern gibt es eine Reihe von Ansätzen. Im nächsten Abschnitt werden Systeme wie Fallen für Ionen und neutrale Atome vorgestellt, im darauffolgenden Abschnitt die Festkörperphysikalischen Systeme.

3.1 Ionenfallen

Eine Möglichkeit, einen Quantencomputer experimentell umzusetzen, ist die Nutzung von Ionen, die in einer sogenannten Falle gefangen sind. Dieses Konzept geht auf eine Arbeit von Cirac und Zoller aus dem Jahre 1995 zurück.²⁴ Das Quantenregister, das heißt die Qubits, mit denen man die Quanteninformation verarbeiten will, besteht dabei aus einer Kette von Ionen, oft von Erdalkalimetallen. Aus der Vielzahl von Zuständen, die ein solches Ion annehmen kann, wählt man nur zwei ganz bestimmte Niveaus aus. Die übrigen Niveaus sollen unbesetzt bleiben, was aber durch Störungen nicht immer garantiert werden kann.

Ein solches System erfüllt im Prinzip alle DiVincenzo-Kriterien, und die meisten dieser Anforderungen wurden bereits experimentell verwirklicht. Obgleich das ursprüngliche Schema im Grunde genommen skalierbar ist, sind im praktischen Einsatz zusätzliche Techniken nötig, wie die Verbindung weit entfernter Qubits mittels Photonen oder durch die Verschiebung von Ionen zum Transport der Quanteninformation.

Beim Ionenfallenbasierten Quantenrechnen lassen sich die Qubits auf zwei Arten implementieren: Entweder nutzt man zwei Niveaus der Zeeman- oder Hyperfeinstruktur eines Ions oder einen verbotenen optischen Übergang. Inzwischen kann man bereits bis zu 14 Ionen in Fallen einbringen, und indem man die Ionen-

²³ Nach David P. DiVincenzo (*1959); D. P. DiVincenzo. Topics in Quantum Computers. In: L. Kowenhoven, G. Schön und L.L. Sohn (Hrsg.): Mesoscopic Electron Transport. NATO ASI Series E, Nr. 345, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1997), S. 657.

²⁴ J. I. Cirac & P. Zoller. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. Physical Review Letters (1995), 4091–4094.

ketten kühlt, können diese in den Grundzustand des Fallenpotenzials gebracht werden. Bestimmte Hyperfeinstruktur-niveaus bringen es, wenn sie unempfindlich gegenüber Magnetfeldern sind, auf Lebensdauern von bis zu zehn Minuten. Bei optischen Übergängen begrenzt ein spontaner Zerfall die Kohärenzzeit; dieser ist allerdings um Größenordnungen höher als eine einzelne Gatteroperation. Mit Hilfe dekohärenzfreier Teilsysteme (s. Unterabschnitt B 5.1) lassen sich Lebensdauern von einigen Sekunden erzielen.

Die wichtigsten Ein- und Zwei-Qubit-Operationen erreichen heute hohe Güten von bis zu 99 Prozent, und man kann inzwischen für die Quanteninformationsverarbeitung wichtige verschränkte Zustände (sogenannte GHZ- und W-Zustände) erzeugen. Um sie zu messen, verwendet man eine zustandsabhängige Lichtstreuung, mit der Detektionseffizienzen von 99,99 Prozent erreicht werden können. Um die Quanteninformation von den Ionen auf Photonen zu übertragen – und umgekehrt – setzt man die Technik der Hohlraum-Quantenelektrodynamik ein. Mit ihrer Hilfe lassen sich weit voneinander entfernte Ionen miteinander verschränken, auch wenn diese Verschränkung nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erfolgen kann. Über kurze Distanzen innerhalb eines Quantenprozessors selbst können die Ionen auch mechanisch verschoben werden.

Die Quanteninformationsverarbeitung mit Ionenfallen erfüllt heutzutage die meisten Anforderungen an einen Quantenrechner. Mit ihren langen Kohärenzzeiten eignen sich ionische Zwei-Niveau-Systeme als robuster Quantenspeicher. Sehr gute Messverfahren und die Verfügbarkeit eines universellen Satzes von Quantengattern, aus denen man alle beliebigen Rechenoperationen erzeugen kann, machen die Ionenfallen zu einem guten Ausgangspunkt für erste Quantenrechner. Problematisch ist jedoch noch,

dass fluktuierende elektromagnetische Felder und spontaner Zerfall zu Dekohärenz führen können. Auch sind die Laser oft nicht stabil, die optischen Messungen und Schaltungen nicht schnell genug. Dabei handelt es sich aber um technische Probleme, grundsätzliche Schwierigkeiten sind nicht zu erwarten.

3.2 Neutrale Atome und Moleküle

Quantencomputer und -simulatoren können auch auf der Grundlage von neutralen Atomen und Molekülen implementiert werden. Als Qubits verwendet man hier langlebige innere Zustände der Atome oder Moleküle, die sich mittels Licht- oder Mikrowellenstrahlung gezielt beeinflussen lassen. Dank der Verfahren der Laserkühlung und der Bose-Einstein-Kondensation ist die Technik, Atome einzufangen und zu kühlen, heute weit fortgeschritten und ermöglicht Quantenregister hoher Güte. Derzeit wird die Technik auf Moleküle erweitert.

Das Quantenrechnen mit neutralen Atomen baut auf neuen Fallentechniken auf. So sind Fallen möglich, die eine unabhängige Steuerung der Schwerpunktbewegung einzelner Atome und Moleküle erlauben, was eine Voraussetzung für einen Quantencomputer ist. Mittlerweile kann man auch eine große Anzahl von Qubits etwa in optischen Gittern parallel steuern, was besonders für die Simulation von Festkörpersystemen relevant ist. Die Verschränkung in Systemen neutraler Atome kann man mit Hilfe von zwei Mechanismen erzeugen:

- mit einer Wechselwirkung zweier Teilchen durch Stöße aufgrund von kurzreichweitigen Kräften oder durch langreichweitige Kräfte wie z. B. Dipolkräfte zwischen hochangeregten sogenannten Rydbergzuständen, hierdurch wird die Verschränkung deterministisch erzeugt oder

- mit einem Austausch von Photonen: Hierdurch wird die Verschränkung nur probabilistisch, also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, erzeugt, nämlich dann, wenn die Photonen mit einem bestimmten Ergebnis gemessen werden.
- Andererseits sind zurzeit nur sehr schwache Fallenpotenziale verfügbar, was man durch Kühlung der Atome auf sehr niedrige Temperaturen ausgleichen muss. Um neutrale Atome oder Moleküle einzufangen und zu verarbeiten, stehen bislang drei Verfahren zur Verfügung:

Beide Mechanismen funktionieren sowohl im freien Raum als auch unter Verwendung der Hohlraum-Quantenelektrodynamik. Dabei können Atome oder Moleküle in optischen Gittern oder in einer Kette von Fallen gespeichert werden. Die zeitliche Entwicklung der Atome beschreibt das sogenannte Hubbard-Modell, nach dem die Atome zwischen den Gitterplätzen umherspringen und durch Stöße wechselwirken. Kalte Atome in einem Gitter ermöglichen deshalb die Simulation von Vielteilchensystemen in Festkörpern. Auch kann man Bose-Einstein-Kondensate in ein optisches Gitter einbringen und darin Phasenübergänge zwischen der superfluiden und der Mott-Isolator-Phase beobachten. Letztere ermöglicht es, jeden Gitterplatz mit genau einem Atom zu besetzen, was zu einer sehr großen Anzahl von Atom-Qubits führt, die man auch miteinander verschränken kann. Diese Anordnung bildet die Grundlage für einen Quantensimulator, etwa für Spingitter, bei denen man die Zeitentwicklung in eine Folge von Gattern aus Ein- und Zwei-Qubit-Operationen zerlegt, die gleichzeitig auf allen Qubits ausgeführt werden können. Eine wichtige neue Entwicklung ist die Möglichkeit, einzelne Atome in einem optischen Gitter abzubilden und zumindest teilweise zu steuern. Verbunden mit Wechselwirkungen zwischen den Atomen eröffnet sich damit ein Weg, um einzelne Atome aus einer großen Zahl verschränkter Atome zu messen.

Für die Speicherung der Quanteninformation eignen sich neutrale Atome wegen ihrer relativen Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungsstörungen gut.

- *Optische Pinzetten* und Reihen optischer Fallen ermöglichen es, wohldefinierte Quantenzustände der Atombewegung zu präparieren, entweder durch Herunterkühlen einzelner Atome in den Grundzustand oder durch Einbringen eines Bose-Einstein-Kondensats in ein optisches Gitter. Beide Zugänge besitzen das Potenzial, einzelne Atome zu steuern und diesen Vorgang zu parallelisieren.
- In *Atomchips* werden Atome nahe der Oberfläche eines Substrates magnetisch eingefangen und gekühlt. Aufgrund ihrer geringen Größe und Robustheit eignen sie sich als Bausteine größerer Quantenprozessoren.
- Daneben werden Fallen für *polare Moleküle* untersucht, die auf Mikrowellen oder elektrischen Feldern beruhen und in der experimentellen Forschung von Bedeutung sind.

Um verschränkte Zustände zu erzeugen, wurde bereits eine Vielzahl von Verfahren untersucht, die auf Wechselwirkungen zwischen Atomen beruhen und diese entweder direkt durch Stöße oder Dipolmomente oder indirekt durch Photonen als Informationsträger vermitteln. Optische Pinzetten eignen sich für Stoßgatter, und optische Gitter ermöglichen parallele Quantengatter, indem die Atome zustandsabhängig bewegt werden. Ohne mechanische Verschiebung und bei Raumtemperatur lassen sich einzelne Atome wiederum über die sogenannte Rydberg-Blockade verschränken; dieses Verfahren ist zudem sehr schnell.

3.3 Hohlraum-Quantenelektrodynamik

Die Technik der Hohlraum-Quantenelektrodynamik wird für den Aufbau einer Schnittstelle zwischen verschiedenen Trägern von Quanteninformation untersucht. Diese Schnittstelle kann zum einen probabilistisch mit Atomen im freien Raum eingerichtet werden, die Photonen zufällig in alle Richtungen aussenden. Eine deterministische Schnittstelle erhält man für Atome in einem Hohlraum (Rydberg-Atome in Mikrowellen-Hohlräumen, Grundzustands-Atome in optischen Hohlräumen) oder mit Parabolspiegeln im freien Raum.

Wird jedes Atom in seinem eigenen Hohlraum platziert, dann gewährleistet ein solches Schema Adressierbarkeit und Skalierbarkeit. Die einzelnen Hohlräume können auch weit voneinander entfernt sein, da der Austausch der Quanteninformation mittels Photonen erfolgt, was den Aufbau von Quantennetzwerken ermöglicht.

3.4 Photonen

Eine weitere Möglichkeit zur Implementierung von Quantencomputern besteht in der Verwendung von Photonen. Hier werden Qubits häufig durch die Polarisation der Photonen realisiert. Die Schwingungsrichtungen des elektromagnetischen Feldes, horizontal und vertikal, entsprechen hierbei Zuständen „0“ und „1“ des Qubits, wobei natürlich auch jede Überlagerung dieser Zustände möglich ist. Hier ist es besonders einfach, den Zustand einzelner Qubits einzustellen, da die Polarisation leicht mit optischen Elementen wie Wellenplatten manipuliert werden kann. Andere Möglichkeiten, um Qubits zu implementieren, sind zum Beispiel die Anzahl der Photonen, ihr Weg oder ihre Ankunftszeit.

Photonen haben neben der einfachen Umsetzung von Gattern für einzelne

Qubits zahlreiche weitere Vorteile. Dazu zählen ihre hohe Mobilität sowie die geringe Wechselwirkung mit der Umgebung, die eine aufwendige Isolierung (Vakuum, Kühlung) nicht notwendig macht. Dies führt dazu, dass photonische Qubits sehr stabil sind und eine lange Kohärenzzeit haben. Das heißt, dass sie ihre Quanteneigenschaften über einen großen Zeitraum hin nicht verlieren. Dies und die Tatsache, dass sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, macht sie zum idealen Träger für den Transport von Quanteninformation.

Der heutige Stand der Technik erlaubt bereits verschränkende Operationen zwischen mehreren Qubits mit hoher Güte durchzuführen, dennoch ist die Komplexität der realisierbaren Schaltkreise im Moment noch limitiert. Die Ursachen hierfür liegen an verschiedenen Stellen eines potentiellen Quantencomputers.

