



### FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG

# Reif für die Praxis

Es hat etwas gedauert, bis die Industrie das Potenzial der Quantentechnologie erkannt hat. Nicht zuletzt dank der Forschung und cleverer Start-ups wird sie inzwischen für verschiedenste Anwendungen genutzt. Beste Beispiele sind die Sensorik sowie die Kryptographie, mit der bereits Geld verdient wird. Doch der Weg von den Forschungslabors in die Produktentwicklung ist weit.

#### VON MARKUS STREHLITZ

---

„Die Zeit ist reif“, sagt Christoph Marquardt, wenn er auf konkrete Anwendungen der Quantentechnologie angesprochen wird. Marquardt ist Gruppenleiter am Max-Planck-Institut und Mitglied im Planungskomitee der QUTEGA-Initiative (Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen). Deren Ziel ist es, den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zu fördern.

Man habe lange gebraucht, um die Quantentechnologie zu verstehen. „Aber mittlerweile lässt sich abschät-

zen, wie man sie nutzen und entsprechende Anwendungen umsetzen kann.“ Die Industrie habe aufgehört, so Marquardt. Unternehmen seien nun stärker an den Möglichkeiten interessiert, die die Quantenphänomene eröffnen, als dies noch vor ein paar Jahren der Fall gewesen sei.

Besonders anschaulich wird dies bei der Quantenkryptographie. Hier ist der Transfer von den Labors in die Produktentwicklung bereits am weitesten fortgeschritten. „Gerade als in den 90er-Jahren deutlich wurde, dass ein

Quantencomputer eines Tages die bisherigen Verschlüsselungs-Algorithmen brechen kann, wurde viel in die Kryptographie-Forschung investiert“, berichtet Marquardt.

Schutz vor solchen Computern sollte die Quantenphysik selbst bieten. Denn nach deren Gesetzen verursacht jeder Lauschangriff eine Zustandsveränderung auf der Leitung, die sich nachweisen lässt. Es ist also nicht möglich, eine Nachricht abzuhören, ohne dass dies bemerkt wird (siehe auch S. 18 f).

So weit die Theorie. Techniken zu entwickeln, die nach diesem Prinzip arbeiten, war jedoch aufwendig. „Dafür müssen quantensensitive Messungen durchgeführt werden“, erklärt Marquardt. „Das ist nicht einfach, da man am Quantenlimit messen muss.“ Um dann die Sicherheit nachzuweisen, sei die Kooperation von Physikern und Informatikern nötig gewesen – auch dies kein einfaches Unterfangen.

## Noch bedient die Quantenkryptographie eher einen Nischenmarkt

Doch diese Arbeit ist getan. Und so gibt es schon seit einiger Zeit Unternehmen, die mit Quantenkryptographie ihr Geld verdienen. Dazu zählt zum Beispiel die Schweizer Firma ID Quantique, die vor 15 Jahren von Physikern der Universität Genf gegründet wurde. Sie bietet unter anderem Technologien an, mit denen sich Quantenschlüssel austauschen lassen. Mit deren Hilfe kann dann eine Kommunikation abhörsicher durchgeführt werden. Außerdem im Angebot: ein Quantenzufallszahlengenerator, mit dem sich laut Anbieter absolut zufällige und sichere Schlüssel erstellen lassen.

Wachstumsraten von etwa 30 Prozent kann ID Quantique für die vergangenen Jahre vorweisen. Die Kunden kommen vor allem aus dem Finanzsektor. Das Unternehmen dringt aber auch in andere Felder vor. So kooperiert ID Quantique unter anderem mit Acronis – einem Spezialisten von Sicherheitstechnik für das Cloud Computing. Gemeinsam wollen die Anbieter Firmen vor „zukünftigen Sicherheitsrisiken schützen, die durch die Weiterentwicklung von Entschlüsselungstechniken sowie durch Quantencomputer entstehen werden“, wie es in einer gemeinsamen Erklärung heißt. Die Zusammenarbeit mit dem südkoreanischen Telekommunikationsunternehmen SK Telecom soll Sicherheitschips von Mobilgeräten verbessern.

Auch Technikgrößen wie Toshiba oder NEC beschäftigen sich mit Quantenkryptographie. Aber noch bedienen die Anbieter mit ihren Produkten eher einen Nischenmarkt. „Quantenkryptographie ist noch nicht so weit, dass sie jeder in seinem Wohnzimmer nutzen kann“, meint Marquardt. Das sei auch eine Kostenfrage.

