



## **Ausgangssituation und strategische Herausforderungen**

Quantentechnologien werden aufgrund ihres großen Disruptionspotentials tiefgreifende Auswirkungen auf Industrie und Gesellschaft entwickeln und gleichzeitig eine erhebliche Bedeutung für unsere zukünftige technologische Souveränität haben. Das Feld steht nun an der Schwelle zur Kommerzialisierung und die hohe Dichte an kooperierenden Forschungsinstitutionen mit herausragender Expertise verspricht dem Land Niedersachsen einen einzigartigen Wettbewerbsvorteil. Aus diesem Grund starten das Ministerium für Wissenschaft und Kultur, die VolkswagenStiftung und führende Forschungseinrichtungen in der Region Hannover-Braunschweig die Quantum Valley Lower Saxony (QVLS) Initiative, eine umfassende Zusammenführung der niedersächsischen Kompetenzen für internationale Sichtbarkeit und lokale Wertschöpfung.

Die über die letzten 10 Jahre etablierte niedersächsische Weltspitzen-Expertise in der Quantentechnologie wird in einem Verbund mit Ingenieuren und der Industrie gebündelt, der die gesamte Wertschöpfungskette für den Bau eines Ionen-basierten Quantencomputers umfasst. Mit der Realisierung der Initiative soll die Lücke zwischen fundamentaler Quantenphysik und kommerzieller Nutzung geschlossen werden: Der Fokus liegt hierbei auf Kooperationen mit der Wirtschaft und der Vernetzung mit deutschen, europäischen und internationalen Industriepartnern, um die Erschließung neuer Märkte zu unterstützen.

## **Quantentechnologien in der Region Hannover-Braunschweig: unsere Stärken**

Die QVLS Initiative stützt sich auf die deutschland- und sogar weltweit einzigartigen Stärken ihrer Gründungspartner. In der Region Hannover-Braunschweig wurden in den letzten 10 Jahren mehr als 220 Mio. Euro in den Aufbau und Betrieb von state-of-the-art Forschungslaboren sowie die Einstellung und Ausbildung wissenschaftlicher Exzellenz in Quantentechnologien investiert. Über 400 ForscherInnen arbeiten an der Leibniz Universität Hannover (LUH), der TU Braunschweig (TUBS), der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) in diesem Bereich und an den dafür notwendigen Schlüsseltechnologien.

Die LUH hat einen strategischen Forschungsschwerpunkt im Bereich der Quanten- und Gravitationsphysik, der sich u.a. darin manifestiert, dass die LUH im Förderatlas der DFG deutschlandweit die Spitzenposition in diesem Themenbereich einnimmt. Die Entdeckung von Gravitationswellen der LIGO Kollaboration (Nobelpreis 2017) wurde mit Hannoveraner Lasertechnologie erzielt. Neue Rekorde in der Erzeugung von nichtklassischem Licht und der Laserstabilisierung lassen einen weiteren Sprung in der Nachweisempfindlichkeit in naher Zukunft erwarten. Im Bereich der Quantenoptik mit kalten Atomen ist Hannover deutschlandweit führend im Bereich von

transportablen Chip-basierten Beschleunigungssensoren basierend auf Quantenmaterie. Kürzlich wurde unter Hannoveraner Führung die ersten Interferometrie-Experimente mit Quantenmaterie im Weltraum durchgeführt. Diese Expertise wird in Zusammenarbeit mit der NASA für ein neues Labor für Quantenmaterie auf der Internationalen Raumstation ISS genutzt. Spezielle quantenmechanisch verschränkte Zustände werden erzeugt und eingesetzt, um Messungen jenseits des klassisch möglichen zu realisieren. Aufbauend auf dieser Expertise ist es jüngst in einer einzigartigen Kollaboration zwischen experimentellen und theoretischen Gruppen und der PTB gelungen die fundamentalen Funktionsblöcke eines Quantencomputers basierend auf gefangenen Ionen zu demonstrieren. Dabei wurden Fehlerraten erreicht, die zur Weltspitze gehören.

Die TUBS hat herausragende Expertise in der Nano- und Halbleitertechnologie. Deutschlandweit einzigartig arbeiten Physiker und Elektrotechniker innerhalb einer Fakultät zusammen und decken von der Simulation und Materialherstellung über die Chip-Prozessierung bis zum Modulaufbau und der Systemintegration alle Aspekte einer mikroelektronischen und nanophotonischen Entwicklungslinie ab. Erstmals konnten hierdurch z.B. nanoLED-Arrays verfügbar gemacht werden, die mittlerweile in vielen Bereichen der Umweltmesstechnik z.B. für energieeffiziente NOx- oder Nanopartikel-Sensorik oder auch in der Medizintechnik für superkompakte Mikroskope für die biomedizinische Forschung neue Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen. Expertise in der Entwicklung höchst-empfindlicher Elektronik führte zu Systemen, die kleinste Signale messen, so z.B. die Abstrahlung von Mikroprozessoren oder elektrische Signale des Gehirns für tragbare EKG-Systeme. Die TUBS zeichnet darüber hinaus eine enge Anbindung zu eigenen Startups sowie zu deutschen, weltweit tätigen Unternehmen der Halbleiter-Industrie aus, die sich in strategische Kooperationen und gemeinsam betriebenen Laboren niederschlägt. Dies wird es zukünftig ermöglichen, Quantentechnologie mit Methoden der Mikroelektronik und der CMOS-Technologie zu verbinden.

Die PTB als weltweit zweitgrößtes nationales Metrologie-Institut arbeitet seit über hundert Jahren im Bereich der Quantenforschung und hat dementsprechende Kompetenzen auf diesem Gebiet, die weit über die reine metrologische Beauftragung hinaus reichen. So betreibt die PTB weltweit die erste transportable optische Uhr, die längste Glasfaserstrecke der Welt zum Vergleich optischer Uhren über lange Distanzen, und hat zusammen mit Forschern aus den USA den aktuell besten Laser für optische Uhren entwickelt. Ein gemeinsames Projekt mit der Industrie hat zum ersten kommerziellen Demonstrator einer optischen Uhr geführt. Weiterhin ist die PTB führend auf dem Gebiet der elektrischen Quantenmetrologie und der Magnetfeldsensorik mit Quantenschaltkreisen. Im Jahr 2019 wurde diese Expertise im Kompetenzzentrum für Quantentechnologien gebündelt, das die dort bereits seit Jahrzehnten entwickelte Quantentechnologie für externe Nutzer zur Verfügung stellt.

## **Bisherige Kooperationen im Forschungsverbund Hannover-Braunschweig**

Die genannten Partner haben gemeinsam bereits zwei erfolgreiche Exzellenzcluster eingeworben: QuantumFrontiers und PhoenixD. Die Projekte befassen sich mit Quantenmetrologie bzw. den modernsten Produktionsmethoden in optischen Technologien.

Das mit 45 Mio. Euro geförderte QuantumFrontiers treibt Forschung an den Grenzen des Messbaren zu immer höherer Präzision. Genaueres Messen bedeutet einerseits einen immer besseren Einblick in die Gültigkeit unserer Naturgesetze und führt gleichzeitig zu immer besseren Sensoren und Kontrolle über Quantenzustände, was für den Bau eines Quantencomputers eine zentrale Rolle spielt. So konnten z.B. bahnbrechende Beiträge zur Entdeckung von Gravitationswellen geleistet werden, die nur durch Präzisionsmessungen von Raum und Zeit möglich wurde.

PhoenixD widmet sich photonischen Technologien und entwickelt hierzu die Fabrik der Zukunft. Ähnlich wie in der Mikroelektronik-Fertigung sollen standardisierte Technologien für die Massenfertigung nanophotonischer Komponenten entwickelt werden. Die Fusion von Quantenphysik, Mikroelektronik und Nanophotonik ist eine Grundvoraussetzung für die Realisierung eines skalierbaren und bezahlbaren Quantencomputers.

Drei jüngst eröffnete Forschungsbauten (HITec, LENA, LNQE) im Wert von 84 Mio. Euro sind direkt den Nano- und Quantentechnologien gewidmet. Als Teil des regionalen Forschungssystems tragen diese zu einer hervorragenden Infrastruktur für die Herstellung und die Analyse kleinster Strukturen bei. In HITec steht ein einzigartiger Fallturm für Präzisionsexperimente unter "zero-g", d.h. ohne Einfluss der Erdanziehung, zur Verfügung.

Neue Reinraum-Labore für Halbleiter- und Nanotechnologie an allen drei Einrichtungen bilden eine herausragende Infrastruktur und ermöglichen den Einsatz von Mikroelektronik-Produktionsprozessen, Atom- und patentierte Ionenfallenchips in Kleinserie. Ergänzt durch gemeinsame Son-

derforschungsbereiche, Graduiertenkollegs, nationale und internationale Verbundprojekte sowie Public-Private-Partnership-Forschung bietet das QVLS eine herausragende Wissenschafts- und Technologiedichte in den Quantentechnologien.

Das QVLS ist aufgrund seiner langjährigen herausragenden Expertise, der gelebten Kooperation zwischen theoretischer und experimenteller Physik und Ingenieurwissenschaften, den belegbaren Vorarbeiten sowie der kontinuierlichen Unterstützung durch das Land Niedersachsen auf allen Ebenen der ideale Partner für den Bau eines Ionen-basierten Quantencomputers.

## **Im Fokus: Ionen-basiertes Quantencomputing**

Einer der jüngst erreichten wissenschaftlichen Durchbrüche ist für das QVLS von besonderer Bedeutung: die Entwicklung einer skalierbaren Technologie für das Quantencomputing bei Raumtemperatur und mit geringer Fehlerrate auf der Basis von gefangenen Ionen. Diese Ionenfallentechnologie wird derzeit als einer der vielversprechendsten Ansätze für skalierbare Quantencomputer angesehen.

Arrays von Ionenfallen stellen aktuell die einzige Technologie dar, die Quantenprozessoren für den Raumtemperatur-Betrieb möglich macht. Alle anderen weit entwickelte Technologie-Ansätze beruhen auf ultra-kalten Temperaturen und fragilen Quantenzuständen, die enorm aufwändige Kühlsysteme erfordern. Die Stabilität von Quantenzuständen isolierter Ionen dagegen ist viele Zehnerpotenzen besser im Vergleich zu alternativen Technologien. Gepaart mit den extrem geringen demonstrierten Fehlerraten kann mit diesem System die Grundvoraussetzung für die Realisierung eines programmierbaren, fehlertoleranten Quantencomputers realisiert werden. Genau in diesem Punkt – der Fehlerwahrscheinlichkeit – konnten weltweit beste Ergebnisse im QVLS Verbund erreicht werden. Mit Blick auf die verfügbare Infrastruktur und die vorliegende Expertise bietet das QVLS die mit Abstand besten Voraussetzungen in Deutschland, um einen Ionenfallen-Quantencomputer zu bauen und weiter zu entwickeln.

Das QVLS wird die einzigartige Ausgangssituation nutzen und einen ersten Quantenprozessor mit 50 Qubits nahe der Fehlertoleranz entwickeln. Ein Quantenrechner mit 50 Qubits kann schon erste fundamentale Rechnungen vollziehen, wird aber vor allem erst einmal als Testmaschine dienen. Dabei sind 50 Qubits mit kleiner Fehlerrate schon wesentlich leistungstärker als 1000 Qubits mit einer hundertfach höheren Fehlerquote. Eine weitere Skalierung über 50 Qubits hinaus würde Investitionen im Bereich mehrerer 100 Mio. Euro voraussetzen. Das QVLS möchte hierfür die notwendigen skalierbaren Basistechnologien entwickeln und erste Schritte gehen.

## **Chancen für die regionale und bundesweite Wertschöpfung**

Die größte und weltweit bisher ungelöste Herausforderung ist die Skalierung jeglicher Ansätze bis hin zur Kommerzialisierung. Eine große Stärke des QVLS Konsortiums ist genau der Übergang von grundlegenden theoretischen und experimentellen physikalischen Forschungsarbeiten hin zu ingenieursartiger Herangehensweise. Das Konsortium deckt somit die vollständige Wertschöpfungskette von der Halbleitertechnologie über die Lasertechnologie und integrierte Photonik bis hin zu Programmierung von Quantenalgorithmen und Software für den Bereich Künstliche Intelligenz und Deep Learning ab.

Die Basistechnologien für Ionenfallen-Quantenprozessoren in Forschungslaboren erzeugen noch keine Arbeitsplätze und sichern deshalb auch noch keine technologische Souveränität. Hierzu muss ein effizienter Transfer von Technologien und Know-How in die regionale und nationale Wirtschaft vorangetrieben werden. Außerdem müssen Herstellungsprozesse und Standardisierung in enger Kooperation mit der Industrie eingeführt werden, die eine kostengünstige und hoch-integrierte Produktion aller notwendigen Komponenten erlauben.

Hierzu ist die Region bestens gerüstet und hat bereits Erfolgsgeschichten geliefert: In der Entwicklung einer integrierten Elektronik-Plattform und einer integrierten Photonik-Plattform bestehen z. B. engste strategische Beziehungen zu Infineon und Osram Opto Semiconductors, zwei der weltweit größten Unternehmen in ihrem Bereich. Diese Firmen wären u.a. geeignete Partner für die Entwicklung eines Ionenbasierten Quantencomputers QVLS-Q2 mit tausend und mehr Qubits. Kombiniert mit der Spezial-Expertise von Startups, den vorliegenden Vorarbeiten und in QVLS-Q1 entwickelten Design-Plänen könnte ein solcher Schritt über die 50-Qubit-Grenze hinweg schon sehr zeitnah angegangen werden. Basierend auf der strategischen Roadmap des QVLS wären Investitionen in Höhe von bis zu 450 Mio. Euro für den Bau eines kommerziellen skalierbaren,

hoch-integrierten Ionenfallen-Quantencomputers nötig. Die Pläne enthalten die Weiterentwicklung der Ionenfallen-Technologie, Photonik-Plattformen, Mikroelektronik Integration, Quantenalgorithmen, Software, Spin-Off-Technologien, Startup-Förderung, Quantum Education sowie einen Forschungsneubau im Wert von 100 Mio. Euro.