Zum einen konnte eine Quelle, die verlässlich eine bestimmte Anzahl von Photonen emittiert, noch nicht realisiert werden. Bei den derzeitigen Quellen werden mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch mehr Photonen als gewünscht emittiert, was das Ergebnis verfälscht. Zusätzlich ist die Emission dieser Photonen zufällig. Das heißt, der genaue Zeitpunkt einer Emission kann nicht festgelegt oder vorhergesagt werden.

Zum anderen macht der Umstand, dass Photonen kaum mit ihrer Umgebung wechselwirken, es schwierig, verschiedene Qubits miteinander zu koppeln. Diese sind aber im Allgemeinen für Berechnungen auf einem Quantencomputer nötig. Bis zum heutigen Zeitpunkt können solche verschränkenden Operationen zwischen Qubits nur probabilistisch umgesetzt werden, das Gatter wird also nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit korrekt ausgeführt. Dadurch ist die Erweiterung auf einen Schaltkreis aus zahlreichen Operationen schwierig, da die Wahr-

scheinlichkeit, dass alle Gatter korrekt ausgeführt wurden, sich aus dem Produkt der einzelnen Erfolgswahrscheinlichkeiten ergibt und daher für eine große Anzahl fehlerbehafteter Gatter schnell absinkt. Es wurde allerdings gezeigt, dass dieses Problem durch die Verwendung zusätzlicher Qubits umgangen werden kann und photonische Qubits eine effiziente Implementierung von Berechnungen erlauben.

Eine weitere Herausforderung für die Zukunft ist die Realisierung von Speichermöglichkeiten für photonische Qubits. Dies ist unter anderem notwendig, da Photonen sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, manche Algorithmen aber das Speichern von Information voraussetzen. Außerdem könnten Speicher dafür genutzt werden, um verlässliche Quellen für einzelne Photonen zu realisieren, da man die zufällig erzeugten Photonen speichern und zu einem gewünschten Zeitpunkt kontrolliert ausgeben könnte.

Um einen Quantencomputer zu realisieren, ist es außerdem nötig, die erzeugten Qubits auslesen, also messen zu können. Dafür werden Detektoren benötigt, die – idealerweise – 100 Prozent der Photonen verlässlich detektieren können. Dies ist bis heute noch nicht möglich, allerdings wurden in den letzten Jahren große Fortschritte im Bereich der Detektorenteknik gemacht.

Ein weiteres Feld, in dem rasante Fortschritte erzielt werden, ist die Verwendung optischer Wellenleiter. Hierbei handelt es sich um gläserne Chips, in denen die Photonen durch ein Netzwerk von optischen Bahnen geleitet werden. Da das Licht auf festen Bahnen geleitet wird, ermöglichen sie eine äußerst stabile Wechselwirkung verschiedener Photonen. Des Weiteren ermöglichen diese Strukturen die Implementierung sogenannter Quanten-Random-Walks, die nicht nur in verschiedenen Algorithmen Verwendung finden, sondern auch die Basis zur Realisierung eines universellen Quantencomputers darstellen könnten.

sierung eines universellen Quantencomputers darstellen könnten.

Da sich die Umsetzung eines solchen allgemeinen Quantencomputers bisher noch schwierig gestaltet, gibt es Ansätze, die darauf abzielen, einige Vorteile der Quantentechnologie nutzbar zu machen, ohne einen universell einsetzbaren Quantencomputer bauen zu müssen. Einer dieser Ansätze ist das sogenannte *Boson Sampling*. Dieses nutzt die speziellen Eigenschaften von Photonen, um ein mathematisches Problem zu lösen, das für klassische Computer sehr schwer zu bewältigen ist.

Auf Photonen basierende Qubits sind auf Grund ihrer zahlreichen Vorzüge ein vielversprechender Kandidat für die Realisierung eines Quantencomputers, besonders für Implementierungen wie den Einweg-Quantencomputer bei dem, sofern ein geeigneter Ausgangszustand erzeugt werden kann, Messungen an einzelnen Qubits ausreichen, um eine beliebige Berechnung durchzuführen. Außerdem sind sie auf Grund ihrer Mobilität die erste Wahl für Protokolle, die den Austausch von Quanteninformation zwischen unterschiedlichen Orten voraussetzen. Allerdings werden in den kommenden Jahren wichtige Herausforderungen, wie bessere Quellen, Detektoren und Speichermöglichkeiten, zu meistern sein, bevor komplexe Schaltkreise aus vielen Qubits realisiert werden können.

4 Quanteninformationsverarbeitung in Festkörpern

Festkörper weisen sehr unterschiedliche elektrische und optische Eigenschaften auf, die auf die vielen verschiedenen Möglichkeiten zurückzuführen sind, wie Atome miteinander wechselwirken und Verbindungen eingehen können. In der Regel kann man solche Bindungszustände auf elementare Anregungen zurückführen (man spricht hierbei von Quasiteilchen). Weisen diese ein diskretes Energiespektrum auf, so kommt prinzipiell jedes beliebige Paar von Zuständen als Qubit infrage.

Fordert man allerdings, dass diese Zustände über eine genügend lange Zeit nicht zerfallen und dass sie gleichzeitig auch gut verarbeitet werden können, so scheidet ein Großteil dieser Anregungen aus, wie Untersuchungen gezeigt haben. Der Grund hierfür ist, dass die möglichen Qubits in eine Umgebung eingebettet sind, mit der sie – anders als etwa freie Atome – stark wechselwirken. In dieser Umgebung liegen auch andere Anregungen vor, etwa die Schwingungen des Kristallgitters, die mit dem Qubit wechselwirken und so seine Kohärenz zerstören können. Um diese Kohärenz zu gewährleisten, sind verschiedene Vorkehrungen nötig.

Dass man überhaupt in Festkörpern nach geeigneten Systemen für Qubits sucht, liegt an der gegenwärtigen Situation der Informationstechnik. Der hohe Integrationsgrad der Bauelemente wird inzwischen in den Quantenbereich hinein extrapoliert. Da solche Bauelemente überwiegend auf Festkörpern beruhen, hofft man, mit Festkörpern auch besonders kompakte und robuste Lösungen für die Quantencomputer-Hardware

zu realisieren. Diese könnten zudem mit aktueller Mikro- und Nanoelektronik kompatibel sein. Oft wird auch mit der Skalierbarkeit argumentiert, also der Möglichkeit, beliebig große Quantencomputer ohne immer größeren Aufwand zu bauen. Allerdings müssen nahezu alle aussichtsreichen Qubit-Systeme bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben werden, was einen aufwendigen Aufbau erfordert. Dieser muss entsprechend mitskaliert werden, will man Systeme aus vielen Qubits aufbauen. Zudem ist unklar, ob die Kohärenz der Qubits bei ihrer Skalierung lange genug erhalten bleibt, um sie verarbeiten zu können.

Im Folgenden werden Qubits in zwei unterschiedlichen Systemen vorgestellt, zum einen in Supraleitern und zum anderen mittels gezielter Störstellen (Defekte) in Halbleitern und Isolatoren. Für beide gilt, dass man einige fundamentale Effekte an ihnen zeigen konnte, etwa ihre Initialisierung, die kohärente Verarbeitung und das Auslesen. Offen ist jedoch, wie sich die Qualität, mit der diese Operationen durchgeführt werden können, verbessern lässt, wie man die Kopplung zwischen den Qubits kontrolliert und wie man die Systeme skaliert.

Ein Ansatz, der noch im Anfangsstadium der Forschungen steckt, ist das topologische Quantenrechnen, bei dem die äußeren Störungen (Dekohärenz) durch die Ausnutzung globaler Eigenschaften vermindert werden; experimentell eignen sich sogenannte fraktionale Quanten-Hall-Zustände, die bei manchen Supraleitern auftreten.

4.1 Qubits in Supraleitern

Der elektrische Widerstand bewirkt, dass die von einem elektrischen Strom geführte Information verloren geht. Kühlt man aber Supraleiter unter die sogenannte Sprungtemperatur, so geht das System der Leitungselektronen in einen makroskopischen Quantenzustand über und der Widerstand verschwindet. In supraleitenden Schaltkreisen gibt es deshalb keine Verluste. In ihnen kann man sehr unterschiedliche quantisierte Größen als Qubits verwenden. Im Gegensatz zu Qubits aus einzelnen Atomen oder Ionen sind diese makroskopisch, weil sie Abmessungen im Mikrometerbereich aufweisen und mehr als eine Milliarde Elektronen beteiligt sind.

Ein supraleitender Schaltkreis enthält klassische elektrische Bauteile wie Spulen und Kondensatoren. Legt man eine Spannung an, so wird ein anharmonisches Potenzial erzeugt, in dem sich sogenannte Cooper-Paare bewegen. Dies sind jeweils zwei miteinander verbundene Elektronen, die im Supraleiter den Strom führen. Das Qubit kann nun über zwei diskrete Zustände in dem Potenzial definiert und sein Verhalten durch Veränderung der angelegten Spannung gesteuert werden. Beispiele hierfür sind Ladungs-, Fluss- und Phasenqubits, bei denen das Qubit durch zwei Energieminima dargestellt wird. Bei Ladungsqubits etwa nutzt man in einem hinreichend kleinen Stromkreis ein Potenzial mit zwei Minima. Im Gegensatz dazu verwenden Flussqubits zwei entgegengesetzt umlaufende Ströme, die in einem sogenannten Josephson-Kontakt über eine Tunnelbarriere gekoppelt werden.

Wegen der niedrigen Anregungsenergien supraleitender Qubits müssen die Schaltkreise bei Temperaturen von wenigen tausendstel Kelvin²⁵ betrieben werden. Zur Anregung verwendet man

Mikrowellenimpulse, für deren präzise Erzeugung heute weitentwickelte Techniken zur Verfügung stehen. Die Übertragung der Impulse vom Ort ihrer Erzeugung auf die in Kühlvorrichtungen liegenden Chips erfolgt innerhalb von Nanosekunden, während die Kohärenzzeiten einige Mikrosekunden – also das Tausendfache – betragen können.

Eine direkte Kopplung der Qubits kann induktiv oder kapazitiv erfolgen. Für ausgedehnte Quanteninformationsarchitekturen müssen aber Verfahren entwickelt werden, die eine abstimmbare Kopplungsstärke ermöglichen. Dies könnte eine Kopplung mittels Photonen im Mikrowellenbereich sein, wofür die Qubits mit Wellenleitern verbunden werden müssen. Mit entsprechenden Architekturen konnte man bereits Systeme aus drei bis sieben Qubits auf Mikro- bis Millisekundenzeitskala verarbeiten und auch einfache Algorithmen implementieren. Zudem gelang es, Quantenkorrelationen zwischen Qubits, die einige Millimeter voneinander entfernt lagen, nachzuweisen. Das Auslesen supraleitender Qubits ist mittlerweile im Bereich von Nanosekunden möglich. Das Hauptproblem supraleitender Qubits ist gegenwärtig, die Dekohärenz zu verringern, was eine wichtige materialwissenschaftliche Herausforderung darstellt.

4.2 Störstellen in Halbleitern oder Isolatoren

Räumlich ausgedehnte Zustände in Kristallen weisen in der Regel zu kurze Zerfallszeiten auf, um von großem Nutzen für die Quanteninformationsverarbeitung zu sein. Um eine möglichst lange Kohärenz zu gewährleisten, müssen die Anregungen räumlich lokalisiert werden. Diese Lokalisierung führt einerseits dazu, dass das Anregungsspektrum ähnlich dem von Atomen diskret wird, und man bezeichnet diese Lokalisationszentren oft als „künst-

²⁵ Einheit der absoluten Temperatur (0 °C = 273,15 K).

liche Atome“, auch wenn ihre Position im Festkörper fixiert ist. Durch die Lokalisierung sind sie auch bis zu einem gewissen Grad von der Umgebung abgeschirmt. Prinzipiell lassen sich zwei Modellsysteme unterscheiden:

- *Quantenpunkte*, in denen die freie Bewegung von Ladungsträgern entlang aller Raumrichtungen unterdrückt ist, und
- Fremdatome (*Dotieratome*) in einem sonst homogenen Kristall, an die die Elektronen gebunden sind.

