

Leuchtendes Beispiel:  
Bei der Entwicklung  
von Quantencomputern  
nutzt das planqc-Team  
Laserlicht, um Atome  
einzufangen und zu  
manipulieren.



# RECHNEN MIT ATOMEN

TEXT: ROLAND WENGENMAYR

Sie sollen manche Rechnungen etwa beim Design von Windrädern und Flugzeugturbinen, in der Materialentwicklung oder der Klimaforschung einmal viel schneller ausführen als heutige Computer. Daher setzen unter anderem Microsoft, Google und IBM auf Quantencomputer. 2022 ist auch das Garching Start-up *planqc*, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik, in das Rennen eingestiegen – mit einem eigenen technischen Konzept. 2027 sollen die ersten Quantenrechner des Unternehmens betriebsbereit sein.

„Sehen Sie die Glaszelle?“, fragt Johannes Zeiher im Labor. Durch ein Labyrinth aus optischen Bauteilen, Geräten und Leitungen hindurch kann man eine kleine Quarzglaszelle erspähen. Wäre das Experiment in Betrieb, dann könnte man darin eine Wolke von im Vakuum schwebenden Metallatomen leuchten sehen. Die könnte künftig den Rechenkern eines Quantencomputers bilden und dabei recht ästhetisch anmuten. Derzeit sind verschiedene Techniken im Rennen, mit denen praktisch einsetzbare Quantencomputer manche Probleme künftig viel schneller knacken sollen als heu-

tige Rechner. Auf die Wölkchen gasförmiger Atome setzt das Start-up *planqc* – der Name ist ein Kunstwort aus „Planck“ und „Quantencomputer“. Johannes Zeiher ist Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und einer der Gründer von *planqc*, einer Ausgründung des Instituts.

Das Start-up richtet sich gerade in einem ehemaligen Baumarkt in Garching ein. Die Wahl sei auf diesen Ort wegen des besonders soliden Tiefgeschosses gefallen, erklärt Sebastian Blatt, Chefentwickler und ebenfalls Gründer von *planqc* sowie Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Quantenoptik: „So solide Keller baut man heute nicht mehr. Dieser bleibt auch im Sommer kühl, was bei den Stromkosten der Klimaanlage spart.“ Darin wird gerade renoviert und umgebaut. Gleichzeitig entsteht in einem Reinzelt ein Labor, vielmehr die Entwicklungs- und Produktionsstätte künftiger Quantencomputer. Dort befindet sich bereits ein optischer Tisch, der die Ausmaße einer Tischtennisplatte hat und auf dem optische

Apparaturen für den *planqc*-Rechner entwickelt und getestet werden. Darum herum sind sogenannte Racks angeordnet, technische Regale, wie man sie von Computerservern kennt. In ihnen stecken Laser sowie Test- und Messgeräte.

*Planqc* entwickelt aber nicht nur eine als vielversprechend geltende Technik für einen frei programmierbaren Quantencomputer, sondern auch Rechenverfahren – Quantenalgorithmen –, die dieser verarbeiten soll. Man kann sich einen Quantenalgorithmus als Analogon zur Software für herkömmliche klassische Computer vorstellen. Da Quantencomputer anders funktionieren als gängige Rechner, können sie möglicherweise einige spezielle Aufgaben schneller lösen. Sie werden klassische Rechner also nicht ersetzen, können sie aber bei manchen Aufgaben ergänzen. Derzeit gibt es allerdings nur wenige Rechenverfahren für Quantencomputer. Wie vielseitig diese sich einsetzen lassen werden, hängt also auch davon ab, welche Quantenalgorithmen Forschende noch aus- →

69

klügeln. Deshalb sei das Algorithmen-Team bei planqc wichtig, sagt Sebastian Blatt.