Zudem gibt es noch ein technisches Problem. Die Kommunikation per Glasfaserkabel ist im Moment noch auf 100 bis 200 Kilometer begrenzt. Der Grund: Beim Datenaustausch über die Glasfaser entstehen Verluste, die die Quantenzustände stören.

Eine Alternative könnte die Nutzung von Satelliten sein. Ein großer Teil des Weges führt dabei durchs Vakuum, was die Verluste deutlich verringert. „Hier starten ge-

## INFORMATION

### Empfehlungen der QUTEGA-Initiative

Die nationale Initiative „Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen (QUTEGA) empfiehlt in ihrem Grundlagenpapier eine Reihe von Maßnahmen, um Quantentechnologien zu fördern und zur industriellen Anwendung zu bringen. Dazu zählen:

#### Förderung von Konsortien

In diesen Konsortien können Vertreter aus Wissenschaft und Industrie gemeinsam an der Verwirklichung konkreter marktrelevanter Projekte arbeiten. Auf diese Weise ist eine enge und ergebnisorientierte Abstimmung gewährleistet. Bei Grundlagenthemen werden Konsortien erforderlich sein, an denen sich noch keine Industrie direkt aktiv beteiligt. Die anwendungsnäheren Themen sollten unterschiedliche Grade der Industriebeteiligung erlauben, die den sehr unterschiedlichen Entwicklungsständen in der Quantenforschung Rechnung tragen.

#### Schaffung von Zentren für Quantentechnologien

Bestehende Forschungsaktivitäten können durch die Förderung von Zentren gebündelt und unterstützt werden. Initiativen für solche Zentren sollten zunächst als industrie- oder anwendungsnahe Konsortien starten, um sich bei entsprechendem Erfolg gegebenenfalls zu Zentren zu entwickeln. Solche Zentren erreichen durch das gemeinsame Auftreten der beteiligten Forschergruppen leichter die Industrie. Dies verbessert nicht nur die Berufsaussichten der Absolventen, sondern erleichtert auch die Annahme der Technologie durch die Industrie.

#### Sabbaticals für Fachkräfte

Ein flexibler, befristeter Austausch von Fachkräften aus Industrie und Forschung führt zu einer signifikanten Verbesserung des Kompetenzaustauschs. Sabbaticals fördern Durchlässigkeit, die in beide Richtungen genutzt werden kann. Industrievertreter können zeitlich begrenzt in Forschungseinrichtungen wechseln und Wissenschaftler in Industrieunternehmen.

#### Ausbildung

Quantentechnologien werden derzeit in der schulischen und in der fächerübergreifenden universitären Ausbildung nur unzureichend behandelt. Die Ingenieure in den relevanten Industrien sind bisher mit Quantentechnologien nur sehr wenig vertraut. Um die industrielle Anwendung zu fördern, sollen die Quantentechnologien in Zukunft verstärkt in die universitäre Ausbildung von Ingenieuren Eingang finden.

## KRISTALLINE SPIEGELTECHNIK

# »Man wird unserer Technologie auch im Alltag begegnen«

Das Unternehmen CMS stellt Spiegel mit einer kristallinen Schicht aus Halbleitern her – ursprünglich entwickelt, um Quanteneffekte nachzuweisen. Im Interview erklärt Geschäftsführer Christian Pawlu konkrete Anwendungsmöglichkeiten der Technik und die weiteren Pläne der Firma.



**CHRISTIAN PAWLU**, Geschäftsführer von Crystalline Mirror Solutions (CMS)

### An welchen Produkten und konkreten Anwendungen arbeitet CMS zurzeit?

Die kristallinen Superspiegel von CMS beinhalten eine Technologie, die viele Anwendungen ermöglicht. Zunächst waren die meisten unserer Kunden Universitäten aus der ganzen Welt, die unsere

Spiegel für Präzisionsinterferometrie und Spektroskopie nutzen. Das LIGO-Observatorium arbeitet mit uns an der nächsten Generation von Gravitationswellenmessungen und das Forschungsinstitut JILA/NIST in Boulder baut mit Technologie von CMS die genaueste Atomuhr. Nach und nach kamen immer mehr Industriekunden hinzu, die mit unseren Spiegeln beispielsweise Lösungen für das Wärmemanagement von Hochleistungslasern und Lösungen für Probleme in der Luftfahrt gefunden haben. In Kooperation mit der Christian-Doppler-Forschungsgesellschaft und der Universität Wien wollen wir unsere Anwendungen im mittleren Infrarot-Bereich ausbauen.