In beiden Systemen haben sich Ladungszustände als ungeeignet für die Implementierung von Qubits erwiesen, weshalb man gegenwärtig vor allem Spinanregungen untersucht. Für Quantenpunkte gibt es sehr unterschiedliche Herstellungsverfahren. Für Untersuchungen des elektrischen Transports eignen sich Strukturen, in denen Ladungsträger durch elektrische Spannungen an metallischen Gattern eingeschlossen werden. Dieser Effekt ist allerdings so schwach, dass er nur bei Temperaturen im Bereich von tausendstel Kelvin genutzt werden kann. Für optische Untersuchungen eignen sich dagegen eher selbstorganisierte Quantenpunkte, da sie aufgrund ihrer Größe von einigen zehn Nanometern stark mit Lichtfeldern wechselwirken. Die Potenzialstärke lässt einen Betrieb bei bis zu einigen zehn Kelvin möglich erscheinen. In beiden Fällen konnte man Verfahren zum Initialisieren und Auslesen der Qubits entwickeln und eine kohärente Verarbeitung der Spins zeigen.

Quantenpunkte höchster Qualität liefert der III-V-Halbleiter Galliumarsenid. Das Problem an diesem Material sind die hohen Kernspinwerte der Kristallatome. Die Hyperfeinwechselwirkung der Ladungsträgerspins mit den Kernspins beschränkt die Kohärenz auf Mikrosekunden. Diese Dauer lässt sich nur mit großem Aufwand vergrößern. Eine andere Möglichkeit wäre die Verwendung kern-

spinfreier Materialien wie isotoopenreines Silizium oder Graphen. Bei ihnen fällt auch die sogenannte Spin-Bahn-Wechselwirkung deutlich geringer aus.

Einige Konzepte sehen vor, Donatoratome einzubringen. Als Prototyp wurde ebenfalls Silizium mit Phosphordotierung vorgeschlagen. Hier wird das Qubit durch den Spin eines Phosphorelektrons bestimmt. Die Hyperfeinwechselwirkung mit dem Phosphorkernspin ist dabei nicht unbedingt schädlich, da so die Quanteninformation auch im Kernspin gespeichert und über die Wechselwirkung mit dem Elektronenspin ausgelesen werden kann. Dieser Effekt ermöglicht einen guten Quantenspeicher, da die Kohärenzzeit von Kernspins im Bereich von Minuten oder gar Stunden liegen kann. Aber auch Elektronenspins können in isotoopenreinem Silizium Kohärenzzeiten von Sekunden aufweisen. Hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften sind Dotieratome wesentlich homogener als etwa selbstorganisierte Quantenpunkte. Als vielversprechend hat sich der einfach-negativ geladene Komplex aus einem Stickstoffatom zusammen mit einer Fehlstelle in Diamant erwiesen (NV-Zentrum, von engl. *nitrogen vacancy*). Für ihn ließen sich eine Reihe von Anwendungen wie schnelle optische Initialisierung, langlebige Kohärenz (Millisekunden) bei Raumtemperatur sowie kohärente Verarbeitung und Verschränkung zeigen.

Neben den erwähnten Störstellen in Silizium und Diamant untersucht man auch eine Reihe anderer Dotieratome in Festkörpern. Der weitere Fortschritt hängt hier ebenfalls von der Lösung materialwissenschaftlicher Fragestellungen hinsichtlich der Reinheit der Materialien und der Platzierung der Donatoratome ab. Ähnlich wie bei Quantenpunkten lassen sich die Qubits über magnetische Wechselwirkungen koppeln. Um sie über größere Entfernungen zu koppeln, ist der

Einsatz von Photonen in Mikroresonatoren erforderlich. Für die Verarbeitung der Spins von Störstellen wurden bisher vor allem Mikrowellen eingesetzt. Optische Techniken könnten vor allem dann interessant werden, wenn es gelingt, den optischen Übergang ohne Beteiligung von Gitterschwingungen zu nutzen.

Eine weitere Möglichkeit sind ungeordnete Festkörper, in denen Atome oder kleinere Atomgruppen zwischen unterschiedlichen Positionen quantenmechanisch tunneln. Dieser Effekt wurde als Quelle verschiedener Anomalien in Gläsern bei sehr tiefen Temperaturen ausgemacht und erzeugt in festkörperbasierten (ebenso wie in nano- und optomechanischen) Schaltkreisen Rauschen und Dekohärenz. Störungen dieser Art sind der Hauptgrund für Dekohärenz von Qubits in Supraleitern und treten bei Josephson-Kontakten auf. Qubits in Supraleitern können allerdings für spektroskopische Messungen einzelner Tunnelsysteme eingesetzt werden, die mit den Qubits wechselwirken. Diese Störstellen zeigen Kohärenzzeiten von Mikrosekunden und lassen sich daher auch als Quantenspeicher nutzen.

4.3 Nanomechanische Quantensysteme

Die Kontrolle nanomechanischer Resonatoren, die als Saiten, Balken oder Trommeln mit Abmessungen von unter 100 Nanometern im Radio- bis hin zum Mikrowellen-Frequenzbereich schwingen, ist in den letzten Jahren weit fortgeschritten. Inzwischen kann man ihre Bewegung bis in den quantenmechanischen Grundzustand verlangsamen. Dabei setzt man u. a. Methoden der für Ionenfallen entwickelten Laserkühlung ein. Bei mechanischen Nanoschwingern aus Siliziumnitrid-Saiten und Kohlenstoffnanoröhren lässt sich die Dekohärenz der Schwingungsmoden bereits so weit kontrollieren, dass Kohärenzzeiten von einigen Sekundenbruchtei-

len erreicht werden. Auch die kohärente Kontrolle nanomechanischer Bewegung durch Kopplung an elektromagnetische Strahlung in optischen oder Mikrowellen-Hohlräumen ist inzwischen so weit fortgeschritten, dass eine kohärente Kopplung einzelner Photonen an einzelne Schwingungsmoden z. B. in Resonatoren aus Kohlenstoffnanoröhren schon bald möglich sein sollte. Längst haben sich quantennanooptomechanische Systeme und quantennanoelektromechanische Systeme international zu einem aktiven Forschungsgebiet entwickelt und versprechen auch große Fortschritte in Sensorik und Messtechnik.

Schon heute lassen sich mit solchen nanomechanischen Resonatoren Massenänderungen im Bereich von 10^{-21} Gramm messen und damit die Anlagerung einzelner Atome nachweisen. Die Möglichkeit einer kohärenten Kontrolle nanomechanischer Bewegung durch elektromagnetische Strahlung eröffnet auch Perspektiven, photonenkontrollierte Qubits auf nanomechanischer Basis zu verwirklichen, und kann selbst in der klassischen kohärenten Signalverarbeitung interessante Anwendungen finden. So wird schon jetzt versucht, die recht klobigen mechanischen Filter auf der Basis akustischer Oberflächenwellen, die sich als diskrete Bauelemente in jedem Mobiltelefon befinden, durch nanoelektromechanische Filter zu ersetzen, die sich direkt in die Siliziumtechnologie integrieren lassen.

Praktische Anwendungen in der Massen-, Kraft- und Bewegungssensorik sind dabei schon heute ebenso möglich wie neue Wege der kohärenten nanoelektromechanischen Signalverarbeitung. Die Steigerung der Empfindlichkeit bis zum Bereich einzelner Schwingungsquanten verspricht eine wertvolle Ergänzung der festkörperbasierten Quantentechnologien durch nanomechanische Elemente.

4.4 Hybride Quantensysteme

Insgesamt zeichnet sich ab, dass es schwer sein wird, ein System zu identifizieren, das alle Erfordernisse im Hinblick auf Kohärenz, Kopplung und Verarbeitbarkeit erfüllt. Bis zu einem gewissen Grad liegt dies in der Natur der Sache, denn eine effiziente Verarbeitung erfordert eine weitgehende Öffnung des Systems, wodurch es anfällig für Störungen wird. Schottet man das System hingegen stark ab, wird umgekehrt die Verarbeitung deutlich erschwert. Bei herkömmlicher Computerhardware kommen verschiedene Plattformen zum Einsatz: Bits werden entweder magnetisch auf Festplatten oder durch Ladungen auf Festkörperspeichern (SSDs) dargestellt, über Stromimpulse transportiert und in Schaltungen verarbeitet.

Ebenso werden Quantencomputer jeweils das für eine Aufgabe am besten geeignete Quantensystem nutzen müssen. Deshalb könnte sich ein einzelner Ansatz für Quantenhardware als unzureichend erweisen. Vielmehr wird man verschiedene Plattformen wie etwa Atome und Festkörper zu Hybridsystemen vereinen müssen, um so die Stärken der unterschiedlichen Systeme auszuspielen. Hierzu gehört auch die Entwicklung geeigneter Schnittstellen zwischen den genannten Systemen.

5 Theoretische und mathematische Grundlagen

Die theoretische und mathematische Physik stellt Methoden zur Verfügung, um die Eigenschaften zusammengesetzter Systeme zu beschreiben, die untereinander oder mit der Umgebung in Wechselwirkung stehen, und erforscht die zugrunde liegenden Prinzipien. Sie stellt dabei den Kontakt zwischen der atom-, quanten-, festkörper- und biophysikalischen Forschung auf der einen Seite und den abstrakten Modellen der Quanteninformationstheorie und der Mathematik auf der anderen Seite her. Darauf aufbauend entwickelt sie Verfahren, mit denen sich Kohärenz und Verschränkung von Zuständen steuern, optimieren und schützen lassen. Ein wichtiges Teilgebiet ist dabei die Beschreibung und Vermeidung der Dekohärenz. Damit will sie die Voraussetzungen schaffen, neuentwickelte Quantenalgorithmen und -anwendungen mit Hilfe von Quantentechnologien auszuführen.

5.1 Quantenfehlerkorrektur

Quantensysteme, vor allem auch Quantenspeicher und Quantencomputer, sind besonders anfällig für Störungen durch die Umgebung. Daher nimmt die Isolierung und Stabilisierung von Quantensystemen eine zentrale Rolle innerhalb der Quantentechnologien ein. Da Quanteninformation ohne Störung des Zustands nur in Ausnahmefällen kopiert und miteinander verglichen werden kann, sind viele der etablierten Konzepte aus der klassischen Informationsverarbeitung nicht direkt übertragbar. Dennoch ist es möglich, Quanteninformation sowohl vor Störungen von außen als auch vor Fehlern zu schützen, die durch technische Unvoll-

kommenheiten hervorgerufen werden. Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Fehlerkorrektur unterscheiden:

- Mit *passiven* Methoden wird die Quanteninformation so gespeichert, dass sie möglichst wenig gestört wird, etwa in dekohärenzfreien Teilsystemen. Dies erschwert allerdings die Verarbeitung der Quanteninformation, und die angesprochenen technischen Grenzen bleiben bestehen.
- In *aktiven* Verfahren versucht man, die Fehler mittels Messung eines Teils des Quantensystems zu erschließen und dann zu korrigieren. Die hierzu notwendige Wechselwirkung mit dem System muss natürlich so erfolgen, dass sie nicht noch mehr Fehler hervorruft als sie korrigiert (sog. fehlertolerantes Quantenrechnen).

Da die genauen Fehlermechanismen in konkreten Systemen oft nur unzureichend untersucht sind, betrachtet man in der Theorie meist sehr allgemeine Fehlermodelle. Eine genauere Erfassung der Fehlerquellen würde eine Anpassung der Fehlerkorrektur an konkrete Systeme ermöglichen. Hierfür bieten sich auch Methoden der *optimalen Kontrolle* an. Methoden zur Stabilisierung von Quantensystemen könnten auch bei anderen Quantentechnologien zu höherer Effizienz und Präzision führen.

5.2 Quanteninformationstheorie

Ergänzend zur Konstruktion von Codes und Korrekturverfahren beschäftigt sich die Quanteninformationstheorie mit

allgemeinen Schranken der Informationsübertragung und Informationsverarbeitung mittels quantenmechanischer Systeme. Während etwa zwei klassische Informationskanäle die doppelte Information übertragen können, ist es in der Quantenmechanik möglich, dass die Gesamtkapazität das Doppelte der beiden Einzelkanäle übersteigt (Superadditivität). Solche Effekte treten nicht nur bei der Übertragung von Quanteninformation, sondern auch bei klassischer Information über quantenmechanische Kanäle auf. Mit Quantentechnologien können sich also auch klassische Ressourcen besser nutzen lassen.