## Auf der Suche nach Algorithmen

Die Entwicklung der Algorithmen leitet Martin Kiffner, der von der Universität Oxford zur Firma stieß. „Er ist ein Experte für Quantenalgorithmen, zum Beispiel speziell für die Fluidodynamik“, erklärt Blatt. „Fluidodynamikrechnungen kommen praktisch überall vor. Das ist eines unserer wichtigsten Standbeine in der Algorithmenentwicklung.“ Mit der Fluidodynamik lassen sich etwa die höchst komplexen Luft- oder Wasserströmungen um Turbinenschaufeln berechnen, was auf Computern enorme Rechenleistungen erfordert, aber für die Entwicklung effizienter Generatoren und Triebwerke nötig ist. Hier könnten Quantencomputer künftig Vorteile bringen. Auch die Entwicklung von Materialien werden sie möglicher-

weise beschleunigen, vor allem wenn es um Materialien geht, auf deren Quanteneigenschaften es ankommt – zum Beispiel solche für extrem empfindliche Sensoren oder neuartige Halbleiterelektronik. Denn gerade Quantencomputer dürften Quanteneigenschaften besonders effizient simulieren. Darüber hinaus könnten sie komplizierte chemische Verbindungen, etwa neue medizinische Wirkstoffe, berechnen. Manche Fachleute setzen auch darauf, dass die Rechner Logistikrouten optimieren werden oder Muster im atmosphärischen Geschehen besser erkennen und so die Wetter- und Klimavorhersagen verfeinern. Diese Anwendungen existieren bislang allerdings lediglich als Konzepte, von denen aktuell noch nicht klar ist, ob sie sich verwirklichen lassen.

Deshalb diskutiert das planqc-Team auch mit Industrievertretern, bei welchen Aufgaben Quantencomputer ihren Geschwindigkeitsvorteil ausspielen könnten. „Solche Kontakte helfen uns, zu verstehen, welche Anwendungen von Quantencomputern für die Wirtschaft interessant sind“, sagt Blatt. Erfahrung beim Brückenschlag zwischen Quantenphysik und Wirtschaft bringt Alexander Glätzle mit, der Dritte im Gründungstrio und Geschäftsführer von planqc. Er kommt aus der theoretischen Quantenphysik, hat unter anderem an der Universität von Oxford geforscht und wechselte 2018 in die Wirtschaft, wo er als Berater in der Kommerzialisierung von Quantentechnologien arbeitete. Dass einerseits so große Hoffnungen in Quantencomputer gesetzt werden, ihre Einsatzmöglichkeiten andererseits aber erst noch erforscht werden müssen, liegt daran, wie sie zu ihrer Rechenkraft kommen (siehe *Max Planck Forschung* 2/2022 und *Techmax* 36). Die Technik des planqc-Rechners beruht darauf, dass sich vor allem Alkalimetallatome wie etwa Rubidium und Lithium sowie Erdalkalimetalle wie Strontium in einer geschickten Kombination aus Laserlicht und Magnetfeldern einfangen lassen.

Wenn Sebastian Blatt das Konzept vorstellt, stößt er gelegentlich auf Skepsis: „Das ist ja kein richtiger Compu-

Mittler zwischen Grundlagenforschung und kommerzieller Entwicklung: Alexander Glätzle, Johannes Zeiher und Sebastian Blatt (von links) bilden das Gründungsteam von planqc.



70

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Derzeit werden drei Techniken für frei programmierbare Quantencomputer entwickelt: supraleitende Schaltkreise, Ionen in Paul-Fallen und neutrale Atome in optischen Gittern. Auf Letztere setzt das Start-up planqc, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik.

Planqc plant, gemeinsam mit dem DLR beziehungsweise dem Leibniz-Rechenzentrum bis 2027 erste frei programmierbare Quantencomputer zu konstruieren und diese zu miniaturisieren. Dafür steht dem Unternehmen ein Kapital von 87 Millionen Euro zur Verfügung.

Bei welchen Berechnungen Quantencomputer schneller als klassische Rechner sind, wird derzeit erforscht. Aktuell werden Anwendungen in der Fluidodynamik, etwa zur Optimierung von Turbinen, in der Materialentwicklung und in der Klimaforschung untersucht.