### Lassen sich Produkte schon im Alltag einsetzen?

Unserer Technologie werden künftig vermutlich auch Privatpersonen im Alltag begegnen, ohne es zu wissen. Wir werden zum Beispiel davon profitieren können, wenn Flugzeuge Navigationssysteme besitzen, die auf den Zentimeter genau messen, oder wenn wir Krankheitserreger oder andere Moleküle

in der Luft feststellen können. Ein großer Fortschritt wurde bereits in der Oktoberausgabe des Magazins „Science“ publiziert. Darin geht es um die Aufdeckung eines Zwischenprodukts der Kohlenmonoxid-Verbrennung mittels unserer Technologie. Dies kann uns helfen, Verbrennungsprozesse nicht nur besser zu verstehen, sondern diese auch besser zu kontrollieren und gegebenenfalls besser auf unsere Umwelt abzustimmen.

### Wie geht die Entwicklung bei CMS weiter?

CMS wurde 2013 gegründet. Wir haben inzwischen mehrere Produktions- und Entwicklungsstandorte in Österreich, den USA und der Schweiz. Nun steht die Weiterentwicklung unserer Produkte im Vordergrund. Viele Investitionen sind sehr kostenintensiv mit manchmal unsicheren Ergebnissen. Die Einschätzung des Risikos und der Mut, dieses Risiko einzugehen, sind unternehmerische Herausforderungen, die uns in der Vergangenheit beschäftigt haben, aber auch zukünftig Herausforderungen bleiben werden.

rade europaweit viele Programme, die sich damit beschäftigen“, berichtet Marquardt.

Ein weiteres, inzwischen weit vorangeschrittenes Einsatzfeld der Quantentechnologie ist die Entwicklung von Sensoren. Dazu zählt beispielsweise das Laserinterferometer, das bereits nah am Quantenlimit arbeitet. Mit seiner Hilfe konnte der Nachweis von Gravitationswellen erbracht werden. Die nächste Generation nutzt laut Marquardt bereits spezielles Quantenlicht. Diese Technik ist in der Nähe von Hannover zu bestaunen. Dort befindet sich mit GEO600 ein entsprechender Gravitationswellendetektor, der vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik gemeinsam mit der Leibniz Universität Hannover und weiteren Universitäten aus Großbritannien und Spanien betrieben wird.

Sensoren haben gerade in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Sie sind elementarer Bestandteil von Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. Da ist es kein Wunder, dass ein Unternehmen wie Bosch zusammen mit der Universität Stuttgart an dem Thema arbeitet. Interessante Einsatzfelder finden sich in der Automobilindustrie ebenso wie in der Medizinbranche. Noch ist man bei Bosch allerdings zurückhaltend, was die Erfolgsaussichten betrifft. „Wir sehen die Quantentechnologie als eine sehr interessante Möglichkeit in der Zukunft“, sagte Forschungschef Michael Bolle vor einigen Monaten im Deutschlandfunk. „Mit großen Chancen, aber auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dass es nicht erfolgreich wird.“

Mögliche Anwendungen liegen auch beim sogenannten Ghost Imaging noch in der Zukunft. Dabei wird eine

der erstaunlichsten Eigenschaften der Quantentechnologie genutzt – die Verschränkung. Miteinander verschränkte Teilchen besitzen identische Quantenzustände. Messungen an den beiden Teilen ergeben das gleiche Ergebnis, selbst wenn diese weit voneinander entfernt sind. Mithilfe miteinander verschränkter Photonenpaare lassen sich so Bilder von einem Objekt machen, obwohl die entsprechende Kamera das eigentliche Licht gar nicht aufnimmt. Heißt konkret: Ein Lichtteilchen wird auf das Objekt gelenkt, das andere auf den Kamerasensor. Da beide miteinander verschränkt sind, nutzt die Kamera das auf sie treffende Photon, um ein Bild von dem Objekt zu machen. Mit dieser Methode könnten zum Beispiel Aufnahmen von sehr empfindlichen biologischen Objekten gemacht werden. Eine weitere Anwendung wäre die Untersuchung von Computerchips.