Andererseits ist aufgrund der Superadditivität die Kapazität von Quantenkanälen nur in wenigen Fällen genau bekannt. Die Quantenkapazität ist daher ein wichtiges Forschungsthema, das viele Szenarien eröffnet: Neben der schon erwähnten Übertragung von klassischer Information oder von Quanteninformation untersucht man auch, ob und mit welcher Effizienz es möglich ist, über einen bestimmten Quantenkanal Information so zu übertragen, dass sie einer dritten Partei verborgen bleibt (Quantenkryptographie). In bestimmten Fällen führen zusätzliche Ressourcen wie der Austausch von verschränkten Zuständen oder auch ein weiterer klassischer Zweiwege-Kanal zu effizienteren Systemen.

5.3 Berechenbarkeits- und Komplexitätstheorie

Für Quantencomputer sind bereits einige Algorithmen entwickelt worden, die klassisch schwierige Probleme wie die Faktorisierung großer Zahlen oder das Berechnen diskreter Logarithmen effizient lösen. Die Schwierigkeit eines Problems wird in der Komplexitätstheorie allgemein dadurch charakterisiert, wie der Aufwand für den verwendeten Algorithmus mit der Länge des Eingaberegisters zusammen-

hängt. Beim Faktorisierungsproblem etwa ist der Aufwand die Anzahl der Rechenoperationen und die Eingabelänge die Anzahl der Stellen der zu faktorisierenden Zahl. Bislang kennt man aber im Wesentlichen erst zwei Grundtypen von quantenmechanischen Algorithmen, die Probleme effizienter lösen als klassische Computer: den auf der Quantenfouriertransformation basierenden Shor- und den Grover-Algorithmus. Hier gibt es noch viele offene Fragen, darunter die, welche Klassen klassisch schwieriger Probleme Quantencomputer effizient lösen können.

5.4 Nichtgleichgewichtsprozesse und Quantenbiologie

In den letzten Jahren hat man erkannt, dass die Wechselwirkung zwischen einem System und seiner Umgebung auch Vorteile mit sich bringen kann. So lässt sich Verschränkung auch in stationären Nichtgleichgewichtssystemen erzeugen. Im Kontext biologischer Systeme kann sie zu einer deutlich erhöhten Transporteffizienz für elektronische Anregungen (sogenannten Exzitonen) führen und damit den Wirkungsgrad dieser Systeme wesentlich steigern. Biologische Systeme sind oft durch eine starke Wechselwirkung mit der Umgebung charakterisiert, und ein Zusammenspiel von Kohärenz und Dekohärenz kann wesentlich für ihre optimale Funktion sein. Speziell im biologischen Umfeld sind diese Effekte erst seit Kurzem der direkten experimentellen Überprüfung zugänglich. Sie könnten neue Anwendungen und Strukturen hervorbringen, in denen das Wechselspiel zwischen Quanteneffekten und dem oft unvermeidlichen Umgebungsrauschen optimiert ist. Wichtige Beispiele von Systemen, die in der Quantenbiologie untersucht werden, sind der Fenna-Matthews-Olson-Komplex (s. Abb. 5) und andere bakterielle und pflanzliche Lichtsammelkomplexe wie LH1, LH2 oder PSII. Darüber hinaus wird in der Quantenbiologie auch der Magnetfeldsinn bei

Tieren sowie der Geruchssinn bei Mensch und Tier untersucht, was grundsätzlich neue Ansätze in der Sensorik verspricht.

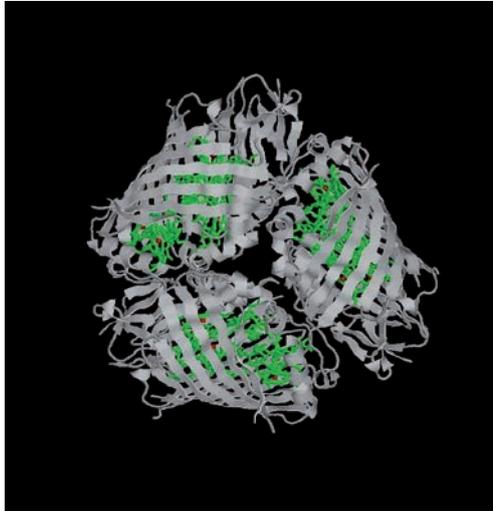


Abbildung 5: Der Fenna-Matthews-Olson-Komplex in grünen Schwefelbakterien leitet Lichtenergie vom Chlorophyll (grün) zu Reaktionszentren chemischer Prozesse (rot). Der Energietransport nutzt ein Wechselspiel von Kohärenz und Dekohärenz. [Wikipedia/Julian Adolphs (Lizenz: CC BY-SA 3.0)]

Neue Lösungsansätze verbinden Methoden aus verschiedenen Forschungsgebieten, die zunächst an die speziellen Bedürfnisse der Quantentechnologien angepasst werden müssen. Dazu gehören Verfahren aus der Optimierungstheorie, der Signalverarbeitung oder der Theorie der stark korrelierten Systeme. Deshalb müssen hier verschiedene Fachgebiete wie Physik, Mathematik, Informationstheorie und Signalverarbeitung interdisziplinär zusammenarbeiten. Diese Arbeiten wiederum werden voraussichtlich auch positive Rückwirkungen auf bislang ungelöste klassische Fragestellungen in den genannten Gebieten haben.

5.5 Verschränkungstheorie und die Dynamik mehrkomponentiger Quantensysteme

Es ist eine grundlegende Beobachtung, dass die Anzahl der Parameter, die zur Beschreibung eines mehrkomponentigen Systems benötigt werden, exponentiell mit der Anzahl der Komponenten wächst. Dies erklärt zum einen die hohe Leistungsfähigkeit von Quantenrechnern, macht es aber zum anderen auch schwierig, Zustände und Dynamik von experimentellen Quantensystemen effizient zu charakterisieren und zu verifizieren. Um die experimentelle Forschung theoretisch zu unterstützen, sind Methoden zur Beschreibung der Dynamik von mehrkomponentigen Quantensystemen äußerst wichtig. Die Dynamik und gegebenenfalls auch das Auffinden von Grund- und angeregten Zuständen in solchen Systemen sind komplex, und der Aufwand, sie auf klassischen Computern zu simulieren, nimmt im Allgemeinen exponentiell zu.

6 Quantenkontrolle

Der Begriff Quantenkontrolle²⁶ steht für eine ganze Klasse moderner Methoden, physikalische und chemische Reaktionen und Prozesse durch angepasste Laserimpulse zu beeinflussen. Dabei spielen die Kohärenzeigenschaften von Lasern eine zentrale Rolle.

6.1 Entwicklung und Methoden

Seit seiner Erfindung 1960 dient der Laser als ideale Lichtquelle sowohl für die hochpräzise Spektroskopie als auch für die Analyse dynamischer Prozesse der Materie. Zugleich weckte der Laser auch die Hoffnung, man könnte mit seiner Hilfe gezielt Prozesse beeinflussen.

Anfangs baute man dabei vor allem auf die Einfarbigkeit (Monochromasie) der Laser. Mit der gezielten Anregung spezieller Schwingungs- oder Elektronenzustände hoffte man, bestimmte chemische Bindungen aufbrechen oder aufbauen zu können. Der Laser sollte also als eine Art „Schere und Kleber“ für das Auftrennen oder Zusammenfügen einzelner Bindungen dienen. Der Erfolg dieser Art von Laserchemie blieb trotz erheblicher Anstrengungen über mehrere Jahrzehnte recht begrenzt. Sieht man von erfolgreichen Ausnahmen ab, etwa im Bereich der Isotopentrennung, scheiterten die Konzepte vor allem an den hohen Geschwindigkeiten, mit denen die vom Laser eingebrachte Energie in Festkörpern, aber auch in isolierten größeren Molekülen umverteilt wird: Der Laser erhitzte in den meisten Fällen lediglich das Material.

Die Situation änderte sich dramatisch gegen Ende der 1980er Jahre. Mehrere wichtige Entwicklungen trugen dazu bei, das gerade beschriebene Problem zu überwinden (bzw. zu umgehen) und die Steuerung von Reaktionen mittels Laser zu realisieren. Zum einen lernte man, die Kohärenzeigenschaften des Lasers gezielt einzusetzen. Man verstand nun die untersuchten Moleküle als echte Quantensysteme, die durch Überlagerung mehrerer Laserfelder gleichzeitig oder in geschickter zeitlicher Abfolge in Überlagerungszustände versetzt wurden. Auf diese Weise konnte man die Besetzung angeregter Systemzustände allein durch eine Variation der Phase zwischen zwei Laserfeldern zielgerichtet beeinflussen.

Die zweite, entscheidende Entwicklung ergab sich aus der Kurzzeitphysik, die seit den späten 1980er Jahren ultrakurze Laserimpulse über einen breiten Spektralbereich mit steigender Wiederholrate und Intensität zur Verfügung stellte. Indem man diese ultrakurzen Laserimpulse auf Moleküle richtete, entstand eine erfolgreiche Femtochemie, die zunächst vor allem zur genauen Analyse zeitlicher Abläufe von physikalischen und chemischen Prozessen genutzt wurde.

Heute kann man im sichtbaren Spektrum Laserimpulse von nur wenigen Femtosekunden²⁷ Dauer bei höchsten Intensitäten herstellen, die aus nur wenigen Oszillationen einer elektromagnetischen Welle bestehen und deren Phasenlage man exakt kontrollieren kann. Im wei-

²⁶ Kontrolle (von engl. control) steht hier statt der eigentlichen deutschsprachigen begrifflich zu trennenden Bezeichnungen Steuerung und Regelung.

²⁷ Femtosekunde (Billiardstel Sekunde): 1 fs = 10^{-15} s;
Attosekunde (Trillionstel Sekunde): 1 as = 10^{-18} s.

chen Röntgenbereich sind inzwischen Impulse mit einer Dauer von unter hundert Attosekunden verfügbar, während man im fernen infraroten Spektrum Wellenzüge aus weniger als einer Schwingung erzeugen kann, deren elektrischer Feldverlauf sich exakt vermessen lässt. Parallel zu dieser Entwicklung wurden effiziente Verfahren entwickelt, mit denen man die so verfügbaren Laserimpulse großer spektraler Bandbreite buchstäblich formen und in ihrem zeitlichen und spektralen Verlauf fast beliebig anpassen kann.

Diese neuen Möglichkeiten nutzte man zunächst, um das chemische und physikalische Verhalten einfacher freier Moleküle zu beeinflussen und Reaktionen gezielt ablaufen zu lassen. Vor allem in den vergangenen 15 Jahren hat man dabei erstaunliche Fortschritte gemacht. Die Wahl der Untersuchungsobjekte geht längst über kleine Moleküle hinaus und reicht über Makromoleküle und biologische Grundbausteine in fester und flüssiger Form bis hin zu Halbleitern oder transparenten Materialien für optoelektronische Bauelemente.

Moderne Quantenkontrollexperimente zeichnen sich darüber hinaus durch den Einsatz geschickter *Rückkopplungsmethoden* aus. Dank der hohen Wiederholraten der verwendeten Femtosekundenlaser kann man ein bestimmtes Experiment viele Tausende Male wiederholen und dabei die jeweils eingesetzte Form des Laserfeldes variieren. Nach jedem Experiment vergleicht man das erreichte Ergebnis mit einem vorgegebenen Zielwert und modifiziert den eingesetzten Laserimpuls solange, bis das gewünschte Ergebnis erreicht ist. Je nach eingesetzter Strategie unterscheidet man dabei zwischen adaptiver und Echtzeit-Rückkopplung. Besonders wirksam haben sich genetische Algorithmen erwiesen, die biologischen Entwicklungsprozessen nachempfunden sind.

Wichtig für den Erfolg dieser Strategien ist die enge Zusammenarbeit von

Theorie und Experiment. Hierbei werden sowohl grundlegende theoretische Fragen zur Durchführung solcher Experimente und ihrer Grenzen untersucht wie auch für spezielle Prozesstypen günstige Strategien vorausberechnet. Die verschiedenen Verfahren kann man unter dem Begriff Quantenphysik der optimalen Kontrolle zusammenfassen.

Erwähnt sei schließlich, dass auch die moderne kernmagnetische Resonanzspektroskopie im weitesten Sinne kohärente Kontrollstrategien der hier diskutierten Art einsetzt. Dabei geht es allerdings fast ausschließlich um das Ziel, die Struktur großer Moleküle spektroskopisch zu erschließen.