ter, denn da gibt es ja gar keinen Chip“, bekomme er manchmal zu hören. Viele Gesprächspartner haben eine von der aktuellen Technik geprägte Vorstellung von Computerprozessoren. Dazu passen zwei Ansätze besser, die mit der planqc-Technik konkurrieren, weil es bei diesen echten Computerchips gibt. Einer dieser Ansätze nutzt als Qubits supraleitende Stromkreise, in denen also Strom bei sehr tiefen Temperaturen ohne Widerstand fließt. Daran forschen zum Beispiel IBM, Google oder das finnische Start-up IQM, das eine Niederlassung in München hat. In einem weiteren Konzept führen Ionen, sprich: elektrisch geladene Atome, die auf einem Chip in einem geschickt geformten elektrischen Feld, einer sogenannten Paul-Falle, gefangen werden, quantenlogische Operationen aus. Wie bei den elektrisch neutralen Atomen, mit denen planqc arbeitet, wer-

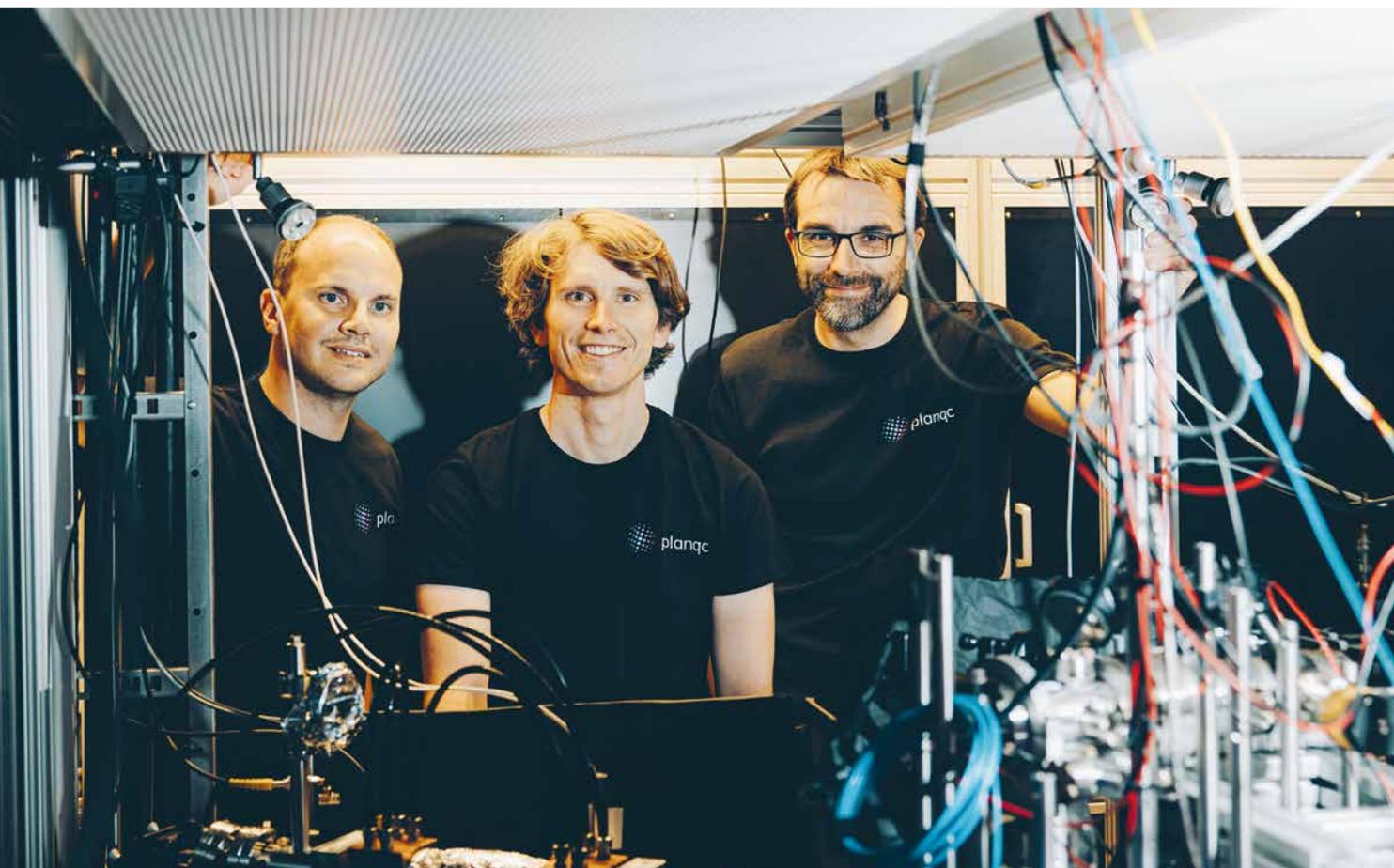


FOTO: PLANQC

den die ionischen Qubits mit Laserstrahlen angesteuert und manipuliert.