Während man bei dieser Methode von der industriellen Nutzung noch entfernt ist, kann Crystalline Mirror Solutions (CMS) bereits konkrete Produkte vorweisen (siehe Interview). Das österreichische Unternehmen produziert kristalline Spiegel, die das thermische Rauschen um ein bis zwei Größenordnungen vermindern und „damit ein entscheidendes Problem der lasergestützten Hochpräzisionsmessung lösen“, wie Geschäftsführer Christian Pawlu erklärt. Das Unternehmen sei durch eine Kombination aus dem Know-how der Wiener Quantenoptik mit den Materialwissenschaften des Silicon Valley entstanden. Die beiden Gründer Garrett Cole und Prof. Markus Aspelmeyer forschten an der Universität Wien und suchten gemeinsam nach neuartigen Beschichtungen, die bei der Messung von Quanteneffekten weniger störanfällig als die bis dahin bekannten sein sollten. Die Spiegel kommen unter anderem bei der nächsten Generation der Gravitationsdetektoren zum Einsatz. Laut Pawlu kann die Technologie aber für viele weitere Messaufgaben genutzt werden – wie zum Beispiel in Navigationssystemen. Daneben lassen sich mithilfe der Spiegel die chemischen Prozesse bei der Verbrennung von Kohlenmonoxid besser analysieren. Die Messung sei damit um den Faktor 10 genauer als bei herkömmlich beschichteten Spiegeln. „Genaue Messungen sind die Basis für bessere Modelle zur Entstehung von Luftverschmutzung, effizientere Verbrennungsprozesse und von atmosphärisch-chemischen Reaktionen, die relevant für die Treibhausgasproduktion und den Klimawandel sind“, erklärt Pawlu.

## Von der Grundlagenforschung zu konkreten Anwendungen in der Praxis

Die beiden Gründer weisen gerne darauf hin, dass das Unternehmen aus der Grundlagenforschung geboren ist. „CMS ist ein Paradebeispiel für die Entstehung von Innovationen durch Grundlagenforschung mit Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie“, so Pawlu. Besonders wichtig sind seiner Meinung nach Kooperationen mit anderen Unternehmen und Institutionen. „Als kleines Unternehmen sind wir darauf angewiesen, Netzwerke zu bilden“, so der Geschäftsführer. „Wir haben Forschungs- und Entwicklungskollaborationen mit namhaften europäi-

schen und amerikanischen Firmen und diese Kollaborationen sind Teil unseres Geschäftsmodells.“

Den Weg aus den Forschungslabors zu finden, ist in Deutschland aber nach wie vor ein Problem. „Wir machen hierzulande eine tolle Grundlagenforschung“, sagt Marquardt. „Aber dann werden die Ergebnisse veröffentlicht, zur Seite gelegt und das Produkt entwickelt jemand anderes.“ Ebenso wie die mit einer Milliarde ausgestattete Flaggschiff-Initiative zur Quantenphysik der Europäischen Kommission soll die nationale QUTEGA-Initiative des Bundesforschungsministeriums dies ändern. „QUTEGA will Wissenschaftler dazu ermutigen, schon frühzeitig mit Unternehmen oder Instituten, die diese Technik bereits anwenden, zusammenzuarbeiten“, sagt Marquardt. Es wäre sehr hilfreich, wenn Grundlagenforscher und Industrie miteinander reden würden. „So erhält man als Forscher das Feedback, was gebraucht wird und wie man das zu einem Produkt macht.“ Umgekehrt erfahren die Firmen, was mithilfe der Quantenphysik möglich ist.

## Ingenieure sollten Basiskenntnisse der Quantentechnologie haben

Als Beispiel könnte die Firma ID Quantique dienen. Zwischen ihr und der Universität Genf gibt es einen regen Austausch. Die Hochschule hält auch Anteile an ID Quantique. Sie kümmert sich um die Grundlagenforschung, während das Unternehmen die konkreten Produkte entwickelt und sich um deren Vermarktung kümmert. In einer gemeinsamen Stellungnahme zu den Perspektiven der Quantentechnologie benennen auch die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech) und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Defizite bei der wirtschaftlichen Nutzung der Quantenphysik in Deutschland. Ein Problem ist demnach 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“, heißt es in dem Papier. Am Ende sprechen die Experten noch eine klare Empfehlung zur inhaltlichen Ergänzung der Ausbildung von Ingenieuren aus: „Bereits in der Grundausbildung sollte das Grundwissen über Quantenphänomene vermittelt werden – und zwar mit derselben Selbstverständlichkeit, mit der etwa das Wissen der Mechanik vermittelt wird.“ Es geht immerhin darum, international nicht den Anschluss bei dieser zukunftsreichen Technologie zu verlieren.

---

### MARKUS STREHLITZ

schreibt als freier Journalist hauptsächlich über Informationstechnologie.