6.2 Anwendungen und Perspektiven

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurden auf der Basis geschickt geformter, ultrakurzer Laserimpulse neue Prinzipien und effiziente Verfahren zur Quantenkontrolle erschlossen. Mit ihrer Hilfe lassen sich physikalische und chemische Reaktionen und Prozesse gezielt beeinflussen und beherrschen. Dies eröffnet eine Fülle von Anwendungen, deren Tragweite heute bei Weitem noch nicht abzusehen ist, denn bislang wurden vor allem die grundlegenden Konzepte und Methoden an relativ überschaubaren Beispielen erprobt. Nun beginnt man, neue Perspektiven für diese Quantentechnologien zu eröffnen.

Hier kann nur eine kleine Auswahl an Beispielen für erzielte Erfolge und aktuell untersuchte Themen und Strategien skizziert werden. Sie reichen von optischen Quantensystemen und -technologien über Atome und einfache Moleküle bis hin zu Halbleiterstrukturen und zur Mikropräzisionsbearbeitung von transparenten Materialien, schließen aber auch die Beherrschung von größeren biologisch relevanten Molekülen ein.

Zu den erfolgreichsten unmittelbaren Anwendungen der adaptiven Rückkopplung gehört die Optimierung von Lasersystemen. Diese werden etwa bei der Erzeugung optimierter Laserimpulse eingesetzt. Aber auch beim Bau von Röntgenlasern im Labor oder bei der räumlich modulierten Wellenfrontkontrolle in Impulslasern bewähren sich diese Methoden. Kohärente Rückkopplung ist zuletzt auch zur Rauschunterdrückung in Lasersystemen erfolgreich erprobt worden. Man kann sich darüber hinaus eine Fülle von optischen Messverfahren vorstellen, die durch kohärente Kontrolle verbessert oder überhaupt erst ermöglicht werden. Dabei wird nicht nur die zeitliche und spektrale Formung von Laserimpulsen, sondern auch ihre räumliche Beeinflussung zunehmend eine Rolle spielen. Interessante Perspektiven für die Nanostrukturierung von Materialien ergeben sich aus der Modifizierbarkeit des Nahfelds fokussierter Lichtstrahlen, die mit Hilfe der adaptiven Rückkopplungskontrolle erreicht wurden.

Daran anschließend sind Verfahren der Materialbearbeitung im Inneren transparenter Materialien zu erwähnen. Mit Femtosekunden-Laserimpulsen und adaptiver Rückkopplung kann man beispielsweise besonders gleichmäßige Wellenleiter und andere photonische Strukturen erzeugen, oder auch mittels räumlicher Impulsformung zu effizienten Parallelisierungsverfahren gelangen.

Entgegen anfänglich übersteigerten Hoffnungen, die mit dem Begriff Laserchemie verknüpft waren, ist auf absehbare Zeit aber nicht damit zu rechnen, dass die Quantenkontrolle für effiziente chemisch-synthetische Verfahren im großen Maßstab einsetzbar ist, auch wenn man an vielen einzelnen Beispielen effiziente Reaktionen nachweisen konnte, die sich nur auf diese Weise unterstützen oder verhindern lassen. Etwas salopp gesagt stehen die Kosten pro benötigtem Photon meist in keinem sinnvollen Verhältnis zum Preis des erzeugten Reaktionsprodukts. Allenfalls in Ausnah-

mefällen darf man auf diesem Wege erfolgreiche chemisch-synthetische, technisch nutzbare Innovationen erwarten.

Ausgesprochen erfolgreich haben sich die Quantenkontrollverfahren allerdings im Bereich der Analytik und Messtechnik und bei Anwendungen in der physikalischen, chemischen und biologischen Forschung sowie in der Nanotechnologie entwickelt. Zum einen hat die Untersuchung vieler Fragen der Grundlagenforschung erheblich von diesen Methoden – insbesondere auch von der adaptiven Rückkopplung – profitiert. Das gilt etwa für das Studium von photoinduzierten Reaktionen in Molekülen, für das Verständnis chemischer Reaktionen, für die Katalyse, für Lösungsprozesse und bei der Korrosionsforschung. Große Fortschritte wurden auch beim empfindlichen und selektiven Nachweis von Molekülzuständen gemacht, bei der räumlichen Ausrichtung von Molekülen und insgesamt in der chemischen und biologischen Analytik, die ihrerseits für die medizinische und pharmazeutische Forschung von Bedeutung sind. So kann man etwa bei der Fluoreszenzmikroskopie unterschiedliche Funktionen von Proteinen nachweisen oder die massenspektrometrischen Verfahren verbessern, indem man speziell geformte, kohärente Femtosekunden-Laserimpulse zur Erzeugung oder partiellen Fragmentierung der untersuchten Molekülonen einsetzt.

Erfolgversprechend sind auch Untersuchungen zur Teilchenbeschleunigung mit ultrakurzen Laserimpulsen höchster Intensität.

Zu nennen sind schließlich auch Überlegungen, mit Hilfe von Quantenkontrollverfahren Molekülvibrationen für Quantencomputer zu nutzen – ein nach wie vor theoretisch viel beachtetes Potenzial, das bislang experimentell noch nicht realisiert wurde. An dieser Stelle schließt sich der Kreis zu den weiter oben beschriebenen Quantentechnologien.

7 Atomare Quantensensoren und Materiewellenoptik

Atomare Quantensensoren haben das Potenzial, eine Schlüsseltechnologie zur genauen Bestimmung der Beschleunigung und Rotation eines Körpers zu werden, insbesondere in der physikalischen Grundlagenforschung. Während die klassische Optik die Eigenschaften von Lichtwellen ausnutzt, besagt die Quantenmechanik, dass sich auch Materie unter bestimmten Umständen wie eine Welle verhalten kann. Atomare Quantensensoren nutzen diese Welleneigenschaften von Atomen und Molekülen.

Die Materiewellenoptik ist eine noch junge, aber schnell fortschreitende Wissenschaft, die eine Reihe von Erfindungen hervorgebracht hat, die zum Teil mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurden (Laserkühlung 1997, Bose-Einstein-Kondensation 2001). Die Interferometrie mit nichtklassischen Materiezuständen ermöglicht sehr hohe Messgenauigkeiten; dies nutzt man etwa für die Bestimmung von Ladungen und Massen oder für die Messung von Gravitationswellen. Ging man früher davon aus, dass Quantenobjekte im Gegensatz zu Objekten der Anschauung mikroskopisch klein sind, zeigen makroskopische Objekte wie Bose-Einstein-Kondensate, dass dies so allgemein nicht gilt.

Atomare Quantensensoren lassen sich sehr vielfältig einsetzen: unter anderem zur Realisierung von Maßeinheiten, zur Erkundung von Rohstoffvorkommen, zur Navigation und für Erd- und Umweltbeobachtungen. Weiterhin sind atom- oder molekülbasierte Quantensensoren schon heute in der Lage, mit Präzisionsmessungen fundamentale Theorien jenseits des Standardmodels oder die zeit-

liche Variation der Naturkonstanten zu testen, und tragen so zu unserem grundlegenden Weltbild genauso bei wie Hochenergieexperimente an großen Beschleunigeranlagen. Auf allen diesen Gebieten entspringen ihre Vorteile unmittelbar den grundlegenden Quanteneffekten, und es sind wesentliche Fortschritte hinsichtlich Leistung, Nutzbarkeit und Effizienz zu erwarten, etwa beim Einsatz transportabler Bauteile in Satelliten oder auf der Erde.

7.1 Erdbeobachtung

Quantensensoren reagieren sehr empfindlich auf die Schwerkraft und ihre Veränderungen, auf Magnetfelder oder die Erdrotation und eignen sich daher besonders für Anwendungen in den Geowissenschaften und für die Erdbeobachtung. Mit ihrer Hilfe lässt sich beispielsweise die Schwerkraft auf der Erdoberfläche präzise vermessen und Schwerkraftkarten erstellen. Die Anwendungen einer solchen Schwerkraftkartographie reichen von der Suche nach Rohstoffen wie Erdöl- und Mineralienvorkommen über Plattentektonik und Erdbebenvorhersagen bis hin zur Messung von Auswirkungen des Klimawandels wie dem Anstieg des Meeresspiegels. Selbst kleine Verbesserungen der Messempfindlichkeit können daher gesellschaftlich und wirtschaftlich wichtig sein. Sie könnten helfen, die zeitliche Veränderung der Rotationsachse der Erde aufzuzeichnen, die wegen der komplizierten Prozesse im Erdinneren nicht vorhersagbar ist.

Ein Vorteil der Quantensensoren ist vor allem, dass sie prinzipbedingt keine Drift aufweisen und nicht regelmäßig

rekalibriert werden müssen. Weil sie keine stabilisierten Plattformen benötigen, eignen sie sich besonders gut für den Einsatz in der Luft und auf hoher See. Im Labor haben Rotationssensoren bereits die Leistungsfähigkeit klassischer Geräte wie Ringlasergyroskope zur Flugzeugnavigation übertroffen.²⁸ Ein Quantengyroskop könnte daher ein Bestandteil zukünftiger Navigationssysteme sein, die sich nicht auf die Satellitenortung (wie GPS oder Galileo) stützen müssen, und würde auch unter schwierigen Sichtverhältnissen in Innenstädten, in Tunneln sowie in bergigem oder bewaldetem Gelände funktionieren.

7.2 Anwendungen im Weltall

Unter Schwerelosigkeit arbeiten atomare Quantensensoren noch weitaus genauer als auf der Erde, was sie auch für die physikalische Grundlagenforschung interessant macht. Man könnte sie als Langzeit-Inertialreferenz für die Astronomie oder die Navigation im Weltall verwenden oder auch in Missionen, die das Schwerfeld der Erde präzise abbilden und beobachten sollen. Diese Sensoren könnten der Schlüssel zu neuen Experimenten sein, etwa in der Gravitationswellenastronomie oder bei der Suche nach einer umfassenden Theorie, die Quanten- und Gravitationstheorie vereint – eines der wichtigsten Ziele der Physik seit dem 20. Jahrhundert.

7.3 Standards im Messwesen

Weil Quantensensoren den inneren Aufbau der Atome erfassen, eignen sie sich auch, um Basiseinheiten im Rahmen des internationalen Einheitensystems festzusetzen.²⁹ Mit Hilfe von Atomuhren konnte man bereits die Sekunde als Zeiteinheit

und das Meter als Längeneinheit neu definieren. Nur das Kilogramm als Einheit der Masse ist als letzte Basiseinheit noch durch das Urkilogramm, einen materiellen Gegenstand zweifelhafter Langlebigkeit, definiert. Einen vielversprechenden Ansatz, diesen unbefriedigenden Zustand zu überwinden, liefert die Watt-Waage, mit der man die Masse über Messungen des elektrischen Stromes und des elektrischen Widerstandes bestimmt. Strom und Widerstand können mit Hilfe zweier Quanteneffekte, des Josephson- und des Quanten-Hall-Effekts, sehr genau ausgedrückt werden, was zu einer Verbindung der makroskopischen Masse mit einer Naturkonstanten, dem Planck'schen Wirkungsquantum, führt. Eine solche Watt-Waage benötigt eine Schwerkraft-Referenz von einer Genauigkeit, die mit klassischen Sensoren kaum zu erreichen ist, die aber im Rahmen der Möglichkeiten eines Quantengravimeters liegen sollte.

²⁸ Ein Gyroskop ist ein Gerät, das die räumliche Orientierung bestimmt.

²⁹ Zu diesen SI-Einheiten (von frz. *Système international*) gehören Basiseinheiten wie Meter, Kilogramm, Sekunde, Ampere und Kelvin.

8 Spezielle Quantentechnologien

8.1 Quantenelektronik

Die Quantenelektronik umfasst allgemein alle elektronischen Bauelemente und Systeme, in denen die Quantisierung von Licht, Ladung oder Elektronenspin für die Funktion ausschlaggebend ist. Zu den relevanten Effekten gehören neben der Wechselwirkung von Lichtquanten mit Ladungen auch die Supraleitung (Bildung von Elektronenpaaren) und die nichtflüchtigen Flash-Speicher (mit dem Tunneleffekt). Auch viele parasitäre Effekte wie das Schrot- und das Funkelrauschen beruhen auf Quantenphänomenen, die durch das Wirken einzelner Ladungen verursacht werden.

Auf der anderen Seite sind die klassisch beobachtbaren Größen wie Strom oder Leistung makroskopischer Natur, nicht etwa Photonen oder Elektronen. Dank der Fortschritte in der Mikro- und Nanoelektronik kann man Strukturen fertigen, in denen tatsächlich einzelne quantisierte Ladungen, Photonen oder Spins die Signale darstellen oder die Funktionalität bestimmen. Bei der Entwicklung solcher Strukturen und Systeme spielen hochempfindliche Messtechniken, die auf Quanteneffekten beruhen, eine wichtige Rolle, etwa der Tunneleffekt in der Rastertunnelmikroskopie oder Austausch- und Korrelationskräfte in der Austauschkraftmikroskopie.