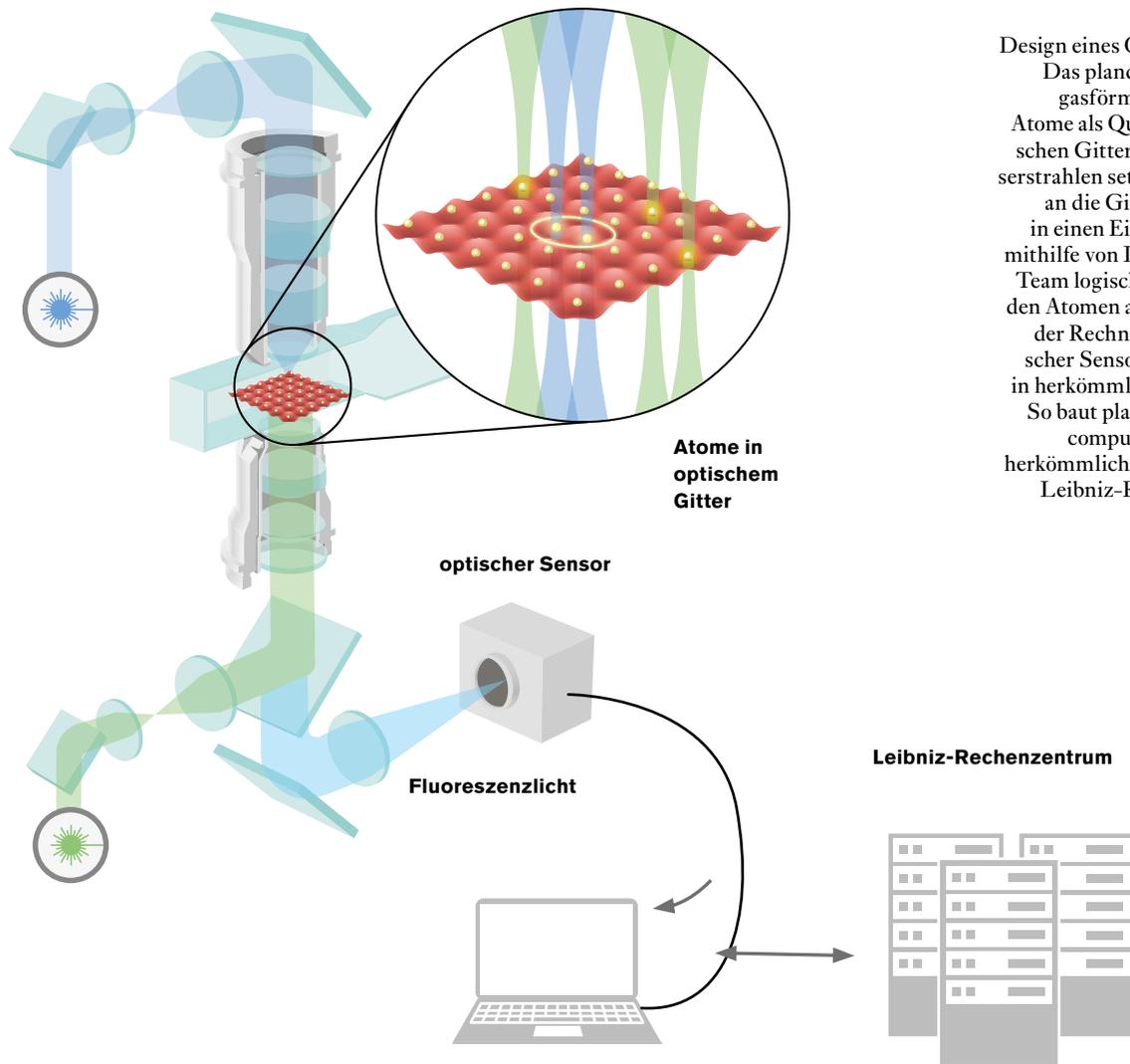
## Robuste Geräte nach Industrienormen

Von dem Ansatz, den planqc verfolgt, erhofft sich das Unternehmen, dass sich in den Lichtgittern vergleichsweise leicht eine größere Zahl von Atomen, sprich Qubits, zu einem Quantenprozessor vereinen lassen. Zur Entwicklung dieses Gebiets hat die langjährige Grundlagenforschung am Max-Planck-Institut für Quantenoptik beigetragen. Auf den Ergebnissen dieser Forschung aufbauend, wurde 2022 planqc gegründet. Johannes Zeiher, der weiterhin auch Grundlagenforschung betreibt, erklärt seine persönliche Motivation so: „Für mich ist klar, dass neutrale Atome eine vielver-

sprechende Technologie für Quantencomputer sind. Daher sollten wir erste Schritte gehen, um das Anwendungspotenzial solcher Maschinen zu untersuchen.“ Zudem bringe der intensive Austausch zwischen kommerzieller Entwicklung und Grundlagenforschung auch Letztere voran. „In der Grundlagenforschung entwickeln wir sozusagen Prototypen, die frei von kommerziellen Zwängen auf bestimmte Bereiche hin optimiert sind“, erklärt Zeiher. „Die bringen ab und zu Durchbrüche und eröffnen etwas ganz Neues.“ Auf der Basis dieser Erkenntnisse entwickelt planqc robuste kommerzielle Geräte, die auch alle Industrienormen erfüllen. Solche zuverlässigen Geräte hofft Zeiher später auch im Grundlagenlabor einsetzen zu können.

Planqc wächst im Quantenbiotop des Munich Quantum Valley heran. „Wir