Diese Investition könnte die langfristige technologische Souveränität im Bereich Quantencomputing und darauf aufbauend auch in der Datensicherheit, künstlichen Intelligenz, der Entwicklung neuartiger Wirkstoffe, dem autonomen Fahren bzw. autonomen Maschinen sichern. Darüber hinaus werden viele der zu entwickelnden Technologien zu Spin-Offs mit Anwendungen in der Umweltmesstechnik, der Medizintechnik und der Lasertechnologie führen. Der langfristige Hebeleffekt für die deutsche Volkswirtschaft wäre enorm groß. Umgekehrt würde ein Verlust technologischer Souveränität im Bereich Quantentechnologien langfristig die technologische Abhängigkeit in so sensiblen Bereichen wie der Kryptographie und der künstlichen Intelligenz zementieren.

Bezüglich des Transfers in die Wirtschaft bietet Niedersachsen ebenfalls einzigartige Chancen. Die Partner im QVLS haben eine lange Tradition in der Unterstützung von Ausgründungen. Ein bemerkenswertes Beispiel für den Transfer von Metrologie in die Industrie ist die GOM GmbH, ehemals Gesellschaft für optische Messtechnik GmbH, eine Ausgründung der TU Braunschweig und mittlerweile ein Global Player. Die 3D-Präzisionsmesstechnik von GOM wird in Branchen wie der Automobil, Luft- und Raumfahrt, Energie und Konsumgüter-Industrie eingesetzt. Im Jahr 2019 wurde GOM, Braunschweig, mit einem Umsatz von 150 Mio. Euro und ca. 500 Mitarbeitern ein Teil der Zeiss-Gruppe und bildet heute das "Center of Excellence" der Firmengruppe für optische Messtechnik. Jüngst erfolgte Ausgründungen befinden sich dagegen noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung. So widmet sich die QubeDot GmbH, Braunschweig, der Vermarktung einer integrierten Photonik-Plattform für Anwendungen in den Lebenswissenschaften. Die Agile Optic GmbH, Braunschweig, eine Ausgründung der PTB, bietet Speziallösungen im Bereich Lasertechnologie an. Die Capical GmbH entwickelt hochempfindliche Elektronik für die Medizintechnik.

Nicht nur Startups werden im QVLS-Umfeld eine hervorragende Entwicklungsperspektive haben. Im Rahmen der QVLS-Initiative soll deshalb ein One-Stop-Shop für die Kooperation mit Unternehmen kreiert werden, der Technologietransfer, Public-Private-Partnerships, direkte Risiko-Investitionen und weitere Startup Förderungen insbesondere im Bereich Quantencomputing ermöglicht.

## Ausblick

Um die genannten Chancen zu ergreifen, müssen Technologien über die „Todeszone“ zwischen Grundlagenforschung und Produkt hinweg entwickelt werden. Die Kosten für derartige technologische Entwicklungen steigen bekanntermaßen exponentiell mit höherem Technology-Readiness-Levels (TRL) und sind nur in enger Zusammenarbeit mit kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) und der Konzernforschung großer Unternehmen zu erreichen. Auf Grund der hervorragenden Ausgangssituation kann jedoch gerade innerhalb des QVLS eine sehr hohe Hebelwirkung durch zusätzliche Förderung und damit eine sehr kluge Allokation von Ressourcen erreicht werden.

Der Bau eines Quantencomputers auf Ionenbasis sollte unbedingt zentral und von einer Stelle mit herausragender Expertise koordiniert werden. Ein Partner wie das QVLS mit seiner starken nationalen und internationalen Vernetzung sowohl mit Forschungseinrichtungen als auch mit der Industrie kann alle relevante Stakeholder in einen derartigen Prozess integrieren. Im Schulterschluss mit deutschen Unternehmen würden Projekte gestartet werden, die entsprechend einem Moonshot-Programm alle Aspekte der Herstellung eines kommerziellen Ionenfallen-Quantencomputers bei Raumtemperatur inklusive Hardware und Software abdecken. Ähnlich zur Struktur vorangegangener strategischer Programme könnte dies z.B. Teil einer umfassenden Förderung "Quantentechnologien 2030 - Partnerschaft für Innovation" im Rahmen des Konjunkturpakets 3 sein.