Weil sich bedingt durch die sehr kleinen Abmessungen nur geringe Signalstärken erzeugen lassen, wird man solche nanoskaligen Systeme in (nicht zur Quantentechnologie gehörige) Eingangs- und Ausgangsstrukturen einbetten müssen,

um sie effektiv nutzen zu können. Ebenso muss man in der Lage sein, viele gleichartige Strukturen herstellen zu können. Beide Bedingungen zu erfüllen, kann schwieriger sein, als das quantentechnologische Element selbst zu realisieren. Ein Beispiel ist der Ein-Elektron-Transistor, in dem einzelne Elektronen Ströme steuern oder Ladungspakete aus einzelnen Elektronen transportiert werden. Auf seiner Basis hat es in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte bei der Realisierung eines quantisierten Stromstandards gegeben. So kann man bereits durch Einzelelektronenpumpen Ströme im Nanoampere-Bereich mit großer Präzision erzeugen. In den nächsten Jahren könnten derartige Einzelelektronenpumpen helfen, das „metrologische Dreieck“ aus Strom, Spannung und Frequenz zu schließen.

Ein weiteres Beispiel, das in jüngster Zeit große Aufmerksamkeit bekommt, ist die nanomagnetische Logik. Hierbei nutzt man die Wechselwirkung von Nanomagneten für nichtflüchtige und potenziell besonders verlustarme Recheneinheiten. Dies bietet etliche Vorteile: zum Beispiel sind keine elektrischen Verbindungsleitungen erforderlich, da die Wechselwirkung ebenso wie die Energiezufuhr über magnetische Felder erfolgt. Diese Wechselwirkung kann in der Ebene und zwischen senkrecht übereinander angeordneten Nanomagneten erfolgen. Somit ist eine flächeneffiziente dreidimensionale Anordnung möglich. Dieses Konzept ist prinzipiell bis zu atomaren Größen skalierbar und vor Kurzem sind erste spinbasierte Logikelemente aus Einzelatomen auf Oberflächen gezeigt worden. Da in diesem Fall keine elektrischen Ladungen fließen,

umgeht man mit solchen rein spinbasierten Nanobauelementen Probleme, die sich im Zusammenhang mit zu großen und wenig reproduzierbaren Kontaktwiderständen ergeben, wie sie sonst für Nanoelektronik-Bauelemente charakteristisch sind. Indem man also den Spin-Freiheitsgrad nutzt, eröffnen sich neue Möglichkeiten für atomare Spin-Logik- und Speicher-Bausteine sowie für die Quanteninformationsverarbeitung (Quantenspintronik). Allerdings gilt auch hier, dass die nanoskaligen Funktionselemente in die makroskopische Umgebung eingebettet werden müssen, wozu leistungsfähige und sichere Eingangs- und Ausgangsstrukturen erforderlich sind. Sollen diese Bauteile in großer Stückzahl eingesetzt werden, eignen sich teure Geräte wie Tunnelmikroskope, Rasterkraftmikroskope und dergleichen nicht als Ausgabeeinheiten, sondern man muss zusammen mit den quantentechnologischen Elementen integrierte Schnittstellen schaffen. Einfache Lösungen sind Eingangsstrukturen aus stromdurchflossenen Leitungen und Ausgangsstrukturen aus Hall-Sensoren oder GMR-Elementen.³⁰

Ebenfalls interessant ist die Koppelung festkörperartiger Nanostrukturen und ultrakalter Quantengase. Mit ihrer Hilfe könnte man hochgenaue Messungen durchführen, die auf Zustandsänderungen eines ultrakalten Quantengases beruhen und elektrisch weiterzuverarbeitende Signale in festkörperbasierten Nanoelektronik-Bauelementen übertragen.

Beim Übergang von der Grundlagen- in die anwendungsorientierte Forschung sollte möglichst früh darauf geachtet werden, dass sich die benötigten Bauteile reproduzierbar und kostengünstig fertigen lassen und unter realistischen Bedingungen sicher funktionieren. Eine Schwierigkeit ist hierbei der Betrieb bei

sehr tiefen Temperaturen, die für manche Effekte nötig sind. In Elementen, in denen nur ein oder wenige Quanten für die Funktion verantwortlich sind, spielt zudem die Unschärferelation eine große Rolle.

8.2 Vielteilchen-Korrelationen

In quantenmechanischen Systemen entstehen spontan Vielteilchen-Korrelationen, die auch eine Vielfalt technischer Anwendungsmöglichkeiten bieten. Das bekannteste Beispiel sind wohl Supraleiter, die bereits heute schon vielfach in der Elektronik, der Starkstrom- und der Medizintechnik eingesetzt werden. Besonders interessant sind die Hochtemperatur-Supraleiter, die schon bei Sprungtemperaturen wenig unterhalb von etwa -180 °C supraleitend werden. Denn je höher die Sprungtemperatur ist, desto weniger Aufwand ist nötig, um die supraleitenden Komponenten zu kühlen. Ein Ziel der Grundlagenforschung ist daher, die der Supraleitung zugrunde liegenden Mechanismen so weit zu klären, dass sich die Sprungtemperaturen mathematisch berechnen lassen. Dabei setzt man vorwiegend spektroskopische und Transportexperimente an Festkörpern sowie analytische und numerische Methoden ein. Eine neue, gegenwärtig intensiv diskutierte Forschungsstrategie ist der Einsatz ultrakalter Gase zur analogen Quantensimulation von stark wechselwirkenden Elektronensystemen in Festkörpern. Hierzu gibt es bereits erste Experimente. Aufbauend auf dem bisherigen grundsätzlichen Verständnis quantenmechanischer Vielteilchensysteme beginnt man nun damit, die mikroskopischen Wechselwirkungen zwischen Quantenteilchen gezielt zu beeinflussen, um die Eigenschaften einer makroskopischen Teilchenzahl zu optimieren. In lasergekühlten atomaren Gasen lassen sich die Wechselwirkungen zwischen den Atomen verhältnismäßig einfach beein-

³⁰ GMR = Giant Magnetoresistance (Riesenmagnetowiderstand), magnetfeldabhängiger Widerstand.

flussen. Es ist allerdings nicht leicht, die für die Kondensation von Vielteilchensysteme erforderlichen tiefen Temperaturen zu erzielen. Um das Phasenverhalten von Elektronensystemen in Festkörpern innerhalb von Femto- oder Attosekunden zu steuern, bieten sich ultrakurze, genau angepasste Lichtimpulse über einen breiten Frequenzbereich an. Auch hierzu gibt es erste, vielversprechende Experimente. Zudem gelingt es immer besser, die in der Halbleiterphysik etablierten Nanostrukturierungsverfahren auch auf Materialien mit stark wechselwirkenden Elektronensystemen anzuwenden und so die elektronischen Korrelationen gezielt zu beeinflussen. Ein Fernziel ist es, makroskopisch phasenkohärente Zustände wie die Supraleitung auch bei Raumtemperatur zu stabilisieren und auf diese Weise das Anwendungspotenzial der Quantentechnologien zu vergrößern.

8.3 Quantenmaschinen

Kann man ganze Atomwolken gezielt einfangen und verarbeiten, so lassen sich Maschinen entwerfen, die mittels gezielter Steuer- und Kontrollfelder Arbeit

völlig kohärent und ohne Reibungsverluste verrichten können. Zu den möglichen Konzepten gehören Brown'sche Quantenmotoren, Einzel-Atom-Motoren und Hybridstrukturen. In ihnen werden mittels kalter Atome kleinste Motoren in optischen Gittern entworfen und experimentell realisiert (s. Abb. 6). Das Fehlen der Reibung stellt allerdings eine Herausforderung dar, weil es schwierig ist, solche Maschinen zu starten und anzuhalten. Der Vorteil solcher Anwendungen wäre aber, dass sie (im Nichtgleichgewicht) mit Wirkungsgraden nahe bei Eins operieren könnten.

Ebenfalls interessant ist es, die statistischen Eigenschaften wie quantenmechanische Thermalisierung und Relaxation von endlichen Quantensystemen zu untersuchen. Dies kann entweder im isolierten Zustand oder in Verbindung mit gegenseitiger Wechselwirkung innerhalb zusammengesetzter Quantenarchitekturen geschehen.

Derzeit befinden sich Quantenmaschinen mit theoretischen und experimentellen Machbarkeitsstudien noch in der Grundlagenforschung.

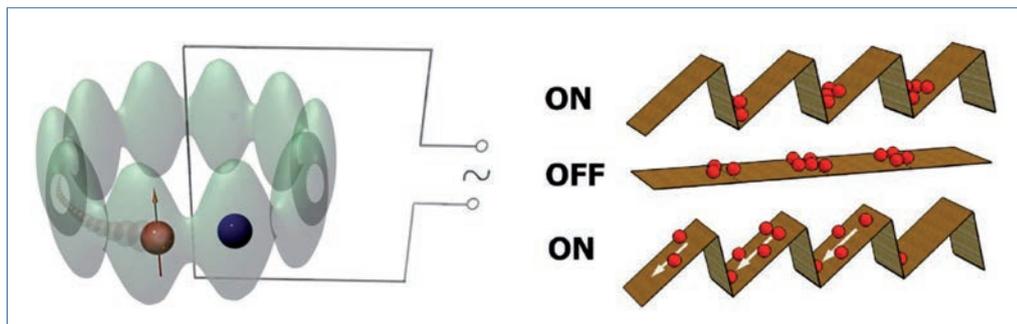


Abbildung 6: Links: Elektrischer Quantenmotor – zwei Atome, die lokal miteinander wechselwirken können, werden in eine ringförmige Falle aus Licht gebracht, wovon das eine (rot) mit einem zeitabhängigen Magnetfeld angetrieben wird und Arbeit gegen äußere Felder zu leisten vermag. Rechts: Quantenradsche – durch Ein- und Ausschalten eines asymmetrischen Sägezahnpotenzials können aufgrund der Brown'schen Bewegung Teilchen transportiert werden. [Links: Hänggi, Peter. Elektrischer Quantenmotor. In: Phys. Rev. Lett. 102, 230601 (2009); Rechts: Hänggi, Peter: Quantenradsche. In: Nature Materials 10, 6-7 (2011)]

8.4 Phononische Quantensysteme

Neben der Quantisierung von Licht, Ladung und Elektronenspin findet auch die Quantisierung von Kristallgitterschwingungen (Phononen) viele Anwendungen. Man kann sie analog zu quantisierten Elektronensystemen wie Quantentöpfen, Quantendrähten und Quantenpunkten erreichen, indem man Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften so miteinander kombiniert, dass die Abmessungen der einzelnen Materialien, Dicke oder Durchmesser, unterhalb der freien Weglänge von Phononen liegt. Weil diese in Festkörpern – 300 Nanometer in Silizium – in der Regel deutlich größer ist als die de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen – 10 Nanometer in Silizium – lassen sich elektrische und thermische Leitfähigkeit entkoppeln. Man kann den von Phononen getragenen Wärmetransport unterdrücken, während das Elektronensystem sich nach wie vor klassisch verhält. So wurde an Silizium-Nanodrähten bereits eine 200-fache Verringerung der thermischen Leitfähigkeit durch den obengenannten Effekt gezeigt, während die elektrische Leitfähigkeit nur auf ein Zehntel abfiel. Mögliche Anwendungen für ein solches Material sind Infrarotdetektoren, mit denen das Sensorsignal – der Temperaturanstieg – elektrisch ausgewertet wird. Die parasitäre Wärmebrücke über eine niederohmige elektrische Zuleitung wird durch diesen Effekt weitgehend vermieden (Erfüllung der hohen Sensitivitätsanforderung). Eine zweite Anwendung sind thermoelektrische Generatoren, die Wärme in elektrisch nutzbare Energie wandeln. Effiziente Generatoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie gleichzeitig eine hohe elektrische Leitfähigkeit (geringer Innenwiderstand) und eine geringe thermische Leitfähigkeit (hoher thermischer Parallelwiderstand) aufweisen. Je größer das Verhältnis von elektrischer und thermischer Leitfähigkeit ist, desto effizienter wandelt das Material Wärme in

elektrische Energie um. Auch hier führt eine Entkopplung der thermischen von der elektrischen Leitfähigkeit zu einer erheblichen Verbesserung. So konnte man bereits eine Verdreifachung des ZT-Wertes³¹ in solchen nanostrukturierten Materialien gegenüber dem gewöhnlichen Wert nachweisen. Ein Beispiel macht das Potenzial thermoelektrischer Generatoren deutlich: Ein 125-Kilowatt-Verbrennungsmotor produziert bei einem gemittelten Fahrzyklus über den Abgasstrang durchschnittlich rund 5 Kilowatt Abwärme. Bei einem thermoelektrischen Generator mit einem ZT-Wert³² von 25 und einem Wirkungsgrad von 6 Prozent ergibt sich eine durchschnittliche elektrische Leistung von 300 Watt, die ausreichen würde, um die Bordelektronik eines Autos mit Energie zu versorgen.