sind die erste Ausgründung im Munich Quantum Valley“, sagt Sebastian Blatt. Als Vorzeigeprojekt wird planqc auch von der Bundesregierung gefördert, und zwar über eine Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, kurz DLR. Für das große Interesse an dem Garching Start-up sorgt auch das „Handlungskonzept Quantentechnologien“ der Bundesregierung. „Darin steht, dass man gerne bis Ende 2026 einen digitalen Quantencomputer mit hundert Quantenbits hätte“, sagt Blatt: „Und das einzige kommerzielle Projekt in Deutschland mit demselben Ziel ist eines, an dem wir zusammen mit dem DLR arbeiten.“ Dieses Projekt heißt DiNAQC, das Akronym steht für „Europas ersten Digitalen Neutral-Atom-Quantencomputer“. Für den Bau des Demonstrators mit zunächst hundert Quantenbits erhält planqc 30 Millionen Euro. Die →



**Design eines Quantenprozessors:**  
Das planqc-Team verwendet gasförmige, aber sehr kalte Atome als Qubits. In einem optischen Gitter aus gekreuzten Laserstrahlen setzen sich die Atome an die Gitterpunkte wie Eier in einen Eierkarton. Ebenfalls mithilfe von Laserlicht führt das Team logische Operationen mit den Atomen aus. Die Ergebnisse der Rechnungen liest ein optischer Sensor aus und speist sie in herkömmliche Elektronik ein. So baut planqc einen Quantencomputer als Koprozessor herkömmlicher Großrechner am Leibniz-Rechenzentrum auf.

GRAFIK: GCO NACH MPQ

72

Apparatur soll im Frühjahr 2027 beim DLR in Ulm in Betrieb gehen, also kaum später, als es das sehr ambitionierte politische Handlungskonzept vorsieht. An diesem Quantencomputer sollen erste Quantenalgorithmen für praktische Anwendungen ausprobiert werden. „Wir machen dort auch die ersten Schritte in Richtung Quantenfehlerkorrektur“, erläutert Blatt.

## Miniaturisierte Quantenrechner

Ein Korrekturmechanismus ist beim Quantenrechnen nötig, da Quanteninformation extrem empfindlich gegen kleinste Störungen ist. Sie muss aufwendig stabilisiert und auf Fehler geprüft werden. Zur Stabilisierung dient der Trick, jeweils mehrere physikalische Qubits, bei planqc sind es

die Atome, zu logischen Qubits zusammenzufassen. Passiert ein Fehler in einem physikalischen Qubit, kann die Quantenrechnung trotzdem weiterlaufen. Zur Fehlerkorrektur führt man Hilfsqubits ein, die als Sensoren für Störungen dienen – wie Kanarienvögel im Bergwerk. Solange eine Quantenrechnung läuft, dürfen die beteiligten logischen Qubits nämlich nicht auf Fehler überprüft werden, sonst bricht die Rechnung ab. Dank der Fehlermeldungen der Hilfsqubits kann das Resultat jedoch hinterher korrigiert werden. So benötigt ein Quantencomputer letztlich Zigtausende oder sogar Millionen von physikalischen Qubits.

Bislang füllt die Technik mit den optischen Geräten und Vakuumkammern, die ein planqc-Rechner benötigt, ganze Labore. Miniaturisierung ist deshalb ein Ziel des zweiten

Großprojekts von planqc, das vom Bundesforschungsministerium mit 20 Millionen Euro gefördert wird. Darin baut das Start-up gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik am Leibniz-Rechenzentrum in Garching bis Ende 2027 ein Gerät namens MAQCS, kurz für „Multikern Atomare Quantencomputing Systeme“. Dieser Rechner soll schon tausend Neutralatome als Quantenbits besitzen und gewissermaßen als Koprozessor in den dortigen konventionellen Großcomputer integriert werden, und zwar platzsparend in kompakte Racks. „Wir wollen auch die Vakuumkammer mit den Atomen in solch ein Rack hineinbringen“, erklärt Blatt: „Wir machen hier Ingenieursarbeit!“ Entsprechend benötigt planqc auch Ingenieure. „Die Firma muss jetzt wachsen, um die Projekte zeitgerecht zu schaffen.“ Da trifft es sich gut, dass das Start-up, das

aktuell insgesamt rund fünfzig Mitarbeitende hat, im Sommer 2024 weitere Millionen Euro an privatem Risikokapital eingeworben hat. So kommt es aktuell auf eine Finanzierung von 87 Millionen Euro – die Anteile an den beiden Großprojekten eingerechnet.

Ob letztlich die neutralen Atome in optischen Gittern, supraleitende Schaltkreise oder aber Ionen in Paul-Fallen das Rennen um einen praktisch einsetzbaren Quantencomputer machen werden, ist derzeit noch offen. Das meint auch Piet Schmidt von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig. Dort entwickelt der Physikprofessor extrem präzise optische Atomuhren, welche ebenfalls auf Ionen in Paul-Fallen basieren. „Technologisch teilen wir mit dem Quantencomputer dieselbe Plattform“, erklärt Schmidt, Er ist Mitgründer des deutschen Start-ups Qudora, das kommerzielle Quantencomputer auf Basis von Ionen in Paul-Fallen entwickelt – ein Konkurrent von planqc also. Von den Fortschritten bei den Neutralatomen ist Piet Schmidt beeindruckt, er meint aber auch: „Das wird sich verlangsamen, die profitieren jetzt von bereits in den anderen Gebieten entwickelten Technologien.“

Angesichts des Ziels, viele Tausend, Zehntausend und mehr Qubits zu kontrollieren, sieht er noch enorme technische Herausforderungen bei allen drei Techniken. Bei den supraleitenden Qubits liegt ein ungelöstes Problem darin, dass die Schaltkreise extrem viele Kabel benötigen, die gute Wärmeleiter sind. Diese transportieren Wärme aus der Umgebung in den Kryostaten, der als Hightech-Thermoskanne den supraleitenden Chip kühlen soll. Wie trotzdem eine große Zahl von Qubits gekühlt werden kann, ist noch unklar. Hinzu kommen Probleme, aus dem supraleitenden Material, derzeit Aluminium, möglichst gleichartige Schaltkreise zu fabrizieren. Damit sich Ionen für Quantenrechnungen nutzen lassen, müsste nach Schmidts Ansicht die Miniaturisierung noch Fortschritte machen. Bislang können nämlich nicht genug optische und elektronische Komponenten in die Fallenchips integriert werden. Auch gelingt es bislang nicht, viele Ionen in einer Falle zu fangen. Mehrere Fallenchips zu koppeln, könnte hier ein Ausweg sein. Bei den Neutralatomen in optischen Gittern sieht Schmidt eine Hürde, die nach einem technischen Detail klingt, aber trotzdem noch genommen werden muss: Die Hilfsqubits müssen sich

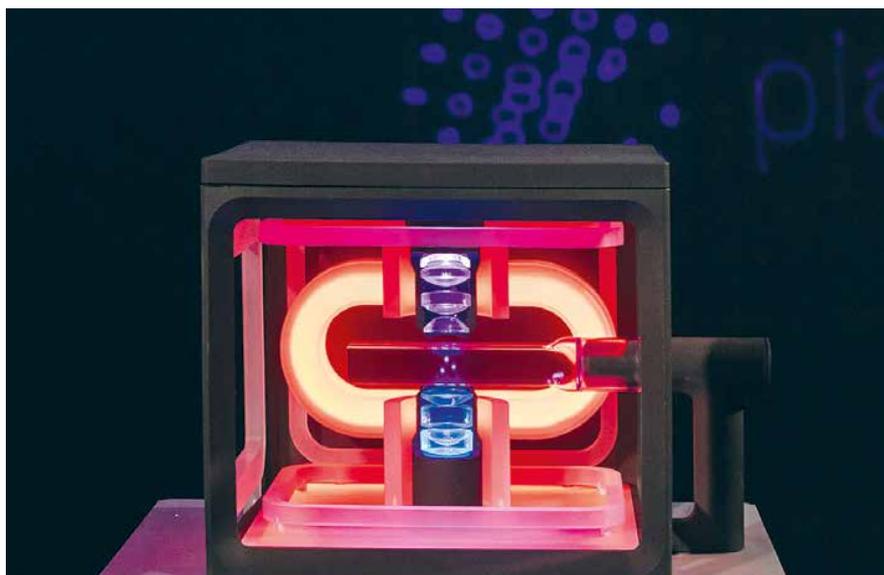
während der Rechnung noch schneller auslesen lassen, um die Fehlerkorrektur zu ermöglichen.

Und die Zukunftsaussichten? Piet Schmidt macht sich, so wie viele Forschende, Sorgen wegen des Hypes um den Quantencomputer. Der hat in Politik und Wirtschaft sehr hohe Erwartungen geweckt. Eine langfristige Förderpolitik muss Start-ups jedoch genug Zeit einräumen, damit sie Quantencomputer Schritt für Schritt kommerzialisieren können. „Ich war allerdings kürzlich bei Kollegen in den USA, in Harvard und am MIT, die zum Teil auch ihre eigenen Start-ups haben“, sagt er: „Die sind angesichts der derzeitigen Fortschritte sehr optimistisch.“ Planqc platziert seine Technik jedenfalls schon am Markt: „Natürlich kann jeder bei uns einen Quantencomputer kaufen“, betont Sebastian Blatt. Von einer Massenproduktion sei das Unternehmen jedoch noch weit entfernt, allein schon deshalb, weil die Computer von Stück zu Stück noch weiterentwickelt werden. „Sobald wir eines Tages einen Computer gebaut haben, den die Kunden in großer Stückzahl haben möchten“, sagt Sebastian Blatt, „würde planqc natürlich auch den Schritt zur Massenproduktion gehen.“ ←

73

Vorzeigeapparatur: Bei der Eröffnung des Firmensitzes 2024 präsentierte planqc das Design einer Glaszelle. Diese soll den Kern eines Quantenrechners bilden, in dem künftig viele Atome kontrolliert werden.

FOTO: PLANQC



## GLOSSAR

### OPTISCHES GITTER

Es wird durch kreuzweise überlagerte Laserstrahlen erzeugt. Deren Wellen überlagern sich so, dass das elektromagnetische Feld an den Gitterpunkten elektrisch neutrale Atome fixieren kann.

### PAUL-FALLE

heißt eine Anordnung von Elektroden, deren elektrische Felder so kombiniert werden, dass sie Ionen einfangen.

### SUPRALEITENDE SCHALTKREISE

werden aus einem widerstandslosen Leiter konstruiert und eignen sich wegen ihrer Quanteneigenschaften als Qubits.