Bei der Verwendung von periodisch wiederkehrenden Strukturen ist es möglich, phononische Bandlücken zu erzeugen (phononische Kristalle). Dieser Effekt spielt zum Beispiel in Bauelementen eine Rolle, in denen man die phononisch gekoppelte Relaxation energetisch hoch angeregter Quantenzustände unterdrücken will. Ein solcher Effekt ermöglicht etwa Hot-Carrier-Solarzellen mit einem theoretischen Wirkungsgradpotenzial von 66 Prozent, in denen hoch ins Band angeregte Ladungsträger vor ihrer Relaxation in Richtung Bandkante extrahiert werden und ihre Energie vor der Rekombination genutzt wird. Ziel ist es, den Rekombinationsprozess für die Extraktion abzubremesen. In Quantenpunkten aus Cadmiumsulfid konnte man diesen Prozess bereits von zehn Pikosekunden auf eine Nanosekunde verlangsamen. Dies ist jedoch von anwendungsrelevanten Zeitskalen, die im Mikrosekundenbereich liegen, weit entfernt. Die Beispiele zeigen

³¹ Der ZT-Wert ist ein dimensionsloser Faktor, der den Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren mitbestimmt. Je größer er ist, desto näher liegt der Wirkungsgrad beim thermodynamischen Maximum.

³² Die bisher besten bekannten Materialien haben einen ZT-Wert von 1.

aber, welche Bedeutung die Grundlagenforschung der Phononenstreuung in Festkörpern für künftige Anwendungen haben kann.

8.5 Energiespeicherung in quantisierten Systemen

Regenerative Energieanlagen wie Windräder, Solarzellen oder Sonnenwärmekraftwerke liefern als primäre Energie elektrischen Strom. Grundlastfähig ist aber nur das Sonnenwärmekraftwerk, weil die Wärme, die aus Lastanforderungsgründen nicht sofort benötigt wird, über mehrere Tage wirtschaftlich gespeichert werden kann. Elektrische Energie aus Photovoltaik- oder Windkraftanlagen, die nicht sofort benötigt wird, sollte im Idealfall in elektrischen Speichern zwischengespeichert werden, um Verluste durch Energiewandlung – etwa in Wasserstoff – zu vermeiden. Gerade Anwendungen wie der Lastausgleich in elektrischen Versorgungsnetzen, der wirtschaftliche Ausbau der Elektromobilität, autarke Sensorknoten für ein „umgebungsunterstütztes Leben“ oder mobile Kommunikations- und Informationssysteme hängen jedoch wesentlich davon ab, dass wirtschaftliche, skalierbare und umweltverträgliche elektrische Energiespeicher zur Verfügung stehen. Elektrische Speicher wie etwa die Lithium-Ionen-Batterien sind aber noch teuer und in ihrer Energie- und Leistungsdichte sowie ihrer Lebensdauer beschränkt. Ein weiteres Problem der Lithium-Ionen-Batterien ist die im Vergleich zur kapazitiven Energiespeicherung – bei der nur Elektronen verschoben werden müssen – ungleich langsamere Ionenbeweglichkeit. Aufgrund dessen sind Lithium-Ionen-Akkus nicht in der Lage, kurzzeitig hohe Leistungsspitzen abzugeben oder aufzunehmen. Zusätzlich ist der Ionenaustausch mit Volumenänderungen verbunden, was zu mechanischen Belastungen des Elektrodenmaterials führt und so die Lebensdauer dieser Batterien begrenzt. Darüber hinaus reicht die

derzeit erzielte Energie- und Leistungsdichte nicht aus und die in Verbindung mit Schlüsselanwendungen wie der Elektromobilität systembedingten Kosten sind zu hoch. Auf der anderen Seite haben heutige kapazitive Energiespeicher eine zu geringe spezifische Energiespeicherung, um Lithium-Ionen-Akkus zu ersetzen. Wegen ihrer schnellen Lade- und Entladefähigkeit wird an ihnen jedoch seit Jahren aktiv geforscht. Ein kapazitiver Energiespeicher zeichnet sich durch eine hohe elektrische Permittivität und eine hohe elektrische Durchbruchfeldstärke aus. Legt man in klassischen dielektrischen Materialien ein äußeres elektrisches Feld an, so bildet sich ein Dipolfeld aus, das dem externen Feld entgegenwirkt. Im einfachsten Fall ist diese Polarisierung auf die mikroskopische Verschiebung der Elektronenhülle gegenüber dem positiv geladenen Atomkern zurückzuführen. Der Grad der Auslenkung bestimmt dabei die Stärke der Polarisierung, die Permittivität und damit die Größe der Kapazität.

Inzwischen sind Strukturen denkbar, in denen der Effekt der Polarisierung nicht mehr auf der atomaren Skala, sondern zwischen gekoppelten Quanten- oder Nanostrukturen abläuft. Die für die Ausbildung des Dipolfeldes notwendige Ladungsverschiebung wird dann vom Tunneleffekt der Ladungsträger zwischen benachbarten Quantenstrukturen übernommen. In einem solchen System ist die Auslenkung der Dipole nicht mehr auf Bruchteile der Gitterkonstanten beschränkt, sondern kann sich über mehrere Nanometer ausdehnen. Dadurch könnten trotz der im Vergleich zum Festkörper geringen Volumendichte an Quantenpunkten aufgrund der starken Auslenkung der Dipole hohe Permittivitäten erreicht werden. Man geht davon aus, dass man mit einem System aus gekoppelten Quantenpunkten spezifische Energiespeicherdichten von bis zu 1000 Wh/kg erreichen könnte, was dem fünffachen Wert heutiger Lithium-Ionen-Batterien entspricht.

Methodik

Mitwirkende in der Arbeitsgruppe

Koordinator

Prof. Dr. Wolfgang P. Schleich	Universität Ulm
--------------------------------	-----------------

Mitarbeiter des Koordinators

Dr. Kedar S. Ranade	Universität Ulm
---------------------	-----------------

Folgende Personen haben an der Erstellung dieser Stellungnahme mitgearbeitet (* : Mitglied des Redaktionsausschusses)

Prof. Dr. Markus Arndt	Universität Wien (Österreich)
Prof. Dr. Markus Aspelmeyer	Universität Wien (Österreich)
Prof. Dr. Manfred Bayer*	Technische Universität Dortmund
Prof. Dr. Dr. Gunnar Berg	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Tommaso Calarco	Universität Ulm
Prof. Dr. Harald Fuchs	Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Prof. Dr. Elisabeth Giacobino	Université de Paris (Frankreich)
Dr. Markus Grassl	National University of Singapore (Singapur) Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen
Prof. Dr. Peter Hänggi	Universität Augsburg
Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl*	Deutsches Museum, München Technische Universität München
Prof. Dr. Ingolf-Volker Hertel	Max-Born-Institut, Berlin Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Susana Huelga	Universität Ulm
Prof. Dr. Fedor Jelezko	Universität Ulm
Prof. Dr. Bernhard Keimer	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart
Prof. Dr. Jörg P. Kotthaus*	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Gerd Leuchs*	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen
Prof. Dr. Norbert Lütkenhaus	University of Waterloo (Kanada)
Prof. Dr. Ueli Maurer	ETH Zürich (Schweiz)
Prof. Dr. Tilman Pfau*	Universität Stuttgart
Prof. Dr. Martin B. Plenio	Universität Ulm Imperial College, London (Großbritannien)

Prof. Dr. Ernst Maria Rasel*	Leibniz-Universität Hannover
Prof. Dr. Ortwin Renn	Universität Stuttgart
Prof. Dr. Christine Silberhorn	Universität Paderborn
Prof. Dr. Jörg Schmiedmayer	Universität Wien (Österreich)
Prof. Dr. Doris Schmitt-Landsiedel	Technische Universität München
Prof. Dr. Kurt Schönhammer	Georg-August-Universität Göttingen
Prof. Dr. Alexey Ustinov*	Karlsruher Institut für Technologie KIT
Prof. Dr. Philip Walther	Universität Wien (Österreich)
Prof. Dr. Harald Weinfurter*	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Emo Welzl	ETH Zürich (Schweiz)
Prof. Dr. Roland Wiesendanger	Universität Hamburg
Prof. Dr. Stefan Wolf	ETH Zürich (Schweiz)
Prof. Dr. Anton Zeilinger	Universität Wien (Österreich)
Prof. Dr. Peter Zoller	Universität Innsbruck (Österreich)

Beiträge aus der Wirtschaft

Dr. Klaus Dieterich	Robert Bosch GmbH
---------------------	-------------------

Wissenschaftliche Referenten der Arbeitsgruppe

Dr. Christian Anton	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
Dr. Stefanie Westermann	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina

Gutachter

Prof. Dr. Alfons Bora	Universität Bielefeld
Prof. Dr. Wolfgang Ketterle	Massachusetts Institute of Technology MIT (USA)
Prof. Dr. Carsten Könneker	Karlsruher Institut für Technologie KIT
Prof. Dr. Christoph Kutter	Fraunhofer-Einrichtung für Modulare Festkörper- Technologien, München
Prof. Dr. Hans Wiesmeth	Technische Universität Dresden

Vorgehensweise

Auf Antrag der Nationalen Akademie der Wissenschaften setzte der Ständige Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina am 27. April 2009 die Arbeitsgruppe Quantentechnologien ein.

Um internationale Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantentechnologien zu berücksichtigen, organisierte die Arbeitsgruppe unter der Leitung von Prof. Dr. Wolfgang Schleich vom 8.-9. Mai 2011 im Deutschen Museum in München die Konferenz „Quantum Technologies“ (Programm s. Anhang). Während der Tagung erläuterten 23 Experten aus acht Ländern vor mehr als 200 Teilnehmern die neuesten experimentellen und theoretischen Entwicklungen. Ein ausführlicher Bericht zur Konferenz findet sich im Leopoldina-Jahrbuch 2011.

Im Oktober 2011 wurde an der Universität Ulm das „Center for Integrated Quantum Science and Technology“ (IQST) eröffnet. Im Rahmen eines Symposium hielt Dr. Klaus Dieterich (Vorsitzender der

Geschäftsleitung von Corporate Research, Bosch) einen Vortrag zum Thema „Quantum Effects – An Opportunity for Industry?“. Nach der Veranstaltung wurde Herr Dieterich von Prof. Schleich gebeten, seinen Beitrag in den vorliegenden Bericht einfließen zu lassen.

Zur Erstellung der Zusammenfassung und zur Diskussion der Kernaussagen traf sich am 11. April 2013 im Deutschen Museum in München der Redaktionsausschuss der Arbeitsgruppe.

Die erste Fassung des Manuskriptes kommentierte Manfred Lindinger (Frankfurt). Die zur Begutachtung vorgesehene Version der Stellungnahme lektorierte Niels Boeing (Hamburg), das Lektorat der finalen Fassung übernahm Martin Radke (Bremen).

Am 4. Dezember 2014 wurde die Stellungnahme vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet.

Literatur

- Bennett, CH, Brassard, G (1984) Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, Volume 175, 175-179. New York.
- Born M, Heisenberg W, Jordan P (1926) Zur Quantenmechanik II. *Zeitschrift für Physik* 35: 557.
- Cirac JI, Zoller P (1995) Quantum Computations with Cold Trapped Ions. *Physical Review Letters* 74: 4091–4094.
- DiVincenzo, DP (1997) Topics in Quantum Computers. In: L. Kowenhoven, G. Schön und L.L. Sohn (Hrsg.): *Mesoscopic Electron Transport*. NATO ASI Series E. Nr. 345. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 657.
- Einstein A, Podolsky B, Rosen N (1935) Can quantum-mechanical description be considered complete? *Physical Review* 47: 777.
- Ekert, AK (1991) Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Physical Review Letters* 67 (6): 661-663.
- Grötter R (2009) Wie der Laser ans Licht kam. *Max Planck Forschung* 4/2009: 84-90.
- Hänggi, P (2011) Harvesting randomness. *Nature Materials* 10: 6-7.
- Heisenberg, W (1927) Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik* 43: 172.
- Institut für Demoskopie Allensbach, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2015) *Die Synthetische Biologie in der öffentlichen Meinungsbildung*. Halle (Saale).
- Ponomarev, AV, Denisov, S, Hänggi, P (2009) ac-Driven Atomic Quantum Motor. *Physical Review Letters* 102, 230601.
- Schrödinger E (1926) Quantisierung als Eigenwertproblem. *Ann. Phys.* 79: 361.
- Schrödinger E (1927) Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordan'schen Quantenmechanik zu der meinen. *Ann. Phys.* 79: 734-756.

Anhang

Internationale Konferenz „Quantum Technologies“

9./10. Mai 2011, Deutsches Museum München, Ehrensaal

Monday 9 May 2011

9:15 a.m. | Opening

Wolfgang Heckl (Munich)

Welcome

Gunnar Berg (Halle)

Welcome

Wolfgang Schleich (Ulm)

9:30 a.m.

Emergent Quantum Technologies: the Exploitation of Quantum Coherence

Peter Knight (London)

10:00 a.m.

Quantum Metrology with Cold Atoms

Mark Kasevich (Stanford)

10:30 a.m.

Probing Strongly Interacting Quantum Matter using Ultracold Quantum Gases

Immanuel Bloch (Munich)

11:00 a.m. | Coffee break

11:30 a.m.

Futures of Quantum Communication: Quantum Memories for Quantum Networks and Device-Independent QKD

Nicolas Gisin (Geneva)

12:00 noon

Nonlinear Quantum Optics in Superconducting Circuit Quantum Electrodynamical Systems

Barry Sanders (Calgary)

12:30 p.m.

Quantum Science and Technology with Superconducting Electronic Circuits

Andreas Wallraff (Zurich)

1:00 p.m. | Lunch at Deutsches Museum

2:00 p.m.

Exploring Quantum Magnetism with Ultracold Atoms

Markus Greiner (Harvard)

2:30 p.m.

Semiconductors – a Potential Platform for Quantum Technologies?

Manfred Bayer (Dortmund)

3:00 p.m.

Coherent Control of Dense Rydberg Gases

Tilman Pfau (Stuttgart)

3:30 p.m. | Coffee break

4:00 p.m.

Quantum Coherence, Decoherence, and Phase Transition Dynamics

Wojciech Zurek (Los Alamos, Ulm)

4:30 p.m.

Beyond Stokes, a Tale of Two Vector Spaces

Joseph Eberly (Rochester)

5:00 p.m.

Quantum Networks with Atoms and Photons

Christopher Monroe (Maryland)

5:30 p.m.

Integrated Quantum Photonics

Jeremy O'Brien (Bristol)

Tuesday 10 May 2011

9:15 a.m.

Quantum Cryptography, Twenty Years Later

Artur Ekert (Oxford, Singapore)

9:45 a.m.

Optical Quantum Technology for Communication and Sensing

Gerd Leuchs (Erlangen)

10:15 a.m.

Coherent Atomtronic Devices

Nicholas Bigelow (Rochester)

10:45 a.m. | Coffee break

11:15 a.m.

Quantum Technology Taken to its (Speed) Limit

Tommaso Calarco (Ulm)

11:45 a.m.

What Quantum Technology can Learn from Quantum Biology of Light Harvesting, Light Reception, and Magnetic Field Reception

Klaus Schulten (Urbana)

12:15 p.m.

Quantum Effects in Biology: A new Playground for Quantum Information Scientists

Martin Plenio (Ulm)

12:45 p.m. | Lunch

2:00 p.m. | Panel Discussion:

Economic Potential of Quantum Technologies

Doris Schmitt-Landsiedel (Munich)

Peter Russer (Munich)

Nicolas Gisin (Geneva)

Moderator: Patrick Regan (Munich)

3:30 p.m. | Coffee break

4:00 p.m.

Interference – the Mother Lode of Quantum Technology

Gunnar Bjoerk (Stockholm)

4:30 p.m.

Optical Multimode Entanglement – from Ideas to Practical Devices

Hans Bachor (Canberra)

5:00 p.m.

Engineering in the Noise: when Technology Meets the Quantum of Light

Howard Carmichael (Auckland)

5:30 p.m.

Quantum Control on a Nanoscale

Myungshik Kim (London)

Förderprogramme und Projekte

Auf dem Gebiet der Quantentechnologien wird eine große Zahl von Projekten und Forschungsgruppen unterstützt, in Deutschland unter anderem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Max-Planck-Gesellschaft, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und weiteren Stellen auch auf Landesebene. Von der Europäischen Union werden Fördergelder im 5., 6. und 7. Forschungsrahmenprogramm bereitgestellt.

Eine Übersicht über diese Projekte findet sich bei der QIPC-Roadmap (Quanteninformationsverarbeitung und Quantenkommunikation, engl. *Quantum Information Processing and Communication*) Qurope/QUIET2 im Internet unter der Adresse <http://qurope.eu/projects/>. Im Folgenden werden beispielhaft und ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige Projekte aufgelistet:

AQUTE	Atomic Quantum Technologies (EU Integrating project)
CORNER	Correlated Noise Errors in Quantum Information Processing (EU-STREP-Projekt), 2008–11
FINAQS	Future Inertial Atomic Quantum Sensors
GOCE	Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer
HIP	Hybrid Information Processing (EU-STREP-Projekt), 2008–11
IKT 2020	Informations- und Kommunikationstechnologien (Bundesministerium für Bildung und Forschung/BMBF) mit den Verbundprojekten <ul style="list-style-type: none"> • QuORep (Quantenoptik-Repeaterplattform) • QuaHL-Rep (Quanten-Halbleiter-Repeater) • QUIIMP (Quanteninterface zwischen optischen- und Mikrowellenphotonen) • IQuRe (Informationstheorie des Quantenrepeaters)
IQS	Inertial Atomic and Photonic Quantum Sensors: Ultimate Performance and Application
LISA-II	Laser Interferometer Space Antenna II
PICC	Physics of Ion Coulomb Crystals (EU-Projekt), 2010–13
Q-ESSENCE	Quantum Interfaces, Sensors, and Communication based on Entanglement (EU Integrating project), 2010–14
QNEMS	Quantum NanoElectro-Mechanical Systems, an FET STREP EU project 2009–12
QUANTUS	Quantengase unter Schwerelosigkeit
SECOQC	Secure Communication using Quantum Cryptography (6. EU-Forschungsrahmenprogramm)
SFB 450	Analyse und Steuerung ultraschneller photoinduzierter Reaktionen
SFB 631	Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung: Physikalische Konzepte und Materialaspekte 2003–15
SFB/TRR 21	Control of Quantum Correlations in Tailored Matter (CO.CO.MAT)

Daneben werden einzelne Forscher etwa durch Alexander-von-Humboldt-Professuren unterstützt, z. B. David DiVincenzo (RWTH Aachen), Martin Plenio (Ulm) und Vahid Sandoghdar (Erlangen-Nürnberg).

Weiterführende Literatur

Bücher

- [1] J. Audretsch. *Verschränkte Welt. Faszination der Quanten*. Wiley-VCH, 2002.
- [2] M. A. Nielsen and I. L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2000.
- [3] P. McManamon and A. E. Willner et al. *Optics and Photonics – Essential Technologies for Our Nation*. The National Academies Press, 2013.
- [4] A. Peres. *Quantum Theory: Concepts and Methods*. Springer-Verlag, 1995.
- [5] O. Renn and M. M. Zwick. *Risiko- und Technikakzeptanz*. Springer-Verlag, 1997.
- [6] A. Zeilinger. *Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik*. Goldmann Verlag 2005.

Übersichtsartikel

- [1] Spektrum Dossier 4/2010: Quanteninformatio
- [2] The Age of the Qubit: A new era of quantum information in science and technology. Institute of Physics, 2011.
- [3] J. I. Cirac and P. Zoller. New Frontiers in Quantum Information with Atoms and Ions. *Physics Today* (2004), 38–44.
- [4] Valerie C. Coffey. Next-Gen Quantum Networks. *Optics & Photonics News* (March 2013), 34–41.
- [5] A. D. Cronin, J. Schmiedmayer and D. E. Pritchard. Optics and interferometry with atoms and molecules. *Reviews of Modern Physics*, **81** (2009), 1051–1129.
- [6] P. Hänggi. Harvesting randomness. *Nature Materials*, **10** (2011), 6–7.
- [7] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe and J. L. O’Brien. Quantum computers. *Nature*, **464** (2010), 45–53.
- [8] G. Leuchs. Wie viel Anschauung verträgt die Quantenmechanik? *PdN – Physik in der Schule*, **62** (2013), 5.
- [9] C. Monroe. Quantum Information Processing with Atoms and Photons. *Nature*, **416** (2002), 238–246.
- [10] P. Zoller et al. Quantum information processing and communication. *The European Physical Journal D – Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, **36** (2005), 203–228.

Einzelne Arbeiten

- [1] A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger. Experimental Test of Bell’s Inequalities using time-varying Analyzers. *Physical Review Letters*, **49** (1982), 1804–1807.
- [2] J. S. Bell. On the Einstein-Podolsky-Rosen-Paradox. *Physics*, **1** (1964), 195–200.
- [3] C. H. Bennett and G. Brassard. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. In *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems & Signal Processing, Bangalore, India*, 175–179 (1984).
- [4] J. I. Cirac and P. Zoller. Quantum Computations with Cold Trapped Ions. *Physical Review Letters*, **74** (1995), 4091–4094.
- [5] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, **47** (1935), 777–780.
- [6] A. K. Ekert. Quantum cryptography based on Bell’s Theorem. *Physical Review Letters*, **67** (1991), 661–663.
- [7] R. P. Feynman. Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, **21** (1982), 467–488.
- [8] W. Heisenberg. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, **43** (1927), 172–198.
- [9] B. Joy. Why the future doesn’t need us. *Wired*, April 2000 (siehe http://www.wired.com/wired/archive/8.04/joy_pr.html), deutsch in der FAZ vom 6. Juni 2000.
- [10] E. Schrödinger. Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Die Naturwissenschaften*, **23** (1935), 807–812, 823–828, 844–849.

Ausgewählte Publikationen der Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

Public Health in Deutschland: Strukturen, Entwicklungen und globale Herausforderungen (2015)

Stellungnahme zur Grünen Gentechnik (2015)

Die Energiewende europäisch integrieren – Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik (2015)

Palliativversorgung in Deutschland – Perspektiven für Praxis und Forschung (2015)

Individualisierte Medizin – Voraussetzungen und Konsequenzen (2014)

Akademien fordern Konsequenzen aus der Ebolavirus-Epidemie (2014)

Frühkindliche Sozialisation – Biologische, psychologische, linguistische, soziologische und ökonomische Perspektiven (2014)

Zur Gestaltung der Kommunikation zwischen Wissenschaft, Öffentlichkeit und den Medien – Empfehlungen vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen (2014)

Klinische Prüfungen mit Arzneimitteln am Menschen – Ad-hoc-Stellungnahme zum „Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über klinische Prüfungen mit Humanarzneimitteln und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/20/EG“ (2014)

Tierversuche in der Forschung – Empfehlungen zur Umsetzung der EU-Richtlinie 2010/63/EU in deutsches Recht (2012)

Präimplantationsdiagnostik (PID) – Auswirkungen einer begrenzten Zulassung in Deutschland (2011)

Prädiktive genetische Diagnostik als Instrument der Krankheitsprävention (2010)

Alle Publikationen der Schriftenreihe sind auf den Internetseiten der Akademien als kostenfreies pdf-Dokument verfügbar.

Deutsche Akademie der Naturforscher
Leopoldina e.V.
Nationale Akademie der Wissenschaften

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e.V.

Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-867
Fax: (0345) 472 39-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org

Residenz München, Hofgartenstraße 2
80539 München
Tel.: (089) 5 20 30 9-0
Fax: (089) 5 20 30 9-9
E-Mail: info@acatech.de

Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: (06131) 218528-10
Fax: (06131) 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de

Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

Hauptstadtbüro:
Unter den Linden 14
10117 Berlin

Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung