

DIGITALE WELT

SCIENCE MEETS INDUSTRY

Ausgabe 2 • April • Mai • Juni • 2021

Quantum Computing

Wie jetzt der Aufbruch in ein neues Zeitalter beginnt

Hardware

1121 Qubits und mehr

Cloud Services

AWS & Co. – Wo Quantum Computing heute schon möglich ist

Anwendungen

Wie ein Quantenvorteil entsteht

WEGWEISER QC

Eine Bestandsaufnahme über Potential und offene Fragen

Google Quantum AI über Anwendungen auf einem fehlerkorrigierenden QC im nächsten Jahrzehnt

Dr. Markus Hoffmann





BECOME
QUANTUM
READY!

Kooperationsmöglichkeit mit dem QAR-Lab

Nutzen Sie die Expertise des QAR-Labs, um sich im internationalen Wettbewerb rechtzeitig Wissen über Quantencomputing anzueignen. In einer Kooperation mit dem QAR-Lab werden Sie von Anfang an kompetent unterstützt. Wir gehen mit Ihnen die ersten Schritte oder begleiten Sie den ganzen Weg.

Unsere Experten wissen, welche Quantenhardware für welche Herausforderungen in einem Betrieb am geeignetsten sind.

Unser Ziel

- 
Schwere Anwendungsfälle
 Die Lösung mit heutigen Techniken braucht viel Rechenzeit oder geht gar nicht.
- 
Wichtige Anwendungsfälle
 Eine bessere/ schnellere Lösung hat einen großen Effekt, bspw. bei der Einsparung von Kosten oder der Verbesserung der Organisation.
- 
Passende Anwendungsfälle
 Es gibt ein (prospektives) Lösungsverfahren incl. QC-HW, das einen Vorteil bringt.
- 
Frühe Anwendungsfälle
 Eine QC-basierte Lösung ist relativ bald (schon mit NISQ?) umsetzbar.

Kontaktieren Sie uns: www.qar-lab.de

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien
 Leitung QAR-Lab
 Ludwig-Maximilians-Universität München
 Oettingenstr. 67
 80538 München
 Telefon: +49 89 2180-9153
 E-Mail: qar-lab@mobile.ifi.lmu.de

Das QAR-Lab

Das Quantum Applications and Research Laboratory (kurz QAR-Lab) – im Jahr 2016 von der Informatik-Professorin Dr. Claudia Linnhoff-Popien der LMU München gegründet – hat die Mission, die Technologie des Quantencomputings (QC) einem breiten Nutzerkreis in Forschung und Wirtschaft zugänglich zu machen. Bereits 2019 wurde das QAR-Lab im Ranking als eine der „World's Top 12“ Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet des Quantencomputings durch „The Quantum Daily“ international bekannt.

Unsere Schwerpunkte

Als Gründungsmitglied des europaweit einzigartigen Leuchtturmprojekts PlanQK („Plattform und Ökosystem für quantenunterstützte KI“) leistet das Lab Pionierarbeit dabei, die Quantencomputing-Technologie auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz zu nutzen.

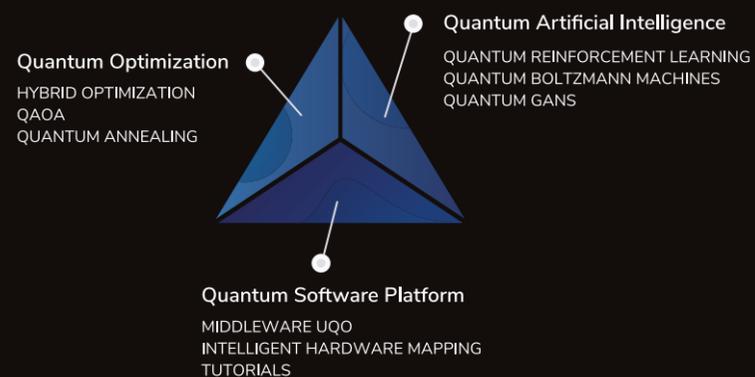
Das QAR-Lab hat – in Deutschland einzigartig – Zugang zu vier unterschiedlichen Quantencomputern und kann daher vergleichende Bewertung geeigneter Algorithmen durchführen.

Die Experten des QAR-Labs beschäftigen sich neben der Grundlagenforschung mit der Nutzung der Technologie für praxisnahe Anwendungen. Sie setzen auf Pilotprojekte für neue Technologien im Bereich QC und arbeiten an der Umsetzung von quantenunterstützten KI-Algorithmen für industrielle Use Cases im Rahmen von Forschungs Kooperationen mit großen Industriepartnern, die die Technologie erproben wollen.

Das QAR-Lab der LMU baut ein bayerisches Ökosystem für Anwenderkompetenz auf und stärkt den Standort München auf der deutschen Quantencomputing-Landkarte.

Finanziell gefördert wird das Lab seit 2019 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und seit 2020 vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi).

Unsere Forschungsschwerpunkte



DIGITALE WELT AUSGABE 2 | 2021

INHALT

EDITORIAL

- 4 Wann hat meine Firma einen Quantenvorteil?**
 Claudia Linnhoff-Popien
 LMU München

ZUM GELEIT

- 6 Die wundersame Welt der Quantencomputer: ein Wegweiser**
 Niko Mohr, Ivan Ostojic, Anna Heid,
 Lorenzo Pautasso, Matteo Biondi
 McKinsey & Company

SOFTWARE & ANWENDUNGEN

- 10 The quantum speedup will allow completely new applications**
 Markus Hoffmann
 Google
- 14 Cloud based QC with Amazon Braket**
 Constantin Gonzalez
 Amazon
- 18 Wie gelingt meinem Unternehmen der Einstieg ins Quantencomputing?**
 Jonas Stein, Lothar Borrmann, Sebastian Feld,
 Thomas Gabor, Christoph Roch, Leo Sünkel,
 Sebastian Zielinski, Claudia Linnhoff-Popien
 QAR-Lab, LMU München
- 24 Wissenschaft und Wirtschaft auf dem Weg in die digitale Zukunft**
 Horst Weiß
 BASF
- 30 Wenn nicht jetzt, wann dann?**
 Frank Leymann
 Universität Stuttgart
- 34 Quantencomputing in der Automobilindustrie**
 Florian Neukart
 Volkswagen
- 38 Quantum Computing: Towards Industry Reference Problems**
 Andre Luckow, Johannes Klepsch and Josef Pichlmeier
 BMW Group
- 46 Azure Quantum – Das Full-Stack-Ökosystem für Anwendungen auf Quantencomputern**
 Patrick Schidler
 Microsoft
- 52 QC aus Anwendersicht**
 Thomas Strohm
 Bosch

- 54 Quantum Incubation Journey: Theory Founded Use Case and Technology Selection**
 Sebastian Senge, Tim Leonhardt, Kinan Halabi
 Accenture

HARDWARE

- 62 The long journey from prototype to the ideal quantum computer**
 Ignacio Cirac
 Technical University of Munich
- 65 Ein Quantencomputer mit 1121 Qubits**
 Dirk Wittkopp
 IBM
- 70 Solving problems with quantum annealing**
 Murray Thom
 D-Wave
- 74 Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers**
 Marcus Doherty
 Quantum Brilliance
- 80 Quantum Advantage für Europa?**
 Sebastian Luber
 Infineon
- 85 Closing the gaps in Quantum Computing: Co-Development and Co-Design**
 IQM Quantum Engineers
 IQM Quantum Computers
- 94 Quantentechnologien im PraxiscHECK – Konzepte und Anwendungsfelder**
 Alexander Kaffenberger, Anne-Marie Tumescheit
 Fujitsu Technology Solutions
- 104 Status Quo und Roadmap von IBM Quantum und erste Lösungsansätze**
 Basil Moshous, Stefan Kister,
 Carsten Dieterle, Mark Mattingly-Scott
 IBM Deutschland

KOLUMNEN

- 29 Neues wagen, Gewohnheiten ändern? Widerstand ist normal, aber was tun?**
 Petra Bernatzeder
- 110 Die agile Transformation: Groß denken, klein beginnen, schnell lernen**
 Marcus Raitner

IMMER DABEI & SZENE

- 112 DIGICON 2020 – Digitale Kompetenzen: Wie Krisen große Veränderung bewirken**
- 113 Digitalisierung in Zahlen**
- 114 Impressum**



Wann hat meine Firma einen Quantenvorteil?

Quantencomputer können Aufgaben lösen, die bei herkömmlichen Rechnern völlig unmöglich sind, oder können dies immens schneller und für eine größere Komplexität. Sie liefern einen Quantenvorteil. Doch, wann ist es so weit?

Dies ist die wohl häufigste Frage, die mir derzeit von den großen Wirtschaftsunternehmen gestellt wird. Wirtschaftlich ist es die wohl wichtigste Frage, die uns beim Thema Quantencomputing (QC) beschäftigt. Meine Antwort für geeignete Anwendungen, die quasi jede Firma hat:

→ Bald!

Falls Sie es genauer wissen möchten, lassen Sie uns überlegen. Als erstes - das QAR-Lab¹ teilt Firmen in 6 Level ein. Überlegen Sie doch mal, auf welchem QC-Level Sie sind:

QC-Level 0: Thinking. Sie haben das Thema für Ihr Unternehmen bereits als spannend erkannt.

QC-Level 1: Classification. Sie wissen, dass wirtschaftliche Vorteile des QC derzeit in den Bereichen Optimierung, Simulation, KI etc. gesehen werden. QC wird unsere IT-Landschaft nicht ersetzen, sondern Co-Prozessoren werden bei komplexen Fällen ergänzen.

QC-Level 2: Discovery. Sie haben komplexe Fälle mit QC-Potential gesammelt und eine Long List erstellt. Diese führt - erfahrungsgemäß 25-75 - potentielle Use Cases Ihres Unternehmens auf.

QC-Level 3: Selection. Sie haben die potentiellen Use Cases anhand von Kriterien bewertet, vielleicht basierend auf dem 4-Kriterien-Katalog des QAR-Lab: interessant sind schwere/wichtige/passende/frühe Fälle. Ihre Gewichtung ergab eine Short List samt einem Favoriten.

QC-Level 4: Implementation. Sie haben Ihren favorisierten Use Case auf mehreren Quantencomputern umgesetzt. Wir empfehlen im QAR-Lab mindestens Quantum Annealing und Quantum Gate Model, möglichst auch Varianten wie digital Annealing und verschiedene Anbieter im Vergleich.

QC-Level 5: Prediction. Sie haben eine Auswertung von Laufzeiten und Güte der Lösung gemacht, kennen Ihren Bedarf an Qubits und haben in einer Hochrechnung ermittelt, wann die von Ihnen benötigte Hardware verfügbar sein wird. Daraus leiten Sie ab, wann Ihre Top-Anwendung einen Quantenvorteil erreicht.

Wenn Sie wissen, auf welchem QC-Level Sie sind, so schauen Sie, wie Sie auf das nächste QC-Level kommen und dann von Level zu Level. Am Ende haben Sie die Antwort für das Timing Ihres Quantenvorteils. So können Sie unmittelbar planen, wie Sie sich auf dieses Zeitalter vorbereiten.

Beispiel – Optimierung am Flughafen

Als Use Case mit Potential für einen Quantenvorteil hat das QAR-Lab für den Flughafen München das Gate Allocation Problem (GAP, Optimierungsproblem zur Zuordnung der Flugzeuge zu Gates) identifiziert. Im Kleinen haben wir es für die Quanten Annealing Hardware von D-Wave Systems, sowie für Quantencomputer der Firmen Rigetti und IBM mittels des QAOA, modelliert und ausgeführt. Für den Produktivbetrieb des Flughafens am Terminal 2 wurden 12.500 Qubits auf Basis einer QUBO Modellierung errechnet. Dies sollten logische Qubits sein, wobei Google² davon ausgeht, dass 1.000 physikalische Qubits zur Realisierung eines logischen Qubits für ihre supraleitende Technologie gebraucht werden, McKinsey³ benennt 1.000-10.000, was technologiespezifisch zu diskutieren wäre. In Kooperation mit der TU Delft betrachten wir, wie die Fehlerkorrektur effizienter gemacht werden kann, sodass potentiell weniger als 10^3 - 10^4 physikalische Qubits benötigt werden. Ferner ist die Kohärenzzeit

von Bedeutung - je größer diese ist, desto komplexere Algorithmen sind ausführbar. Quantum Brilliance mit einer Technologie basierend auf Stickstoff-Fehlstellen wäre bspw. ein äußerst interessanter Anbieter hinsichtlich dieser Kohärenzzeit⁴. Doch, gehen wir von aktuell verfügbaren Quantencomputern/Annealern aus: D-Wave⁵ und Fujitsu⁶ lassen eine Verdopplung der Qubits alle drei Jahre erwarten, bei IBM⁷ u.a. Gate Model Rechnern erwarten wird diese Verdopplung etwa jährlich.

Nach Auswertung aller Daten und Business Pläne prognostizieren wir für ein voll ausgelastetes Terminal 2 am Flughafen München einen ersten Quantenvorteil auf dem Quantum Annealer im Jahr 2026, auf einem Quantum Gate Model mit größerer Genauigkeit in 2028.

Das ist das „bald“.

Lassen Sie sich durch eine Fülle von Beiträgen rund um das Erreichen eines Quantenvorteils inspirieren. Wenn Sie Fragen haben oder wir Ihnen helfen können - bei der Entdeckung, Auswahl, Implementierung und Prognose Ihrer Fälle - so melden Sie sich! Meine Kollegen vom QAR-Lab und ich sind gerne für Sie da.

Wir unterstützen Sie beim Quantencomputing als kompetenter Partner. Deutschlandweit einzigartig testen wir im QAR-Lab die größte Anzahl an Quantencomputern. Deshalb wissen wir, welche Quantenhardware für welche Herausforderungen in Ihrem Unternehmen am geeignetsten sein kann. Wappnen Sie Ihr Unternehmen für eine neue Ära in Ihrer Firmengeschichte.

Ihre

Claudia Linnhoff-Popien

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien ist Lehrstuhlinhaberin an der LMU München und leitet das Quantum Applications and Research Laboratory, kurz QAR-Lab, das QC-Software programmiert und diese auf QC-Hardware (aktuell D-Wave, Fujitsu, IBM und Rigetti) ausführt, um bereits heute erfolgreich QC Use Cases für die Wirtschaft umzusetzen. Mit dem QAR-Lab ist die LMU laut TheQuantumDaily gemeinsam mit Harvard, Oxvord, MIT und Stanford unter den „The World's Top 12 Quantum Computing Research Universities“. Ferner ist sie Gründungsmitglied des Leuchtturmprojekts „PlanQK“ des Bundes und Leiterin des „QAR-Lab Bayern – Aufbau eines Ökosystems für Quantencomputing-Anwenderkompetenz“ des Freistaates Bayern. Als Vorstandsvorsitzende des „Digitale Stadt München e.V.“ kooperiert sie mit aktuell 127 Firmen.

Die wundersame Welt der Quantencomputer: ein Wegweiser

Niko Mohr, Ivan Ostojic, Anna Heid, Lorenzo Pautasso, Matteo Biondi

McKinsey & Company

Revolutioniert der Quantencomputer bald schon die Lösung rechenintensiver Probleme in Wissenschaft und Industrie? Welchen praktischen Nutzen lässt die neue Technologie erwarten? Das Potenzial ist zweifellos groß, aber es gibt auch noch viele offene Fragen. Eine Bestandsaufnahme.

Vor gut einem Jahr ließ Google die Bombe platzen: Quantenüberlegenheit. Google hatte nach eigener Darstellung den Nachweis geführt, dass ein Quantencomputer eine Aufgabe lösen kann, die ein klassischer

Computer nicht oder nicht in annehmbarer Zeit lösen kann. Die konkrete Aufgabe bestand, vereinfacht gesagt, aus der Erzeugung komplexer Zufallszahlen. Googles Sycamore-Prozessor brauchte dafür nur gut drei Minuten. Die besten klassischen Supercomputer bräuchten für dieselbe Berechnung geschätzt 10.000 Jahre.[1]

Die praktische Relevanz solcher und ähnlicher Erfolgsmeldungen ist schwer einzuschätzen. Gleichwohl wächst auch außerhalb der Grundlagenforschung das Interesse am Thema Quanten-Computing. Denn in einigen Branchen nehmen konkrete Anwendungsszenarien Gestalt an, zum Beispiel bei der Entwicklung neuer Medikamente und der Lösung komplexer Optimierungsprobleme in Bereichen wie Finanzdienstleistungen, Telekommunikation und Logistik/Mobilität. Insgesamt wird das Wertpotenzial der Quantentechnologie bis Mitte der 2030er-Jahre auf über 1 Billion US-Dollar geschätzt,[2] und die Investitionen in diesem Bereich wachsen stetig.[3] Aber für welche Unternehmen lohnt es sich, jetzt schon selbst zu investieren? Wer sollte warten, bis bestimmte technische Hürden überwunden sind und zuverlässige Quantencomputer tatsächlich zur Verfügung stehen? Welche Schlüsseltechnologien sollte man im Auge behalten? Zugegeben: Nicht auf alle Fragen gibt es heute schon endgültige Antworten. Umso wichtiger ist es für betroffene Entscheider deshalb, sich einen Überblick über den Stand der Entwicklung und die Quellen der Unsicherheit zu verschaffen. Diesen wollen wir geben und setzen uns daher im Folgenden mit dem praktischen Potenzial der Quantentechnologie, den wichtigsten Herausforderungen, den dominanten Technologien und möglichen Brückenlösungen auf dem Weg zum perfekten Quantencomputer auseinander.

Quantencomputer werden Probleme lösen, bei denen klassische Computer versagen

Ein Quantencomputer hat einen fundamentalen Vorteil gegenüber klassischen Rechnern: Er kann andere Quantensysteme (z.B. ein Stickstoffmolekül) sehr viel effizienter simulieren als jedes heute verfügbare Computersystem. Für klassische Rechner stellen selbst Moleküle mit vergleichsweise geringer Komplexität eine fast unlösbare Aufgabe dar. Auch in anderen Bereichen sind Quantencomputer klassischen Computern überlegen, zum Beispiel bei bestimmten Verfahren zur Primfaktorzerlegung, die für die sichere Verschlüsselung von Daten eine wichtige Rolle spielen. Ein mit Quantentechnologie verschlüsselter Datensatz wäre mit klassischer Computertechnik nicht zu entschlüsseln, oder zumindest nicht in für menschliche Anwender relevanten Zeiträumen. Und umgekehrt wäre es für einen Quantencomputer ein Leichtes, mit klassischer Technik verschlüsselte Daten zu knacken. Zwar gibt es zum jetzigen Zeitpunkt noch keine in der Praxis einsatzfähigen Quantencomputer, aber vielversprechende technische Plattformen wie supraleitende Schaltkreise und Ionenfallen (siehe unten) lassen erwarten, dass es innerhalb der nächsten zehn Jahre die ersten marktreifen Geräte für ausgewählte kommerzielle Anwendungen geben könnte.

Die meisten industriellen Anwendungen allerdings sind auf einen „fehlertoleranten“ Quantencomputer angewiesen, und die Fehlertoleranz eines Quantencomputers ist konstruktionsbedingt sehr viel geringer als die eines klassischen Computers. Das liegt am sogenannten „Quantenrauschen“, der zufälligen Änderung des Quantenzustands der physikalischen Qubits, aus denen ein Quantencomputer aufgebaut ist. Dieses Rauschen erzeugt auf der Ebene der physikalischen Qubits falsche Rechenergebnisse. Deshalb werden mehrere physikalische Qubits zu logischen Qubits

verbunden. Für ein einziges logisches, perfektes, fehlerkorrigiertes Qubit braucht man nach dem heutigen Stand der Forschung 1.000 bis 10.000 physikalische Qubits. Bisherige Geräte kommen allerdings erst auf 50 bis 100 physikalische Qubits. Für dieses Problem gibt es trotz aller Bemühungen der besten Köpfe heute noch keine Lösung. Allerdings steht die Quantenfehlerkorrektur erst ganz am Anfang, und es besteht Aussicht auf Fortschritte bei Hardware und Software (siehe Textbox „Finde den Fehler“). Gleichwohl sind Anwendungen in Bereichen, die fehlerfreie Lösungen erfordern, nach jetzigem Wissensstand erst für die Zeit nach 2030 zu erwarten. Zudem sind viele industrielle Anwendungen auf einen Quanten-RAM (QRAM) angewiesen. Darunter versteht man die Möglichkeit, klassische Daten effizient in einen Quantencomputer zu laden. Einen solchen Quanten-Arbeitsspeicher gibt es bisher aber noch nicht.

Dennoch ist es möglich, die Vorteile von Quanten-Hardware schon jetzt zu nutzen – auch ohne verbesserte Fehlertoleranz und QRAM. Dafür braucht es zweierlei: hochoptimierte Quanten-Hardware und Hybridlösungen, also das Zusammenspiel klassischer und quantenbasierter Computer. Dabei bearbeitet ein herkömmlicher Computer den übergeordneten Algorithmus, delegiert aber bestimmte kritische Schritte, die mit einem herkömmlichen System nicht effizient durchzuführen sind, an eine Quantenmaschine. In Zusammenarbeit mit Anbietern von Quanten-Hardware nutzen Start-ups wie ProteinQure z.B. hybride Algorithmen für die Simulation der Proteinfaltung, die in der pharmazeutischen Industrie eine zentrale Rolle spielt. Andere Anbieter, z.B. Rahko, berechnen mithilfe des VQE-Algorithmus und Optimierungsansätzen für eine erweiterte Quantenberechnung angeregte Molekülzustände.

Schlüsseltechnologien auf dem Weg zum perfekten Qubit

Seit Mitte der 1990er-Jahre hat es bei der Entwicklung von Quanten-Hardware große Fortschritte gegeben. Technologieriesen wie IBM, Google und Intel arbeiten dabei eng mit Innovationsführern wie Rigetti Computing und D-Wave Systems sowie mit etablierten Start-ups wie Quantum Circuits, Silicon Quantum Computing, IonQ, Honeywell, Alpine Quantum Technologies, Xanadu und Qilimanjaro zusammen. Die wichtigsten technischen Plattformen für gatterbasierte [4] Quantenberechnung sind dabei supraleitende Schaltkreise und Ionenfallen. Aber auch in anderen Bereichen ist die Dynamik der Entwicklung hoch, z.B. bei Plattformen auf Basis von Elektronenspins in Halbleitern, Lichtwellenleitern („Photonik“) und topologischen Systemen.

Supraleitende Schaltkreise

Supraleitende Schaltkreise stehen im Zentrum der heutigen Bemühungen von Technologieriesen wie Google und etablierten Start-ups wie D-Wave und Rigetti Computing. Ein erster Nachweis erfolgreicher Quantenanwendungen mit supraleitenden Schaltkreisen gelang 1999. Seitdem wächst die Leistungsfähigkeit von Qubits, die auf Supraleitung beruhen, hinsichtlich aller wichtigen Kriterien stetig: Kontrollierbarkeit, Flexibilität, geringe Rauschanfälligkeit, Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit der Datenübertragungsprotokolle und universelle Gatter, d.h. die Möglichkeit, jede komplexe Berechnung in Grundoperationen zu

zerlegen. Derzeit erreichen Prototypen auf Basis supraleitender Schaltkreise Gattergeschwindigkeiten im GHz-Bereich, was in etwa der Geschwindigkeit herkömmlicher Computer entspricht. Die führenden Forscher gehen davon aus, dass die Anzahl physikalischer Qubits, die man für fehlerkorrigierte logische Qubits benötigt, mit Supraleitern erreichbar ist. Alle relevanten Anbieter halten die Entwicklung von Systemen mit bis zu 100.000 physikalischen Qubits für machbar. Dieser Wert liegt nochmals eine Größenordnung über der Anzahl, die nach heutigem Wissensstand für fehlerkorrigierte logische Qubits mindestens erforderlich ist. Allerdings gibt es auf dem Weg dahin noch eine Reihe teils bisher ungelöster Probleme:

- **Eingeschränkte Konnektivität.** Die Konnektivität ist wichtig für die Bearbeitung von Algorithmen und die Fehlerkorrektur. Supraleitende Schaltkreise lassen sich schwerer miteinander verbinden als Ionen, da die Konnektivität in der Regel über den nächsten Nachbar erfolgt. Komplexere Verbindungen erfordern zusätzliche Schaltungen.
- **Kohärenz bzw. Qubit-Qualität.** Damit man mit Qubits sinnvoll rechnen kann, müssen deren Überlagerungszustände eine lange Kohärenzzeit aufweisen, das heißt, von ausreichender Dauer sein. Die Kohärenzzeit von Qubits auf Basis supraleitender Schaltkreise hat sich zuletzt um zwei Größenordnungen verbessert.[5] Die systemische Unschärfe hat damit abgenommen. Dennoch bleibt das Skalieren eines solchen Systems schwierig, da es eine Reihe von Störquellen für die Informationserhaltung im Quantencomputer gibt, sodass der Größe und damit der Leistungsfähigkeit von Quantencomputern auf der Basis von supraleitenden Schaltkreisen Grenzen gesetzt sind.
- **Schaltungs- und Kalibrierungsaufwand** in Geräten mit vielen Qubits. Jedes Qubit muss über Leitungen in demselben Mischungskryostat (d.h. demselben Kühlgerät) kontrolliert werden, in dem sich auch der Chip befindet. Daraus ergeben sich beträchtliche konstruktive Herausforderungen bei der Konzeption, dem Bau und dem Betrieb von großen Quantencomputern.
- **Kühlung.** Ein Quanten-Chip auf Basis supraleitender Schaltkreise wie Googles Sycamore-Chip arbeitet bei einer Temperatur von 15 mK in speziellen Mischungskryostaten. Diese Kühlsysteme müssen so dimensioniert sein, dass sie auch große Geräte aufnehmen können. Daraus ergeben sich enorme Anforderungen an die Kühltechnik. Führende Experten sprechen von „fußballfeldgroßen“ Kühlaggregaten.[6]

Ionenfallen

Ionenfallen sind nach den supraleitenden Schaltkreisen als Basis von Quantencomputern technisch am weitesten entwickelt. Der Microsoft-Partner Honeywell und einige Start-ups, z.B. IonQ und Alpine Quantum Technologies, setzen auf Ionenfallen. Ein Qubit ist bei dieser Technologie definiert als interner Elektronenzustand des Ions. Dabei handelt es sich meist um hyperfeine, d.h. quantenmechanische Niveaus magnetischer Effekte auf nuklearer Ebene. In sogenannten Paul- oder Penning-Fallen werden Ionen durch oszillierende elektromagnetische Felder eingefangen. Die eigentlichen Qubits, also die Zustände der Ionen, werden dann mithilfe von Lasern kontrolliert. Weil Ionen nicht künstlich erzeugt werden, sondern von der Natur vorgegeben sind, sind in einer Ionenfalle alle Qubits grundsätzlich identisch, sodass – anders als bei Quantenchips auf Basis von Supraleitern – keine Kalibrierung

erforderlich ist. Ionen weisen zudem eine große Konnektivität auf. In der Regel sind in einer Ionenfalle alle Ionen mit allen anderen verbunden. Das ist ein großer Vorteil für die Bearbeitung von Algorithmen und die Fehlerkorrektur. Das erste logische Qubit auf Basis einer Ionenfalle wurde kürzlich vom Start-up IonQ vorgestellt. Ionen ermöglichen längere Kohärenzzeiten und höhere Gattergenauigkeiten als supraleitende Schaltkreise, sind aber langsamer. Die Leistung derzeitiger Geräte liegt im MHz-Bereich und damit noch unter der Taktrate herkömmlicher Computer.

Zu den wichtigsten Herausforderungen bei der Weiterentwicklung von Ionenfallen zählen folgende Faktoren:

- **Langsame Gatter.** Die Faktorzerlegung einer 2048 Bit großen Zahl mithilfe des Shor-Algorithmus würde mit einer Ionenfalle etwa 10 bis 100 Tage dauern, rund tausend Mal länger als mit supraleitenden Schaltkreisen. Zwar wird mit deutlich schnelleren Gatterzeiten experimentiert, doch darunter leidet die Gattergenauigkeit. Diese beträgt zurzeit nur rund 75 Prozent anstatt der bei Standardgattern üblichen 99,9 Prozent.
- **Skalierbarkeit.** Bei den ersten Ionenfallen waren alle Ionen auf einer Linie angeordnet. Ab 50 bis 100 Qubits ergeben sich aus einer solchen linearen Anordnung allerdings Skalierbarkeitsprobleme bei der für die Kontrolle benötigten Optik und Elektronik. Neuere Ansätze richten sich z.B. auf eine Skalierung mithilfe zweidimensionaler Arrays mit Spuren und Kreuzungen. Diese Konstruktionsweise soll es ermöglichen, die Ionen vom

Finde den Fehler

Herkömmliche Computer machen kaum Fehler. Dafür sorgen verschiedene weiche und harte Fehlerkorrekturen, Kodierungen, Kontrollpunkte und Redundanzen. Klassische Computer sind ohnehin generell weniger anfällig für Fehler als Quantencomputer, deren sogenanntes „Quantenrauschen“ sich aus ihrer Konstruktionsweise ergibt. Der Quantenzustand der Qubits, aus denen ein Quantencomputer besteht, ist zufälligen Änderungen („Flips“) unterworfen. Dieses Phänomen, das sogenannte „Quantenrauschen“, führt zu falschen Rechenergebnissen. Deshalb ist eine wirksame Quantenfehlerkorrektur (Quantum Error Correction, QEC) für die meisten Anwendungen unerlässlich.

Zur Lösung dieses Problems setzen Forscher und Entwickler auf Redundanz. Sie verbinden mehrere physikalische Qubits (d.h. in der Hardware existierende Qubits) zu einem logischen Qubit. Ein solches logisches Qubit stellt die Fehlerkorrektur einheit eines Quantencomputers dar. Je mehr Fehler bei einer bestimmten Anwendung möglich sind, desto mehr physikalische Qubits werden für die Korrektur falscher Rechenergebnisse benötigt.

Die Früchte der bisherigen Bemühungen sind eher entmutigend: Für ein einziges fehlerfreies logisches Qubit benötigt man 1.000 bis 10.000 physikalische Qubits. Aber es gibt auch Anlass zur Hoffnung. Die Quantenfehlerkorrektur schien lange Zeit gänzlich unmöglich und steht erst am Anfang ihrer Entwicklung. Wenn die Qualität physikalischer Qubits zunimmt, werden deren Fehlerraten sinken. Und dann braucht man auch immer weniger physikalische Qubits für ein fehlerfreies logisches Qubit. Die Leistungsfähigkeit supraleitender Schaltkreise zum Beispiel hat sich in weniger als 15 Jahren um zwei bis drei Größenordnungen verbessert, und neue Verfahren zur Fehlerkorrektur werden den Soft- und Hardware-Aufwand weiter verringern.

Speicher in die Kalkulationseinheit und zurück zu übertragen. Honeywell hat sich zum Ziel gesetzt, mithilfe photonischer und optischer Integration in einem Quanten-CCD (Charge-Coupled Device, ladungsgekoppeltes Bauelement) größere Ionenfallen zu konstruieren. Die wichtigsten Bausteine dafür hat Honeywell bereits der Öffentlichkeit präsentiert.

Sonstige Technologien

Supraleitende Schaltkreise und Ionenfallen sind zurzeit die dominierenden technologischen Plattformen für Quantencomputer. Wegen der genannten Herausforderung verfolgen einzelne Spieler in Wirtschaft und Wissenschaft allerdings auch andere Ansätze. Intel arbeitet z.B. mit der TU Delft an Qubits auf Basis des Elektronenspins lokalisierter Elektronen in Halbleitern wie Silizium oder Germanium. Solche Qubits funktionieren bei höheren Temperaturen (etwa 1 Kelvin) als Supraleiter und sind leichter skalierbar; ein Test-Chip mit 26 Test-Qubits wurde schon 2018 vorgestellt. Photonische Plattformen können sogar bei Raumtemperatur betrieben werden. Deshalb plant z.B. das Start-up Xanadu einen Quantencomputer auf Basis von integrierter Photonik und Qumodes (auch bekannt als kontinuierliches variables Quantencomputing). Microsoft arbeitet langfristig an topologischen Qubits auf Basis von Majorana-Fermionen. [7] Solche Qubits dürften nahezu rauschfrei sein und den Aufwand für die Fehlerkorrektur minimieren. Es gibt in diesem Bereich bisher allerdings keine Hardware, weshalb Investitionen in diese Technologie trotz des großen theoretischen Potenzials als riskant gelten. Darüber hinaus gibt es eine Reihe vielfältiger nicht fehlerkorrigierter Technologien, teils auch in Form besonderer Spielarten der bereits vorgestellten Plattformen. Eine der derzeit am meisten diskutierten dieser weiteren Technologien ist das Quanten-Annealing. So scheint die Quanten-Annealing-Technologie von D-Wave z.B. gut für Optimierungsprobleme geeignet zu sein, die Skalierung zu einem universalen Einsatz der Annealing-Technologie ist aber noch ungewiss. Darüber hinaus arbeitet das Start-up Quantum Brilliance an einem Quantencomputer, dessen Qubits auf Basis von Diamanten konstruiert sind. Dieser, so Quantum Brilliance, soll auch ohne eine ultrakalte Umgebung voll funktionsfähig sein.

Ein Ökosystem entsteht

Dank der enormen Fortschritte bei der Hardware investieren immer mehr etablierte Wirtschaftsunternehmen in Quantentechnologie, beispielsweise Boehringer Ingelheim, die jüngst eine Forschungspartnerschaft mit Google ankündigten [8], oder Daimler, die im Bereich Materialforschung Fortschritte verkündeten [9]. Auch die Zahl der Start-ups in diesem Bereich wächst ständig. IBM präsentierte seine Quantum Experience bereits 2016 der Öffentlichkeit. Forscher und Wissenschaftler waren fasziniert: Zum ersten Mal konnten sie Quantenalgorithmen auf einem physischen, wenn auch technologisch limitierten Quantencomputer durchführen. Inzwischen hat die Cloud sich als Zugang zu Quantencomputern und als die Grundlage der meisten Geschäftsmodelle in diesem Bereich etabliert. Zu den wichtigsten Spielern zählen Hardware-Anbieter wie Qubits, Software-Entwickler und Anbieter von Cloud-Services. Parallel dazu haben sich Start-ups wie Zapata Computing, IQbit oder Cambridge Quantum Computing der Service-seite der Quantentechnologie angenommen. Sie haben z.B. konkrete Anwen-

dungsfälle in optimierte Software für Geräte mit unvollständiger Fehlerkorrektur übertragen. Stärker spezialisierte Start-ups wie ProteinQure oder Rahko konzentrieren sich auf algorithmische Lösungen für die Pharma- und Chemieindustrie.

Alle Spieler haben sich Partner entlang der Wertschöpfungskette gesucht. Kleinere Software-Unternehmen haben sich mit Hardware-Herstellern zusammengetan. Microsoft bietet auf seiner Azure-Quantum-Plattform Partnerschaften mit den Hardware-Anbietern Honeywell, IonQ und Quantum Circuits an. Die Cloud wird voraussichtlich auch langfristig die dominante Plattform für Quantentechnologien bleiben.

Ausblick auf erste industrielle Anwendungen

Viele Pharmaunternehmen setzen schon heute auf die computergestützte Wirkstoffentdeckung, wenn auch noch mithilfe herkömmlicher Hochleistungsrechner. [10] Solche Unternehmen werden zu den Ersten gehören, die von den Möglichkeiten der neuen Quantencomputer profitieren. Eine bereits etablierte Anwendung von Quantencomputern ist die Simulation effizienterer Katalysatoren für die Ammoniaksynthese im Haber-Bosch-Verfahren, die heute ca. 1 bis 2 Prozent des weltweiten Energieverbrauchs ausmacht. Bessere Katalysatoren könnten den Energieverbrauch senken und damit auch zur Verlangsamung der globalen Erwärmung beitragen. Selbst Quantencomputer ohne vollständige Fehlerkorrektur könnten für diese Anwendung schon jetzt besser geeignet sein als Simulationen auf klassischen Computern. [11] Auch in der Finanzdienstleistungsbranche könnten Quantencomputer schon bald eine Rolle spielen. Besonders Akteure, die auf Portfoliooptimierung und Arbitrage spezialisiert sind, könnten davon profitieren. In allen Bereichen wird es zudem Unternehmen geben, die Nischenanwendungen auf Basis von Quantentechnologie entwickeln. Dies könnten zum Beispiel Fintechs sein, die sich auf dynamisches Pricing, Produktempfehlungen oder gezielte Kundenansprache spezialisieren. Auch Anwendungen im Logistikbereich sind vorstellbar, zum Beispiel bei der Optimierung von Lieferketten.

Bis Quantum-Computer die Wirtschaftswelt wesentlich verändern, werden aller Voraussicht nach noch 10 bis 15 Jahre vergehen. Die ersten praktischen Anwendungen sind jedoch schon heute absehbar. Entscheidungsträger in Unternehmen, für die rechenintensive Anwendungen eine große Rolle spielen, sollten die technische Entwicklung deshalb genau verfolgen und frühzeitig eine geeignete Strategie entwickeln, nicht zuletzt mit Blick auf den bereits heute heiß umkämpften Arbeitsmarkt. Denn schon jetzt übersteigt die Nachfrage nach Quantenspezialisten das Angebot, und vielen Vorhersagen zufolge dürfte diese Lücke sich in den nächsten Jahren noch vergrößern. [12]

Referenzen: [1] <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5> [2] <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/a-game-plan-for-quantum-computing> [3] www.mckinsey.de/news/presse/quantum-computing-monitor-marktanalyse-investitionen [4] Gatterbasiert bedeutet, dass der Quantencomputer universell einsetzbar ist und jeden komplexen Quantenalgorithmus ausführen kann, indem er ihn in Einzelschritte zerlegt. Quantenalgorithmen sind Anweisungen für den Quantencomputer, etwa die Primfaktorzerlegung nach Shor oder diskrete Logarithmen, wie sie der RSA/ECC-Verschlüsselung oder dem HHL-Algorithmus für die Matrixinversion zugrunde liegen. In beiden Fällen wird der Rechenprozess exponentiell beschleunigt. [5] Entscheidend waren dafür sogenannten Transmon-Qubits; siehe <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/piuz.202001587> [6] <https://www.uni-muenchen.de/forschung/news/2020/weinfurter.html> [7] Das Majorana-Fermion ist im Unterschied zum Dirac-Fermion sein eigenes Antiteilchen. Siehe Majorana, Ettore; Maiani, Luciano (2006). „A symmetric theory of electrons and positrons“. In Bassani, Giuseppe Franco (ed.). Ettore Majorana Scientific Papers, pp. 201–33. doi:10.1007/978-3-540-48095-2_10. [8] [https://www.boehringer-ingel-](https://www.boehringer-ingel-heim.com/press-release/partnering-google-quantum-computing)

[heim.com/press-release/partnering-google-quantum-computing](https://www.boehringer-ingel-heim.com/press-release/partnering-google-quantum-computing) [9] <https://www.zdnet.de/88391387/ibm-und-daimler-erzielen-durchbruch-mit-quantumcomputern/> [10] Siehe „Pharma's drug discovery digital Rx: Quantum computing in drug development“ (Ivan Ostojic, Anna Heid, <https://www.mckinsey.com/industries/pharmaceuticals-and-medical-products/our-insights/recalculating-the-future-of-drug-development-with-quantum-computing>) [11] Siehe „The next big thing? Quantum computing's potential impact on chemicals“ (Florian Budde, Daniel Volz, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-next-big-thing-quantum-computings-potential-impact-on-chemicals>) [12] <https://news.mit.edu/2019/mit-william-oliver-qanda-talent-shortage-quantum-computing-0123>

Prof. Dr. Niko Mohr

Prof. Dr. Niko Mohr ist Partner im Düsseldorf Büro von McKinsey & Company, Mitglied des globalen IoT Führungsteams und koordiniert die B2B-Aktivitäten von McKinsey Digital im DACH-Raum. An der Universität Regensburg lehrt er als Honorarprofessor am Lehrstuhl für Innovations- und Technologiemanagement.



Ivan Ostojic

Ivan Ostojic ist Partner im Zürcher Büro von McKinsey & Company. Dort verantwortet er u.a. das Global Technology Council für Quanten-Computing. Ivan hat einen Doppelabschluss in Molekularbiologie von der Universität Basel/FMI und einen Master in Management, Technology & Economics von der ETH in Zürich.



Dr. Anna Katharina Heid

Dr. Anna Katharina Heid ist Engagement Managerin im Zürcher Büro von McKinsey & Company. Als Wirtschaftsingenieurin und Teil von McKinsey Digital fokussiert sie sich in ihrer Arbeit auf Strategie-, Innovations- und Technologieprojekte. Sie unterstützt vornehmlich Klienten der pharmazeutischen Industrie und Medizintechnik.



Lorenzo Pautasso

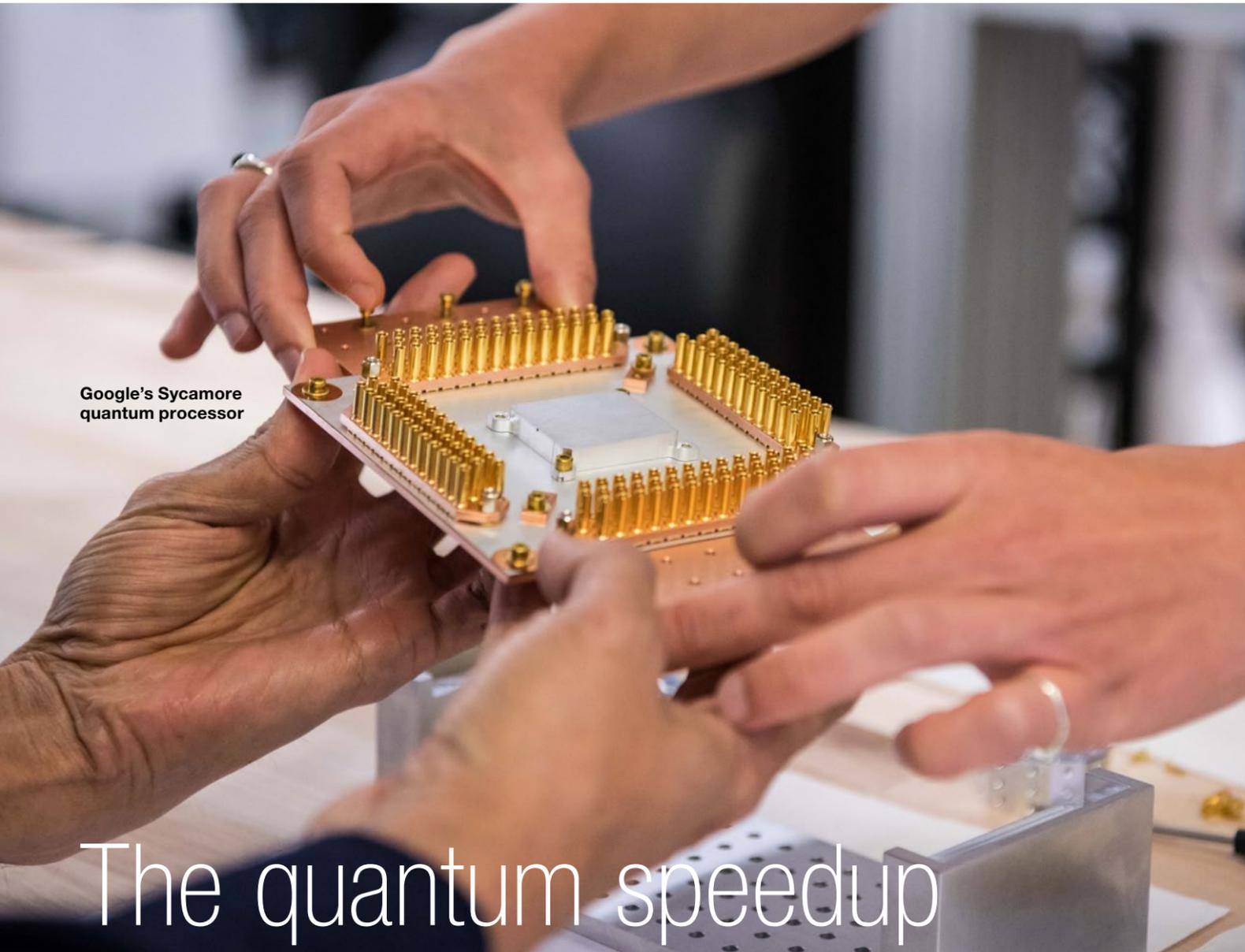
Lorenzo Pautasso ist Consultant im Münchner Büro von McKinsey & Company. Er unterstützt Klienten bei der Entwicklung von Digitalstrategien und der Integration von Advanced-Analytics-Lösungen. Im Bereich Quanten-Computing leitet Lorenzo industrieübergreifende Forschungs- und Klientenprojekte.



Dr. Matteo Biondi

Dr. Matteo Biondi ist Data Science Specialist im Zürcher Büro von McKinsey & Company. Als Forscher am Institut für Theoretische Physik der ETH Zürich gewann er zwei unabhängige Forschungsstipendien (maschinelles Quantenlernen) und verfasste neun Publikationen über Quantenoptik und Quantensensorik.





Google's Sycamore quantum processor

The quantum speedup will allow completely new applications

The mission of Google Quantum AI is to make best-in-class quantum computing tools available to the world, enabling humankind to solve problems that would otherwise be impossible. In this interview, Dr. Markus Hoffmann talks about potential quantum applications, his idea of a quantum computer as a co-processor, and the vision of building an error-corrected quantum computer in the next decade.

You are an expert in quantum computing at Google and responsible for partnerships for quantum computing. How can you imagine your work? What is your goal? What are you doing exactly?

Let's start with our group. Google Quantum AI is part of Google Research. Our mission is to make best-in-class quantum computing tools available to the world, enabling humankind to solve problems that would otherwise be impossible. Based on this mission, our goals for the next decade are to build an error-corrected quantum computer and finding valuable applications for quantum. My role is about managing relationships with all our partners across the Quantum Ecosystem. This includes our academic collaborators, start-ups and our first industrial research partners. It's very motivating to see the quantum computing community grow at such a rapid pace over the last couple of years.

While our hardware group is based in the US in Santa Barbara and our theory group is led out of Los Angeles, we also have several team members in the European Union, with for example our European Quantum Algorithms and Applications Lead and myself being based in our Google office in Munich.

How do you think quantum computing will change our lives and work? What is your vision?

On your question of how quantum computing will change our lives, a first starting point would be to look into which problems are hard to solve for classical computers today. It's important to point out that a quantum computer will not be able to speed up all of these hard problems, for many problems a classical computer will actually be faster in the future as well. You can imagine a quantum computer as a co-processor which is able to solve a certain category of problems very well. As mentioned above one of these categories will definitely be native quantum systems, like we see them in material science, chemistry and pharma. Applications discussed in the quantum community are room-temperature superconductors, materials for better electric car batteries up to more efficient catalysts in industrial applications or more efficient drug discovery. A field which has seen much interest from quantum computing researchers over many years is quantum optimization. However, our group just showed in a recent paper that quantum algorithms with quadratic speedups, like the widely known Grover's algorithm for unstructured search will even in the error-correction era most likely not be able to outperform classical solvers. This shows the need for more fundamental research on quantum algorithms as every industry is facing optimization problems. The paper showed that new quantum algorithms with minimum quadratic speedups are required, to be able to solve optimization problems faster on a quantum computer and so make them valuable for industrial applications.

Further areas of research are linear algebra and differential equations, where the quantum speedup to solve certain problems could even be exponential and allow completely new applications.

The last big field of research to mention here is quantum machine learning. This field is compared to the other two quite young, but looks quite promising. Here you could for example imagine training more robust machine learning models on more noisy datasets with fewer samples.

The question of when this will actually happen is especially hard to predict. With our beyond classical experiment in October 2019, we have shown that a quantum computer is able to outperform

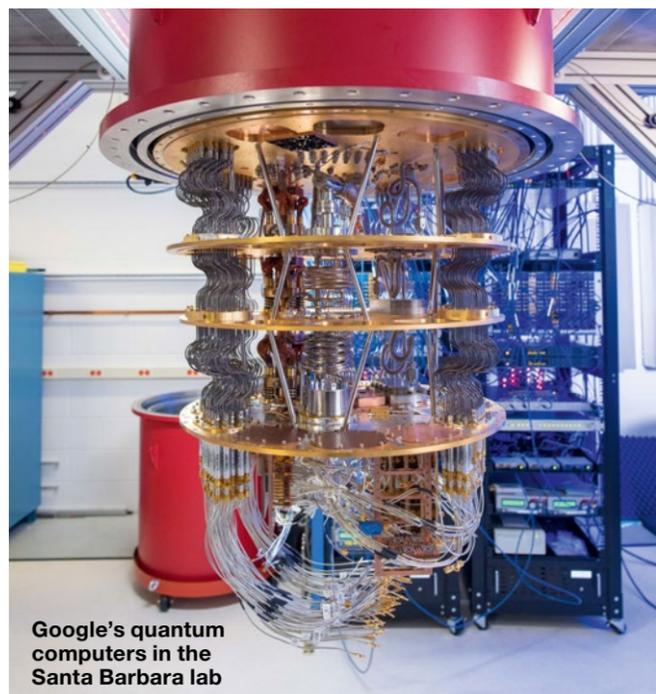
the fastest supercomputer on a very specific task; the quantum device performed the aforementioned task in 200 seconds, while the world's top supercomputers would need thousands of years. As simulation algorithms improve over time, it's likely that the classical runtime can be improved, but the direction is clear as adding only one further qubit already doubles the problem size. Based on this fact, it's obvious that improvements on classical algorithms will not be able to catch up, as the number of qubits increases. This nicely visualizes the power of exponential scaling. Right now quantum computing is in the Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) era. This means we have several dozens of physical qubits, which produce a certain amount of errors for every calculation. The Nobel Prize winner Richard Feynman once said: "Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical." Given material science and chemistry problems are native quantum systems our research is currently looking into solving beyond classical problems during the NISQ era. We are quite optimistic about finding beyond classical problems in material science or chemistry during the NISQ era, although a lot of fundamental research is still required.

As mentioned our long term vision is to build over the next decade an error-corrected quantum computer. This is a device with so-called logical qubits – each such qubit requires approximately 1000 noisy physical qubits to make, but runs with far-suppressed error levels. To achieve this we plan to leverage the surface code. In the summer of 2020, we presented our detailed roadmap for this journey to error correction, which will encounter large challenges on the hardware and theory side.

What would you recommend to a computer science student or a computer scientist from a company who is interested in quantum computing? How does he or she best get started with this topic?

First of all I think students are looking at a very promising future. To me it feels like quantum computing is heading towards a similar situation as we are in with AI today, where we have excellent hardware and software available, but industry cannot find enough highly skilled talent on the market to create maximum value out of these resources. Looking at the size of today's quantum computing community and assuming the availability of error-corrected quantum computers in the next decade, I think the industry will face problems to find enough talent to make good use of future quantum computers.

One misconception on quantum computing I often see is that people think of quantum computing as just another compute unit which is programmed via already known languages like Python, with all the quantum logic abstracted into libraries. This is definitely not the case, so my recommendation to students who would like to get into quantum computing, is to expand their knowledge on quantum information science and how to develop and improve quantum algorithms. The quantum computing stack consists of many layers. This requires researchers with expertise in, for example, high-level programming, FPGA programming, electronics design, materials science, applied mathematics, signals processing, chemistry and physics. It's very positive to see that more and more Master programs are starting, like the Master in Quantum Science & Technology by Munich Center for Quantum Science and Technology, LMU and TUM.



Google's quantum computers in the Santa Barbara lab

The Google Quantum Software stack is completely open source under Apache 2.0, so students interested in the field can get started immediately without having to think about licensing. The software stack includes Cirq our quantum programming language, OpenFermion a package for chemistry simulation and TensorFlow Quantum, which is a library for hybrid quantum-classical machine learning. For sure we also see the demand for quantum compute resources especially in education and academia. For that reason we open sourced our high-performance quantum simulator qsim. This allows quantum simulations on classical compute infrastructure. So students can run high performance simulations on their laptops to get started in the field, while senior academics can also prepare large scale experiments using large machines on premise or in the cloud.

Germany is characterized by a very well developed funding landscape. How can we best prepare Germany for the age of quantum computing?

First, the German government should continue to increase support for fundamental research that will create the foundation for broad industrial value in the future. For example, take the above paper on quantum optimization - we need basic research now to discover algorithms that can better scale quantum optimization for future industrial applications. This is true for many of the building blocks of quantum computers (both hardware and software) and is reflected in the fact that the Google Quantum AI group is part of Google Research.

Second, we need to consider how to best support the growing quantum computing ecosystem, which includes quantum hardware and the related supply chain, hardware and software start-ups and quantum applications in industry. Such support could come through funding, as well as opportunities for public-private partnerships across the quantum computing system. There are several quantum hardware efforts across the European Union based on different technologies. Two to mention are the EU fund-

ed OpenSuperQ project using superconducting qubits or IQM a start-up out of Finland which is also building their hardware based on superconducting qubits. Furthermore there is AQT out of Innsbruck building quantum computers based on ion-traps or Pasqal out of Paris using cold atoms. One thing AQT and Pasqal have in common is that both are using the same open source quantum computing framework Cirq, as Google does. So scientists writing algorithms in Cirq can easily leverage all three platforms and support for further platforms is upcoming.

Beyond supporting hardware start-ups I think one key aspect will be to support strong software and algorithm start-ups to be able to unlock value creation in industry, especially with the knowledge in mind that industry will have a hard time to find sufficient talent for a certain amount of time. Here quantum start-ups might play a key role in bridging this gap. For industry the general recommendation is to create a quantum strategy, which covers in which areas and by when quantum computing will likely become relevant for them. Especially for those with potential NISQ applications, incubation teams with a strong quantum science background will be key to starting research on their specific problems. We also provide ReCirq which is a repository of NISQ experiments.

How can science and business cooperate with Google today?

At the current stage our group's focus is on accelerating quantum science. We are broadly collaborating with academic groups across the full quantum computing stack and have several collaborations across the European Union. These academic collaborations include for example funded research projects, a limited number of groups with early access to our quantum computer, an offering for visiting scientists and visiting faculties or a large internships program.

Regarding cooperations with industry one has to know we are not widely commercializing our quantum computing service and instead focusing on a limited number of industrial research partnerships. All our current industry research partnerships are right now with European companies, which include VW, Daimler, Covestro, Boehringer Ingelheim and further being announced in early 2021. During these research partnerships our teams collaborate on fundamental research questions which will be the building blocks for future industrial applications. The results of these collaborations are published as open research, as we for example did with Daimler last summer in *Science* with our joint Hartree-Fock experiment.

Interview: Claudia Linnhoff-Popien

Dr. Markus Hoffmann

Dr. Markus Hoffmann leads Quantum Computing Partnerships and Programs in Europe and Asia for Google Quantum AI. He has got more than 15 years of experience in all kinds of technical roles, program management to partnerships. Since 2017 his focus is on accelerating quantum computing research via strong collaborations with academia, start-ups and first industrial research partners.



Fotos: Google

DIGICON 2021

DIGITALE WELT CONVENTION

www.digitaleweltmagazin.de/digicon

Werden
Sie
Partner!

Die 6. DIGICON in Kooperation mit dem Anwendernetzwerk des Digitale Stadt München e.V.

QUANTUM COMPUTING

Wie ein Quantenvorteil entsteht

16. & 17.11.2021, Palais Lenbach - München

Cloud based QC with Amazon Braket

The approaches to solutions in quantum computing technology are auspicious. Quantum computers are already promising an improved architecture to solve problems that conventional computers can no longer handle. The voices asking how this new technology can be made commercially viable are getting louder. The US cloud computing provider Amazon Web Services has launched “Amazon Braket”, a fully managed quantum computing service that harnesses the potential of quantum computing. Constantin Gonzalez is Principal Solutions Architect at Amazon Web Services and speaks about AWS’s ambitious goals to make quantum computing a breakthrough.

Almost exactly a year ago, Amazon Web Services presented its new “Braket” cloud service in Las Vegas. What is a cloud service? What is special about “Braket”?

Cloud computing is the on-demand delivery of IT resources over the Internet with pay-as-you-go pricing. Instead of buying, owning and maintaining physical data centers and servers, you can access technology services, such as computing power, storage, and databases, on an as-needed basis.

One of these technology services is the new Amazon Braket service, a fully managed quantum computing service that helps our customers to get started with this new technology to accelerate research and discovery. Looking at the bigger picture, it is still rare today to have access to a single quantum computer and researchers and developers who are interested in experimenting across a range of quantum hardware and technologies need to set up and manage the necessary infrastructure, negotiate access with multiple vendors, and write custom code to interface with different quantum processors. Amazon Braket helps overcome these challenges by letting customers get started quickly, using familiar tools like Jupyter notebooks to access pre-installed developer tools that can be used to design quantum algorithms, visualize results, and collaborate with others. Amazon Braket offers cross-platform developer tools that let customers design their own quantum

“Looking at the bigger picture, it is still rare today to have access to a single quantum computer.”

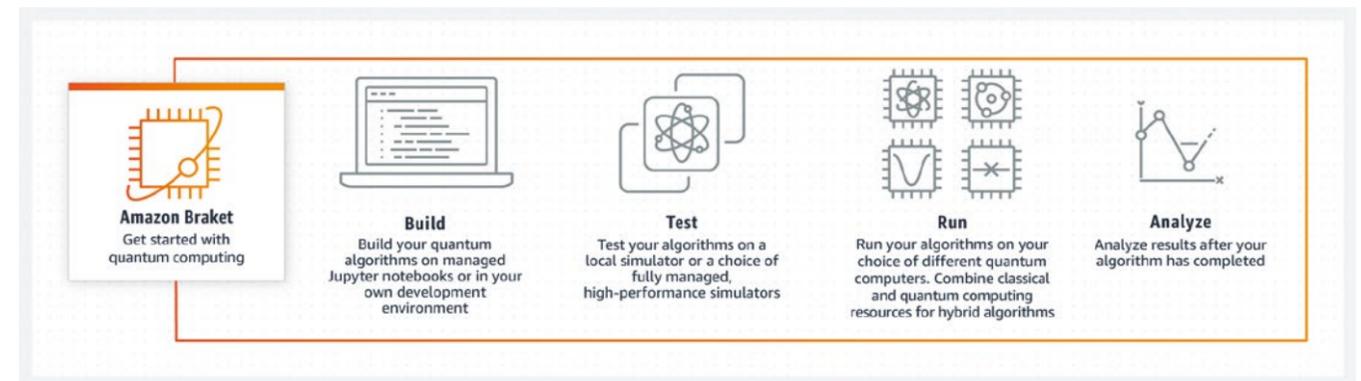
algorithms or choose from a growing library of pre-built algorithms, providing a consistent experience so that our customers no longer need to learn multiple development environments and can explore the best quantum computing fit for their application.

Which different quantum computing technologies can be used with “Braket”?

Amazon Braket lets customers run their algorithms on a quantum computer of their choice without having to engage multiple providers or committing to a single technology. Currently, these include quantum annealing superconductor computers from D-Wave, gate-based ion trap computers from IonQ, or gate-based superconductor computers from Rigetti. Over time, we plan to add more choices to give customers the opportunity to test a wider variety of technology types and other providers within various categories.

Which simulation tools does “Braket” offer?

Currently, Amazon Braket offers a choice of three gate-based quantum circuit simulators: The Amazon Braket SDK includes a local simulator for quick validation of circuit designs directly in your local environment or a Jupyter notebook. To run larger, more complex circuits Amazon Braket provides two fully managed simulators on high-performance compute infrastructure. Depending on your use case, you can use SV1, a state vector simulator or TN1, a tensor network simulator. Amazon Braket orchestrates Amazon



Amazon Web Services – Amazon Braket - How it works

EC2 clusters and GPU resources to run fully managed, high-performance simulation tasks. Amazon Braket runs simulations as fully managed jobs, automatically determining the optimum compute instance type to run simulations and managing those resources on your behalf. Customers don’t have to understand the various AWS instance types or how well they support a simulation job, as Amazon Braket handles this automatically for them.

Amazon is known as a shipping giant and also as the world leader in cloud computing. For example, what hardware does Amazon use for the “Braket” cloud service? What is the cooperation with other specialist companies that Amazon works with?

Amazon Braket currently offers access to gate-based superconductor computers from Rigetti, quantum annealing superconductor computers from D-Wave, and ion trap computers from IonQ. Over time, we plan to add more choices to give customers the opportunity to test a wider variety of technology types and other providers within various categories.

Volkswagen (VW) is now the largest customer of “Braket”. Is it a customer relationship or a scientific partnership?

By using Amazon Braket, Volkswagen wants to gain in-depth understanding of the meaningful use of quantum computing in a corporate environment and it is using Amazon Braket to access quantum computers of different service providers via a standardized programming interface, helping Volkswagen accelerate development work and improving its quantum algorithms.

Volkswagen also uses a multitude of other AWS services for different use cases including a joint development effort with AWS to build the Volkswagen Industrial Cloud, ridesharing services for MOIA, and RIO’s digital logistics and telematics products.

AWS customers can also take advantage of Amazon Quantum Solutions Lab engagements, which are collaborative research programs that allow them to work with leading experts in quantum computing, machine learning, and high-performance computing. The programs help customers research and identify the most

promising applications of quantum computing for their business and get quantum ready.

Quantum computers will remain very expensive, at least for the foreseeable future, and only a few large corporations can finance them. Amazon’s solution of using other quantum computers and integrating them into their own cloud could be an effective means of commercializing the quantum computer on a broad basis. Is that how you see it and is there an indirect business model with cloud quantum computing behind it?

Quantum computing is still an early-stage technology and building this expertise will take time, but it has the potential to solve computational problems that are beyond the reach of classical computers. It promises to transform areas such as energy

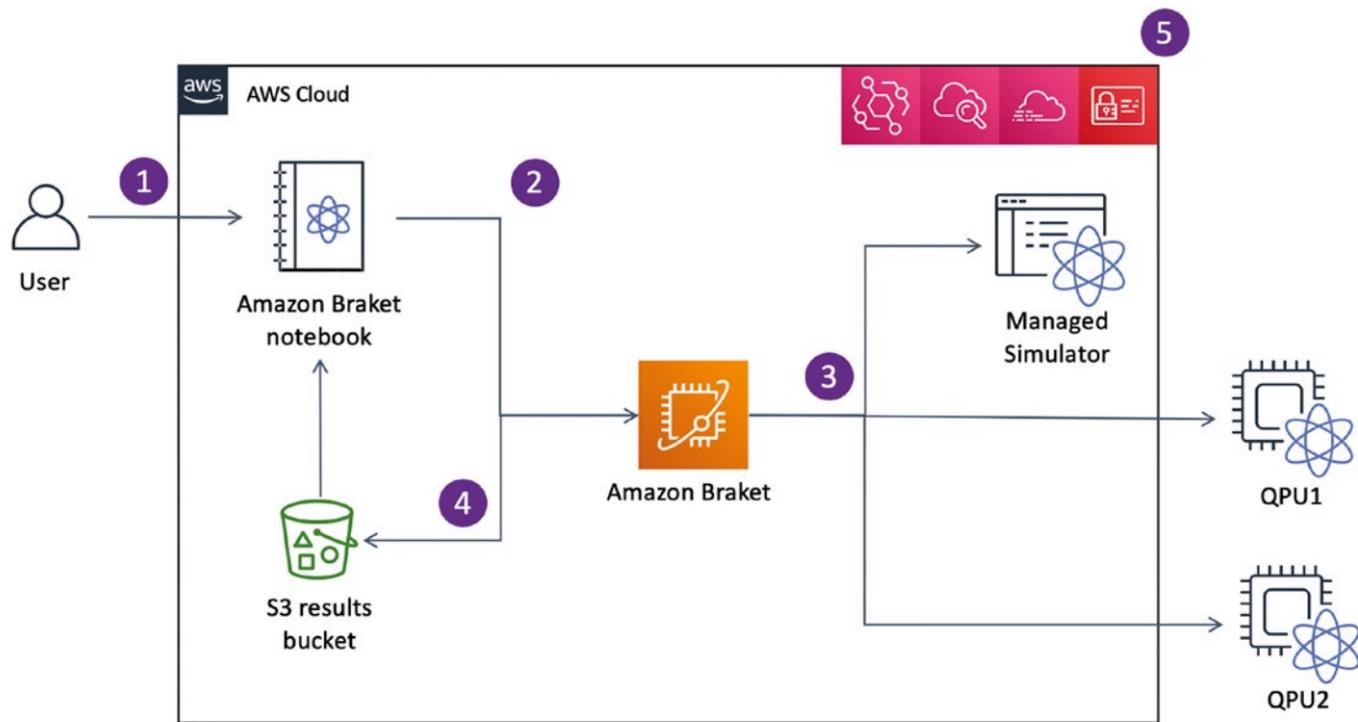
storage, chemical engineering, material science, drug discovery, process optimization, and machine learning.

We are hearing from some customers that they are interested in looking into how quantum computing might help their business in the future, but a lot of them face a significant learning curve to become truly quantum ready, as it is hard

for customers to engage with quantum computers, particularly if they want to evaluate different early-stage technologies, each with their own development, simulation, and test environments. Without the opportunity to develop the necessary skills, it’s difficult for customers to identify when quantum computing will provide benefit, and learn how they can design algorithms and discover new applications.

We think that now is a good time to provide a service that will help customers to start planning around these technologies, and to help overcome these challenges, AWS is not only launching the Amazon Braket service but also the Amazon Quantum Solutions Lab, so that customers can begin learning and experimenting with quantum computing today.

Amazon also offers the use of so-called “hybrid algorithms”. What are hybrid algorithms and what application



Amazon Web Services – Amazon Braket Task Flow

possibilities are associated with them?

Hybrid quantum algorithms use an iterative approach, with quantum computers as co-processors to classical computing resources. This approach helps mitigate the effect of errors inherent in today's quantum computing hardware. To help you get started with hybrid algorithms, Amazon Braket supports PennyLane, an open source software framework built around the concept of quantum differentiable programming. This concept allows you to train quantum circuits in the same way that you would train a neural network to find solutions to computational problems in quantum chemistry, quantum machine learning, and optimization. PennyLane is performance-optimized for Amazon Braket and provides interfaces to familiar machine-learning tools, including PyTorch and TensorFlow, to make training quantum circuits fast, easy, and intuitive.

A classic case: A medium-sized company in Germany is currently working on the switch to digitization. Regardless of its market specialization, it would like to integrate quantum computing in order to optimize internal processes. The company comes across Amazon's "Braket". How does the cooperation with Amazon work? How does the company bind itself to Amazon?

Amazon Braket is a fully managed service that makes it possible for customers to get started quickly, using familiar tools and providing the same, consistent AWS experience they know today, without having to engage multiple vendors or risk being locked into a single technology.

But once the customers get started, it is crucial for them to understand that some types of quantum computers are particularly well suited to solving specific sets of problems.

Because we know that a lot of our customers are missing the necessary skills to identify the benefits of quantum computing for their business, we established the Amazon Quantum Solutions Lab, which will help our customers to assess the state of the current technologies, identify how it might impact their business, and prepare for the future.

As the technology eventually reaches the point of commercial viability, AWS and its partners will collaborate on experiments with customers and guide them to incorporate quantum solutions into their business. Lab programs will combine hands-on educational workshops with brainstorming sessions to help customers "work backwards" from business challenges, and then go step-by-step through the process of using quantum computers effectively.

In combination with customer access to Amazon Braket, and by integrating with familiar software tools for optimization, quantum simulation, computational material science, and quantum chemistry, the Amazon Quantum Solutions Lab will help customers to determine where existing high-performance computing can currently meet their needs, begin to develop their own strategy for quantum computing, build internal expertise, and eventually deploy quantum applications. Amazon Partner Network (APN) partners participating in the Amazon Quantum Solutions Lab include: IQbit, Rahko, Rigetti, QCWare, QSimulate, Xanadu, and Zapata.

"We launched more than 250 new capabilities for machine learning and artificial intelligence in the last year."

Which other machine-learning processes are already in use at Amazon?

Our experience working with hundreds of thousands of customers combined with our own experience building machine-learning (ML) driven businesses with Amazon, has given us deep knowledge in what it takes to successfully deploy and scale machine-learning initiatives. AWS offers the broadest and deepest set of machine-learning services and supporting cloud infrastructure. We launched more than 250 new capabilities for machine learning and artificial intelligence in the last year.

To give you some examples: as customers look to machine learning to reinvent entire areas of their business, we are building AI Services to address common horizontal and industry-specific use cases. These include Amazon Kendra for intelligent search, Amazon Contact Lens for Amazon Connect, for contact center intelligence, and Amazon CodeGuru and DevOps Guru for developer operations.

And at re:Invent 2020, we launched five new machine-learning services that help industrial and manufacturing customers embed intelligence in their production processes in order to improve operational efficiency, quality control, security, and workplace safety.

In healthcare, our customers can use our purpose-built solutions for transcription, medical text comprehension, and the Amazon HealthLake service, a new HIPAA-eligible service to store, transform, query, and analyze petabytes of health data in the cloud.

For those who are building their own models, we also invested in making machine learning faster and easier to do with Amazon SageMaker. We built Amazon SageMaker from the ground up to provide every developer and data scientist with the ability to build, train, and deploy machine-learning models quickly and at lower cost by providing the tools required for every step of the ML development lifecycle in one integrated, fully managed service.

On your website you announce that two new container-orchestration services will soon be available: Amazon ECS Anywhere, Amazon EKS Anywhere. What is it and what do the two services do?

ECS Anywhere is an extension of Amazon ECS (Elastic Container Service) which was introduced in 2014 and will allow customers to deploy native Amazon ECS tasks in any environment. This includes traditional AWS-managed infrastructure, as well as customer-managed infrastructure. Our customers will continue using the familiar managed ECS control plane that is running in their chosen AWS region. They can then use AWS Systems Manager to install a new version of the open source ECS agent on their infrastructure of choice, enabling them to run ECS container tasks on their own infrastructure. EKS Anywhere is a new deployment option for Amazon Elastic Kubernetes Service (EKS) that enables customers to easily create and operate Kubernetes clusters on-premises, including their own virtual machines and bare metal servers. In addition, it provides an installable software package for automa-

tion tooling of cluster lifecycle support and enables customers to automate cluster management, reduce support costs, and eliminate the redundant effort of using multiple open source or 3rd party tools for operating Kubernetes clusters.

How can the direct or indirect use of quantum computing change the shipping processes of a global shipping company like Amazon? Why does Amazon of all people see great potential in this new technology?

Today, Amazon is much more than a shipping company: Our mission is to be Earth's most customer-centric company. Amazon is guided by four principles: customer obsession rather than competitor focus, passion for invention, commitment to operational excellence, and long-term thinking. Customer reviews, 1-Click shopping, personalized recommendations, Prime, Fulfillment by Amazon, AWS, Kindle Direct Publishing, Kindle, Fire tablets, Fire TV, Amazon Echo, and Alexa

"Quantum computing is still an early-stage technology and building this expertise will take time, but it has the potential to solve computational problems that are beyond the reach of classical computers."

are some of the products and services pioneered by Amazon.

Quantum computing is still an early-stage technology and building this expertise will take time, but it has the potential to solve computational problems that are beyond the reach of classical computers. It promises to transform areas such as energy storage, chemical engineering, material science, drug discovery, process optimization, and machine

learning. Optimization problems are ubiquitous across many industries including telecommunications, supply chain logistics (including shipping), and financial services. Finding the optimal approach from a set of alternatives can overwhelm classical computers as the number of possible combinations drives up complexity. Quantum computing can be used to address a wide range of these problems, for instance in the field of combinatorial optimization by accelerating linear programming algorithms and Monte Carlo methods.

Interview: Hannes Mittermaier

Constantin Gonzalez

Constantin Gonzalez is Principal Solutions Architect at Amazon Web Services in Munich. For over 20 years he has been diving deeply into various technologies such as CPU and systems architecture, operating systems, storage, high-performance computing, web technologies, cloud computing, IoT and machine learning.



At Amazon, he helps customers from startups to large multi-national companies leverage the Cloud in order to be more efficient and innovative, while transitioning their companies from "old IT" to fast and innovative, digital organizations.

Wie gelingt meinem Unternehmen der Einstieg ins Quantencomputing? Über das Ökosystem für die Quantencomputing-Anwenderkompetenz des QAR-Lab

Jonas Stein, Lothar Borrmann, Sebastian Feld, Thomas Gabor, Christoph Roch, Leo Sünkel, Sebastian Zielinski, Claudia Linnhoff-Popien

Die Mission des QAR-Labs ist es, die Technologie des Quantencomputings einem breiten Nutzerkreis in Wissenschaft und Wirtschaft zugänglich zu machen. Dazu evaluieren wir unterschiedliche Systeme, entwickeln Algorithmen und Software, vergleichen Architekturen und Performance mit dem Ziel, Unternehmen beim Einstieg sowie der Umsetzung, Migration und Auswertung von Use Cases für das Quantencomputing zu unterstützen. Unser großes Anwendernetzwerk sorgt ferner für den Austausch der Firmen auch untereinander.

Das Quantum Applications and Research Laboratory (kurz QAR-Lab) wurde im Jahr 2016 am Institut für Informatik der LMU München gegründet. Neben der Grundlagenforschung im Bereich Quantencomputing beschäftigt es sich insbesondere mit der Nutzbarmachung dieser Technologie für praxisnahe Anwendungen.

Die dabei entstehenden Beiträge für Wissenschaft und Wirtschaft werden von Bund (BMWi) und Land (StMWi) im Rahmen von Förderprojekten wie „PlanQK“ und „QAR-Lab Bayern - Aufbau eines bayerischen Ökosystems für Quantum-Computing-Anwenderkompetenz“ unterstützt. Konkret arbeitet das QAR-Lab dabei an der Umsetzung und Entwicklung von quantenunterstützten KI-Algorithmen für unterschiedlichste industrielle Use Cases und dem Aufbau eines Ökosystems für die Quantencomputing-Anwenderkompetenz. In diesem Kontext agiert das QAR-Lab als Vermittler zwischen den Domänen- und Quantentechnologieexperten, mit dem Ziel neue Anwendungen zu realisieren. Darüber hinaus ermöglicht der enge Kontakt des QAR-Labs mit zahlreichen führenden Quantenhardwareherstellern (wie z.B. IBM, D-Wave Systems, Rigetti und Fujitsu) eine einzigartige Rolle in der Welt des Quantencomputings. Insbesondere hinsichtlich der Anzahl an Hardwarepartnern befindet sich das QAR-Lab damit in einer deutschlandweit führenden Position. Die Struktur des QAR-Labs in der Vermittlung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ist in Abbildung 1 dargestellt.

Im Rahmen des Ausbaus unserer Forschung und des Wissenstransfers in die Wirtschaft erweitert das QAR-Lab ständig seine Kompetenzen. Zwecks Wissenstransfers der Grundlagenforschung stellen wir unsere Ergebnisse allgemein der Öffentlichkeit zur Verfügung. Für speziellere Anfragen, zielgerichtete Schulungen, Bereitstellung von Quanten-Hardware, Programmierung von Use Cases, Unterstützung bei Migrationspfaden, Prognostizierung eines Quantenvorteils etc. geht das QAR-Lab individuelle Kooperationen mit Industriepartnern ein.

Der Weg zum praktischen Einsatz von Quantum Computing

Die Welt der Software ist heute voll von Aufgabenstellungen, die durch einen immensen Einsatz von Rechenleistung gelöst werden: Das Erstellen von Zeitplänen, das Optimieren von Produktionsabläufen, das Verteilen von Ressourcen (wie aktuell gerade Impfdosen), der Aufbau robuster Wertpapierportfolios, sowie das Trainieren neuronaler Netze und damit alles, was durch sie geleistet wird, darunter Bilderkennung, Sprachassistenten, uvm. All diese Aufgabenstellungen benötigen besonders viel Rechenzeit, selbst wenn man sie nur für kleine Datenmengen einsetzen will. Oft setzt man ganze Rechenzentren und/oder spezialisierte Hardware ein, um solche



Abbildung 1: Die Struktur des QAR-Labs – Eine Symbiose von Realweltanwendungen aus der Wirtschaft (oben), der Grundlagenforschung im Bereich des Quantencomputings für verschiedenste Disziplinen der Wissenschaft (unten) basierend auf der marktführenden Quantenhardware (rechts).

Problemstellungen zu bändigen. In vielen Fällen muss man jedoch vor dem schieren Rechenaufwand kapitulieren.

Auf der anderen Seite haben wir heute sehr einfache Quantencomputer. Sie versprechen, ganz neue Quellen für Rechenleistung zu erschließen, und viele Algorithmen können durch sie beschleunigt werden: Optimierungsprobleme können schneller gelöst werden, Schlüssel schneller geknackt, Datenberge schneller durchsucht werden. Schon heute kann jeder die meisten Quantencomputer gegen Gebühr benutzen und direkt oder via Cloud-Zugriff in die eigene Software integrieren. Doch aktuelle Quantencomputer operieren nur auf sehr kleinen Aufgabenstellungen: Die Anzahl und Qualität der Qubits reicht meist nicht aus, um besonders umfangreiche oder besonders komplexe Aufgabenstellung effektiv umsetzen zu können. Für die Praxis bieten sie heute noch keinen echten Vorteil.

Irgendwann werden sich die rechenintensiven Aufgabenstellungen und die rechenstarken Quantencomputer von selber finden: Quantencomputer werden immer besser und die Aufgabenstellungen immer vielfältiger. Dann wird man eine Aufgabe aus der Praxis einfach genau so wie sie anfällt auf einem Quantencomputer lösen können. Doch bis dann klafft eine Lücke zwischen diesen beiden Bereichen der Informatik: Die QC-Forscher verstehen die Zielanwendungen nicht und die praktischen Anwender verstehen die Möglichkeiten des Quantum Computings nicht.

Das QAR-Lab verfolgt das Ziel, über diesen Graben eine

Brücke zu bauen. Dadurch führen wir Quantencomputer und praktische Anwendungsfälle zusammen, bevor es automatisch „Klick“ macht. Wir nutzen Quantencomputer, so früh es möglich ist, nicht erst sobald es trivial ist. Für uns stellt das eines der spannendsten Forschungsgebiete der aktuellen Informatik dar. Für unsere Partner entsteht hier ein entscheidender Wettbewerbsvorteil.

Abbildung 2 zeigt den Weg, den wir vor uns sehen: Über den Graben zwischen Quantum Computing Hardware und praktischen Anwendungen führt eine Brücke aus 5 Elementen, an denen das QAR-Lab aktiv arbeitet. Im Einzelnen sind dies:

- Die Analyse der Hardware-Architektur und der Fähigkeiten der QC-Chips: Es existieren zahlreiche, teilweise grundverschiedene Ansätze, um einen Computer zu bauen, der mit Quanteneffekten rechnen kann. Diese werden heute alle parallel weiterentwickelt. Das Ergebnis sind QC-Chips, die unterschiedlich aufgebaut sind, etwas unterschiedlich funktionieren und dann auch für unterschiedliche Einsatzzwecke besonders geeignet sein können. Niemand will sich hier festlegen und damit einschränken. Das QAR-Lab verfügt über die Erfahrung, die Fähigkeiten der QC-Chips zu analysieren und treibt natürlich die Verbreitung von Standard-Verfahren voran.

- Softwarewerkzeuge und -plattformen für den Hardware-zugriff und zur abstrakten Programmierung: Wer einen Quantencomputer programmieren will, mag sich nun nicht

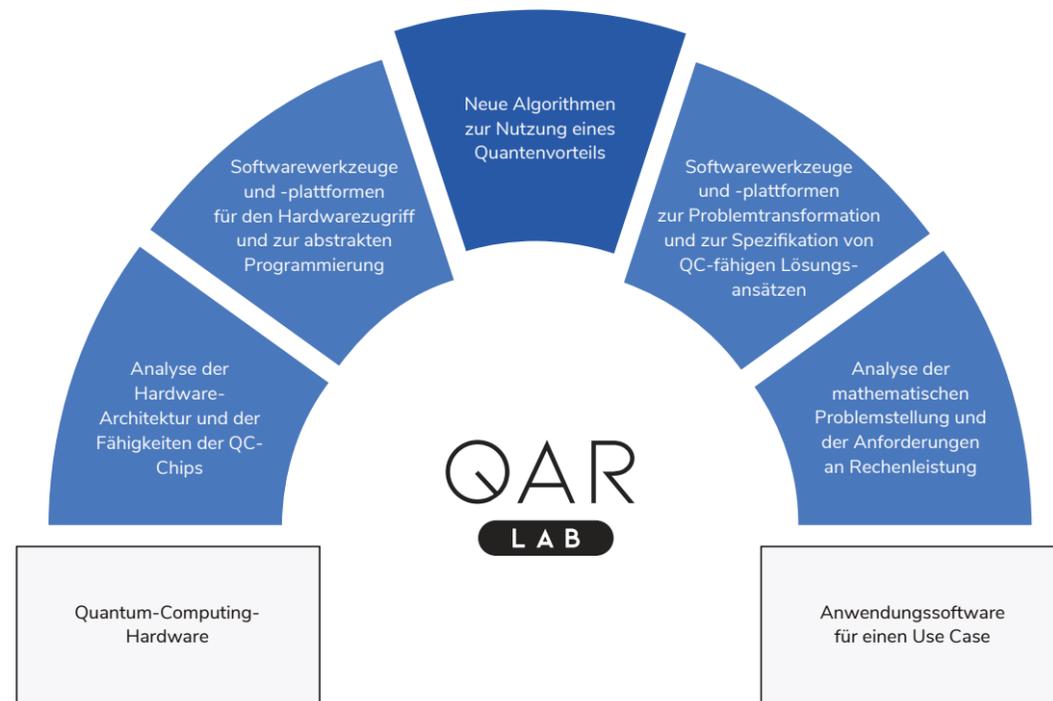


Abbildung 2: Brücke zwischen der Quantum-Computing-Hardware und der Anwendungssoftware. Das QAR-Lab forscht aktiv an allen Bausteinen ebnet damit den Weg für anwendungsorientiertes Quantum Computing.

immer und jedes Mal mit allen möglichen Chips einzeln beschäftigen. Quantum Computing muss auf dem Weg zur Praxis auf die nächste Abstraktionsstufe gehoben werden! Neue Programmierwerkzeuge und -sprachen ermöglichen generische Quantum-Software zu schreiben, die auf verschiedene Hardware-Typen dynamisch zugreifen kann und auf verschiedenen Hardware-Architekturen ausgeführt werden kann. Eine Middleware wie UQO vom QAR-Lab ermöglicht dies für Optimierungsprobleme schon heute.

- Die Analyse der mathematischen Problemstellung und der Anforderungen an Rechenleistung: Eine Brücke baut man von beiden Seiten gleichzeitig! Wir müssen auch die Probleme in der Praxis besser verstehen lernen, wenn wir sie möglichst bald auf einem Quantencomputer zum Laufen bringen wollen. Hier ist die Analyse der mathematischen Rahmenbedingungen und der bekannten mathematischen Schranken an das Lösen eines Problems essenziell. Ebenso wichtig ist es aber auch, sich früh die interessanten Probleme herauspicken zu können. Läuft eine Lösung heute schon schnell genug? Dann braucht es auch nicht sofort den Quantencomputer!
- Softwarewerkzeuge und -plattformen zur Problemtransformation und zur Spezifikation von QC-fähigen Lösungsansätzen: Auch auf der Seite der Anwendungen brauchen wir eine gemeinsame Sprache. Das QAR-Lab erforscht, wie Aufgabenstellungen zu spezifizieren sind, damit der Angriffspunkt für einen Quantenalgorithmus ersichtlich wird. Viele Aufgabenstellungen müssen hierfür entsprechend transformiert werden, was natürlich nicht zu aufwändig sein

darf, um einen Rechenvorteil nicht wieder zu nivellieren. Wir unterstützen hier auf Plattformen wie PlanQK, die zunächst die Erfahrung von Experten unterschiedlicher Fachbereiche zusammenbringen, mit dem Ziel, schließlich auch hier einen Großteil der Arbeit durch Softwareunterstützung automatisch zu erledigen.

- Neue Algorithmen zur Nutzung eines Quantenvorteils: Dies ist der Schlussstein unserer Brücke. Quantencomputer bieten unheimlich viele neue Möglichkeiten. Der Einsatz all ihrer Fähigkeiten ist aktuell aber lediglich bedingt erschlossen. Die bisher gut untersuchten QC-Algorithmen bieten entweder nur begrenzte Einsatzfelder oder einen nur schlecht absehbaren Vorteil. Der vielleicht riskanteste aber auch der spannendste Schritt zum ubiquitären, praktischen Einsatz von Quantum Computing wird die Anpassung der bekannten Algorithmen an neue Aufgabenstellung und die kreative Konstruktion gänzlich neuer Algorithmen zur Nutzung aller Vorteile eines Quantencomputers.

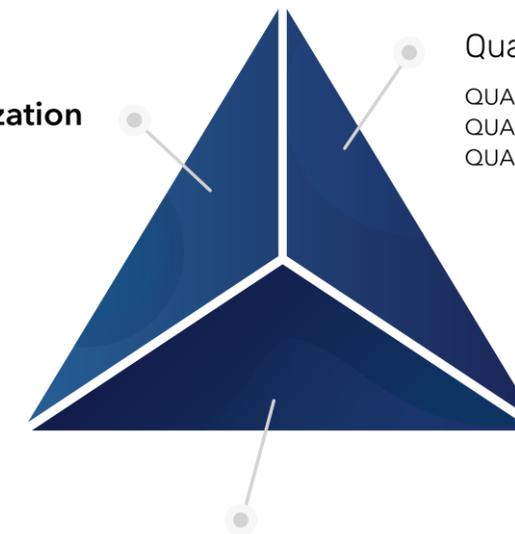
Es ist ein umfangreiches Vorhaben, dass das QAR-Lab zusammen mit allen weiteren Akteuren in der Wissenschaft und Wirtschaft vor sich hat. Deshalb ist es essenziell, schrittweise vorzugehen. Mit jeder neuen Entwicklung sehen wir die Vorteile und schaffen neue Möglichkeiten für jeden Interessenten am Quantum Computing. Nur indem wir uns dem praktischen Vorteil von Quantum Computing von beiden Seiten nähern, profitieren wir sofort von den Nutzungsmöglichkeiten der Hardware und einem tieferen Verständnis der Aufgabenstellungen.

Quantum Optimization

HYBRID OPTIMIZATION
QAOA
QUANTUM ANNEALING

Quantum Artificial Intelligence

QUANTUM REINFORCEMENT LEARNING
QUANTUM BOLTZMANN MACHINES
QUANTUM GANS



Quantum Software Platform

MIDDLEWARE UQO
INTELLIGENT HARDWARE MAPPING
TUTORIALS

Abbildung 3: Die Forschungsschwerpunkte des QAR-Labs und deren Ergebnistransfer.

Forschung und Ergebnistransfer

Die Forschungsschwerpunkte des QAR-Labs sind Quantum Optimization und Quantum Artificial Intelligence. Darin wird Quantencomputing in den für die in der Informatik omnipräsenten Bereichen Künstliche Intelligenz und Optimierung eingesetzt. Um einen bestmöglichen Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung zu ermöglichen, arbeiten wir im QAR-Lab aktuell an einer Software-Plattform, deren Kernstück die Middleware UQO für einen einheitlichen und einfachen Zugriff auf Quantenhardware darstellt. Eine Übersicht zu den vorangegangenen Bereichen ist in Abbildung 3 dargestellt.

1. Quantum Optimization

Die Lösung von Optimierungsproblemen ist ein zentrales Gebiet der Informatik und besonders relevant in der Anwendung. Der oft exponentiell zur Eingabegröße wachsende Suchraum verhindert eine exakte Lösung praxisrelevanter Problemstellungen auf klassischen Computern. Ansätze des Quantencomputings zeigen Möglichkeiten auf, diese Probleme effizienter als mit klassischen Algorithmen zu lösen. Der Fokus der Forschung in diesem Bereich ist die Suche nach einer optimalen Formulierung der Probleme, sodass der in der Theorie bewiesene Quantenvorteil bestmöglich auf aktueller Quantenhardware umgesetzt werden kann. Dazu ist spezifisches Expertenwissen der Problemfelder notwendig, auf das wir durch zahlreiche zurückliegende Forschungen zu Problemen wie beispielsweise dem Gate Assignment Problem (GAP),

dem 3-Erfüllbarkeitsproblem (3-SAT) [8], dem Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) und vielen mehr, verfügen. Auf Basis dessen konnten wir beispielsweise in den folgenden Bereichen wertvolle Fortschritte erzielen:

- Der Komprimierung von Geometriedaten mittels Quantum Annealing, die z.B. für einen effizienten Datentransfer in verteilten 3D-Computer-Vision-Anwendungen nötig ist [10]
- Der Lösung von Optimierungsproblemen für hoch relevante, logistische Problemstellungen mittels hybriden Quantenalgorithmen [12]
- Der Nutzung von Quantum Annealing zur Ausführung von approximativen Lösungsverfahren für Optimierungsprobleme, insbesondere dem Problem der Archetypischen Analyse [11]
- Der optimalen Formulierung eines Optimierungsproblems mit Nebenbedingung zur Ausführung auf einem Quantum Gate Computer [2]
- Untersuchung Approximativer Lösungsverfahren auf Quantenannealern [1]
- Abbildung von Zeitreihen unterschiedlicher Länge mittels Quantum Annealing [9]
- Untersuchung aktueller NISQ Hardware hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit in praktischen Anwendungen für Problemstellungen mit Quanten-Speedup Potential [4]
- Dem Einsatz von Quantum Annealing zur Erkennung von Nash-Gleichgewichten, die eine zentrale Rolle in der Spieltheorie und damit der Modellierung von Wirtschaftsvorgängen haben [3]

Aktuell forschen wir an einigen weiteren Problemstellungen, für die wir vor allem Konzepte auf Basis des Quantum Gate Model entwickeln. Im Folgenden sind einige Beispiele hierzu aufgeführt:

- Einbettung von Problemformulierungen auf spezielle Hardwarearchitekturen sowohl für das Quantum Gate Model als auch für Quantenannealer
- Nutzung von Quantum Walks zur Lösung von Community-Detection Problemen
- Integration eines Quantenalgorithmus zum Lösen linearer Gleichungssysteme an geeigneter Stelle innerhalb der Archetypischen Analyse, einem speziellen Clusteringverfahren

2. Quantum Artificial Intelligence

Ansätze der Künstlichen Intelligenz ermöglichen die Lösung hochkomplexer Probleme durch die Simulation intelligenten Verhaltens. In diesem Feld konnten in den letzten Jahren zahlreiche Durchbrüche in überaus relevanten Problemstellungen erzielt werden. Der Trend der dazu benötigten Rechenkapazitäten steigt jedoch exponentiell, sodass zukünftig deutlich leistungsfähigere Computer benötigt werden. Ein vielversprechender Ansatz ist es dabei, rechenzeitintensive Bausteine von KI-Algorithmen in einem hybriden Verfahren mittels Quantumcomputing zu lösen. Vor dem Hintergrund unserer langjährigen Expertise im Bereich der Künstlichen Intelligenz bringen wir uns aktuell insbesondere im Bereich der hybriden Optimierung, der Lösung von Gleichungssystemen und dem Lernen von Clustern und SVMs ein. Zusätzlich verfolgen wir vielversprechende Forschungsrichtungen wie Quantum Reinforcement Learning (QRL), Quantum General Adversarial Networks (QGANs) und dem Training von Quantum Boltzmann Machines (QBM). Zusätzlich dazu forscht das QAR-Lab daran, wie Künstliche Intelligenz für die Erhöhung der Effizienz eines Quantenalgorithmus durch die Modifikation dessen Formulierung eingesetzt werden kann [6]. Konkret wurden dazu beispielsweise Neuronale Netze trainiert, um die Anzahl der benötigten Qubits zur Lösung eines Problems mittels Quantum Annealing zu verringern [7].

3. Quantum Software Plattform

Zur Ermöglichung eines einfachen Austauschs von Quanten-Algorithmen, -Implementierungen und -Applikationen arbeitet das QAR-Lab an einer darauf ausgelegten Softwareplattform. Um den Einstieg in das Feld des Quantumcomputings zu erleichtern, werden hier Guidelines, Lehrmaterialien und Entwicklungswerkzeuge bereitgestellt. Als Besonderheit der Plattform wird ein universeller Zugriff auf verschiedene Quantenhardware unabhängig von einzelnen Hardwareherstellern durch die im QAR-Lab entwickelte Middleware UQO ermöglicht [5]. Als Unterstützung bei der Auswahl der geeignetsten Quantenhardware für eine angefertigte Implementierung werden intelligente Algorithmen bereitgestellt. Zur maximalen Ausnutzung der bislang noch sehr begrenzten

Kapazitäten verfügbarer Quantenhardware forschen wir in dem Feld der möglichst optimalen, automatisierten Übersetzung von Quantenalgorithmien auf vorhandene Quantenhardware. Erzielte Ergebnisse, wie beispielsweise eine automatisierte Optimierung von QUBO-Formulierungen für Quantenannealer der Firma D-Wave Systems, werden auf der Softwareplattform als Werkzeug zur Verfügung gestellt.

Zugriff auf Quantenhardware

Der aktuelle Stand der Technik in der Entwicklung und dem Bau von Quantencomputern lässt eine Serienfertigung solcher Hardware bislang nicht zu. Nahezu jeder Bau eines Quantencomputers ist aktuell die Realisation eines neuen Prototyps, der stationär beim Hersteller verbleibt. Auch aufgrund der enormen Kosten, die in die Realisation eines solchen Systems fließen, ist der Verkauf der Hardware meist keine Option, sodass die meisten Hersteller lediglich Rechenzeit auf ihrer Hardware über die Cloud zur Verfügung stellen. Die wachsende Anzahl an Herstellern bringt dabei eine große Menge von verschiedenen Softwareanbindungen mit sich, sodass die Ausführung eines Quantenalgorithmus auf unterschiedlicher Hardware jeweils eine Umprogrammierung der Implementierung erfordert. Eine Middleware, die sich dieser Problemstellung annimmt, ist die bereits erwähnte, im QAR-Lab entwickelte Softwarelösung UQO. Aktuell ermöglicht sie bereits den Zugriff auf Quantenannealer der Firma D-Wave Systems. Im Laufe dieses Jahres ist die Anbindung der Quantenhardware unserer Partner Rigetti, IBM und Fujitsu geplant. Zusätzlich dazu befindet sich das QAR-Lab in Gesprächen für die Nutzung der Hardware-Plattform „Quantum Inspire“ von QuTech, den Mikroprozessoren der Firma Quantum Brilliance und den Quantum-Gate-Computern von Google.

Aufbau des Ökosystems und Zusammenarbeit mit der Wirtschaft

In einigen großen deutschen Unternehmen wie zum Beispiel Volkswagen, der Deutschen Telekom, Bosch oder der Deutschen Bahn gibt es bereits erste Initiativen zum Thema Quantumcomputing. Um das volle Potenzial des Quantumcomputings auszuschöpfen, ist neben dem Wissenstransfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft auch der Austausch der Experten untereinander nötig, um Synergien aller Beteiligten herzustellen. Hierzu leistet das QAR-Lab durch die Veranstaltung von Workshops, Seminaren, Infoveranstaltungen und Kursen zur Aus- und Weiterbildung in Verbindung mit der Organisation zahlreicher Projekte zur Zusammenarbeit von Industrie und Wissenschaft einen zentralen Beitrag.

Um vor allem auch kleinen und mittelständischen Unternehmen den Einstieg in die Welt des Quantumcomputings zu erleichtern, bietet das QAR-Lab die Möglichkeit von

Kooperationen mit Partnern aus der Wirtschaft an. Hierbei leistet das QAR-Lab Unterstützung auf dem gesamten Weg von der Identifizierung von Use Cases über die Implementierung von Quantumcomputing basierten Lösungsansätzen bis hin zur Wahl der Quantenhardware und der Ausführung der Quantenalgorithmien:

1. Identifizierung von Use Cases der Anwenderindustrie

Infolge der vielfältigen Problemstellungen der Unternehmen aus unterschiedlichsten Branchen betrachten wir verschiedenste Anwendungen aus der Praxis und bereiten sie hinsichtlich ihrer Lösbarkeit mit Hilfe von Quantumcomputing auf. Oft sind darunter geschäftsrelevante Problemstellungen, deren effizientere Lösung Wettbewerbsvorteile verspricht. Als Nebengewinn identifizieren wir so Anforderungen an die verfügbaren Quantumcomputing-Technologien und Erwartungen an zukünftige Entwicklungen.

2. Implementierung von Quantumcomputing-basierten Lösungsansätzen

Insbesondere der Prozess der Implementierung ermöglicht den Kooperationspartnern Einblicke in die Welt des Quantumcomputings. Als Domänenexperten leisten sie in diesem Schritt zentrale Beiträge zur Lösungsfindung und lernen Quantenalgorithmien kennen. Hier leistet das QAR-Lab wertvolle Unterstützung, um die ansonsten hohe Einstiegsbarriere des Quantumcomputings zu überwinden.

3. Auswahl und Zugriff auf Quantenhardware

Mit der großen Anzahl an Quantenhardwaresystemen ist die Wahl des optimalen Rechners für das eigene Problem ohne Expertenwissen nicht trivial und bedarf oft eines experimentellen Vergleichs, der (wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert) meist sehr aufwändig ist. Unsere Expertise in der Anwendung von Quantenhardware und der vorhandene Zugriff auf einige der leistungsfähigsten Rechner mittels der Middleware UQO ermöglichen uns die notwendige Bewertungskompetenz zur Wahl der optimalen Quantenhardware.

4. Auswertung der Ergebnisse und Prognose eines Quantenvorteils

Heutige Quantencomputer ermöglichen noch keine fehlerfreie bzw. fehlerkorrigierende Ausführung von Quantenalgorithmien. Im Fachjargon wird der aktuelle Stand auch deshalb dem sogenannten NISQ-Zeitalter (noisy intermediate scale quantum) zugeordnet. Diese Fehleranfälligkeit, gekoppelt mit der nicht-deterministischen Natur einiger Rechenschritte im Quantumcomputing, erschwert die Auswertung der Ergebnisse im Vergleich zu klassischen Alternativansätzen. Mit Hilfe der Erfahrung, die wir bereits auf diesem Gebiet sammeln konnten, können wir einen zentralen Beitrag in der Beantwortung der Frage „Welche Vorteile hat die Nutzung von Quantumcomputing für ein spezielles Problem?“ und „Wann erreicht ein Use Case einen Quantenvorteil?“ leisten.

5. Schulungen und Anwendernetzwerk

Parallel schulen wir Anwender individuell entsprechend ihres QC-Know-How Levels und Bedarfs hinsichtlich interessanter Use Cases und der dafür am besten geeigneten Quantum Hardware. In Kooperation mit den aktuell 127 Firmen der Digitale Stadt München e.V. sorgen wir über Formate wie DigiTalks und DIGICON neben der Weiterbildung auch für den Austausch der Firmen untereinander und begleiten in Kooperation mit dem Magazin DIGITALE WELT und dem Springer-Verlag die Publikation neuester Trends und Entwicklungen in diesem Gebiet in verschiedenen Formaten. Mit wachsendem Interesse der Wirtschaft werden unsere Angebote zunehmend diversifiziert und kontinuierlich ausgebaut.

Zukunftsvision

Das gesetzte Ziel des QAR-Labs ist es einerseits den Zweig des Quantumcomputings durch Grundlagenforschung voran zu treiben und andererseits eine breitflächige Anwenderkompetenz herzustellen. Dazu fördern wir sowohl die universitäre Lehre als auch die Aus- und Weiterbildung im Bereich Quantumcomputing, um neue Experten hervorzubringen, als auch die Anwendung von Quantumcomputing in der Industrie durch Schulungen und Kooperationsprojekten. Damit leisten wir einen Beitrag dazu, das Feld des Quantumcomputings mit seinen Ursprüngen in der Quantenphysik zu einem zentralen Feld der Informatik zu machen. Insbesondere ist es uns ein großes Anliegen die Einstiegsbarriere in den Bereich des Quantumcomputings zu minimieren und damit Quantumcomputing als gängiges Werkzeug zur Lösung komplexer Problemstellungen zu etablieren. Das QAR-Lab fungiert dabei in einer Vorreiterrolle und trägt essenziell dazu bei, dass Deutschland im Einsatz von Quantentechnologien auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig bleibt.

[1] I. Sax, S. Feld, S. Zielinski, T. Gabor, C. Linnhoff-Popien und W. Mauerer, „Approximate approximation on a quantum annealer“ in 17th ACM Int. Conf. Comput. Front. 2020, CF 2020 - Proc., 2020. [2] C. Roch, A. Impertro, T. Phan, T. Gabor, S. Feld und C. Linnhoff-Popien, „Cross entropy hyperparameter optimization for constrained problem hamiltonians applied to QAOA“, 2020. [3] C. Roch, T. Phan, S. Feld, R. Müller, T. Gabor, C. Hahn und C. Linnhoff-Popien, „A quantum annealing algorithm for finding pure nash equilibria in graphical games“ in Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), 2020. [4] T. Hubregtsen, C. Segler, J. Pichlmeier, A. Sarkar, T. Gabor und K. Bertels, „Integration and Evaluation of Quantum Accelerators for Data-Driven User Functions“ in Proc. - Int. Symp. Qual. Electron. Des. ISQED, 2020. [5] T. Gabor, S. Zielinski, C. Roch, S. Feld und C. Linnhoff-Popien, „The UQ platform: A unified approach to quantum annealing.“ in 2020 5th Int. Conf. Comput. Commun. Syst. ICCCS 2020, 2020. [6] T. Gabor, L. Sünkel, F. Ritz, T. Phan, L. Belzner, C. Roch, S. Feld und C. Linnhoff-Popien, „The Holy Grail of Quantum Artificial Intelligence: Major Challenges in Accelerating the Machine Learning Pipeline.“ in Proc. - 2020 IEEE/ACM 42nd Int. Conf. Softw. Eng. Work. ICSEW 2020, 2020. [7] T. Gabor, S. Feld, H. Safi, T. Phan und C. Linnhoff-Popien, „Insights on Training Neural Networks for QUBO Tasks“ in Proc. - 2020 IEEE/ACM 42nd Int. Conf. Softw. Eng. Work. ICSEW 2020, 2020. [8] T. Gabor, S. Zielinski, S. Feld, C. Roch, C. Seidel, F. Neukart, I. Galter, W. Mauerer und C. Linnhoff-Popien, „Assessing Solution Quality of 3SAT on a Quantum Annealing Platform“ in Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), 2019. [9] S. Feld, C. Roch, T. Gabor, X. T. M. To und C. Linnhoff-Popien, „The dynamic time warping distance measure as QUBO Formulation“ in 2020 5th Int. Conf. Comput. Commun. Syst. ICCCS 2020, 2020. [10] S. Feld, M. Friedrich und C. Linnhoff-Popien, „Optimizing Geometry Compression Using Quantum Annealing“ in 2018 IEEE Globecom Work. GC Wkshps 2018 - Proc., 2019. [11] S. Feld, C. Roch, K. Geirhos und T. Gabor, „Approximating Archetypal Analysis Using Quantum Annealing“ in 28th Eur. Symp. Artif. Neural Networks, Comput. Intell. Mach. Learn. (ESANN 2020), 2020. [12] S. Feld, C. Roch, T. Gabor, C. Seidel, F. Neukart, I. Galter, W. Mauerer und C. Linnhoff-Popien, „A hybrid solution method for the capacitated vehicle routing problem using a quantum annealer“ Front. ICT, 2019.

Wissenschaft und Wirtschaft auf dem Weg in die digitale Zukunft

BASF ist, nach Umsatz gesehen, das weltweit größte Chemieunternehmen. Dr. Horst Weiß arbeitet bei BASF in der Einheit Digitalisierung von Forschung und Entwicklung (F&E) und verantwortet dort als Vice President das Thema „Knowledge Innovation and Solutions“. BASF betreibt seit 2017 einen eigenen TOP500-Supercomputer, der im Rahmen einer Mitarbeiterbefragung auf den Namen „Curiosity“ getauft wurde.

„Curiosity“ ist ein treffend gewählter Neologismus, der an das lat. Wort „Curiositas“, dt. „Neugierde“, erinnert. Was interessiert Sie an der Welt der Quanten?

BASF sieht High Performance Computing (HPC) als ein Kernelement der Digitalisierung. Uns interessieren alle gegenwärtigen Trends auf dem Gebiet HPC. Besonders wichtig erscheint uns beim Thema „Next Generation Computing“ mittelfristig Quantencomputing. Der Grund ist das überlegene Skalierungsverhalten bestimmter Algorithmen, sodass sehr viel komplexere Fragestellungen beantwortet werden können, als dies mit Supercomputern möglich ist.

Was genau machen Sie mit Quantencomputern? Was für Erfahrungen haben Sie und seit wann?

Ich habe sehr lange auf dem Gebiet der wissenschaftlichen

Modellierung gearbeitet und mitgeholfen, dieses in der Materialforschung von BASF zu etablieren. Ein wichtiges Arbeitsgebiet dort war und ist die Quantenchemie. In dieser Tätigkeit kam ich schon 1998 mit dem Thema Quantencomputing in Berührung. Seitdem verfolge ich dieses Thema, da spätestens 2005 klar wurde, dass sich mit Quantencomputern die Quantenchemie tatsächlich lösen lassen wird. 2005 erschien in Science ein Algorithmus zu Full CI auf Quantencomputern. Mit Full CI lässt sich die Schrödinger-Gleichung und damit das Verhalten von Molekülen quantitativ beschreiben. Das Versprechen des Quantencomputers und seiner Algorithmen ist aber die Lösung nicht mehr mit exponentiell anwachsender Rechenzeit sondern polynomial. Quantencomputer bieten also perspektivisch die Möglich-

BASF betreibt seit 2017 den eigenen TOP500-Supercomputer „Curiosity“. Hauptsächlich wird dieser für wissenschaftliche Modellierungen und Simulationen genutzt. Außerdem implementiert BASF Quantenalgorithmen in einer speziellen Entwicklungsumgebung von und mit dem Unternehmen Heisenberg Quantum Simulations, die dann auf Curiosity ausgeführt werden.



keit, die Chemie „zu rechnen“, und sind damit natürlich äußerst wichtig für chemische Forschung. Zunächst schien es uns aber noch sehr lange zu dauern, bis entsprechende Quantencomputer tatsächlich industriell verfügbar sein würden. Wie ein Paukenschlag erschienen mir dann die Arbeiten von Google und IBM vor etwa fünf Jahren, die erste echte Rechnungen auf gate-basierten Quantencomputern publizierten. Da wurde klar, dass Quantencomputing in greifbarere Nähe gerückt ist als zuvor gedacht.

Seit 2017 arbeiten wir mit Michael Marthaler und seiner Firma HQS Quantum Simulations GmbH (HQS) in verschiedenen Projekten zusammen und haben erste Ergebnisse 2019 publiziert.

Sie verweisen auf die Verbindung des Quantencomputers zur Chemie. In Ihren jüngsten Publikationen sprechen Sie von „Quantum Chemistry“. Was verbirgt sich dahinter?

Quantenchemie war unsere erste Anwendung auf Quantencomputern. Uns interessierte vor allem herauszufinden, wie weit aktuelle Quantencomputer noch von industriellen Anwendungen entfernt sind.

Eine Standardaufgabe von Quantenchemie in der chemischen Industrie ist die quantenmechanische Berechnung des Energieverlaufs chemischer Reaktionen. Das erlaubt tatsächlich die Vorhersage des wahrscheinlichen Verlaufs (also wie läuft die Reaktion ab, welche Produkte, Nebenprodukte etc. entstehen, wie kann ich die Reaktion mithilfe von Katalysatoren beschleunigen etc.) von chemischen Reaktionen, aber auch die quantenmechanische Vorhersage der Kinetik, also der Geschwindigkeit einer chemischen Umsetzung. Die Anforderungen an die Genauigkeit der quantenchemischen Rechnungen sind sehr hoch. Man muss so genau wie möglich rechnen, damit die Ergebnisse quantitativ sind und Vorhersagen möglich werden. Hier stößt die Dichtefunktionalmethode an ihre Grenzen, und zur Absicherung werden hochgenaue Methoden wie die sog. Coupled Cluster Methoden verwendet. Die skalieren aber auf konventionellen Rechnern ungünstig, sodass Rechnungen mit 20, 30 Schweratomen in der Praxis schon am Limit sind. Das oben genannte Full CI geht hier aus Rechenzeitgründen gar nicht mehr. Zusammen mit der Firma HQS haben wir untersucht, wie weit wir für eine einfache Modellreaktion auf gegenwärtigen Quantencomputern kommen würden. Wir haben uns dazu die Dissoziationsreaktion von Wasser angeschaut und dazu ein Quantencomputing Coupled Cluster Modell auf Quriosity implementiert und die Dissoziation dort simuliert. Verglichen haben wir die erzielte Genauigkeit mit konventionell implementierten Coupled Cluster Modellen. Dieser Vergleich erlaubte uns eine sehr genaue Analyse des Fehlerverhaltens und des Ressourcenbedarfs. Für uns war es aber wichtig zu sehen, wie weit bei den kritischen 2-gate Operationen existierende Hardware von den Anforderungen abweicht. Es waren 2019 noch mehrere Zehnerpotenzen! Unbestritten ist aber, und das ist der Grund, warum wir dabeibleiben, das bessere Skalierungsverhalten des Quantencomputers. Wenn die Hardware es schafft, dann können

wir dort zukünftig Systeme rechnen, die auf klassischen Supercomputern nicht zu rechnen sind. [weitere Details sind in der Arbeit zu finden: M. Kühn, S. Zanker, P. Deglmann, M. Marthaler, H. Weiß, JCTC 2019, 15, 4764.]

Was hat das viel zitierte Koffeinmolekül mit einem Quantencomputer zu tun?

Wenn die Hardware es packt, dann rechnen wir dort Systeme, die auf klassischen Supercomputern nicht zu rechnen sind. Das Koffein ist so ein mittelgroßes Molekül, dessen Wechselwirkungen mit anderen Molekülen heikel zu beschreiben sind. Gerne wird auch auf die Fixierung von Stickstoff hingewiesen etc. Katalyse ist natürlich ein weiteres spannendes Gebiet, da die dort oft verwendeten Übergangsmetalle quantenchemisch schwierig sind. Es gibt viele Felder, die hier profitieren werden.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage: In welchem Zweig wird die Weiterentwicklung des Quantencomputers größere Impacts zu verbuchen haben: in der Industrie oder in der Wissenschaft?

Das kann ich nun wirklich nicht sagen. Hatte der Laser größeren Impact in Wirtschaft oder Wissenschaft? Und wo verläuft hier die Grenze? Wirtschaft und Wissenschaft haben so viele Synergien. Diese wünsche ich mir gerade bei den Quantentechnologien sehr. Letztlich brauchen wir so bald wie möglich wertschaffende Anwendungen und Produkte. Ganz sicher ist der Quantencomputer kein Objekt der Grundlagenforschung, auch wenn noch sehr viel Grundlagenarbeit nötig ist. Er muss so bald wie möglich Nutzen in Anwendungen zeigen. Gleichzeitig werden wir aber im Bereich der Grundlagenforschung zu Quantentechnologien noch unerwartete Entdeckungen machen, die ihrerseits Nutzen stiften werden und möglicherweise komplett neue und bisher nicht bedachte Anwendungen ermöglichen werden – auch hier wieder Stichwort Laser und Protonik. Wir lernen hier gerade Nutzen zu ziehen aus verschränkten quantenmechanischen Zuständen. Wohin das noch führt in Sensorik, Metrologie, Information und Computing – ich bin gespannt!

In Voraussicht auf die Zukunft wird häufig von „Industrie 4.0“ gesprochen. Der Begriff geht zurück auf eine Forschungsunion der deutschen Bundesregierung und meint die umfassende Digitalisierung der industriellen Produktion. Welche Rolle dafür muss der Quantencomputer einnehmen?

Als wir 2017 den Supercomputer Quriosity in Betrieb nahmen, hatten wir zunächst naturwissenschaftliche Anwendungen in Modellierung und Simulation im Sinn. Die Verfügbarkeit von immenser Rechenpower hat aber schließlich die Konsequenz, dass man Komplexität besser beherrschen kann. Auf einmal können Sie über Nacht komplexe Risiko-Simulation durchführen oder Modelle rechnen, die vorher nicht machbar waren. Breites Screening wird auf einmal wirtschaftlich etc. Den Quantencomputer sehe ich hier als Coprozessor, der bestimmte Teile in der Verarbeitungskette (z.B. Klassifizierung, Optimierung, Simulation) mit überlegener Leistungsfähigkeit erledigen kann. Für das Handling

von sehr großen Datenmengen sehe ich ihn nicht. Spannend wird es sein, wie das Zusammenspiel zwischen klassischen Supercomputern und Quantencomputern funktioniert. Ich sehe hier große Cloud-Instanzen, die entsprechend performant an die Daten (Rohdaten, Masterdaten etc.) aus der Produktion angebunden sein müssen. Dass einzelne Unternehmen in absehbarer Zeit Quantencomputer besitzen, glaube ich nicht.

Muss es dafür auch eine „Science 4.0“ geben – also eine analoge Verstechnisierung der Wissenschaft, die der Industrie ihre Gerätschaften zur Verfügung stellt?

Das ist in der Tat eine wichtige Frage: Wie bekommen wir möglichst schnell und nachhaltig einen deutschen Quantencomputer auf die Straße? Und wie schaffen wir es, einen Zugang zum Quantencomputer mit minimalen Hürden für gewinnbringende Anwendungen für alle zu schaffen? Dazu braucht es ein ganzheitliches Ökosystems, das geeignete

Strukturen (Cluster oder Hubs für die vertikale Integration des gesamten Technologiestacks eines Quantencomputers, Kompetenznetzwerke für horizontale Integration für Software und Anwendungen, Infrastruktur und Kompetenzaufbau) zur Verfügung stellt. Der Kooperation von Industrie und Wissenschaft kommt dabei die entscheidende Rolle zu. Denn es nützt nichts, wenn der Austausch

nicht reibungslos funktioniert. Die anwendende Industrie braucht neben geeigneter Hardware und Software auch kompetent ausgebildete Fachleute, und die Wissenschaft braucht den Zug aus der Industrie. Parallel dazu gibt es natürlich auch die produzierende Industrie, die sich aktiv an der Wertschöpfungskette der entstehenden Quantentechnologie-Industrie beteiligt. Hier wird die Rolle dieser Industrie, etwa Bosch bei der Quantensensorik, weit über die Abnahme von in der Wissenschaft entwickelten Technologien hinausgehen. Hier erwarte ich einen tech-push aus der sich hier entwickelnden Industrie. Man kann nicht deutlich genug auf die wichtige Rolle von Start-ups hinweisen, die sich bei entsprechender Förderung entlang der Wertschöpfungsketten entwickeln werden und in der Lage sind, den Transfer von neuer Hochtechnologie aus der Forschung in die Anwendung zu schaffen!

Was denken Sie, wie sich Quantencomputing in den nächsten Jahren entwickeln wird? Wann wird er vermehrt einen wirtschaftlichen Nutzen geben – und für wen gibt es diesen Nutzen überhaupt?

Zurzeit sind erste Quantencomputer in der Lage, einfache Probleme zu lösen. Allerdings sind reale Probleme noch nicht lösbar, weil die Fehlerwahrscheinlichkeiten immer noch zu groß sind. Den Quantenvorteil, also die Lösung eines anwendungsrelevanten Problems mit einer Effizienz, die ein klassischer Rechner nie erreichen kann, werden wir erst erreichen können, wenn diese Fehler behoben sind. Das wird vermutlich noch einige Jahre dauern. Voll fehlerkorrigierte Quantencomputer sind ein Ziel von eher 10 bis 15 Jahren. Allerdings sind die Anstrengungen weltweit so groß, dass niemand hier Gewissheit hat. In der Zwischenzeit aber werden weltweit Algorithmen entwickelt und stehen teilweise

auf spezieller Hardware, wie etwa bei Fujitsu, jetzt schon zur Verfügung. Es lohnt sich also durchaus jetzt schon, sich in das Thema Quantencomputing einzuarbeiten.

Anbieter von Quantencomputing-Systemen sind heute nahezu ausschließlich im nordamerikanischen Raum angesiedelt, dicht gefolgt von chinesischen staatlichen Initiativen. Weitere starke Gruppen gibt es u. a. in Japan und Australien. Daher müssen wir in Deutschland und Europa kurzfristig (in den nächsten fünf Jahren) eine geeignete Struktur aufbauen, um ein komplettes Quantencomputer-System mit Quantenanwendungen zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben und damit den souveränen Zugang zu dieser potenziell disruptiven Technologie sicherzustellen.

Was ist Ihre Empfehlung für die Leser*innen der DIGITALEN WELT? Wann sollte eine – sagen wir mal mittelständige – Firma in Deutschland anfangen, sich mit Quantencomputing zu beschäftigen? Und wie geht sie dieses Thema im besten Fall an?

Quantencomputing ist vollkommen anders als klassisches Supercomputing. Hardware und Software erfordern zurzeit spezielle Kompetenzen und erfordern einen langen Atem. Sich diese zu erarbeiten, könnte speziell für kleinere und mittelständige Firmen einen zu großen Aufwand bedeuten. Aus diesem Grund ist es so wichtig, dass der Bund für Quantencomputing-Anwenderkompetenznetzwerke mit entsprechendem Cloudzugang sorgt. Diese sollen zeitnah und mit niedriger Hürde (Invest, Zeit, IP) die bereits bestehenden Möglichkeiten des Quantencomputings eruieren und diese Technologien mit hoher Geschwindigkeit für Anwendungen in der Industrie wertschöpfend nutzbar machen. Das Netzwerk sollte folgende Aufgaben wahrnehmen:

- Identifizierung von Use-Cases der Anwenderindustrie und Abschätzung der Tragweite für die jeweilige Branche bzw. den jeweiligen Markt.
- Bereitstellung eines einfachen, niederschweligen Zugangs zu Quantencomputern und quantum-inspired Hardware, zunächst auf Basis existierender Quantencomputing-Systeme.
- Aufbau einer unabhängigen Bewertungskompetenz für die Anwenderindustrie, die Fragen nach Leistungsfähigkeit, Mehrwert, Entwicklungsaufwand, Trends etc. beantwortet.
- Bereitstellung von Methodenwissen und Erstellung von Entwicklungswerkzeugen für Quantencomputing-Anwendungen und Aufbau einer entsprechenden Anwenderplattform inklusive der Cloudumgebung für den Zugriff auf die Quantencomputer.
- Kooperative Durchführung von praxisnahen Pilotprojekten als Basis für die Entwicklung zugehöriger Geschäftsmodelle durch Anwenderunternehmen.

Gegenwärtig gibt es Initiativen wie PlanQK oder die Fraunhofer-IBM-Kooperation, die es auch kleineren und mittelständischen Unternehmen ermöglichen, über Piloten sich am besten jetzt mit diesen Technologien vertraut zu machen. Daneben gibt es mittlerweile auch in Deutschland und

Österreich einige Start-ups, die mit Firmen in Piloten arbeiten, um sie ans Quantencomputing heranzuführen. Ich sehe hier einen Bedarf und eine Aufgabe, nämlich Cloud-Infrastruktur-Dienste von PaaS bis SaaS für Quantencomputing bereitzustellen. Die Wissenschaft hinter der Technologie ist schon kompliziert genug, da sollten technische und organisatorische Hindernisse für den Zugang so weit wie möglich aus dem Weg geräumt sein.

Befürchten Sie ein Gefälle zwischen mittelständischen und großen Unternehmen, weil Quantencomputing und damit verbundene Technologie zunächst für kapitalstärkere Unternehmen leichter greifbar sein wird? Haben dann finanzstärkere Unternehmen einen Wettbewerbsvorsprung?

Ich glaube nicht, dass die Größe entscheidend ist. Einen eigenen Quantencomputer stellt sich auf absehbare Zeit wohl keine Firma hin. Es kommt vor allem auf das Knowhow an, und dazu führt der Weg wie schon gesagt zurzeit über Kooperationen und Netzwerke. Diese müssen natürlich für alle offen sein. Quantencomputing erfordert einen langen Atem und eine Unternehmenskultur, die diesen langen Atem hat und bereit ist, über Jahre diese Technologie zu lernen. Auch hier bin ich davon überzeugt, dass der Bund durch entsprechende Fördermaßnahmen in der Verantwortung ist, die nötigen Kompetenzen und Infrastrukturen aufzubauen. Ideal wäre der freie Zugang zu Cloud-Plattformen mit Quantencomputing-Entwicklungsumgebungen, Simulationsmöglichkeiten und Zugang zu realer Hardware. Was man aber vorher braucht, ist eine Idee, was man mit dem Quantencomputer anfangen möchte.

Wo steht Deutschland im internationalen Vergleich beim Thema Quantencomputing? Und was braucht Deutschland noch, um im Quantencomputing einen wirtschaftlichen Mehrwert zu erzielen?

Wissenschaftlich ist Deutschland hervorragend aufgestellt, die wissenschaftlichen Kompetenzen sind hervorragend. Was fehlt, sind Akteure wie IBM oder Google in den USA oder ein Wissenschaftsverbund, die die Entwicklung eines Quantencomputer-Systems übernehmen könnten. Verglichen mit den USA oder China liegt Deutschland hier weit zurück. Die Kompetenzen sind verteilt und es sind Lücken in der skalierbaren Hardwareentwicklung, der Systemintegration, dem Software-Stack und der IP-Generierung zu erkennen. Ganz wichtig und noch zu entwickeln sind Bildungsmaßnahmen zum Aufbau und Erhalt von Kompetenz in Wirtschaft und Wissenschaft. Ferner gibt es natürlich Defizite bei der Verfügbarkeit digitaler und technologischer Infrastruktur, Stichwort: Cloud. Dann tun wir uns schwer beim raschen Technologietransfer von der Forschung in die Industrie, hier fehlen die Instrumente und Rahmenbedingungen. Wichtig ist es, dass interessierte Firmen bei ersten Anwendungen massiv unterstützt werden.

2019 ging die Meldung um, dass BASF in das Quantencomputer-Startup Zapata investiert. Welchen innovativen Technologieansatz verfolgt Zapata?

Zapata hatte diese Lücke sehr früh erkannt. Sie boten an, Firmen „Quantum ready“ zu machen, also interessierte Firmen

bei ersten Gehversuchen im Quantencomputing zu unterstützen, vom Consulting bis hin zu Tests auf Quantenhardware. Zapata versprach damals, eine universelle Entwicklungsumgebung mit leichter Portierung von code auf unterschiedliche Quantenhardware. Das entsprechende Produkt, Orquestra, ist seit einiger Zeit auf dem Markt. Zapata hat dazu eine sehr aktive und breite Forschung bei Algorithmen und ist aktiv bei der Patentierung. Zapata ist damit ziemlich erfolgreich, nicht nur auf dem amerikanischen Markt.

Ihr Ausblick: Wie steht es um die sog. „Quanten Supremacy“ oder den „Quantum Advantage“? Hinkt Europa anderen Kontinenten nach oder ist das Quantencomputing ein globales Projekt, an dem am Ende jeder profitiert?

So beeindruckend die beiden publizierten Quantum Supremacy-Beispiele technologisch auch sind: Sie haben für industrielle Anwendungen keine Bedeutung. Im Moment werden alle Systeme durch Stabilitätsprobleme und Gatterfehler limitiert, auch Connectivity stellt ein großes Problem dar. Europa und insbesondere Deutschland haben aber das Potenzial von Quantentechnologie erkannt und wollen jetzt massiv investieren. Das muss allerdings jetzt passieren, um nicht technologisch den Anschluss zu verlieren.

Interview: Hannes Mittermaier

Dr. Horst Weiß

Dr. Horst Weiß ist bei BASF Vice President Knowledge Innovation & Solutions im Bereich Global Digital Services. Dort beschäftigt er sich aktuell mit Natural Language Processing, Digitalization of Knowledge und Innovationen. Er hat sich viele Jahre mit Multiscale Modeling

auf High Performance Computern beschäftigt und dort auch mit dem Quantum Computing begonnen. Seine Leidenschaft ist es, Innovationen mithilfe neuer Techniken zu ermöglichen. Er studierte Chemie und Physik an den Universitäten Marburg und Karlsruhe und promovierte in Karlsruhe in Quantenchemie. Von dort ging er direkt als Quantenchemiker in die Polymerforschung der BASF. Herr Dr. Horst Weiß wurde 2020 in den Expertenrat zur Erstellung einer nationalen Roadmap für Quantencomputing berufen. Dieser wurde auf Beschluss von Frau Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel eingerichtet und von den Staatssekretären des Bundesministeriums der Finanzen, des Bundesministeriums für Bildung und Forschung sowie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unterstützt.

Fotos: BASF SE



NEUES WAGEN, GEWOHNHEITEN ÄNDERN? WIDERSTAND IST NORMAL, ABER WAS TUN?

Ein Leser meiner Kolumne hat sich mit einem Anliegen an mich gewandt und mir erlaubt, es anonymisiert zu veröffentlichen.

„Unser Unternehmen steckt wieder einmal in einem Change Prozess, ich habe gerade eine Abteilung übernommen, die für Abrechnungssysteme verantwortlich ist. Da steht Datensicherheit ganz oben. Deshalb ist, neben anderen Projekten, die Einführung einer neuen Software geplant. Aber es ist so mühsam. Aufgrund der Pandemie arbeiten wir alle im Homeoffice. Die Teammeetings, in denen es um die Software geht, sind extrem anstrengend. Lähmung, so kommt es mir vor. Die Leute finden immer wieder etwas, warum es nicht funktionieren wird. Was soll ich tun?“

Phänomene dieser Art sind häufig Ausdruck von Widerständen. Sie werden häufig formuliert als „das bringt nichts“, „das haben wir noch nie so gemacht!“. Oder es wird auffallend still, wenn es um das Thema geht.

Was ist da los?

Veränderungen kosten Energie. Liebgewonnene Gewohnheiten aufzulösen, erfordert zusätzliche Konzentration und damit Kapazität des Frontalhirns. Ein Beispiel: Stellen Sie sich vor, Sie würden beschließen, von nun an Ihre Zähne mit der „fälschen“ Hand zu putzen. Selbst mit einer elektrischen Zahnbürste würden Sie anfangs sehr ungelenkt zu Werke gehen. Sie müssten sich darauf konzentrieren und könnten nicht wie sonst an etwas anderes, vielleicht Wichtigeres denken.

1. Widerstand ist also in erster Linie Selbstschutz. Denn Gewohnheiten sind energiesparend für unser Gesamtsystem. Das Frontalhirn ist in seiner Kapazität begrenzt und verbraucht 80% der bereitgestellten Energie. Der größte Teil des Gehirns, also Stammhirn und Mittelhirn mit allen unbewussten Prozessen, kommt mit den restlichen 20% aus. Um das Gesamtsystem vor zu hohem Energieverbrauch zu schützen oder wenn es um die Veränderung von Mustern geht, entsteht Blockade. Und gerade dann suchen Menschen häufig eine kleine Insel, auf der sie sich sicher fühlen.
2. Widerstand kann sich gegen das Ziel der Veränderung richten. Wozu sollte es denn gut sein, die Zähne mit der anderen Hand zu putzen? Wozu brauchen wir den erneuten Change und die andere Software? Hier geht es um die Frage, ob die kommunizierten Ziele der Maßnahmen passend sind. Triggern sie auch emotionale Bilder? Die Gehirnforschung bestätigt, dass das Training motorischer Abläufe mit der anderen Hand die Qualität der Koordinationsfähigkeit und Kreativität

– bis ins hohe Alter – verbessert. Malen Sie sich dazu vor Ihrem geistigen Auge das Bild Ihres Selbst im hohen Alter, immer noch kreativ und beweglich in Körper und Geist ... Lohnt es sich, dafür heute Energie einzusetzen?

3. Nun, das Ziel ist sehr erstrebenswert, aber mit der anderen Hand Zähne putzen? Und das soll reichen? Der Weg zum Ziel der Veränderung wird infrage gestellt, er kann als unpassend oder unklar erscheinen. Und natürlich sind wir uns einig, dass Datensicherheit oberstes Gebot ist. Keiner von uns will in die Hände von Erpressern fallen, die Systeme blockieren und sie nur gegen Lösegeldzahlung wieder frei geben. Aber mit genau dieser Software soll das verhindert werden??
4. Glaubt man der Person, die die Einführung der neuen Software vorantreibt? Genieße ich Ihr Vertrauen, wenn ich behaupte, dass Sie mit einfachen Mitteln Ihre Koordinationsfähigkeit und Kreativität – bis ins hohe Alter – verbessern können? Oder brauchen Sie einen zusätzlichen Beweis meiner Kompetenz?
5. Und schließlich: Diese neue Software auszuprobieren, scheint wirklich sehr schwierig zu sein. Schon mit der vorherigen Version hat es Monate gedauert, bis man sie fehlerfrei nutzen konnte. Und schon wieder Kollegen um Hilfe bitten müssen, schrecklich, die halten einen ja für dumm. Und das alles alleine im Homeoffice.

Was genau können Sie also tun, wenn Sie mit Widerstand konfrontiert sind?

Das erste ist, den Selbstschutz der Betroffenen zu akzeptieren, und manche Personen brauchen für sich mehr Schutz als andere. Darüber hinaus könnten Sie herausfinden, ob es Ihnen gelungen ist, das Ziel dieser Veränderung auch emotional wirksam zu formulieren. Ist auch der Weg zum Ziel wirklich klar? Sollten Sie in Ihre Glaubwürdigkeit investieren? Und welche Unterstützung können Sie vorsehen? Mitunter ist es am besten, die Betroffenen einzubeziehen, wenn es um die Klärung dieser Frage und damit Auflösung der Widerstände geht.

Was in aller Regel nicht funktioniert: gebetsmühlenartig immer wieder die eine Argumentationskette zu wiederholen, z.B. ständig über Risiken zu sprechen. Das greift zu kurz.

**Gerne beantworte ich auch Ihre Fragen.
Dr. Petra Bernatzeder, Diplom-Psychologin,
Coach, Experte für mentale Stärke
www.upgrade-hr.com**





Wenn nicht jetzt, wann dann?

Um die derzeit vorherrschende Diskrepanz zwischen wissenschaftlicher Forschung und Anwendungen von Quantencomputing zu tilgen, will die Bundesregierung mit breiten Unterstützungen der Wirtschaft unter die Arme greifen. Doch nun fragt es sich, wie, wo und in welchem Maß man in neue Technologien investiert, um sich im globalen Wettstreit von Quantencomputing bestmöglich zu positionieren. Frank Leymann ist Professor und Institutsleiter am Institut für Architektur von Anwendungssystemen an der Universität Stuttgart. Durch seine langjährige praktische Erfahrung in der Wirtschaft versucht er, den Bogen zwischen Forschung und Praxis zu spannen.

Welche berufliche Vorgeschichte hat Sie zu Ihren heutigen Tätigkeiten geführt?

Mit großer Leidenschaft habe ich Mathematik und Physik studiert, was mir jetzt beim Quantencomputing natürlich zugutekommt. Danach habe ich bei IBM in der Anwendungsentwicklung begonnen, mich von dort auf das Gebiet Middleware begeben und in vielen Firmen benutzte Produkte wie beispielsweise MQSeries oder DB2 mitentwickelt. Ich war dann schließlich Mitglied eines kleinen weltweiten Teams, welches die Strategie und Architektur des gesamten Middleware-Portfolios der IBM verantwortete. Auch habe ich mit Firmen wie Microsoft oder SAP kooperiert, um Service-Oriented Computing zu ermöglichen.

Sie sind seit 16 Jahren an der Universität und damit in der Wissenschaft tätig. Ihr akademisches Œuvre umfasst mehr als 500 wissenschaftliche Artikel. Was verbindet Sie besonders mit dem Thema Quantencomputing? Wie sind Sie damit in Berührung gekommen?

Wie gesagt, ich bin eigentlich von Haus aus Mathematiker und Physiker. Durch meine beruflichen Tätigkeiten bei IBM bin ich dort zum Informatiker geworden. Meine berufliche Praxis wurde stets durch diverse Partnerschaften mit anderen Industriebetrieben begleitet. Vor fünf Jahren kam dann einer der Industriepartner zu mir und verband mich – aufgrund meiner Vorkenntnisse – mit seinen Quantencomputing-Ambitionen. Was ich am Anfang als eher utopisch und illusorisch empfand, änderte sich binnen weniger Wochen: Ich war fasziniert von Quantencomputing und den technischen Möglichkeiten. Von dem, was man schon machen kann; und von dem, was man bald können wird. Seitdem bin ich leidenschaftlich da-

bei und habe mein Institut auch umgekrempelt, damit zwei Drittel sich nur mehr mit Quantencomputing beschäftigen können.

Das heißt, Sie haben auf die Materie immer schon einen doppelten Blick geworfen, sprich: Sie kennen Quantencomputing aus der Wissenschaft, sind aber immer schon mit der praktischen Anwendungsseite konfrontiert worden.

Das kann man sagen. Ich war 20 Jahre lang bei IBM, war dort als ein Distinguished Engineer tätig. Neben der Aufgabe, große Produkte zu entwickeln, stand ich in Kontakt mit vielen Geschäftsführern anderer Unternehmen. Schon damals ging es immer auch um die unternehmerischen Strategien dahinter. Das habe ich in meine akademische Karriere nahtlos einfließen lassen. Quantencomputing heißt für mich primär, den anwendungsorientierten Nutzen im Blick zu haben.

Eines Ihrer Anwendungsprojekte von Quantencomputing heißt PlanQK. Was ist dieses Leuchtturmprojekt des Bundesministeriums für Wirtschaft? Was ist das Ziel dieses Projekts? Was sind die Inhalte?

Wir wollen eine Plattform für die Industrie zur Verfügung stellen, um Wissen über Quantencomputing und Anwendbarkeit von Quantencomputing der deutschen

Industrie – besonders dem Mittelstand – zugänglich zu machen. Insbesondere sollen die Firmen, die bei PlanQK involviert sind, Bewertungskompetenzen bekommen. Das heißt, sie sollen verstehen, für welche Problematiken Quantencomputer heute oder in kurzer Zeit schon einsetzbar sind. Wir vergleichen dann Lösungen von anwendungsnahen Problemen, die wir auf dem Quantencomputer machen, mit klassischen, herkömmlichen Implementierungen, um festzustellen, wo die Vorteile des Quantencomputers liegen. Ist man genauer? Ist man schneller? Da Quantencom-

„Ich war fasziniert von Quantencomputing und den technischen Möglichkeiten.“

puting-Projekte anders sind als klassische Software-Projekte, definieren wir die Rollen, die Leute einnehmen, um an Quantencomputing-Projekten teilzunehmen. Wir stellen fest, welche Skill-Profile benötigt werden. Ferner wird ein Marktplatz für Quantenlösungen in PlanQK gebaut. Und – ganz wichtig – wir schaffen eine Community, die alle involvierten Unternehmen am Nutzen teilhaben lässt. Ein Leuchtturmprojekt ist es gerade deshalb, weil das Projekt tatsächlich „strahlt“ und regelmäßig neue assoziierte Partner dazustoßen.

Was sind die konkreten Inhalte von PlanQK?

PlanQK beschäftigt sich mit Quantum Machine Learning, kurz „QML“ genannt. Wir entwickeln in PlanQK, um Wissen einheitlich zu repräsentieren, eine Mustersprache. Das heißt, Softwarearchitekten bauen solche Mustersprachen, um wiederholbares Wissen in bestimmten Domänen darzustellen. Wir implementieren die verschiedenen Use-Cases der Industriepartner und passen ggf. existierende Quanten-Algorithmen an. Dazu haben wir einen Partner im Konsortium, der Quanten-Algorithmen selber baut. Ein Fokus liegt auf der Vergleichbarkeit der Lösungen mit herkömmlichen Softwareanwendungen, denn hier stellen wir fest, was heute schon eine geeignete Problemgröße ist, die mit Quantencomputern realisiert werden kann. Um die Community zu verbinden, richten wir eine internetbasierte Plattform ein, um einerseits alle Informationsartefakte in dieser Plattform abzulegen, um andererseits aber alle schon möglichen Quanten-Machine-Learning-Verfahren ausführbar zu machen auf verschiedener Quanten-Hardware.

Besteht gerade darin der breite Mehrwert der Plattform, öffentlich und für alle zugänglich zu sein?

Gewiss. Vor allem der Austausch in der Community. Wir geben regelmäßig Webinare, wo wir Kurse geben und über den aktuellen Leistungs- und Anwendungsstand von Quantencomputing informieren. Wir fangen jetzt schon damit an, eine Beratungskompetenz für alle aufzubauen. Das kommt gerade kleineren und mittelständischen Unternehmen zugute, die es sich gar nicht leisten könnten, eigenständig mit diesen neuen Technologien zu arbeiten. Einen weiteren Mehrwert sehe ich hinter der öffentlichen Zugänglichkeit von PlanQK. PlanQK liefert eine öffentliche Wissensbasis zu dieser hoch komplexen Frage nach Quantencomputing, indem wir darlegen, was technisch schon möglich ist und was noch nicht klappt. Wir geben auch Auskunft darüber, was man in den nächsten Jahren nicht machen sollte, weil es technisch nicht umsetzbar ist. Die Anwendungen, die wir bauen, laufen auf heutigen Quantencomputern. Diese sog. NISQ-Technologie („Noisy Intermediate-Scale Quantum“) ist nach aktuellem Stand noch fehleranfällig. Gerade hier ist die ständige technische Überprüfung und damit Weiterverbesserung wichtig.

Einen weiteren praktischen Nutzen, den wir unseren Partner anbieten, sehe ich in dem einfachen Verfügbarmachen von mehreren Quantencomputern. Kein Mitglied von uns muss sich mit Einzelverträgen herumschlagen oder gar selbst Kontakt mit ausländischen Herstellern aufnehmen.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage fast von selbst, wie es um den allgemeinen Status von Quantencomputing in Deutschland überhaupt bestellt ist. Wie bewerten Sie die aktuelle Lage?

Die deutsche Wissenschaft ist im generellen Bereich Quantentechnologie sehr gut aufgestellt. Auch hinsichtlich der Hardware-Forschung genießt sie einen guten Ruf. Aber einen Quantencomputer haben wir noch nicht gebaut. Quantencomputer werden in den USA und in China gebaut. Es gibt inzwischen aber erste Ansätze, auch in Deutschland, Frankreich und Österreich einen Quantencomputer zu bauen. Man kann also eine Diskrepanz zwischen Forschung und Anwendung konstatieren: In der Forschung ist Deutschland sehr gut aufgestellt, in der Anwendung nicht. Das jüngste Konjunkturpaket der Bundesregierung will hier Abhilfe

„Das kommt gerade kleineren und mittelständischen Unternehmen zugute, die es sich gar nicht leisten könnten, eigenständig mit diesen neuen Technologien zu arbeiten.“

schaffen. Doch wann wird Deutschland einen eigenen Quantencomputer haben? Quantencomputer werden immer eine Spezial-Hardware sein oder aus solcher bestehen. Bis es zu einem Quantum-Advantage in Deutschland kommt, das hängt stark von der Verbesserung der NISQ-Technologie ab. Man braucht „genügend viele“ Qubits – Qubits sind die physikalischen Informationseinheiten eines Quantencomputers; man braucht „hinreichend wenige“ Fehler während der Ausführung; und man braucht „gute“ Qubits, denn Qubits zerfallen während der Zeit, in der die Anwendung läuft. Die Vagheit dieser Adjektive lässt sich nur mit der Vielfalt und Komplexität der Probleme klären, mit denen wir Quantencomputer konfrontieren. Wir erfahren in PlanQK beispielsweise, dass wir kleinere Probleme auf den heutigen Quantencomputern sinnvoll lösen können. Generell erwarten wir nach Einblick in die Roadmaps führender Unternehmen, die Quantencomputer herstellen, dass aber der Quantencomputer in rund zehn Jahren eine Vielfalt an Problemen lösen kann. Mittlere Probleme werden etwa in drei bis fünf Jahren schon durch den Quantencomputer abgedeckt werden. Einen Hinweis, den ich in diesem Zusammenhang jetzt schon geben will: Der Skill-Aufbau, also die Aneignung der Fähigkeiten, um mit einem Quantencomputer umgehen zu können, dauert sehr lange. Ein Jahr ist lächerlich kurz; man plane mindestens zwei Jahre ein. Im Hinblick auf die Perspektive des Quantencomputings ist es also notwendig, jetzt schon anzufangen, sich mit der Technologie zu beschäftigen.

Wie erklären Sie die Schere zwischen angemessener Forschung und fehlender Anwendung? Wie will Deutschland oder sogar Europa diese Kluft möglichst zeitnah schließen?

Woran das liegt? An der deutschen Gründlichkeit. Man kennt die Problematik schon aus dem Cloud-Computing. Wir wollen zuerst verstehen, wägen ab und sind deshalb wenig experimentierfreudig auf praktischer Anwendungsebene. Deshalb haben wir heute keinen eigenen Quantencomputer. Was macht man dagegen? Ich denke, man hat die Problematik verstanden. Im jüngsten Konjunkturpaket gibt es zwei Milliarden Euro für Quantencomputing. Das Bundeskanzleramt hat einen Expertenrat einberufen, um einen Vorschlag zu machen, wie diese zwei Milliarden sinnvoll investiert werden. Meine Kollegin Claudia Linnhoff-Popien und ich waren Mitglied in einem Expertenteam, das eine Roadmap erarbeitet hat, wie wir den Aufbau von Quantencomputing und dessen Anwendungen umsetzen könnten. Es sollen u. a. mehrere Quantencomputer gebaut werden. Man möchte hierbei auch neue Ansätze von Technologien realisieren, die sehr erfolgsversprechend klingen und von anderen Industrieriesen noch nicht genutzt werden. Ein Fokus ist aber auf die Anwendungen gerichtet, denn die Hardware alleine lässt sich nur schwer vermarkten. Das wie-

derum soll viele, auch kleinere Firmen anreizen, sich zu spezialisieren und eigene Lösungen und Softwareprodukte anzubieten.

Warum eigene Quantencomputer bauen, wenn andere bereits existierende über Cloud-Dienste globale zugreifbar sind?

Natürlich können Sie Quantencomputer durch die Plattformen wie etwa von Amazon oder Microsoft nutzen. Aber diese Quantencomputer haben ein „furchtbares“ Potenzial, denn sie können zukünftig unsere etablierten Security-Mechanismen knacken. Passierte das, bricht ein großer Teil von dem, was wir Geschäfte abwickeln, kurzerhand zusammen. Es gäbe kein Online-Shopping mehr, kein Online-Banking, Daten könnten nicht mehr zwischen Firmen ausgetauscht werden. Dem will man mit eigenen Quantencomputern entgegenwirken. Die Bundesregierung möchte Handlungsfreiheit und Souveränität gewährleisten, um nicht hilflos dazustehen, würden uns Amerikaner oder Chinesen den Zugang zu ihren Rechnern abdrehen.

Amazons Quantencomputing-Cloud-Dienst nennt sich „Braket“. Was halten Sie dann davon?

Das ist ein repräsentatives Beispiel von dem, was ich vorher bereits angedeutet habe. Solche Cloud-Dienste laufen entweder in den USA oder in China. Amazon selbst hat keinen eigenen Quantencomputer, obwohl Amazon nun angekündigt hat, selbst einen zu bauen. Dennoch greife ich nach derzeitigem Verfahren über Amazons Cloud auf Quantencomputer anderer Hersteller zu und beuge mich damit sozusagen in eine doppelte Abhängigkeit. Amazon und andere haben ihre eigenen Werkzeuge gebaut und ihre eigenen Zugänge zu Quantencomputing entwickelt. Was heißt das für unsere Daten? Wie steht es um die Security? Wie um die Portabilität der erstellten Anwendungen? Um sich genau gegen diese Abhängigkeit zu stemmen, will das Konjunkturpaket eigene Lösungen auf die Beine stellen. Konkret bereiten wir derzeit mit anderen Partnern einen Antrag für ein Quantencomputing-Anwenderkompetenzzentrum (QCAC) vor. Der Auftrag der Roadmap des Konjunkturpakets besteht u. a. darin, eine Cloud-Infrastruktur zu bauen, die es den Anwendern gestattet, auf verschiedene Hardware zuzugreifen – wie es Amazon und Microsoft beispielsweise heute machen –, aber hier soll eben der deutsche Quantencomputer, der gebaut wird, nutzbar sein. Auch sollen die Anwendungen mit Werkzeugen erstellt werden können, die nicht spezifisch für die Hersteller sind, was den Anwendern Investitionssicherheit geben soll. Und ein Software-Engineering für Quantencomputer fehlt komplett – auch bei großen Anbietern. Das QCAC will gerade hier passende Vorgehensmodelle entwickeln. Solche Werkzeuge, die ein ingenieurmäßiges Vorgehen unterstützen, können als Produkte vermarktet werden.

Einem wiederum standortspezifischen Ansatz geht das QAR-Lab der LMU-München nach. Was verbirgt sich dahinter und wie kooperieren Sie?

Das ist eine Klasse Initiative der Kollegin Claudia Linnhoff-Popien. In unserer Zusammenarbeit geht es um die Synergien zwischen der LMU und meinem Institut an der Universität Stuttgart. Hinter „QAR“ verbirgt sich „Quantum Applications and Research“-Laboratory. Der Schwerpunkt richtet sich auch wieder auf Anwendungen von Quantencomputing-Technologie, zuvörderst will das QAR-Lab den großen, kleineren und mittelständischen

Unternehmen helfen, sich mit dem Thema zu beschäftigen. Viele Fragen zum Quantencomputing sind heute Optimierungsfragen, was eine weitere Kompetenz des QAR-Labs darstellt. Außerdem kümmert sich das Team von Frau Linnhoff-Popien um die Organisation und den Zugang zu Quantencomputern. Wenn man das nicht via Cloud machen will, muss man mit Herstellern einzelne Verträge abschließen. Das ist kompliziert und zeitaufwendig. Wir streben eine Vereinheitlichung und damit eine Vereinfachung an.

„Bis es zu einem Quantum-Advantage in Deutschland kommt, das hängt stark von der Verbesserung der NISQ-Technologie ab.“

Quantencomputing wird also ein immer wichtigeres Tool für Industrie und Wirtschaft werden. Was würden Sie Stand heute den kleinen und mittelständischen Unternehmen raten, um den Sprung nicht zu verpassen?

Ich sehe keinen Unterschied zwischen KMU und großen DAX-Konzernen. Wir stehen alle vor demselben Problem, unabhängig der Größe des eigenen Betriebs: Wo bekomme ich meine Skills für Quantencomputing-Anwendungen her? Will man einen Quantencomputer programmieren, muss man sich mit viel linearer Algebra auseinandersetzen. Das benötigt Zeit, um diese Fähigkeiten aufzubauen. Durch die Bank durch müssen kleine und große Firmen Skills aufbauen, müssen kleine Quantenprogramme schreiben, um sich sukzessive Wissen anzueignen. Erst dann lerne ich zu verstehen, wie man Projekte im Bereich Quantencomputing organisieren kann, weil dort ganz neue Rollen auftreten und ein vollkommen anderes Vorgehen der Anwendungserstellung nötig ist, als wir es aus der klassischen Projektwelt kennen.

Trotzdem möchte ich einen Appell kundtun:

„Quantencomputing kommt. Bitte nicht abwarten, wie wir das etwa beim Cloud-Computing gemacht haben. Wer jetzt nicht einsteigt, verschläft den ganzen Zug. Denn in drei Jahren ist der bereits abgefahren.“

Interview: Hannes Mittermaier

Prof. Dr. Frank Leymann

Prof. Dr. Frank Leymann ist ordentlicher Professor für Informatik an der Universität Stuttgart, Deutschland. Seine Forschungsinteressen umfassen Softwarearchitektur, Robustheit hochverteilter Anwendungen, Middleware, Mustersprachen und Quantencomputing. Leymann ist Co-Autor von mehr als 500 begutachteten Arbeiten, etwa 70 Patenten und mehreren Industriestandards. Er ist gewähltes Mitglied der Akademie von Europa, Fellow des Zentrums für integrierte Quantenwissenschaft und -technologie (IQST) und Kurt Gödel Visiting Professor für Quantencomputing der TU Wien.

Vor seinem Wechsel an die Universität war er ein IBM Distinguished Engineer und Mitglied eines kleinen Teams, das für die Architektur und Strategie des gesamten IBM-Middleware-Stacks verantwortlich war. Er war auch als Berater für CxOs vieler Unternehmen weltweit tätig und unterhält noch immer viele dieser Beziehungen.



Fotos: Frank Leymann



Florian Neukart,
Director des
Volkswagen
Data Lab
in München

Quantencomputing in der Automobilindustrie

Quantencomputer versprechen in der Theorie, über ein enormes Leistungspotenzial zu verfügen, das die Rechenpower herkömmlicher Computer überholen könnte. Dieses Potenzial wird, mittelfristig gesehen, auch für erhebliche technische Entwicklungen in der Automobilindustrie sorgen. So hat VW 2019 in Lissabon das weltweit erste Pilotprojekt zur Verkehrsoptimierung mit einem Quantencomputer präsentiert. Das Volkswagen Data Lab arbeitet schon seit rund fünf Jahren an der Verwendung von Quantencomputing für neue Entwicklungen. Florian Neukart ist Director des Volkswagen Data Lab und Assistenzprofessor für Quantum Computing an der Universität Leiden. Er gibt Auskunft über den aktuellen technischen Stand von Quantencomputing bei VW.

Der Volkswagen-Konzern ist ein Vorreiter in der neuen Technologie rund um Quantencomputing. Wie setzen Sie sich derzeit mit diesem Thema auseinander?

Wir haben vor ungefähr fünf Jahren bei Volkswagen damit begonnen, uns aktiv mit Quantencomputing zu beschäftigen. Wir wollten verstehen, wie wir mit verfügbaren Quantencomputern praxisnahe Fragestellungen lösen können. Da ich selbst aus der Forschung komme, weiß ich um die Gefahr, die Materie zu theoretisch zu betrachten. Für uns steht deshalb immer die Frage nach den konkreten Praxismöglichkeiten des Quantencomputers im Zentrum: Wie kann ich industrie-relevante Probleme lösen? Nun war die Technologie vor fünf Jahren noch nicht so weit, trotzdem sahen wir damals schon erste Ansätze, Optimierungsprobleme mithilfe des Quantencomputers schneller zu lösen als mit herkömmlichen Rechnern. Das war der Kick-Off für eine intensiviertere Beschäftigung mit Quantencomputing.

Was ist inzwischen passiert? Wie hat sich Ihr Startversuch vor fünf Jahren inzwischen weiterentwickelt?

Unser Team hat sich stetig weiterentwickelt und ist gewachsen. Heute ist Quantencomputing bei uns in vier Teilbereiche aufgeteilt: Optimierung, Simulation von Molekülen, IT-Sicherheit und Machine Learning. Bei der Optimierung wenden wir uns Verkehrsfluss- und Logistik-Optimierung zu. Bei Machine Learning schauen wir uns an, wie wir bestehende klassische Algorithmen quantenmechanisch erweitern können, um sie weiter zu verbessern und für unsere Zwecke nutzbar zu machen. Oder wir erfinden neue Algorithmen, die kein Gegenstück in der klassischen Machine-Learning-Welt haben. Die Simulation von Molekülen ist ein komplexes Feld, aber zugleich sehr vielversprechend. Je mehr Elektronen ich bei Molekülsimulationen hinzufügen kann, umso industrierelevanter wird mein Forschungsergebnis. Dies betrifft zum Beispiel die Batterieforschung.

Warum ist die Molekülerforschung derart komplex?

Ein herkömmlicher Computer kann beispielsweise ein Molekül mit 1500 Elektronen nicht simulieren. Dafür reicht seine Rechnerleistung schlichtweg nicht aus. Doch gerade hier verspricht der Quantencomputer ein enormes Potenzial. Richard Feynman fundierte theoretisch bereits in den 1980er-Jahren die Möglichkeit eines Quanten-basierten Rechners. Seither besteht in der Forschung der Traum, das Quanten-System eines Moleküls in ein anderes Quanten-System, sprich in den Quantencomputer, zu bringen, um es damit zu simulieren. Das ist quasi der Heilige Gral des Quantencomputings. Auch Stand heute sind wir noch nicht bei industrierelevanten Materialien angelangt, sondern schauen uns runterskalierte Anwendungsfälle wie kleine Moleküle an. Wir wollen ver-

stehen, wie ein Algorithmus zur Molekül-Simulation entwickelt werden kann. Dahinter verbirgt sich die Hoffnung, dass eines Tages derselbe Algorithmus auf fehlertoleranten und verbesserten, leistungsstärkeren Qubits auch größere Moleküle simulieren kann.

Das klingt nach Grundlagenforschung mit der Möglichkeit, durch verbesserte Technik auch quantitativ größere Forschungsergebnisse zu erzielen. Was interessiert Sie als Automobilhersteller daran? Was können Sie aus einer durch Quantencomputing generierten Molekül-Simulation ableiten?

Wir sehen hier großes Potenzial in der Batterieforschung. Mit Quantencomputing wollen wir in die Batteriechemie hineingehen, um entweder einen besseren Elektrolyt zu entwickeln oder um bessere Materialien für Kathoden und Anoden zu finden. Dies wiederum erlaubt es uns dann, die Reichweite von Batterien zu erhöhen oder die Ladezeit zu verringern. Insgesamt verbessert sich die Qualität der Batterie, sie ist weniger anfällig für Brüche und Strukturveränderungen im Material selber. Wir haben hierfür bereits Algorithmen entwickelt, die auch publiziert und patentiert sind, mit denen wir kleine Systeme mit zwei oder drei

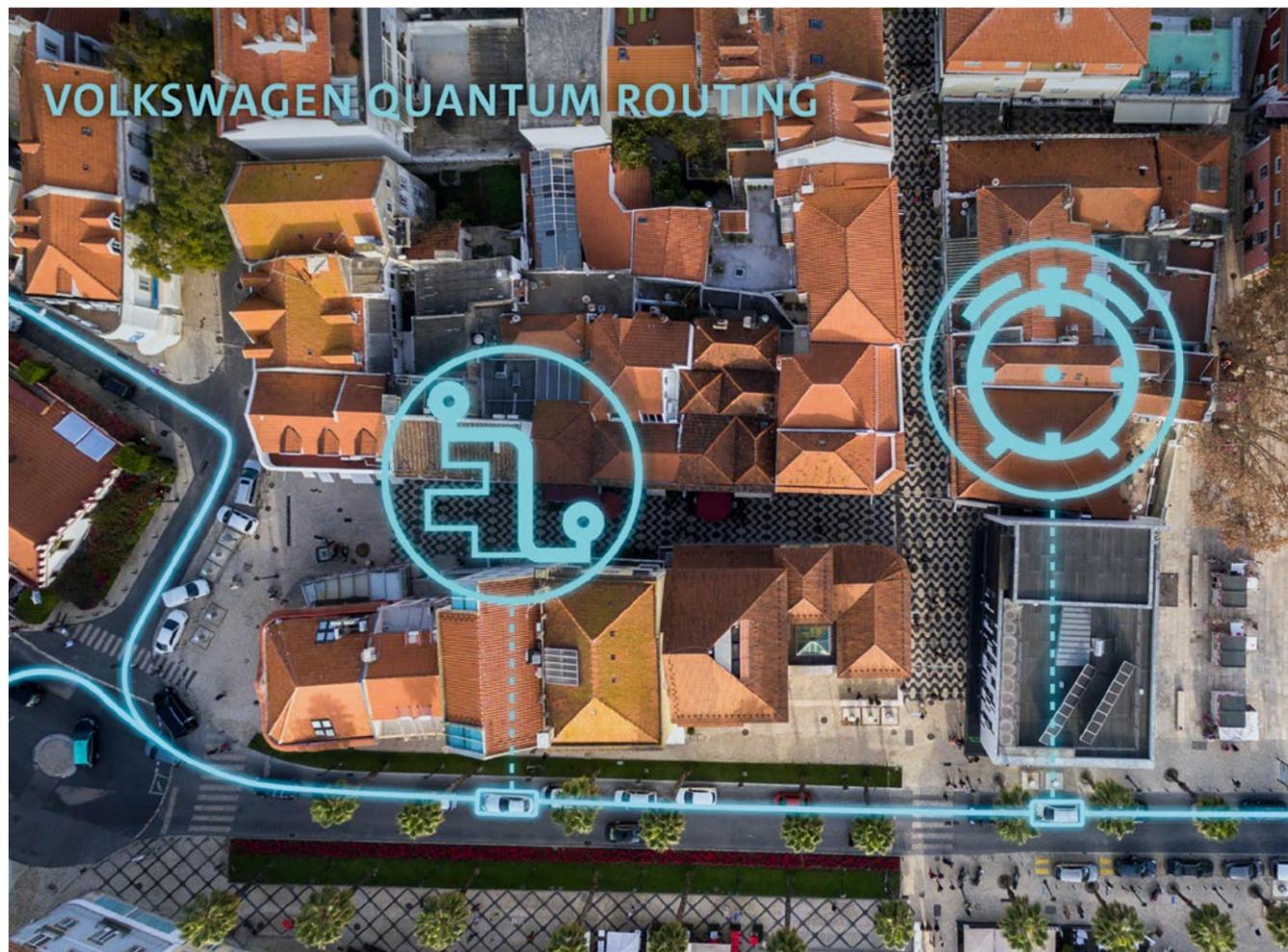
atomischen Molekülen simulieren können. Das verändert die heutige Batteriechemie zwar noch nicht, aber die von uns eingesetzten Algorithmen haben das Potenzial, mit mehr Rechnerleistung auch größere Simulationen zu bewerkstelligen, die dann direkten Einfluss auf unsere Batterieherstellung nehmen könnten. Das kann – wobei das schwierig zu sagen ist – in fünf bis zehn Jahren der Fall sein.

Unter Ihre vier Aufgabenbereiche des Quantencomputing-Teams fällt auch IT-Sicherheit. Warum?

IT-Sicherheit ist ein wichtiges Thema in allen Bereichen von Volkswagen. Seit den 1990er-Jahren gibt es den sogenannten Shor-Algorithmus. Mit dem ist es möglich, primfaktor-basierte Verschlüsselungsverfahren – und darunter fallen sehr viele gängige Verschlüsselungsverfahren in unserem Alltag – anzugreifen. Wir stellen uns vordergründig die Frage: Was passiert, wenn jemand in zehn Jahren mit einem hypothetisch perfekten Quantencomputer Daten entschlüsseln kann? Wir schauen uns Algorithmen an, die wir zur Verschlüsselung nutzen können, um dieser Gefahr entgegenzusteuern. Ich denke, mit dem Thema werden sich in den nächsten Jahren alle Branchen intensiver beschäftigen.

Schon im Oktober 2019 haben Sie ein Projekt zur Verkehrsoptimierung in Lissabon vorgestellt. Wie ist Quantencomputing hier involviert?

Wir haben damals mit Quantenchips eine bewegte Flotte ausgestattet und ihren Verkehrsfluss in Echtzeit optimiert. Der Quantencomputer ist auch hier ein Co-Prozessor, das



Volkswagen startete 2019 in Lissabon das weltweit erste Pilotprojekt zur Verkehrsoptimierung mit einem Quantencomputer.

heißt, die Routen, welche die Fahrzeuge nehmen, können von Quantencomputern ob ihrer enormen Rechenleistung vorausgedacht werden. In unserem Fall waren das Busse, die an mehreren Stopps planmäßig anhalten und weiterfahren mussten. Für die Verbindungen dieser einzelnen Stopps wählte der Quantencomputer die bestmögliche Route selbst aus, sodass alle Busse schnellstmöglich ans Ziel kommen. Die Bewegungsdaten aller Parameter werden dabei noch mit herkömmlichen Computern berechnet und etwa in einer Zeitspanne von fünf Minuten in die Zukunft vorausgedacht. Das klingt, gerade bei neun Bussen, gar nicht so komplex. Doch unser Algorithmus skaliert und kann quantitativ einen viel größeren Rahmen abdecken, wenn die Quantencomputer noch leistungsfähiger werden. Stellen Sie sich vor, Sie haben dann nicht nur neun Busse, sondern 1000 und mehr. Oder noch weiter gedacht: Wir könnten die Fahrtzeit aller Fahrzeuge einer Stadt optimieren und Staus reduzieren. Wir arbeiten gerade an der nächsten Evolutionsstufe dieses Projekts.

„Wir versuchen dabei, die Anzahl so zu minimieren, dass der Fluss maximiert wird. Auch in einer extrem dicht befahrenen Stadt funktioniert dieses Prinzip.“

Sie haben dieses Projekt in Lissabon vorgestellt. Nun ist Lissabon eine charakteristische Stadt mit gewissen Merkmalen. Lässt sich Ihr Projekt beliebig auch auf andere Städte ausweiten? Oder genereller gefragt: Von welchen Parametern hängt die Funktionstüchtigkeit dieser Optimierungs-Anwendung überhaupt ab?

Das ist eine gute Frage! Tatsächlich ist es so, dass die Parameter eine sekundäre Rolle spielen. Nehmen wir als Beispiel eine Straße, die in die Stadt München hineinführt. Darauf ist eine Höchstgeschwindigkeit von maximal 50 km/h zugelassen. Ob die Straße zwei oder dreispurig ist, ist nicht von primärem Interesse, denn wir können mit unseren anonymisierten Bewegungsdaten sehen, ob viele Fahrzeuge 50 fahren oder nicht. Tun sie das nicht, nehmen wir an, dass der Verkehrsfluss nicht optimal ist. Diese Quantität, also die Anzahl der Fahrzeuge pro Streckenabschnitt, wollen wir optimieren. Wir versuchen dabei, die Anzahl so zu minimieren, dass der Fluss maximiert wird. Auch in einer extrem dicht befahrenen Stadt funktioniert dieses Prinzip. Was wir natür-

lich auch wissen müssen: Welche Alternativrouten gibt es? Dafür analysieren wir zuvor, was für mögliche Ausweichrouten es geben kann. Wir weisen jedem Fahrzeug eine Anzahl an möglichen Routen zu. In einer Stausituation ermitteln wir zudem, wie viele Fahrzeuge am besten umgeleitet werden müssen, damit der Fluss optimiert wird. Das vermeidet dann auch den klassischen Navigationssystemeffekt, bei dem alle Fahrzeuge dasselbe tun und dann wiederum neue Staus erzeugen.

Optimierungsverfahren sind sehr praxisbezogen. Wie ist das bei Machine Learning, dem vierten Bereich Ihres Quantencomputing-Teams?

Betrachten wir zum Beispiel ein neuronales Netz, das dafür bestimmt ist, das Fahrverhalten eines Fahrers zu spiegeln. Ich nehme dafür alles, was ein Fahrzeug über Kameras, Ultraschall und weitere Sensoren wahrnimmt, als Input, die X-Werte meiner Gleichung. Der zu prognostizierende Output, die y-Werte, ist dann das, was der Fahrer selbst tut. Wie bewegt er das Lenkrad? Wie tritt er aufs Gas, wie auf die Bremse? Der Algorithmus lernt, basierend auf den Umfeldaten, wie der Fahrer darauf reagiert. Für die enorme Datenmenge reichen unsere herkömmlichen Rechner nicht aus. Doch auch hier ist mithilfe größerer Rechenleistung, wie sie etwa ein verbesserter Quantencomputer in naher Zukunft verspricht, ein enormes Potenzial. Derzeit können wir Quantenalgorithmen für kleinere Netze finden, testen und optimieren. Wir können also den Usecase vorbereiten, indem wir einen Teilbereich des neuronalen Netzes betrachten, etwa 40 oder 50 Neuronen. Sobald die Quantenchips aber leistungsfähiger werden, können wir die Algorithmen nahezu linear hochskalieren auf größere Netze.

Da nun auch die Komponente Fahrer aufgetaucht ist und autonomes Fahren in der Automobilindustrie schon länger diskutiert wird, drängt sich die Frage nahezu auf, ob und wie Quantencomputing den Prozess zu autonomem Fahren begünstigen wird?

Jedes Machine Learning, darunter auch selbstfahrende Fahrzeuge, werden von Quantencomputing profitieren, indem wir diese Algorithmen schneller trainieren können. Wir werden den Quantencomputer wohl nicht im Fahrzeug selbst sehen, aber wir werden dessen Rechenleistungen anwendungsbezogen nutzen und die damit entstandene Technologie in Autos zum Einsatz bringen. Zudem werden wir aufgrund der Menge der Daten immer komplexere Algorithmen brauchen. Heutzutage muss ich mich immer annähern, um irgendwann ans Ziel zu kommen. Diese Näherungsverfahren sind stets ein Kompromiss hinsichtlich der Komplexität der Probleme. Die Hoffnung ist, in Zukunft mit größeren Quantencomputern, diese Annäherungen selbst zu verbessern und genauer zu machen. Die zwei Punkte zusammengefasst: Zum einen wollen wir schneller werden, zum anderen aber auch besser.

Quantencomputing ist ein globales Ansinnen. Auf welche Kooperationen akademischer, aber auch industrieller Art kann der Volkswagen-Konzern setzen? Wie wichtig sind Ihnen diese damit entstandenen Synergien gerade mit anderen Universitäten?

Starke Partnerschaften sind genauso wichtig, wie Talente auf der ganzen Welt zu suchen. Unser Volkswagen Standort in München ist zum Beispiel eng mit der LMU verwachsen und ermöglicht durch die geografische Nähe einen raschen Austausch. Selbiges trifft auf unsere Partnerschaft mit der Universität Berkeley in den USA zu. Universitäre Forschungseinrichtungen leisten beispielsweise viel in der Quantenchemie, wovon wir dann praxisbezogen profitieren.

Andererseits interessieren sich gerade Universitäten dann für die Ergebnisse in der industriellen Anwendung. Dadurch entsteht ein Zusammenspiel aus Theorie und Praxis, woraus beide Partner ihre Vorteile ziehen können.

Das jüngste Konjunkturpaket der Bundesregierung unterstützt Quantencomputing in Deutschland mit zwei Milliarden Euro. Wie wichtig ist die Etablierung eines Quantencomputing-Standortes in Deutschland, sprich in Europa? Wie stehen wir gerade im internationalen Vergleich da?

Wir haben in Deutschland ein sehr gutes und kompetentes Forschungslevel. Außerdem interessieren sich immer mehr Unternehmen für Quantencomputing und beginnen damit, eigene Teams aufzubauen. Die zwei Milliarden seitens der Regierung sind ein großer und wichtiger Schritt, um die Anstrengungen auf nationaler Ebene voranzutreiben und einen Fokus auf die Anwendbarkeit der Ergebnisse zu legen. Ein Grund, warum wir als Land weiterhin Fortschritte machen müssen, ist die globale Konkurrenzsituation: Wer auch immer die Algorithmen zur Simulation von besseren Materialien entwickelt und Zugang zur nötigen Hardware hat, sie auszuführen, der hat eine bessere Industrie und damit einen Wettbewerbsvorteil. Ich bin auch aufgrund der Förderung zuversichtlich, dass Deutschland beim Quantencomputing ein relevanter Player wird im internationalen Vergleich.

Interview: Hannes Mittermaier

Dr. Florian Neukart

Dr. Florian Neukart ist Director des Volkswagen Data Lab und Assistenzprofessor für Quantum Computing an der Universität Leiden. Vor seiner jetzigen Tätigkeit war er Director und Gründer der Advanced Technologies Group bei der Volkswagen Group of America und CTO des Volkswagen Data Lab. Er leistete Beiträge zu den Bereichen Mathematik und Informatik, insbesondere in den Bereichen Optimierung, Quantum Computing und bioinspirierte Algorithmen. Florian hält ein Doktorat in Informatik der Universität von Brasov, sowie zusätzliche Abschlüsse in Informationstechnologie und Informatik und hat über 70 Publikationen verfasst, darunter Bücher über künstliche Intelligenz und Energie.



Quantum Computing: Towards Industry Reference Problems

Andre Luckow, Johannes Klepsch and Josef Pichlmeier

BMW Group, Germany

The complexity is increasing rapidly in many areas of the automotive industry. The design of an automobile involves many different engineering disciplines, e.g., mechanical, electrical, and software engineering. The software of a vehicle comprises millions of lines of code. Further, the manufacturing, logistics, distribution, and sales of a vehicle are highly complex. There is an immense need for solving simulation problems, e.g., in battery chemistry, an essential enabler for technological advancements for electric vehicles. In all these domains, myriads of optimization, simulation, and machine learning problems arise. Quantum computing-based approaches promise to overcome some of the inherent scalability limitations of classical approaches. This article investigates quantum computing applications across the automotive value chain and identifies several high-value problems that will benefit from quantum-enhanced solutions.

1 Introduction

The field of quantum computing is evolving rapidly. Progress in quantum hardware can be observed through the increasing number of qubits and growing quantum volume. The maximum quantum volume grew from 16 in 2019 to 64 in 2020 [1]. The last decades were marked by the development of algorithms that offer a theoretical exponential speedup compared to classical methods, e.g., Shor's algorithm [2]. Further, advantages of quantum solutions for different (non-practical) problems have been demonstrated, e.g., Google showed an advantage in a computational task involving random numbers [3]. Chinese researchers created a quantum device for sampling bosons [4], demonstrating a problem that could not be solved in finite time on classical hardware.

However, current quantum systems are limited to non-practical, small problems and are referred to as

Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ) computers [5].

Nevertheless, promising algorithms for these NISQ systems are emerging. They utilize both classical and quantum hardware and are therefore often called hybrid algorithms. While most algorithms in this class show a similar working principle, the variety of problems that can be solved is increasing. Currently, this includes the simulation of chemical properties in small-scale molecules [6], solving optimization problems [7], performing machine learning tasks such as classification [8], or finding solutions to differential equations [9].

The automotive industry's complexity makes the industry a prime candidate for quantum computing with many promising applications. Vehicles are highly complex products with many variants assembled in an international network of plants leading to many opportunities for optimization and machine learning methods. Further, the automotive industry's transition to electric vehicles makes battery chemistry simulation an important opportunity. This article aims to investigate applications in the automotive industry that can benefit from quantum computing.

Identifying high-value industry problems is crucial to guide progress in the field of quantum computing [10]. In this paper, we propose the usage of industry reference problems to develop benchmarks. For this purpose, we investigate industry applications that (i) are limited by the current state of optimization, simulation, and machine learning, (ii) have potential quantum-enhanced solutions. We postulate that solutions to these reference problems help guide quantum computing toward commercially valuable solutions.

This paper is structured as follows: Section 2 investigates applications in both the product and industry 4.0 domain. We continue with a discussion of the methodology for the development of industry benchmarks in section 3. Based on the described applications, we identify potential reference problems and provide an in-depth description for two problems: robot path planning and vehicle configuration optimization.

	Application Scenario	Variants	Description
1	Robotic Path Optimization	Bodyshop, paintshop, assembly, logistics	Hundreds of robots per plant in particular in body and paint shops [11, 12, 13]
2	Vehicle Configurations	Vehicle options optimizations, crash relevant component layout, cell layout for heat optimization, parts demand calculation, seat position path optimization	Modern vehicles contain many independent but interconnected subsystems for which an optimal combination needs to be derived for reasons including emission and endurance testing [14]
3	System Verification	Verification of automated systems, software testing	Testing of connected subsystems that are designed and described through diverse models to ensure the safety of cyber-physical systems [15, 16]
4	Route Optimization	Logistics, fleets, car sharing, routing	In automated driving and on-demand-mobility, finding optimal paths is crucial [17, 18]
5	Placement & Distribution Problems	Charging station placement, on-demand vehicle distribution	Complex, non-linear problems aiming to optimize the geographic distribution of assets [19]
6	Strategic Planning	Volume planning, plant strategy, plant/model allocation	Highly complex, long term corporate planning (see Figure 1)
7	Tactical Planning	Design of work stations in assembly, workforce planning, rework minimization	Various types of production failures, e.g., technical and human errors, lead to rework, and thus, higher costs [20]
8	Operational Planning	Workforce allocation, line balancing, shift scheduling, vehicle sequencing	Highly customizable products lead to complex production lines with varying cycle times [21])
9	Portfolio optimization	Feature selection in credit scoring, arbitrage opportunities, trading trajectories, risk analysis, Pricing of financial derivatives	Selection of optimal asset distribution considering various objectives, e.g., expected return, volatility [22]
10	Nanoscale Functional Materials Development	Battery simulation, hydrogen simulation, corrosion inhibitors, material science for car body design	Understanding molecular dynamics and electronic structure, simulating surface reactions in battery materials [23]
11	Engineering & Design	Aeroacoustic simulation, component layout for cooling systems, airborne noise optimization, CFD	Solving sets of differential equations is a key element in the development process of any vehicle [24]
12	Computer Vision	Visual inspection in manufacturing, object detection in automated driving	Improving the classification of Nd data through representation in high dimensional Hilbert space

Table 1: Automotive Applications: A wide variety of optimization, simulation, and machine learning problems exist in the automotive value chain, indicating the potentially large impact of the technology on the industry.

2 Applications in the Automotive Value Chain

We discuss potential application areas for quantum computing as an enabler for new product capabilities and Industry 4.0. Table 1 provides an overview of common application scenarios. In the following, we discuss selected applications in detail.

2.1 Product and Customer

Computing and software play a vital role in providing innovative capabilities, e.g., electric mobility, connected services, and automated driving [25]. Advances in quantum computing may enable

significantly improved products and services in these domains. A critical area is research in battery materials that offer improved properties, considering, e.g., energy density, weight, and safety. Lithium metal anodes could, e.g., increase the energy density drastically [26], require, however, other types of electrolytes, which are not available on industry-scale (#10 in Table 1). Simulations are critical for understanding potential materials and chemical reactions. However, classical algorithms for accurately simulating the behavior of molecules are computationally very costly. Quantum computing promises to push the boundaries of what is technically feasible in chemistry simulation [23].

Another challenge for electric mobility is establishing and

managing charging infrastructures (#5 in Table 1). The energy grid must be optimized to support the needs of the growing number of electrified vehicles, e.g., the increased and highly dynamic charging demands. Quantum-enhanced algorithms promise to optimize charging station positions, grid utilization and charging times (see [19] for a review).

Further, optimization problems arise in many connected services, e.g., routing, traffic optimization (#4 in Table 1). Problems in which the shortest possible route across a set of points has to be found can be solved using quantum algorithms to improve traffic predictions, routing, ride-sharing, and other types of on-demand-mobility [27].

2.2 Industry 4.0

Industry 4.0 [28] envisions digital engineering and factories enabled by technologies, such as the IoT, cloud computing, augmented reality, 3-D printing, robotics, and artificial intelligence. Using these technologies enables shorter development time, highly customizable products (batch size “one”), shorter production times, higher quality, and lower costs. The usage of optimization and machine learning methods is essential to achieve these goals (#1, 7 & 8 in Table 1).

Further, there are ample opportunities for using quantum computing to improve processes, e.g., in manufacturing, logistics, and design (#1, 4 & 11 in Table 1). Designing a complex product such as a vehicle is challenging as designs have to meet various criteria, such as cost, safety, regulation, space, aerodynamic, weight, customizability, durability, manufacturing methods, and aesthetics. The highly dynamic market environment demands new approaches for solving engineering challenges. For example, generative design methods [29] can improve the design and creative process by minimizing trial-and-error techniques. Generative design methods are heavily reliant on AI and optimization approaches (#11 in Table 1).

Manufacturing automobiles is a complex challenge: not only is every vehicle a complex product on its own, but the high number of variants is also driving complexity to unprecedented scales [30]. Combined with the large-scale volume of a typical manufacturer of ten thousands vehicles/day, this provides ample opportunities for applying quantum-based machine learning, simulation, and optimization methods.

An important problem in the automotive value chain is planning across different time scales and granularities. Figure 1 illustrates three planning dimensions: strategic, tactical, and operational planning (#7, 8 & 9 in Table 1). Planning is highly challenging, involving many stakeholders and data across the company and the supply chain. Both horizontal alignment of data, models, and decisions across stakeholders on each level and vertical alignment is challenging for technical and business reasons.

The availability of data across the automotive value chain is increasing, as evidenced by the Automotive Alliance, which seeks to establish a collaborative industry platform for exchanging data across the automotive value chain [31]. This data provides the foundation for value chain optimizations and the ability to support long-term strategic decisions, such as allocating vehicle models to plants or the product mix considering complex constraints, such as capacities, logistics, labor costs, and customs.

Tactical decisions include issues related to the plant design

(e.g., line balancing [32]) and workforce allocation (e.g., shift scheduling). Many aspects of production are suitable for optimizing the operational level, e.g., robot path optimization [11] and paint sequencing [12].

3 Towards Industry Reference Problems

All layers of the quantum computing stack are evolving rapidly. At the same time, a gap between high-impact automotive applications and quantum solutions exists. This section discusses our methodology, identifies potential quantum solutions for industrial applications, and describes two potential reference problems.

3.1 Methodology

Figure 2 illustrates our methodology for identifying high-value, commercially relevant industry problems. We investigate (i) available quantum solutions, e.g., low-level quantum hardware and software, and (ii) high-level application problems derived from real-world industry applications. Both approaches complement each other: progress on low-level challenges, e.g., hardware and algorithms, can inspire new industrial applications. High-impact industrial problems can accelerate progress on quantum solutions due to the high commercial relevance. Standardized benchmarks form the third pillar for comparing system designs and guiding progress.

We identified the following layers: problem domain, problem class, mathematical formulation, algorithms and quantum systems. We focus on four problem domains: optimization, quantum chemistry, numerical simulation and machine learning. For each domain, we identified different problem classes, e.g., traveling salesman, knapsack, graph partitioning for optimization. The mathematical formulation provides a formal description of the underlying problem that enables assessment of the complexity, the required input, and the expected output. Often, different types of algorithms are suitable for solving a problem based on a given mathematical formulation. Commonly, we differentiate between quantum, hybrid, and quantum-inspired algorithms. The quantum system encompasses the software and hardware required to execute an algorithm, i.e., qubits, control, connectivity, and software.

Quantum benchmarks are still in their infancy. While various performance characterizations of quantum systems have been conducted, they often lack comparability. While this is an important first step to understand current systems, it is essential to standardize evaluation processes and develop accepted community benchmarks. Benchmarking is an instrumental method to achieve this goal. Designing a good benchmark is a challenging task and requires careful consideration of often conflicting objectives, e.g., trading off different types of hardware, algorithms, and application characteristics. At the same time, the breadth of potential applications is high. A further complicating factor is a high uncertainty regarding the potential impact of the different factors on a potential quantum advantage.

3.2 Background and Related Work

A benchmark is a standardized workload, i.e., a program and a set of inputs, that is used to compare computer systems [33]. Benchmarks are essential to compare systems, applications, al-

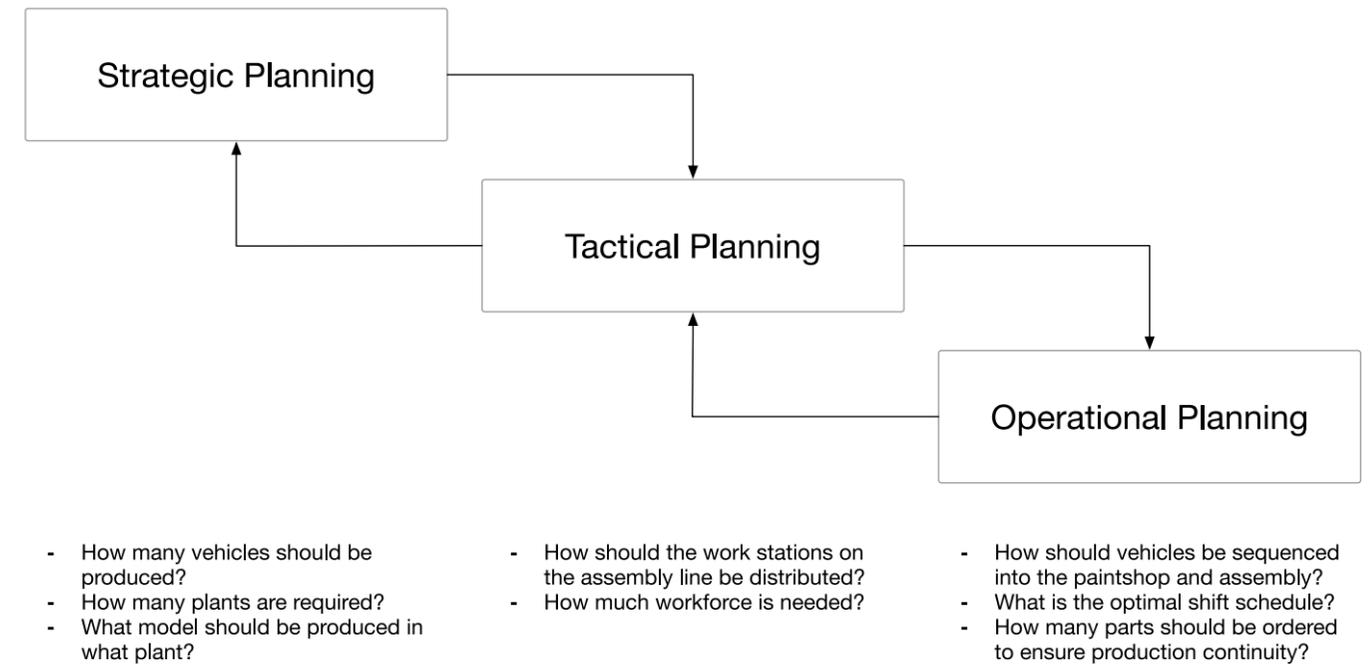


Figure 1: Multi-Level Planning in the Automotive Industry: Planning requires the consideration of different time-scales and granularities. Alignment within and across these layers is crucial to improve quality but results in added complexity.

gorithm innovation and steer progress. An example is ImageNet [34], which motivated the creation of AlexNet and led to deep learning. We postulate that industry reference problems provide a good foundation for application benchmarks.

Benchmarks exist in different granularities. A kernel represents the central part of a program that contains the most time-consuming calculations [35]. Micro-benchmarks investigate a well-defined, narrow aspect of a larger system [36]. A benchmark suite comprises multiple benchmarks typically to study different aspects (e.g., application domains).

Benchmarking quantum systems is challenging due to various reasons, e.g., the complexity induced by various error types, e.g., state preparation, coherence and measurement errors, and the need to handle rapidly evolving hardware, software, and algorithms. Randomized benchmarks aim to address this challenge [37, 38]. The Quantum Volume benchmark emerged as a standard benchmark that captures manifold aspects of quantum computers, such as the number of qubits, gate fidelity, and error rates, into a single metric [39].

While low-level benchmarks aid the comparison of quantum systems, they have limited applicability to real-world applications. In particular considering that NISQ-era algorithms, such as hybrid algorithms, are highly dependent on specific hardware characteristics, e.g., specific noise characteristics, qubit connectivity, and other gate properties. Both the problem structure of the application and hardware characteristics are not sufficiently captured by the Quantum Volume metric.

Some application benchmarks have been proposed: Perdomo et al. [40] utilize a randomized application benchmark for combinatorial circuit fault diagnostics, a SAT problem, to assess classical,

quantum-inspired, and annealing optimization algorithms. Willsch et al. [41] investigate the QAOA algorithm’s performance on the weighted Max-Cut and 2-satisfiability problems. Q-score [42] is a proposed benchmark that measures a quantum processor’s performance when solving standard combinatorial optimization problems. The score is calculated based on the maximum number of variables that a quantum solution can optimize.

While these benchmarks provide immense value in measuring progress, they focus on singular aspects of quantum systems, e.g., the quantum volume is a singular metric incorporating many aspects. Quantum volume particularly emphasizes gate fidelity while weighing the number of qubits less [43]. Thus, it is essential to develop benchmark suites that provide a broad perspective on the state of quantum computing. In particular, application benchmarks based on industry problems can guide and drive progress towards commercially relevant problems.

3.3 Understanding Automotive Applications

Table 2 investigates problem domains, classes, mathematical formulation as well as quantum-based approaches for addressing these. Further, we map these to the described industry applications. The majority of applications are in the optimization domain, but notable applications in quantum chemistry, numerical simulations, and machine learning exist.

Quantum chemistry relies heavily on the simulation of Hamiltonian dynamics. By describing a system in the form of a many-body wave function, quantum computers can efficiently simulate their time evolution [49]. A molecular Hamiltonian can be mapped onto a gate-based quantum computer using the mathematical transformations depicted in Table 2. Different algorithms to

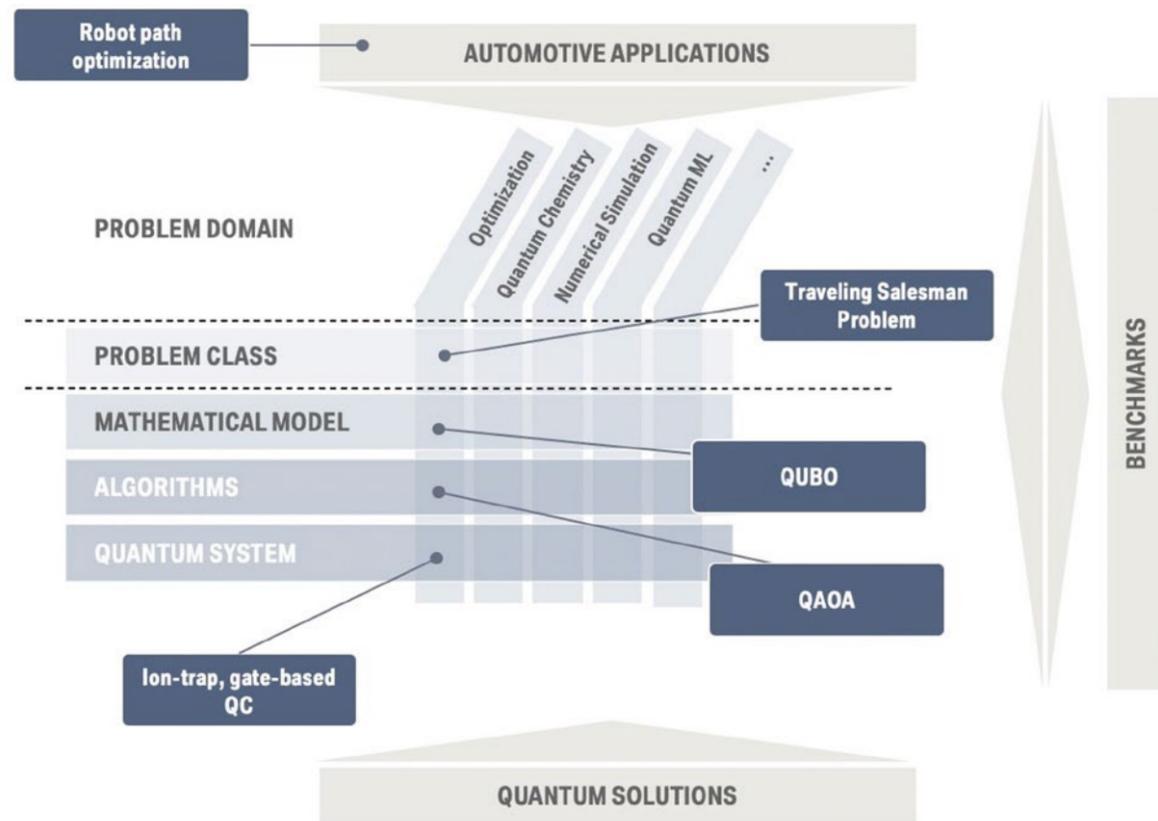


Figure 2: Methodology: We use a three-pronged approach: (i) identifying high-impact industry applications, (ii) deriving potential applications based on current quantum solutions, and (iii) using and developing benchmarks.

simulate the evolution of the many-body Hamiltonian exist. The Variational Quantum Eigensolver (VQE) is designed for NISQ devices and tries to find a ground state of the Hamiltonian by using a classical optimizer in combination with a quantum computer. Quantum Phase Estimation (QPE) is an algorithm frequently used in many areas of quantum computing. It allows to derive the eigenstates and therefore eigenenergies of any Hamiltonian. However, it uses a circuit with high depth and therefore requires error-corrected quantum computers [49].

Many science and engineering problems, e.g., crash simulations and fluid dynamics, are expressed through partial differential equations. One approach is to use quantum systems as an accelerator in a finite element method [50], e.g., by solving the corresponding system of linear equations using a variant of the HHL (Harrow, Hassidim, and Lloyd) algorithm [47]. While the HHL algorithm promises a quantum speedup, it is not feasible on NISQ devices. However, promising hybrid and quantum-inspired approaches have been proposed, e.g., differential quantum circuits [51] and tensor networks.

Many quantum machine learning approaches utilize a higher dimensional space by encoding classical data as quantum states [48]. Quantum circuits for encoding classical data are an active area of research. The goal is to achieve a mapping that is hard to simulate by classical computers [8]. The resulting state is then processed by a parameterized quantum circuit (PQC), allowing exploration of the created space [52]. In the end, the

states are measured, and a label is associated with the outcome. By training the parameters of the PQC, the probability that the correct label is assigned to unclassified data can be increased. This approach is sometimes also referred to as Quantum Neural Networks (QNN) [53].

The solution space for addressing the identified industry challenges is vast: for each problem, various mathematical formulations and algorithms suitable for different types of quantum hardware and system exist. As hardware and software co-design driven by these problems will be critical in the NISQ era, it is essential to establish standardized reference problems to guide designs and evaluate the trade-off between these solutions.

3.4 From Industry Problem to Reference Benchmark

Quantum solutions are advancing on all levels, on hardware, software, algorithm and mathematical formulation level. To support a structured investigation and future benchmarking, we propose the usage of reference problems. A reference problem comprises a description including an assessment of the business value, an analysis of the problem class, potential mathematical formulations, and quantum solutions.

Unlike classical systems, current quantum systems are restricted to small (non-practical) problem sizes. Thus, it is essential to provide simplifications of the problems: They should be simple enough to explore current quantum systems, but still capture the essence of the application. However, they also need to support

Problem Domain	Problem Class	Mathematical Formulation	Algorithm	Application (ref. Table 1)
Optimization	TSP, SAT, Max-Cut, partitioning, maximum independent set problem	QUBO, PUBO, Graph	QAOA [7], Quantum Adiabatic Algorithm [44], Grover Adaptive Search [45]	[1,2,3,4,5,6,7,8,9]
Quantum Chemistry	Molecular dynamics	Jorda-Wigner, BravyiKitaev Superfast, Parity encoding	QPE [46], VQE [6]	[10]
Numerical Simulation	Computer fluid dynamics (CFD), crash simulation, automotive structure design	Sets of differential equations, system of linear equations	Harrow, Hassidim and Lloyd (HHL) [47], differential quantum circuits (DQC) [9]	[11]
Machine Learning	Vision, natural language processing	Reproducing Kernel Hilbert spaces	Variational Quantum Classifier [8], Kernel Methods [48], Quantum Neural Networks	[12]

Table 2: Application of Quantum Approaches to Automotive Applications: Various mid- and long-term approaches for addressing specific optimization, simulation, and machine learning problems exist.

varying degrees of difficulties to accommodate future advances. Another challenge is assessing the quality of the application's output, particularly considering the stochastic nature of quantum computing. For example, while it is possible to assess the computational complexity for optimization problems based on the number of variables, it is difficult to verify the output, particularly as problems become intractable for classical machines.

The abstraction of applications onto problem classes and reference problems enables horizontal, vertical, and cross-industry collaboration. By abstracting high-value applications to problem classes of interest to a broad research and industry community, advances can be accelerated. Simultaneously, the defined problem classes can guide the hardware/software co-design (vertical collaboration), aligning quantum application, software, and hardware developers. In the future, these problems serve as a basis for the investigation and the experimental evaluation of quantum-enhanced approaches, e.g., assessing the impact of noisy qubits, gate fidelities, and coherence times. We continue with a case study of two reference problems from the domain of optimization.

3.4.1 Robot Path Optimization

Problem description: In modern vehicle manufacturing, robots take on a significant workload, including performing welding jobs, sealing welding joints, or applying paint to the car body [11]. While the robot's tasks vary widely, the objective remains

the same: Perform a job with the highest possible quality in the shortest amount of time. For instance, to protect a car's underbody from corrosion, exposed welding seams are sealed by applying a polyvinyl chloride layer (PVC). The welding seams need to be traversed by a robot to apply the material.

Problem class and mathematical formulation: The problem belongs to the domain of optimization problems, specifically to the class: traveling salesman problem, which is classified as NP-hard [54]. A typical mathematical formulation of the model is a weighted graph, which encodes the distance of all possible combinations of start- and endpoints. The goal is to find a combination of connected start- and endpoints that represent the shortest path that needs to be traversed, and therefore, the shortest time necessary. A mathematical formulation suitable for a quantum computer is Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO), which can be derived from the traveling salesman graph [55]. We assign binary variables to the decision of assigning a robot to a specified seam at a discretized time, for all seams and all times. Hence, for a problem with N seams, $2 \times N^2$ variables are needed to model the connection between two points on the graph [11].

Algorithm: The QUBO problem can then be solved using quantum annealing [13]. The most straightforward mapping requires M qubits for M binary variables. Another possible algorithm to solve this problem on a gate-based quantum computer is the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) [7].

3.4.2 Vehicle Configuration Optimization

Problem description: Newly developed car components need to be tested before moving into series production. For this purpose, test vehicles are built. This application's objective is to ensure that every new component is at least built into a test vehicle once. Since many different components are developed each year, the efficient allocation of components to test vehicles is essential, ensuring that the number of built test vehicles is minimal. A powerful engine requires a corresponding transmission.

Further, there might be dependencies to other vehicle options, e.g., an interior design options might depend on the chosen engine. This example shows that the complex dependencies between components can result in a complex, combinatorial problem. Thus, minimizing the number of test vehicles can become highly complex. Similar, configuration problems arise in other areas, e.g., vehicle sequencing, optimizing vehicle configurations for built-to-stock vehicles, and in other industries, e.g., the production of other consumer goods.

Problem class and mathematical formulation: This problem belongs to the class of boolean satisfiability problems (SAT). The different components are mapped to boolean variables, which are either 1 (component is built in) or 0 (component is not built in). Boolean clauses express the dependencies between the different components. The resulting mathematical formulation contains clauses with varying sizes, likely resulting in higher-order than quadratic terms (Polynomial Unconstrained Binary Optimization (PUBO)).

Algorithm: Even though it has been shown that SAT problems can also be mapped to QUBO problems, the reformulation of higher-order terms as quadratic functions leads to a high amount of ancillary variables. To avoid this increase of variables, the QAOA can, e.g., be used to solve the resulting PUBO problem [56].

3.4.3 The relevance of industry benchmarks

We showed how applications can be analyzed using a set of well-defined categories, in particular problem classes, mathematical formulation, and algorithms. Approximate solutions can be found using different quantum hardware systems. Though many different approaches are possible, the feasibility differs significantly depending on which formulation and hardware is applied. Progress in quantum hardware may not be directly translatable in progress in solving optimization problems. Thus, solving real-world reference problems provide a good proxy for evaluating progress. By deriving reference problems from different domains, the suitability of the underlying methods and the technology's maturity can be evaluated. This approach allows the investigation of hardware characteristics for real-world industry applications. Robot path planning and vehicle configuration optimization are examples of two high-value use cases that can be generalized across many industrial applications beyond the automotive industry. For example, robots are increasingly used in all industry from consumer goods to airplanes. Similarly, as products' customizability increases, configuration problems are emerging in several industries, e.g., the optimal configuration of IT systems. Therefore, industry application benchmarks can guide both academic and industry communities.

4 Discussion

We have identified 10+ application scenarios and 40+ use cases across the automotive value chain that are promising for mid- and long-term quantum-based methods, particularly in the domains of optimization, simulation, and machine learning. In these domains, algorithms, such as quantum annealing, adiabatic optimization, hybrid algorithms for machine learning, and linear equations, that can evolve toward a quantum advantage on NISQ-era machines are emerging. Thus, it is instrumental to identify and pursue high-value problems that benefit from higher-quality solutions (e.g., solving more realistic, larger problem sizes) and higher performance. Solving these challenges can accelerate the development of quantum-enhanced solutions.

Industry applications are an essential factor in establishing ecosystems and accelerating the development of quantum computing. Currently, benchmark activities often focus on low-level aspects, such as gate fidelity. There is a lack of application and end-to-end benchmarks that push development towards realworld problems. By describing these high-impact business problems, we can incentivize the exploration of novel solutions spaces, including hybrid and quantum-inspired solutions, and advance the commercial development of quantum computing, while also enhancing our understanding of the technology's potentials for our industry.

In the future, we will evolve the identified reference problems to benchmarks to create a benchmark suite for industry problems. For this purpose, we will develop reference implementations comprising configurable workloads and datasets with different complexity and defined metrics. We postulate that comprehensive benchmark suites on every level are essential to guide progress toward high-value applications that provide a potential quantum advantage. Further, standardized benchmarks developed based on these problems are essential to understand the current state of quantum computing (e.g., problem sizes, performance, scalability), illustrate best practices, and make predictions about the progress of quantum computing.

References: [1] Petar Jurcevic, Ali Javadi-Abhari, Lev S. Bishop, Isaac Lauer, Daniela F. Bogorin, Markus Brink, Lauren Capelluto, Oktay Gu'nlu'k, Toshinari Itoko, Naoki Kanazawa, Abhinav Kandala, George A. Keefe, Kevin Krsulich, William Landers, Eric P. Lewandowski, Douglas T. McClure, Giacomo Nannicini, Adinath Narasgond, Hasan M. Nayfeh, Emily Pritchett, Mary Beth Rothwell, Srikanth Srinivasan, Neereja Sundaresan, Cindy Wang, Ken X. Wei, Christopher J. Wood, Jeng-Bang Yau, Eric J. Zhang, Oliver E. Dial, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. Demonstration of quantum volume 64 on a superconducting quantum computing system, 2020. [2] P. W. Shor. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. In Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, pages 124–134, 1994. [3] Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave Bacon, Joseph Bardin, Rami Barends, Rupak Biswas, Sergio Boixo, Fernando Brandao, David Buell, Brian Burkett, Yu Chen, Jimmy Chen, Ben Chiaro, Roberto Collins, William Courtney, Andrew Dunsworth, Edward Farhi, Brooks Foxen, Austin Fowler, Craig Michael Gidney, Marissa Giustina, Rob Graff, Keith Guerin, Steve Habegger, Matthew Harrigan, Michael Hartmann, Alan Ho, Markus Rudolf Hoffmann, Trent Huang, Travis Humble, Sergei Isakov, Evan Jeffrey, Zhang Jiang, Dvir Kafri, Kostyantyn Kechedzhi, Julian Kelly, Paul Klimov, Sergey Knys, Alexander Korotkov, Fedor Kostritsa, Dave Landhuis, Mike Lindmark, Erik Lucero, Dmitry Lyakh, Salvatore Mandr'a, Jarrod Ryan McClean, Matthew McEwen, Anthony Megrant, Xiao Mi, Kristel Michielsen, Masoud Mohseni, Josh Mutus, Ofer Naaman, Matthew Neeley, Charles Neill, Murphy Yuezhen Niu, Eric Ostby, Andre Petukhov, John Platt, Chris Quintana, Eleanor G. Rieffel, Pedram Roushan, Nicholas Rubin, Daniel Sank, Kevin J. Satzinger, Vadim Smelyanskiy, Kevin Jeffrey Sung, Matt Trevithick, Amit Vainsencher, Benjamin Villalonga, Ted White, Z. Jamie Yao, Ping Yeh, Adam Zalcman, Hartmut Neven, and John Martinis. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574:505–510, 2019. [4] Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, Ming-Cheng Chen, Li-Chao Peng, Yi-Han Luo, Jian Qin, Dian Wu, Xing Ding, Yi Hu, Peng Hu, Xiao-Yan Yang, Wei-Jun Zhang, Hao Li, Yuxuan Li, Xiao Jiang, Lin Gan, Guangwen Yang, Lixing You, Zhen Wang, Li Li, Nai-Le Liu, Chao-Yang Lu, and Jian-Wei Pan. Quantum computational advantage using photons. *Science*, 370(6523):1460–1463, 2020. [5] John Preskill. Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2:79, August

2018. [6] Abhinav Kandala, Antonio Mezzacapo, Kristan Temme, Maika Takita, Markus Brink, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature*, 549(7671):242–246, September 2017. [7] Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, and Sam Gutmann. A quantum approximate optimization algorithm, 2014. [8] Vojtěch Havlíček, Antonio D. C'orcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, and Jay M. Gambetta. Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. *Nature*, 567(7747):209–212, March 2019. [9] Oleksandr Kyriienko, Annie E. Paine, and Vincent E. Elfving. Solving nonlinear differential equations with differentiable quantum circuits, 2020. [10] Henning Kagermann, Florian Su'ssenguth, Jorg K'orner, and Anika Liepold. The innovation potential of second-generation quantum technologies. <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/>, 2020. [11] Murad Muradi and Rolf Wanka. Sample-based motion planning for multi-robot systems. In 2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), pages 130–138, 2020. [12] Michael Streif, Sheir Yarkoni, Andrea Skolik, Florian Neukart, and Martin Leib. Beating classical heuristics for the binary paint shop problem with the quantum approximate optimization algorithm, 2020. [13] Arpit Mehta, Murad Muradi, and Selam Woldeitsadick. Quantum annealing based optimization of robotic movement in manufacturing. In Sebastian Feld and Claudia Linnhoff-Popien, editors, Quantum Technology and Optimization Problems - First International Workshop, QTOP@NetSys 2019, Munich, Germany, March 18, 2019, Proceedings, volume 11413 of Lecture Notes in Computer Science, pages 136–144. Springer, 2017. [14] Jean-Marc Astesana, Laurent Cosserat, and Helene Fargier. Constraint-based vehicle configuration: A case study. In 2010 22nd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. IEEE, October 2010. [15] Wiktor B. Daszczuk, Jerzy Miescicki, Michal Nowacki, and Jacek Wytrebowicz. System level specification and verification using concurrent state machines and COSMA environment. *CoRR*, abs/1703.05541, 2017. [16] Kyoung-Dae Kim and Panganamala Kumar. Cyber-physical systems: A perspective at the centennial. *Proceedings of The IEEE - PIEEE*, 100:1287–1308, 05 2012. [17] Karl Berntorp, Bj'orn Olofsson, Kristoffer Lundahl, and Lars Nielsen. Models and methodology for optimal trajectory generation in safety-critical road-vehicle manoeuvres. *Vehicle System Dynamics*, 52(10):1304–1332, 2014. [18] Christoph Roch and Stefan Langer. The Capacitated Vehicle Routing Problem. *Digitale Welt*, 3(2):30–33, April 2019. [19] Sanchari Deb, Xiao-Zhi Gao, Kari Tammi, Karuna Kalita, and Pinakeswar Mahanta. Nature-Inspired Optimization Algorithms Applied for Solving Charging Station Placement Problem: Overview and Comparison. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(1):91–106, January 2021. [20] L'am Laurent Lim, Gu'ngu'n Alpan, and Bernard Penz. A simulation-optimization approach for sales and operations planning in build-to-order industries with distant sourcing: Focus on the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 112:469–482, 2017. [21] Ralf Bihlmaier, Achim Koberstein, and Ren'e Obst. Modeling and optimizing of strategic and tactical production planning in the automotive industry under uncertainty, pages 367–392. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. [22] Rom'an Oru's, Samuel Mugel, and Enrique Liza-so. Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4:100028, 2019. [23] Vincent Elfving, Jos'e A. G'omez, and Christian Gogolin. Simulating quantum chemistry in the restricted hartree-fock space on a qubit-based quantum computing device. *arXiv: Quantum Physics*, 2020. [24] Ali Yildiz. Optimal structural design of vehicle components using topology design and optimization. *Materials Testing*, 50:224–228, 04 2008. [25] Robert N Charette. This car runs on code. *IEEE Spectrum*, 46(3):3, 2009. [26] Joscha Schnell, Till Gu'ntner, Thomas Knoche, Christoph Vieider, Larissa K'ohler, Alexander Just, Marlou Keller, Stefano Passerini, and Gunther Reinhart. All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production. *Journal of Power Sources*, 382:160–175, 2018. [27] Dominic J. Moylett, Noah Linden, and Ashley Montanaro. Quantum speedup of the traveling-salesman problem for bounded-degree graphs. *Phys. Rev. A*, 95:032323, Mar 2017. [28] Human Ramezani and Andre Luckow. Big data, small data, and getting products right first time. In M. Dastbaz and P. Cochrane, editors, *Industry 4.0 and Engineering for a Sustainable Future*. Springer International Publishing, 2019. [29] Markus Fricke and Stephan Huber. Generative design and additive manufacturing in automotive: The future of making cars. <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/GenerativeDesign-and-Additive-Manufacturing-Automotive-Future-Making-Cars-2018>, 2018. [30] Len Wozniak and Paul Clements. How automotive engineering is taking product line engineering to the extreme. In Proceedings of the 19th International Conference on Software Product Line, SPLC '15, page 327–336, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery. [31] Oliver Ganser, Hagen Heubach, and Frank K'oster. Souver'ane Daten'okosysteme fu'r die Automobilindustrie. <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/W/ws2-gesamtpraesentation.pdf>, 2020. [32] Bryan Pearce. A Study On General Assembly Line Balancing Modeling Methods And Techniques. PhD thesis, Clemson University, 2015. [33] Domenico Ferrari. Computer Systems Performance Evaluation. Prentice-Hall, 1978. [34] Jia Deng, Wei Dong, Richard Socher, Lia-Jia Li, Kai Li, and Li Fei-Fei. Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 248–255, 2009. [35] Jack Dongarra, Joanne L. Martin, and Jack Worlton. Computer benchmarking: Paths and pitfalls: The most popular way of rating computer performance can confuse as well as inform; avoid misunderstanding by asking just what the benchmark is measuring. *IEEE Spectrum*, 24(7):38–43, 1987. [36] Nicolas Poggi. Microbenchmark, pages 1143–1152. Springer International Publishing, Cham, 2019. [37] Easwar Magesan, J. M. Gambetta, and Joseph Emerson. Scalable and robust randomized benchmarking of quantum processes. *Physical Review Letters*, 106(18), May 2011. [38] Kristel Michielsen, Madita Nocon, Dennis Willsch, Fengping Jin, Thomas Lippert, and Hans De Raedt. Benchmarking gate-based quantum computers. *Computer Physics Communications*, 220:44–55, 2017. [39] Andrew W. Cross, Lev S. Bishop, Sarah Sheldon, Paul D. Nation, and Jay M. Gambetta. Validating quantum computers using randomized model circuits. *Phys. Rev. A*, 100:032328, Sep 2019. [40] Alejandro Perdomo-Ortiz, Alexander Feldman, Asier Ozaeta, Sergei V. Isakov, Zheng Zhu, Bryan O'Gorman, Helmut G. Katzgraber, Alexander Diedrich, Hartmut Neven, Johan de Kleer, and et al. Readiness of quantum optimization machines for industrial applications. *Physical Review Applied*, 12(1), Jul 2019. [41] Madita Willsch, Dennis Willsch, Fengping Jin, Hans De Raedt, and Kristel Michielsen. Benchmar-

king the quantum approximate optimization algorithm. *Quantum Information Processing*, 19(7):197, June 2020. [42] Atos. Atos announces Q-score, the only universal metrics to assess quantum performance and superiority. https://atos.net/en/2020/press-release_2020_12_04/atos-announces-q-score-theonly-universal-metrics-to-assess-quantum-performance-and-superiority, 2020. [43] Scott Aaronson. Turn down the quantum volume. <https://www.scottaaronson.com/blog/?p=4649>, 2020. [44] Tameem Albash and Daniel A. Lidar. Adiabatic quantum computation. *Rev. Mod. Phys.*, 90:015002, Jan 2018. [45] Austin Gilliam, Stefan Woerner, and Constantin Gonciulea. Grover adaptive search for constrained polynomial binary optimization, 2019. [46] Daniel S. Abrams and Seth Lloyd. Simulation of many-body fermi systems on a universal quantum computer. *Physical Review Letters*, 79(13):2586–2589, September 1997. [47] Aram W. Harrow, Avinandan Hassidim, and Seth Lloyd. Quantum algorithm for linear systems of equations. *Phys. Rev. Lett.*, 103:150502, Oct 2009. [48] Maria Schuld. Quantum machine learning models are kernel methods, 2021. [49] V. E. Elfving, B. W. Broer, M. Webber, J. Gavartin, M. D. Halls, K. P. Lorton, and A. Bochevarov. How will quantum computers provide an industrially relevant computational advantage in quantum chemistry?, 2020. [50] Ashley Montanaro and Sam Pallister. Quantum algorithms and the finite element method. 2015. [51] Oleksandr Kyriienko, Annie E. Paine, and Vincent E. Elfving. Solving nonlinear differential equations with differentiable quantum circuits, 2020. [52] Thomas Hubregt-sen, Josef Pichlmeier, Patrick Stecher, and Koen Bertels. Evaluation of parameterized quantum circuits: on the relation between classification accuracy, expressibility and entangling capability, 2020. [53] Nathan Killoran, Thomas R. Bromley, Juan Miguel Arrazola, Maria Schuld, Nicol'as Quesada, and Seth Lloyd. Continuous-variable quantum neural networks. 2018. [54] Jillian Beardwood, J. H. Halton, and John M. Hammersley. The shortest path through many points. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 55(4):299–327, 1959. [55] Andrew Lucas. Ising formulations of many np problems. *Frontiers in Physics*, 2, 2014. [56] Stuart Hadfield. Quantum algorithms for scientific computing and approximate optimization, 2018.

Dr. Andre Luckow

Andre Luckow is head of emerging technologies at the BMW Group IT in Munich, Germany. Andre held different positions in the field of IT Innovation & Research in the USA and in Germany. His work lies at the intersection of emerging technologies, such as quantum computing and artificial intelligen



Dr. Johannes Klepsch

Johannes Klepsch has been with the BMW Group for 4 years, working on data driven emerging technologies and the conjunction between IT and business. He has a background in mathematics and probability theory with a PhD from the Technical University of Munich.



Josef Pichlmeier

Josef studied B.Sc. Engineering Physics in Munich (HM). During his Bachelor thesis he investigated the applicability of QC for the verification of autonomous cars. Afterwards, he worked on QML at TU Delft. At the moment he studies M.Sc. Computational Science at the University of Regensburg.



Azure Quantum – Das Full-Stack-Ökosystem für Anwendungen auf Quantencomputern

Quantencomputer können durch ihre enorme Leistungsfähigkeit etwa in der Berechnung von Molekülen bahnbrechende Ergebnisse erzielen. Deshalb könnten bald in der Chemieindustrie durch den Einsatz von Quantencomputern hochleistungsfähige Materialien entwickelt werden. Mit diesen Entwicklungen gehen Verbesserungen in der Pharmaindustrie und in der Medizin einher. Doch auch in der Verbesserung von Logistik-Prozessen können Quantencomputer optimierend wirken. Darüber hinaus gibt es neueste Ansätze, Quantencomputing auch für eine Reduktion im CO₂-Ausstoß nutzbar zu machen. Der studierte Informatiker Patrick Schidler verantwortet seit 2018 das Lösungsgeschäft mit der Cloud Platform Microsoft Azure in Deutschland und berichtet über vielversprechende Anwendungsmodelle von Quantencomputing.

Welche Rolle nimmt das Thema Quantencomputing innerhalb von Microsoft Stand heute ein? Wie kam es dazu?

Wir haben schon vor über einem Jahrzehnt mit unseren Bemühungen im Bereich des Quantencomputings begonnen. Heute haben wir eine weltweite Gemeinschaft aus Experimentator*innen, Ingenieur*innen, Theoretiker*innen, Postdocs und Studierenden, die einzigartig in der Industrie und im akademischen Bereich ist. Wir haben außerdem einen umfassenden Ansatz für das Quantencomputing gewählt, der Folgendes beinhaltet:

- Den Bau eines Quantencomputers mit zuverlässigen, skalierbaren und fehlertoleranten topologischen Qubits.

- Die Entwicklung einer einzigartigen kryogenen Steuerebene mit extrem geringer Leistungs- und Wärmeabgabe.
- Die Entwicklung eines kompletten Software-Stacks, der die Programmierung des Quantencomputers und die Steuerung des Systems im großen Maßstab ermöglicht.

Insbesondere über den verstärkten Einsatz unserer Cloud-Angebote rund um Microsoft Azure sind wir für unsere Kund*innen auch zu einem verlässlichen Partner bei der digitalen Transformation geworden. Denn anders als noch vor zehn Jahren sind die Technologien für diesen Prozess komplexer geworden und umfassen nicht mehr nur Rechenleistung oder Speicher aus Cloud-Rechenzentren, sondern

vielmehr Technologien wie Künstliche Intelligenz, Mixed Reality, Blockchain und eben Quantencomputing. Während es lange Zeit ein scheinbares Wettlaufen um die Anzahl der Qubits – die Speicher- und Informationseinheiten eines Quantencomputers – gab, war uns die Anwendbarkeit des Quantencomputings von Beginn an wichtig. Aus diesem Grund haben wir uns darauf konzentriert, die Stabilität der typischerweise schwer zu beherrschenden Qubits zu erhöhen. Man muss dazu wissen, dass Quantencomputer häufig sehr anfällig für Störungen von außen sind, was deren Einsetzbarkeit deutlich reduziert. Um diese Anfälligkeit zu kompensieren, müssen komplizierte Verfahren zur Fehlerkorrektur angewandt werden, was wiederum die Leistungsfähigkeit reduzieren kann. Es geht also eigentlich nicht darum, wie viele Qubits man hat, sondern wie viele man tatsächlich davon effizient nutzen kann. Daher hat Microsoft sehr früh auf das Konzept der „topologischen Qubits“ gesetzt – basierend auf den Ideen des italienischen Physikers Ettore Majorana – und arbeitet seit über zehn Jahren an einem stabilen, skalierbaren Quantencomputer. Gleichzeitig machen wir die für die Anwendung notwendigen Werkzeuge nutzbar: Mithilfe von Programmiersprachen und -frameworks für Quantencomputer machen wir die Konzepte dieser Technologie für Kund*innen sowie Partner bereits heute erlern- und anwendbar.

Führende Wissenschaftler und Industriekonzerne gehen von einer groß angelegten Technologie-Revolution aus, die der Quantencomputer binnen 5-10 Jahren erzielen wird. Wie sieht Microsoft die anwendungsbezogenen Fähigkeiten von Quantencomputing?

Für unsere Kund*innen und Partner sind die anwendungsbezogenen Möglichkeiten natürlich sehr relevant. Sie versprechen sich durch die Anwendung der Technologie die Lösung signifikanter Probleme oder Wettbewerbsvorteile. Tatsächlich sehen auch wir, dass viele Kund*innen sich bereits Kompetenzen in diesem Bereich aufgebaut haben

und schon für ihre individuellen Bedürfnisse nutzen – wenn auch eingeschränkt. Aus unserer Sicht ist das ein spannender Zwischenschritt: Viele Ideen, die wir mit Kund*innen diskutieren, brauchen gar keinen Quantencomputer. Häufig können diese mithilfe optimierter Algorithmen und cleverer Programmierung sehr effizient auf marktüblicher Hardware umgesetzt werden. Die Quantenkonzepte helfen aber dabei, die Probleme aus einem anderen Blickwinkel zu betrachten und zu besseren Lösungen zu kommen. Wir nennen das dann

„quanteninspirierte Algorithmen“. Mit der breiteren Verfügbarkeit von Quantencomputern als Werkzeug geht unserer Meinung nach etwas sehr Spannendes einher: Viel mehr Menschen werden ihre Ideen mithilfe dieser Technologie umsetzen können. Erst das wird die eigentliche Technologie-Revolution auslösen. Genau das ist der Grund, warum wir bereits heute die Quantenkonzepte nutzbar machen – etwa mithilfe der Programmiersprache Q#. Wir wollen Menschen befähigen, bereits heute von den Möglichkeiten der innovativen Technologie zu profitieren.

Wer sollte sich heute bereits für Quantencomputing interessieren und warum? Welches Potenzial verbirgt sich hinter Quantencomputern?

Wir arbeiten bereits mit den Möglichkeiten des Quantencomputings und diskutieren über seine Potenziale, um einige der anspruchsvollsten Probleme in der heutigen Industrie zu lösen, und zwar für eine Vielzahl von Bereichen, darunter für die Chemie, die Medizin und den Naturschutz. Beispielsweise kann Quantencomputing dabei helfen, chemische Stoffe zu entdecken, mit denen wir das Treibhausgas CO₂ aus der Atmosphäre binden können. Auch alltägliche Probleme lassen sich mit Quantencomputern effizienter lösen. So arbeiten wir zum Beispiel gemeinsam mit Ford an der Vermeidung von Verkehrsstaus – insbesondere im Hinblick auf das autonome Fahren. Auf der anderen Seite bricht das Quantencomputing auch mit so mancher traditionellen Annahme der Informatik – etwa, dass die Lösung bestimmter mathematischer Probleme für normale Computer sehr komplex ist und damit sehr lange dauert. So funktioniert das immer noch

„Beispielsweise kann Quantencomputing dabei helfen, chemische Stoffe zu entdecken, mit denen wir das Treibhausgas CO₂ aus der Atmosphäre binden können.“

häufig eingesetzte Verschlüsselungsverfahren „RSA“ auf der Annahme, dass die Zerlegung einer sehr großen Zahl in ihre beiden Primfaktoren sehr lange dauert – hunderte oder tausende Jahre. In Ihrem Artikel „Ein Generationenwechsel der Superlative: Der Computer von morgen“ wird ja gut beschrieben, dass man diese Verschlüsselung

des von Peter Shor beschriebenen Algorithmus mithilfe eines Quantencomputers effizient knacken kann. Von der Idee zur Lösung bedarf es aber auch der Umsetzungskompetenz. Mein persönlicher beruflicher Hintergrund liegt in der Software-Entwicklung. Als ich das erste Mal die Werkzeuge des Quantencomputings in die Hände bekommen habe, hatte ich einen ganz schönen „Knoten im Kopf“. Man braucht schon etwas Zeit, Übung und Erfahrung, bis man beispielsweise in unserer Programmiersprache Q# die ersten Algorithmen feh-

lerfrei zum Laufen bekommt. Eben deshalb ist es so wichtig, dass sich Entwickler*innen, Forscher*innen und alle anderen Interessierten frühestmöglich mit den Konzepten vertraut machen.

Was ist „Azure Quantum“?

Azure Quantum ist das weltweit erste Full-Stack-Ökosystem für Public Cloud-Lösungen. Mit Azure Quantum machen wir die Vorteile des Quantencomputings heute schon für unsere Kund*innen nutzbar. Zusammen mit unseren Partnern IQBit, Honeywell, IonQ, QCI und Toshiba stellen wir das vielfältigste Angebot an Quantensoftware- und Hardwarelösungen, ein Netzwerk führender Quantenforscher*innen und -entwickler*innen sowie eine robuste Ressourcenbibliothek zusammen. Wie bereits angesprochen, lassen sich viele Probleme auch durch Nutzung von „quanteninspirierten Algorithmen“ auf marktüblicher Hardware ausführen. Azure Quantum ermöglicht es Entwickler*innen, Algorithmen zu schreiben und diese dann auf der ganzen Bandbreite von Hardwarelösungen einzusetzen – bis hin zur Quanten-Hardware. Microsofts „Quantum Development Kit“ erlaubt es, die Quantenprogramme in Q# oder in der Programmiersprache Python zu entwickeln und laufen zu lassen. Und Microsofts neue Quantum Intermediate Representation (QIR) soll eine gemeinsame Schnittstelle zwischen vielen Programmiersprachen und Zielplattformen für Quantenberechnungen sein.

Welche konkreten Use-Cases von Quantencomputing kann Microsoft heute schon anbieten? Welche Lösungen werden damit erzielt?

Ein konkretes Einsatzfeld ist die computergestützte Chemie insbesondere bei der Entwicklung hochleistungsfähiger Materialien. Die Vorhersage des Verhaltens und der Wechselwirkung von solchen Materialien ist ein komplexes Problem, aber für die effiziente Entwicklung von Neuheiten unerlässlich. So arbeitet beispielsweise OTI Lumionics mit Microsoft an der Entwicklung transparenter Displays auf Basis von OLEDs. Gemeinsam mit der Case Western Reserve University in Ohio kombinieren wir die spannenden Möglichkeiten des Quantencomputings mit unserer Microsoft HoloLens und der Mixed Reality Technologie: Durch die gesteigerte Leistung bei der Verarbeitung der Daten von Magnetresonanztomographen (MRT) brauchen Patient*innen weniger Zeit im MRT zu verbringen und Ärzte erhalten gleichzeitig bessere 3D-Bilder. Gemeinsam mit Trimble arbeiten wir an der Optimierung der weltweiten Logistik: Hierbei geht es im Kern darum, Transportkapazitäten bestmöglich zu nutzen, Waren möglichst effizient zu transportieren und dabei Variablen

wie den CO₂-Ausstoß, Kosten oder Lieferzeiten deutlich zu reduzieren. Darüber hinaus arbeitet Microsoft zum Beispiel auch an Projekten zur Optimierung von Ernten mit, wo es gezielt darum geht, den Düngereinsatz zu reduzieren, um die Umwelt zu schonen. Mithilfe von Azure Quantum lassen sich solche Probleme schon jetzt effizient angehen. Die genannten Beispiele sind nur eine kleine Auswahl, sie zeigen aber anschaulich, dass viele gängige Probleme für klassische Computer heutzutage bereits eine große Herausforderung darstellen können. Das vermutlich bedeutsamste am Quantencomputing wird somit sein, neue Lösungsansätze für diese ganz konkreten Herausforderungen zu finden.

Ein Beispiel: Wie funktioniert die Zusammenarbeit zwischen einem mittelständischen Unternehmen, das in Deutschland seinen Standort hat, mit Microsoft? Wie steht es um die Verarbeitung, Speicherung und Sicherung von hoch sensiblen Daten?

Datenschutz ist für Microsoft ein sehr wichtiges Thema. Wir nehmen deutsche Unternehmen als Innovationstreiber wahr und arbeiten natürlich auch bei diesem Thema eng zusammen. Hinsichtlich der Verarbeitung, Speicherung und Sicherung von hoch sensiblen Daten geht es Kund*innen und Partnern um mindestens zwei wichtige Aspekte: Wie können sie gesetzliche bzw. regulatorische Anforderungen erfüllen und wie schützen sie ihre Innovationen bzw. ihren Wettbewerbsvorteil? Zum ersten Punkt ist zu sagen, dass Azure Quantum den gleichen Design-Richtlinien folgt wie alle Azure-Dienste: Wir haben bereits vor ein paar Jahren die Vorgaben der europäischen Datenschutzgrundverordnung auf alle unsere Rechenzentren weltweit ausgeweitet. Über 90 regionale und mehr als 35 industriespezifische Compliance-Angebote sind unter anderem die Basis dafür, dass unsere Kunden ihre eigenen Compliance-Anforderungen umsetzen können. Zum Schutz von Innovationen haben wir mit Azure IP Advantage eine wichtige Grundlage gelegt, um das geistige Eigentum von Unternehmen zu schützen, was insbesondere für Startups sehr wichtig ist. Um diese Bedingungen zu gewährleisten, investiert Microsoft jedes Jahr mehr als eine Milliarde US-Dollar in die Sicherheit seiner Rechenzentren.

Mit welchen Partnern arbeitet Microsoft für eigene Quantencomputing-Anwendungen zusammen? Sind diese anderen Partner in die zuvor abgeschlossene Zusammenarbeit des Unternehmens auch involviert?

Microsoft war schon immer eine „Partner Company“ – es entspricht unserer DNA. Unser Partner-Netzwerk in Deutschland umfasst mittlerweile über 30.000 Partner. Da-

her arbeiten wir auch im Bereich des Quantencomputings sehr eng mit verschiedenen Partnern zusammen: In unserem „Quantum Network“ befinden sich aktuell weltweit über 20 Partner aus der Industrie. Hinzu kommen über 20 Universitäten und Forschungsinstitute. Um die Werkzeuge schnellstmöglich nutzbar zu machen, befinden sich mittlerweile auch viele Kund*innen in diesem Netzwerk. Insbesondere die Entwicklungswerkzeuge werden als Open Source veröffentlicht, sodass möglichst viele Menschen die Möglichkeit haben, unsere Entwicklungen aktiv zu nutzen oder sich selbst einzubringen.

Um sich noch stärker dem Thema Quantencomputing widmen zu können, hat Microsoft unlängst ein neues Quantum Computing Lab in Delft in den Niederlanden eingerichtet. Welche Funktion nimmt dieses Laboratory ein?

Europa ist für uns ein wichtiger Standort, um die Entwicklung des Quantencomputing voranzutreiben. Die TU in Delft nimmt in Europa eine wichtige Rolle im Bereich der Forschung rund um Quantencomputing ein. Dort wird wichtige Grundlagenforschung betrieben, aber eben auch die Entwicklung von sehr praxisnahen Szenarien vorangetrieben – wie beispielsweise das Quantum Internet, welches später einmal parallel zu unserem derzeitigen Internet existieren soll. In Zusammenarbeit mit QuTech – einer Kooperation zwischen der TU Delft und der Forschungsorganisation TNO – will Microsoft praxisnahe Anwendungsfälle entwickeln, die dazu beitragen, dass Menschen frühestmöglich von der Technologie profitieren können.

Die Fehleranfälligkeit gängiger Quantencomputer ist in manchen Dingen noch relativ hoch, weshalb herkömmliche Computer der neuen Technologie noch zuvorkommen. Doch das kann sich schnell ändern. Wann rechnet Microsoft mit dem Kippunkt, sprich: Wann wird der Quantencomputer den herkömmlichen Computer endgültig überholen?

Für viele Ansätze bei der Entwicklung des Quantencomputers ist das in der Tat noch eine Herausforderung. Wir haben uns deshalb vor über zehn Jahren bewusst für einen anderen Ansatz entschieden und die Entwicklung eines skalierbaren Quantencomputers auf Basis von „topologischen Qubits“ vorangetrieben – wie am Anfang bereits skizziert. Julie Love, Director of Quantum Computing Business Development bei Microsoft, hat vor einiger Zeit mal geschätzt, dass

diese recht stabilen Qubits zwischen 1.000 und 10.000mal effizienter genutzt werden können als die instabilen Qubits in anderen Architekturen. Trotz allem ist festzuhalten, dass der Aufwand für den Betrieb von Quantencomputern noch immer sehr hoch ist. So muss die Kühlung der Systeme im Bereich zwischen 0,01 und 0,03 Kelvin erfolgen – also bei circa minus 273 Grad Celsius. Es liegt also noch einiges an Arbeit vor uns. Im Großen und Ganzen hat noch niemand ein stabiles, skalierbares und damit wirklich nützliches Qubit entwickelt. Wir glauben allerdings, dass unser Ansatz die Industrie tatsächlich voranbringen und schnell skalierbares Quantencomputing ermöglichen wird.

Welche besonderen Anwendungen und Dienstleistungen kann Microsoft europäischen bzw. sogar deutschen Partnern anbieten?

Wie man am Beispiel unserer europäischen Labore sieht, denkt Microsoft bei Innovation weltweit, aber eben auch lokal.

„Der Quantencomputer ist kein „Allheilmittel“, Fach- und IT-Expert*innen müssen daher gleichermaßen in ihrer Ausbildung auf die Möglichkeiten und Grenzen des Quantencomputings hingewiesen werden und diese hautnah anwenden können.“

Wir haben in Deutschland und Europa viele Partner, die uns helfen, unsere Technologieinnovationen für Kund*innen nutzbar zu machen. Die Kooperation mit dem Labor in Delft ist ein gutes Beispiel dafür. Darüber hinaus gibt es viele Kolleg*innen in Europa, die unsere Kund*innen in konkreten Projekten unterstützen. Häufig können wir Kunden und Partnern schneller helfen als erwartet, weil sich, wie angesprochen, viele Probleme häufig schon mit Quanten-inspirierten Algorithmen und Vorgehen lösen lassen. Die iterative Vorgehensweise verbunden mit dem Wissensaustausch im „Quantum Network“ schätzen viele deutsche sowie europäische Kunden und Partner als großen Mehrwert bei der Lösungsentwicklung.

Im Sommer 2020 wurde mit großer Euphorie eine theoretisch vorhergesagte Quantenbatterie konstruiert: die Quanten-Phasen-Batterie. Was halten Sie davon und welchen Nutzen kann der Quantencomputer von morgen dadurch erzielen?

Das Team um Francesco Giazotto vom NEST in Pisa hat diesbezüglich eine wirklich beeindruckende Arbeit geleistet. Eine seriöse Vorhersage hinsichtlich des „Quantencomputers von morgen“ ist unheimlich schwer. Ich denke, als 1947 in den Bell Laboratories der erste Bipolartransistor präsentiert wurde, hätte auch niemand daran gedacht, dass wir heute Milliarden von Transistoren in unseren Smartphones in der Hosentasche mitführen.

In einer zeitlichen Skala zwischen Grundlagenforschung – konkreten Anwendungen von Quantencomputing – wo steht Deutschland aktuell? Und was muss sich gesamtheitlich gesehen tun, um die neue Technologie breit nutzbar zu machen?

Es gibt bereits eine Vielzahl an Bereichen in vielen Unternehmen in Deutschland, die an sehr spezifischen Anwendungsfällen arbeiten. Ihnen allen kommt zugute, dass grundlegende Fragen nicht mehr gestellt werden müssen: Die eingesetzten Werkzeuge und Programmiersprachen sind

Ausbildung, Adaptionbereitschaft und Adaptiongeschwindigkeit. Bei der Ausbildung müssen wir es schaffen, fachliche Probleme von Expert*innen auf die Lösungsmöglichkeiten des Quantencomputings abzubilden. Der Quantencomputer ist kein „Allheilmittel“, Fach- und IT-Expert*innen müssen daher gleichermaßen in ihrer Ausbildung auf die Möglichkeiten und Grenzen des Quantencomputings hingewiesen werden und diese hautnah anwenden können. Quantencomputer zu programmieren, das sollte man praktisch erfahren können – die Werkzeuge dafür stehen etwa mit unserem Quantum Development Kit bereits zur Verfügung. Beim Thema der Adaption neuer Technologien geht die Bereitschaft in deutschen Unternehmen oft weit auseinander, hier können wir in der Breite noch mutiger und lösungsorientierter werden. Zuletzt zum Punkt der Adaptiongeschwindigkeit: Es gibt einige wichtige Rahmenparameter bei der Adaption des Quantencomputers. Manche davon erscheinen recht trivial, sind aber selbst beim aktuellen Stand der Technologie immer noch Blocker für viele Unternehmen: Der Breitbandausbau beispielsweise ist nur eine von vielen Herausforderungen einer soliden digitalen Infrastruktur. Wer einen Wettbewerbsvorteil mithilfe von Quantencomputing generieren will, der muss in der Lage sein, die verfügbaren Technologien zeitnah und verlässlich einzusetzen. Diese Grundlagen dürfen nicht erst geschaffen werden, wenn Quantencomputer für alle Organisationen zur Verfügung stehen.

„Durch die gesteigerte Leistung bei der Verarbeitung der Daten von Magnetresonanztomographen (MRT) brauchen Patient*innen weniger Zeit im MRT zu verbringen und Ärzte erhalten gleichzeitig bessere 3D-Bilder.“

Stichwort Wechselwirkung von Quantencomputing mit anderen hochaktuellen Technologien: Welche anderen Neuerungen könnten mit dem Quantencomputer fusioniert werden? Gibt es beispielsweise eine Wechselwirkung zwischen Künstlicher Intelligenz und Quantencomputing?

Diese Frage ist hoch spannend, da sie bidirektional funktioniert. Immerhin kann man sich auch fragen, welche anderen Technologien das Quantencomputing überhaupt erst erfolgreich nutzbar machen. Microsoft arbeitet an Synergien in beide Richtungen – das bereits erwähnte Beispiel der Case

Western Reserve University ist ein gutes Beispiel dafür, wie die Zusammenführung von innovativen Technologien wie Quantencomputing und Mixed Reality schon heute einen echten Mehrwert generieren kann. Schaut man sich aktuelle Publikationen an, muss man sich eher fragen, welche Bereiche keine Wechselwirkungen mit Quantencomputing haben werden. Letzt-

endlich sollte immer das zu lösende Problem im Fokus stehen und ganzheitlich betrachtet werden. Wir sehen, dass die Fragen nach der Lösung bedeutender Probleme – beispielsweise die Reduzierung von Umweltschäden oder die verbesserte Heilung von Krankheiten – die eigentlichen Treiber bei der Entwicklung des Quantencomputings sind. Wir glauben, dass die Lösung solcher Herausforderungen die künftige Bedeutung und Rolle der Technologie prägen wird. Hierfür arbeiten wir kontinuierlich daran, die Möglichkeiten des Quantencomputing für Menschen zugänglich zu machen.

Interview: Hannes Mittermaier

Patrick Schidler

Patrick Schidler verantwortet seit 2018 das Lösungsgeschäft mit der Cloud Plattform Microsoft Azure in Deutschland. Der studierte Informatiker setzt sich in seiner Rolle als Head of Azure Marketing & Operations u.a. mit den Chancen von Quantencomputern für Kunden und Partner im deutschen Markt auseinander.



Foto: Microsoft



Digitale Stadt München e.V.



Stand: Sept. 2019

Digitale Stadt München e.V.:

Der Verein „Digitale Stadt München e.V.“ ist ein branchenübergreifendes Netzwerk im Umkreis der Digitalmetropole München. Als lebendige Plattform vernetzt er seine Mitglieder im Rahmen von drei Formaten:

DigiTalk

DigiTalks sind unsere regelmäßigen Themenabende. Unsere Mitglieder öffnen ihre Türen und laden zu einem aktuellen Thema der digitalen Transformation ein. Lernen Sie das Unternehmen kennen und erfahren Sie dessen Herausforderungen und Lösungsansätze.

AGs

Die Arbeitsgruppe „Smart City“ hat beispielsweise das Ziel, die Stadt München zu einer intelligenten Metropole zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden Potenziale aus Wissenschaft und Wirtschaft identifiziert, um sie in das urbane Leben zu integrieren.

DIGICON

Die DIGICON ist großer Treffpunkt wenn jährlich 350 namhafte Experten und Entscheider zusammen kommen, um sich über aktuelle Themen der Digitalisierung auszutauschen.

Kontakt: Geschäftsstelle des Vereins „Digitale Stadt München e.V.“, Oettingenstraße 67, 80538 München
 ✉ geschaeftsstelle@digitalestadtmuenchen.de ☎ 089/ 2180-9259 oder -9171
 Mitglied werden unter: <https://digitalestadtmuenchen.de/mitglied-werden/>

QC aus Anwendersicht

Thomas Strohm ist Senior Expert und Coordinator Quantum Technologies bei Bosch. Bosch arbeitet aktuell – wie viele andere Konzerne auch – an der Erforschung, Entwicklung und Nutzung des Quantencomputings. Der Weg dazu ist nur über gemeinsame und internationale Vorhaben zu bewerkstelligen. So ist Thomas Strohm sehr aktiv bei der Gründung des European Quantum Industry Consortium (QuIC). Von seiner technischen Erfahrung bei Bosch profitierend, spricht er über die aktuelle Quantencomputing-Situation in der Industrie.

Welche Rolle spielen „Quanten“ in Ihrem Metier?

Bosch ist einer der größten Technologiekonzerne. Insofern ist es ganz natürlich, dass die „Quanten“ eine große Rolle für Bosch spielen werden. Bosch ist Weltmarktführer bei mikroelektromechanischen Sensoren: Drei von vier Mobiltelefonen sind mit Beschleunigungssensoren und ähnlichen Sensoren von Bosch ausgestattet. Auf „Quanten“ basierende Sensoren können um mehrere Größenordnungen empfindlicher sein als konventionelle Sensoren. Quantensensoren haben das Potenzial, neue Anwendungen zu ermöglichen und die Stellung von Bosch im Sensorgeschäft zu verfestigen.

Beim Quantencomputing ist man ziemlich sicher, dass es in einigen Gebieten wie der Simulation und Entwicklung von Materialien, chemischen Stoffen und Medikamenten völlig neue Möglichkeiten eröffnen wird. Man ist auch sehr zuversichtlich, dass es darüber hinaus große Vorteile gibt, etwa bei den allgegenwärtigen Optimierungsaufgaben oder beim Maschinenlernen. Hier ist aber auf der Algorithmenseite noch viel Forschung durchzuführen, und natürlich müssen die dafür benötigten Quantencomputer gebaut werden. Hier stellen die unterschiedlichen Anwendungen teilweise stark unterschiedliche Anforderungen an die Quantencomputer-Hardware. Schließlich haben wir auch eine kleinere Aktivität auf dem Gebiet der Quantenkryptographie. Das ist wichtig für uns, denn es trägt zu einer Verbesserung der Datensicherheit in den zunehmend vernetzten Systemen bei.

Auf Ihrer Website schreiben Sie: „Quantentechnologien sind ein Technologiebereich, der heute noch in den Kinderschuhen steckt; daher kommen der Zusammenarbeit mit der akademischen Gemeinschaft und öffentlichen Förderpro-

grammen hier besondere Bedeutung zu.“ Wie sieht diese Zusammenarbeit mit Forschung und Öffentlichkeit konkret aus? Sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene gibt es Förderinitiativen, die Projekte beinhalten, an denen explizit Akademia und Industrie zur Teilnahme aufgerufen sind. Wir sind selbst an einigen solchen Projekten beteiligt und schätzen den engen Austausch mit Akademia. Des Weiteren haben wir auch eine enge Zusammenarbeit mit einigen Universitätsinstituten in unserer Umgebung.

Sie sind als Vertreter der deutschen Industrie im European Quantum Community Network aktiv. Wie steht es um die Quantentechnologie im internationalen Vergleich? Wo steht Europa? Wo steht Deutschland?

Das hängt sehr stark von der Quantentechnologie ab. Wenn wir einen Blick ins Gebiet des Quantencomputings machen, muss ich leider feststellen, dass die USA, aber auch China, Europa gerade davonlaufen. Unsere Akademia ist zwar in vielen Bereichen sehr gut aufgestellt, aber bei der industriellen Umsetzung hinken wir momentan hinterher. Ein Grund dafür ist, dass wir keine oder wenige so kapitalstarke IT-Unternehmen wie in den USA haben. US-amerikanische Startups können sich aber auch einfacher und erfolgreicher mit Kapital versorgen als deren europäische Pendanten.

Der Mischkonzern Honeywell feierte Anfang 2020 einen Durchbruch beim Quantencomputing. Man spricht selbst vom weltbesten Quantencomputer, weil er doppelt so viele Quantenvolumen als andere Computer dieser Art habe. Doch das Selbstlob ist durchaus umstritten. Wie bewerten Sie die Invention?

Honeywell ist ein erfolgreicher Entwickler von Quantencomputer. Dass deren Quantencomputer der weltbeste sein soll, liegt aber eher an den Unzulänglichkeiten des Leistungsmerkmals „Quantum Volume“ als an den Fähigkeiten des Honeywell-Systems.

Wie sieht die Implementierung von Quantentechnologie bei Bosch aus? Können Sie angewandte Beispiele nennen und erläutern?

Ein Beispiel sind Farbzentren in Diamanten. Reiner Diamant besteht lediglich aus Kohlenstoff-Atomen. In der Regel hat man aber eine minimale Verunreinigung mit Stickstoff-Atomen, die dem Diamanten eine schwache rote Färbung geben. Die Farbzentren verhalten sich ähnlich wie Qubits, allerdings mit Energien, die von der Stärke des anliegenden Magnetfeldes abhängen. Eine Energiemessung ergibt dann direkt die Feldstärke. Solche Magnetfeldsensoren entwickeln wir.

Was ist der Unterschied zwischen „Quanten“ und „Qubits“?

Das Wort „Quant“ lässt sich nur schwer definieren. Ursprünglich wurde damit gemeint, dass die Energie eines Quantensystems unter Umständen nur diskrete „quantisierte“ Werte annehmen kann. So ist das z. B. beim Elektron eines Wasserstoff-Atoms. Und wenn es Energie abgibt, kann es das nur in „Energiequanten“ einer bestimmten Größe tun. Daher rühren die Fraunhofer-Linien in Lichtspektren. Die Energie eines Feldes (wie z. B. einer Mode des elektromagnetischen Feldes) ist ebenfalls quantisiert, und hier beschreibt man das durch Photonen. Die Energie des Feldes ist dann proportional zur Anzahl der vorhandenen Photonen, welche wiederum eine nichtnegative ganze Zahl ist. Hier nennt man die Photonen „Quanten“.

Qubits hingegen sind Quantensysteme, die, grob gesagt, genau zwei verschiedene Zustände annehmen können. Ein Spin (den man sich als kleinen Elementarmagnet vorstellen kann) kann im magnetischen Feld zwei Zustände annehmen: entweder parallel oder antiparallel zum magnetischen Feld. Oben sagte ich „grob gesagt“, denn diese zwei Zustände können wiederum interferieren und dadurch entstehen neue Zustände. Qubits sind für Quantencomputer, was Bits für konventionelle Computer sind.

Wie werden Qubits hergestellt?

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, Qubits zu realisieren. Man kann dazu Elektronen in Atomen verwenden. Mit einem Laserpuls kann man den Elektronen Energie zuführen oder wegnehmen. Und um die Atome „festzuhalten“, kann man sie elektrisch aufladen (ionisieren) und dann mit einem elektromagnetischen Feld im Vakuum „fixieren“. Eine Alternative sind supraleitende Kontakte. Hier handelt es sich um zwei Metallkontakte, beispielsweise aus Aluminium, die supraleitend (also u. a. ideal stromleitend) und durch eine sehr dünne isolierende Schicht voneinander getrennt sind. In diesen Systemen, die bis knapp vor den absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt werden, existieren dann auch zwei klar getrennte Energiezustände. Zur Manipulation dieser verwendet man Mikrowellen. Die ionisierten Atome und die supraleitenden Kontakte sind im Moment die für Quantencomputing reifsten Technologien. Es gibt aber etliche weitere vielversprechende Alternativen.

Was würden Sie einem Kleinunternehmen heute raten: Wie schafft es am besten den Sprung in die digitale Zukunft?

Die Unternehmen sollten zunächst herausfinden, inwieweit Quantencomputing ihr Geschäft beeinflussen wird. In der Regel werden Unternehmen die notwendige Kompetenz nicht „an Bord“ haben. Aber es gibt Dienstleister, die die Untersuchung übernehmen können.

Welche Rolle spielt der Zufall in der Quantentechnologie?

Wenn man ein Qubit in den Zustand Null initialisiert, dann „um 90° dreht“ und danach misst, erhält man idealen Zufall: mit jeweils 50% Wahrscheinlichkeit resultiert eine Null oder eine Eins. Um die Wahrscheinlichkeit selbst zu bestimmen, muss man den Versuch aber sehr oft wiederholen und die Anzahl der resultierenden Nullen und Einsen messen. Wenn man mit dem

Quantencomputer eine Berechnung macht, will man aber ein möglichst deterministisches (also nicht zufälliges) Ergebnis, denn sonst muss man die Berechnung ja sehr oft wiederholen. Die Konstruktion von Algorithmen, die ein deterministisches Ergebnis liefern, ist aber eine sehr große Herausforderung.

Die Nutzung von Quantencomputern wirft auch ethische Fragen auf. Zum Beispiel benötigen Quantencomputer viel Strom. Außerdem ist bei der enormen Macht, die Quantencomputer generieren, die Gefahr eines Missbrauchs groß. Wie stehen Sie persönlich zu diesem Thema?

Wie stark ein Quantencomputer unsere Stromrechnung belastet, hängt von dessen Realisierung ab. Es gibt kein Gesetz, das besagt, dass ein Quantencomputer mehr Energie „verbrät“ als ein konventioneller Computer. Ganz im Gegenteil könnte ein geschickt implementierter Quantencomputer diesbezüglich günstiger sein.

Interview: Hannes Mittermaier

Dr. Thomas Strohm

Dr. Thomas Strohm hat 1999 am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart mit einer theoretischen Arbeit zu inelastischer Lichtstreuung an Hochtemperatursupraleitern promoviert. Danach ging er direkt in die Bosch-Forschung, wo er zunächst für mehr als 10 Jahre auf dem Gebiet des



Software-Engineering forschte und als System- und Software-Architekt arbeitete. Im Jahr 2013 begann er, Quantenkryptographie und später Quantencomputing zu scoupen. Momentan koordiniert Thomas die Quantentechnologie-Aktivitäten bei Bosch. Er ist außerdem das zweite deutsche Mitglied des europäischen Quantum Community Network (QCN) und Mitarbeiter des Flagship Coordination Office (FCO). Thomas Strohm ist sehr aktiv bei der Gründung des European Quantum Industry Consortium (QuIC) und Projektmitarbeiter im europäischen QRANGE-Projekt, wo er Beiträge zur quantentheoretischen Modellierung von Zufallszahlengeneratoren leistet.

Fotos: privat/Bosch

Quantum Incubation Journey: Theory Founded Use Case and Technology Selection

Sebastian Senge, Tim Leonhardt, Kinan Halabi

Accenture GmbH

Quantum Use Case Identification

With quantum computers (QC) on the rise to be the next powerful calculation accelerator, a new era to utilize and solve complex challenges is dawning. Learning from the past, where most companies began their way into the AI world way too late, it is time to start the journey into the quantum computing realm and the best way is learning by doing. Hence, one may refer the selection and evaluation process of a quantum computing use case longlist as a key milestone and the first ingredient to be the active force to shape it.

Employees represent an invaluable treasure of implicit and explicit knowledge of the inner workings and values of a company. Mining already existing ideas is in most cases a suitable and recommended approach to find the first set of use cases to further assess in a fail-fast approach. This approach might be even enhanced when it comes to identifying QC use cases, yielding only those use cases that are hidden in the sweet spot for a successful quantum computational implementation.

Quantum computing is still a new, very fast developing field. There are no widely accepted standards and the lack of experience when it comes to implementation is still a hurdle to take. This makes the selection process for pilot candidates very cumbersome. After business stakeholders, IT and quantum computing experts have compiled a longlist of use cases (incl. impact and currently limiting computing resources) to be evaluated, the very start for each identified use case is to formulate the problem statement and transform them into mathematical models. This article then

proposes an approach to assess and select use cases with high feasibility based on computational complexity theory and technology limitations and prospects aware implementations. This approach relies on the application of a sequence of three sieves to peel away scenarios and use cases that would lead to a huge invest in resource and time without any promising outcome. Thus, leaving only the very core of the longlist which may yield substantial benefits through usage of quantum computers. Those three steps (depicted in Figure 1) consist of checking whether the model used to describe the use case can be solved efficiently on a QC, then checking available QC algorithms, always assessing if there are classical solutions that might be faster and finally making use of a checklist to avoid pitfalls and showstoppers when it comes to tool selection and implementation.

After applying all three sieves the initial set of use cases might have diminished heavily, as well as the risk of failure, before starting the phase of implementation and thus reflect an essence needed for a successful QC journey.

Model Computational Problem

Based on the informal descriptions of potential use cases from the previous ideation activities, the goal of this step is to precisely, in the sense of mathematical rigor, model and formulate the problem statement either in a mathematical notation (e.g. as common for mathematical programming or algebraic specification), specification languages (e.g. AMPL [Fourer 2003]) or for more complex situations

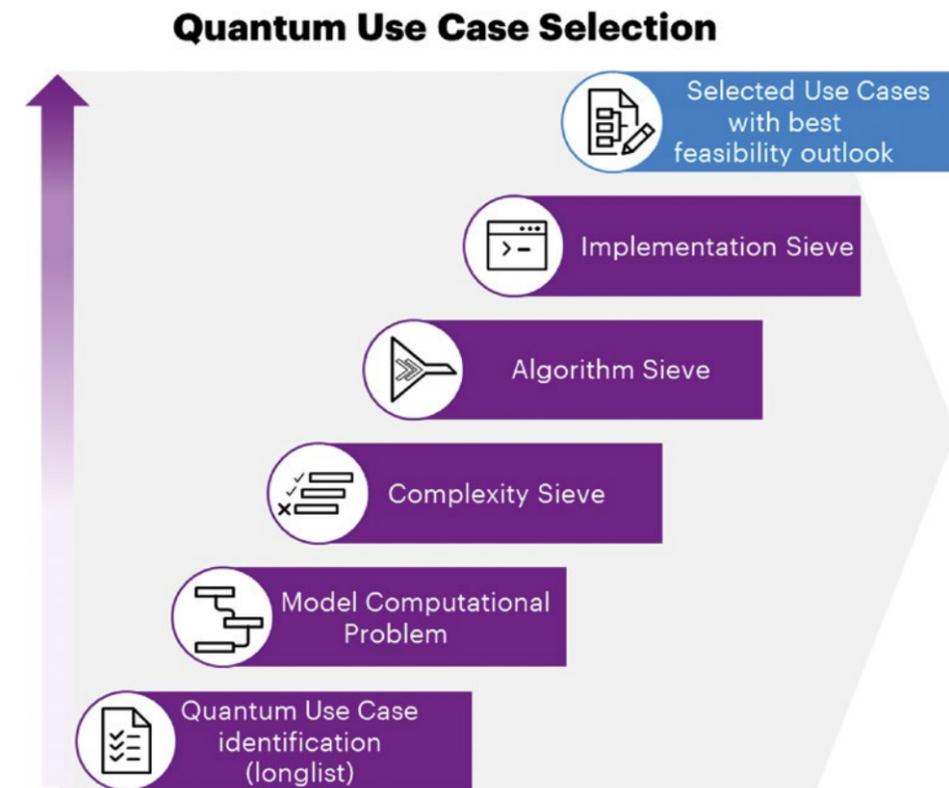


Figure 1: Quantum Use Case Identification Process

(esp. if (meta)heuristics are applied) to write evaluation functions for feasible/ optimal solutions in any general-purpose programming language. All these approaches add benefit over a pure informal use case description. Most importantly, precise modeling of input and output variables, the domain, co-domain and range of the problem as well as the definition of feasible (or optimal) solutions is mandatory for the subsequent steps. The model choice is a challenging task of describing a process or system sufficiently and efficiently, but out of scope of this QC specific approach. As will be detailed below, even minor changes in the problem's description can change its characteristic properties, might even make it computationally intractable and thus render it infeasible as a quantum computing proof-of-concept (PoC) candidate.

The next section introduces concepts to formalize and analyze these kinds of (in)tractability.

The Complexity Sieve

Assume for a given problem a classical computer (CC) and QC would yield similar results in terms of required clock runtime. Should the associated use case then be implemented on a CC or QC? Naturally, a CC implementation is preferable, simply as software libraries and environments, the entire development process and especially the hardware is much more mature. This step's objective (as well as those of the following) is to sieve out computational problems, and hence use cases, that potentially could be better solved by a CC.

Complexity Theory: Limitations & Opportunities of Computability

Over the last decades, computers became a ubiquitous tool to support human analysts and decision-makers in virtually all optimization and learning tasks. More precisely, software algorithms leverage the enormous and continuously increasing computing power of modern hardware – from Zuse's Z3, a single 8-core laptop, over supercomputers and distributed computing nodes to the new kid on the block: quantum computers (QC). But can computers solve any problem?

This question emerged already in the early days of computing in the 1930s. It all started with the seemingly simple challenge to define what a computing problem is and consequently which of these problems a computer can solve. The result of this thought process, called the Church-Turing thesis, is the assumption - not provable but commonly accepted in the sense of an axiom - that in layman's terms every (practical) computer irrespective of the type or architecture can solve exactly the same set of problems, namely the same problems that a human being can solve with pen & paper. Put differently, computers, including QCs, are in general not better (or worse) in problem-solving than humans, but of course extraordinarily faster. The obvious follow-up question is which computing problems a human (and hence a computer) can solve, which not and if there are categories of problems that are more difficult, or even intractable, to solve than others. The short answer is yes, there are multiple categories, called (computational) complexity classes, that exhibit

different levels of difficulty, or (computational) complexity. Complexity classes exist for multiple kinds of computational resources, e.g. computation time, memory space and messages exchanged between communicating network nodes. This article is restricted to the predominantly limiting resource, time.

The legitimate question may arise why this step is required at all? Isn't it more straightforward to directly jump into the solution part? No question, this shortcut would be possible. However, then you will miss important information and hints on where to look for a solution, and what kind of benefit you could expect from a quantum algorithm. What could be more frustrating than realizing after investing a significant amount of resources that for this particular task a well-known classical algorithm solves the problem similarly well or that a quantum computer is even not much of a help per se? So, let's start the adventurous journey into what Computer Scientists and Mathematicians call computational complexity theory.

Back to the initial question: can computers solve every problem? Astonishingly, the most complex problems are not solvable at all – neither by a human, nor any kind of computer, it is a general limitation of computability. The best-known representative is the famous Halting Problem [Arora 2007], i.e. the binary question: will a given computer program ever terminate? There is no (nor will there be) a general way to decide this seemingly simple question for general formal languages (any typical programming language falls into this category), hence this question is undecidable. Practical consequence: compilers will never have a built-in feature that will notify the user without fail that the project's source code contains parts that might run in an infinite loop. So, as a first result: if the considered problem is not decidable, it is not worth looking any further. No computer, not even a QC, will help you. Fortunately, such problems do not occur too frequently in practice.

The insights complexity theory could contribute do not stop here. The excursion box 1 introduces additional basic concepts of classical complexity theory, the excursion box 2 extends this to the quantum world.

Applying the Sieve

Usually, a problem is not entirely new and thus already well evaluated in the literature (in the rare exceptions a thorough problem analysis is required which is beyond scope). Consequently, literature research using the formal problem specification derived in the previous activity, typically easily reveals the computational complexity as well as the pertinent algorithms. The following distinction is practically relevant (cf. the excursion boxes on complexity theory for an explanation of the relevant terms):

1. Classically Tractable Problems [P, BPP (and FP,PO)]:

The problem is efficiently solvable by CCs and QCs (as $P \subseteq BPP \subseteq BQP$). Whether a quantum algorithm is still beneficial depends on the specific speed-up. For instance, the shortest path problem [Cormen 2001] is in P and efficiently solvable in theory and practice, a quantum implementation may not bring tangible improvements (esp. as no performant quantum algorithm is known for this problem). In contrast, the problem solved by the Grover algorithm, searching in an unsorted database with n elements (or

more precisely a special version of function inversion) is also in P, classically with a linear time complexity with n steps in the worst case, can be solved in \sqrt{n} steps. Depending on the specifics of the problem at hand, this might be a relevant speed-up if the use case hits limits on a CC.

If the related use case is not limited by actual resource constraints on CCs such a problem is not a (high priority) quantum PoC use case candidate.

2. Potentially Classically Intractable Problems [from NP (and FNO,NPO)]:

Since the class NP is not (entirely) in BQP (analogously for related classes and problem sets) multiple subsets need to be evaluated individually.

- **NP-intermediate** (and FNO-/NPO-intermediate): The problem is not efficiently solvable by a CC, however some successful quantum algorithms for this set exist. One of the most prominent precedent cases for quantum computing falls in this category: Integer/ Prime Factorization by Shor's algorithm [Arora 2007].

A prime PoC candidate.

- **NPC, NP-hard**: The problem is not efficiently solvable by a CC. Unfortunately, these classes are conjectured to also not be in BQP, hence, the problem can likely (if $P \neq NP$) not be solved by a QC in an exact and efficient way. Consequently, there cannot be an efficient quantum algorithm, however, a special kind of algorithms called metaheuristics can be used by CCs and QCs to possibly find imperfect solutions. Note that if the problem is not in one of the next classes at the same time, approximations could get basically arbitrarily bad (the clique problem [Cormen 2001] is such an example).

If approximated solutions are acceptable, it is a PoC candidate.

- **APX,PTAS**: The NPO problem is efficiently approximable by a CC but might exponentially depend on the specified maximum admissible error. An example for APX is the notoriously difficult (metrical) Traveling Salesman Problem (TSP [Cormen 2001]) and the m-dimensional Knapsack [Cormen 2001] problem has even a PTAS.

If approximated solutions are acceptable, it is a PoC candidate.

- **FPTAS**: The NPO problem is efficiently approximable on classical computers irrespective of the admissible error. Popular examples include the Bin Packing problem [Cormen 2001] and the 1-dimensional Knapsack problem (apparently another instance where changes in the problem formulation can lead to significant complexity changes).

Thus, the same considerations as for class P apply.

3. Intractable Problems [Undecidable]:

Could neither be solved by a classical nor by a quantum computer (cf. Halting Problem).

Trivially not a QC PoC candidate.

Applying this complexity sieve gives a first idea of the set of admissible use cases that could benefit from a quantum implementation.

Algorithm Sieve

The next step is to look up potential quantum algorithms in the literature based on the formal problem description. This activity could yield the following results:

1. **Perfect fit**: In the simplest case, a perfectly fitting quantum algorithm is already known and can be immediately applied to the problem. Compared to the virtually uncountable number of classical algorithms, the number of known quantum algorithms is significantly lower. Alas, chances are that a precisely fitting algorithm has not yet been discovered (or does not exist). A valuable resource for a quantum algorithm overview and finding potential candidate algorithms is [QAZ 2021].
2. **Transformation required**: As the number of discovered quantum algorithms is comparatively low, it is more likely that algorithms for related problem areas exist. It is therefore not uncommon that it is required to transform an input instance of the problem at hand into input instances of the related problem for which quantum algorithms exist and finally to transform back the output (the polynomial reductions applied in complexity theory could serve as an inspiration). Practically, in case efficient (esp. linear) transformations are available both problems can be considered equal and are just differently formulated.
3. **Approximation / Metaheuristic applicable**: In case no efficient exact algorithm is available and classical (meta)heuristics do not lead to the expected success, quantum approximation algorithms for specific problems or general metaheuristics for broader classes of (combinatorial) optimization/search problems might help. Examples of widely used quantum metaheuristics are Quantum Annealing (QA) [Kadowaki 1998] and Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) [Farhi 2014]. If such algorithms are applied, it is a priori compulsory to precisely define the admissible error and to understand the algorithm's potential solution guarantees in advance.
4. **No applicable algorithm found**: If no quantum algorithm exists or a transformation is too complicated, obviously, the use case is not a PoC candidate.

Assuming an efficient quantum algorithm has been identified, the subsequent step is to compare its computational complexity with classical counterparts revealed during literature research. Two aspects then play an important role:

1. **Runtime complexity**: For exact algorithms, the key metric is the (asymptotical) growth of the required computational steps as a function in the number of input units. In the algorithmic literature it is commonly provided in the Big O notation [Cormen 2001] that abstracts away large coefficient constants prolonging the runtime multiplicatively. Where these constant factors are predominant runtime determinants it is usually stated explicitly in the literature.
2. **Convergence complexity**: For approximation algorithms and (meta)heuristics, the key metric is the number of steps required to reach a certain level of approximation quality (also provided in Big O notation). Especially for metaheuristics, however, empirical analyses for are typically more insightful.

As QCs are conceptually not faster than CCs but draw all their strength from algorithmic speed-ups opportunities provided by the underlying quantum mechanical peculiarities, a quantum algorithm should be at least super-linearly, or even quadratically, better (in runtime or convergence) in order to be considered realistically superior. Otherwise the next generation of supercomputers or massively distributed computing nodes, might be able to provide solutions faster and cheaper.

Problems solvable by such superior quantum algorithms, also pass this second sieve successfully and flow into the third sieve that filters for hurdles of existing tooling for hardware and algorithms.

Implementation Sieve

The international race to exploit the abstract space of quantum mechanics ("Hilbert-space") drives rapid developments of the hardware and algorithms. In order to assess the use case's recent and perspective success probability the implementation feasibility sieve points out applied measures and pitfalls by reviewing common algorithm assumptions on hardware capabilities and limitations, as well as mitigation methods.

A general hardware-agnostic check regards the problem models structure: As one example quantum machine learning (QML) algorithms rely on sparsity (number of entries in a matrix) [Biamonte 2016] and thus exclude large fractions of instances. Further the sizable impact of instance structures on performance of QML has been shown by [Huang 2020].

The hardware-aware assessment depends on the choice of the model of quantum computer and its bridge technologies, which soften the entry barrier to post-quantum:

1. **von-Neumann Computers (CPU + Memory) or Accelerators/Co-Processors** – Developments in quantum technology also spark ideas in related fields. The development of algorithms, created to solve problems in similar ways as quantum algorithms sometimes called quantum inspired algorithms (e.g., recommendation systems [Tang 2018], optimization [Zhu 2016]) also drive developments in creating application specific hardware. Although these types of algorithms run on classical CPU or accelerators like graphic cards (GPU) used in production today, even faster field programmable gate arrays (FPGA) and application specific integrated circuits (ASIC), or quantum-inspired digital technology has been developed, that can perform parallel, real-time optimization calculations with improvements in the percent range [Castellanos 2020] compared to the companies best practice. The success of this technology will rely on scaling faster, than competitors as the small performance advantages typically vanish with the next revision cycle.
2. **Quantum annealers** – can be employed for optimization or simulation tasks and offer to represent problems with dozens of binary variables already today, using quantum effects to discover better solutions within the very-short lifetime of these effects (ca. one-millionth of a second) with debated practical potential as it is a heuristic approach with reduced generality. These machines offer a learning and development platform for small scale (dozens of variables) problems and PoC today.

- Gate quantum computers** – use the full theoretical potential of quantum effects and enable 1000x longer calculation times at the cost of reduced number of qubits (50-100) to represent variables. These machines were the first proving advantage for the previously mentioned highly specialized problems related to quantum physics questions (solving these problems in minutes compared to thousands of years), small scale optimization [Arute 2019], chemistry [Nam 2019]. The latter team announced they aim for quantum advantage – a drastic speed-up on a practical problem - within the next year.
- Error-corrected (digital) quantum computers** – use the full potential (e.g., decrypting types of secret messages within a day compared to millions of years for a CC) by algorithms to detect in the NISQ devices and correct them during calculation. Recent research gets closer, to realizing a long-lived (towards seconds) qubit called “logical qubit” of which a few thousands would be enough according to recent research results on hardware limitation aware runtime complexity to simulate previously intractable improved pricing for derivatives [Chakrabarti 2020] or cryptanalysis based on prime factorization [BSI 2018].
- Analogue quantum computers/ quantum simulators** leverage the continuous control of for example ultracold atoms in optical traps and are used in fundamental research to simulate complex electronic structures for material science.
- Unitary Transformation** – exact algorithms (Grover) with quadratic speed-ups are likely to be overthrown by the error-correction overhead for the near future [Babbush 2020]. Additionally, “native gate sets” - additional instruction sets available for a QC that resemble problem or hardware native operations (e.g., the exchange of electrons in a molecule) impact the algorithm complexity.
- Measurement** – determining the output of a quantum calculation resets the complex quantum state to a classical state. All quantum algorithm concepts take this behavior into account, but hybrid algorithms involving iterations of a loop of quantum circuits, measurements and updates to the circuits by classical computers can be limited by the amount of iterations given by the number of measurements. Algorithms that leverage recent approaches can reduce the number of measurements by 90% [Verteletskyi 2020], [Sweke 2020] increase the implementation feasibility on today’s hardware.
- Postprocessing** – for variational methods’ the duration of the iterative loop of evaluating the quantum circuit result and then updating the hyperparameters to configure the next circuit is critical. Thus, choosing an approach that compiles new circuits at low latency with gradient-based or gradient-free approaches, as well as a hardware running the optimization-loop fast in direct proximity to the quantum chip at low latency is critical for edge use-case candidates’ speed-up.

Depending on the scope of the use case we advise to decide on these core hardware platforms intermediate implementations that meets the requirements. Keep in mind that today’s noisy intermediate scale quantum computers (NISQ) (types 2-5) use different physical systems to represent the qubits with impact on main performance indicators like maximum number of qubits, number of gates executed before errors dominate the process and interconnections as well as the universality of operations (e.g., quantum annealers are limited in generality regarding the simulation of quantum systems). The following exemplary list extends features to check to filter infeasible use case, with further “hardware-efficient” approaches listed in [Bharti 2021]:

- Preprocessing** - The solution of problem instances on quantum computers relies on mapping binary variables on qubits and dependencies on interactions between them, thus the topology of the problem needs to be embedded on that of the QC. These embeddings are generally NP-hard it is important to identify problem structure classes that respect the widely varying connectivity graphs of different QC implementations (e.g., superconducting, ion-trap or photonic QCs) or check leading heuristics performance.
- State Preparation** – the efficient preparation of an initial state can be a bottleneck of the algorithm as a QC always starts in the all-0-state. Domain specific efficient representations or machine learning methods black box to optimize the state initialization have been developed for some cases. Additionally, a family of algorithms assumes a quantum computer module called “QRAM” - a long-lived quantum random access memory - that is not expected by the scientific community anytime soon and is a prerequisite of e.g., QML algorithms like HHL. Applications relying on these algorithms are not feasible in the near future.

Additionally, methods of „error mitigation” reduce the errors produced during the algorithm steps can reduce complexity. For approximative algorithms, it is important to review if the use case critical algorithm can represent a rich class of quantum states and thus possible solutions (expressibility), if these states can be created at algorithm runtime (reachability) and if the initial solution quality can be improved (trainability). Checking for recent results regarding the algorithm can exclude use cases that require short implementation time scales and build the basis of the following step of technical solution design, which is out of scope of this article.

Summary

For many companies, the first steps on their own quantum computing journey have yet to be taken.

It is recommended to define an outcome (e.g., showcase, training platform, proof-of-concept, prototype) specific requirements analysis and solution blueprint (e.g., framework choice, coding guidelines, cloud architecture, tooling support incl. CI/CD pipeline) for future reference alongside the implementation based on the experiences. The complexity theory-backed method described in this article may help to select and assess use cases to allocate budget in a reasonable way. Even though a huge part of initial ideas might drop in the process and only a handful remain to be viable, there is no doubt that QC will play a key role within the future IT architectures. Moreover, as first mover advantage one may shape industry standards for quantum computing and directs design or research on new algorithms into the directions of one’s own needs.

EXCURSE BOX 1

Classical Complexity Theory

In a complexity theoretical context, it is necessary to discriminate several variants of computational problems:

- Decision problem:** A problem that can be answered by yes or no. The aforementioned Halting Problem is exactly such a decision problem. Another example is the question: “Does a path between these two cities exist with at most x cost units?”
- Function problem:** An extension of the decision problem in the sense that a single output per input is generated but where the output can be more complex than just yes/no. For instance, for the question “What is a path between these two cities with at most x cost units?” a path (sequence of graph edges) is requested.
- Optimization problem:** A problem which has potentially multiple feasible answers, each associated with a cost value, where the answer with the best cost (minimum or maximum, depending on the use case) is the searched optimal value. An example: “What is the cost of the shortest path between these two cities?”
- Search problem:** A variant of the optimization problem asking for the actual solution that leads to the optimal cost value, e.g. the path with the minimal cost. By clever encoding, the search problem can be solved using the optimization variant for many problems and, thus, for the scope of this discussion, the first can be treated as a special case of the latter and will be neglected in the following description.

Complexity theory [Arora 2007] mostly focuses on the decision versions as a binary answer simplifies theory and already allows for providing (lower) bounds also for the other variants. A simplified overview of the relevant classes of the complexity landscape can be found in Figure 2.

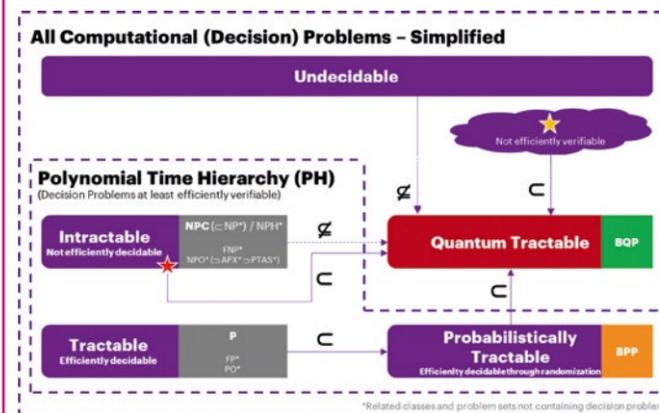


Figure 2: Simplified overview of complexity landscape

Many, if not most, of the problems that one encounters in the wild belong to a complexity class that is part of the so-called Polynomial Time Hierarchy (PH). It encompasses decision problems for which a given solution could be verified to be valid (a yes (no) instance yields a yes (no)) such that the number of computational steps of the verification process is polynomially bounded in the size of the input (e.g. the edges and nodes in a graph for a shortest path problem). The complexity theory is inclined to consider such polynomial upper bounds in n inputs, i.e. all functions that do not grow faster than n^c for any constant c , typically noted as $O(n^c)$ in the so-called Big O notation [Cormen 2001], as efficient (cf. Cobham’s thesis [Cobham 1970]). This is based on the underlying notion that such computa-

tions are typically still tractable on practical hardware in the sense of acceptable (clock) runtime. In contrast to super-polynomial, esp. exponential, growth, that could quickly lead to computations taking millions of years for even moderate input sizes using any foreseeable computer technology. Using this terminology, all problems in PH are efficiently verifiable as it is guaranteed that at least one polynomial verification algorithm exists. Unfortunately, an efficient verification, however, does not necessarily imply that deriving a solution is efficiently calculatable (and hence might require a super-polynomial time algorithm, e.g. with exponential growth). Moreover, it is also true that Cobham’s thesis is just a rule of thumb, but a practically good one. There are examples of algorithms that are efficient by this definition but their runtime is dependent on large coefficients or the number of required inputs is so large that cubic ($c=3$) or even quadratic ($c=2$) polynomial degrees could already lead to computations taking too long for some real-world use cases. However, often, the runtime’s growth dependency on the input size is a good estimate so that the knowledge of the inherently minimal possible complexity of a problem as well as the runtime guarantees of the candidate algorithms are invaluable.

The simplest class in PH depicted in the diagram is called P (for Polynomial Time). As the name implies, it contains all decision problems for which efficient decidability has been proved. Consequently, these decision problems are typically easily decidable in the sense that the computational requirements are comparatively low even for large input sizes. In other words, a CC can usually quickly decide if the input is a yes instance. But does this help us in the assessment of the considered problem, which is usually rather an optimization problem than a decision problem? The answer is clearly positive:

- A decision version is always a lower bound** in terms of time complexity for the related function and optimization version. In other words: finding an optimal or even any solution cannot be simpler than the decision variant.
- In many cases, the function, optimization and search problem is efficiently solvable if the decision problem is efficiently decidable** (if the decision problem can be used as an oracle function at most polynomial times to solve the function or optimization problem).

The shortest path problem might serve as an example: the decision problem is in P and indeed the function, optimization and search problem, i.e. getting actually the shortest path and the associated cost, can be solved in polynomial time (in the number of cities) as well (e.g. by application of the Dijkstra algorithm [Cormen 2001]). Consequently, these problem variants are part of other polynomial classes, namely FP (Function Polynomial) and PO (Polynomial Optimization) for the function and optimization problem, respectively.

Naturally, not all problems in the world can be easily solved. In complexity theory, many different levels of difficulty are known. To understand this better, let’s first review the underlying concepts of computational models. Theoretical computer science in general and complexity theory in particular requires a formal computing model to abstract away all the constantly changing details of actual hardware. Alan Turing, the famous English code breaker and mathematician, introduced such a theoretical model, now named Turing Machine in honor of him, in the late 1930s. It is a very minimal, but due to its infinite memory, purely fictional abstract machine that, despite its simplicity, is still equivalent to (all) real computers in terms of accomplishable tasks in the sense of the Church-Turing

thesis described above. This model always starts in a single state, then executes a single action and subsequently transitions into a resulting new single state and repeats this process until a stop criterion is reached. As the sequence of steps (state 0 \rightarrow action 0 \rightarrow state 1 \rightarrow ...) forms a computational path that is always the same for a given initial state, the model is more precisely known as Deterministic Turing Machine (DTM). DTMs constitute the class P, i.e. they can efficiently decide exactly those problems in P.

Now imagine an at first glance much more powerful extension. Instead of a single state-action-state transition, the model branches in all possible subsequent states concurrently by executing every action possible at once, hence forming a computational tree. Such a, obviously purely theoretical, model is known as Non-deterministic Turing Machine (NTM). It is the missing link between efficiently and non-efficiently decidable problems. An NTM constitutes the class NP (Non-deterministic Polynomial) which is the set of decision problems polynomially decidable by an NTM. As a DTM is a special case of an NTM, the class NP is trivially a superset of P. But is this also true the other way around?

This is the most famous open question in computer science and an introductory description of complexity theory is of course not complete without a reference to it: does P equal NP (P=NP)? It might come as a surprise, but the seemingly magical NTM is not more powerful than a plain DTM regarding the set of computable tasks. If a problem is computable by an NTM it can also be computed by a DTM. It is conjectured, but not yet proven, however, that this is not possible in a polynomial number of steps. Effectively, this means that likely problems in NP exist that are efficiently decidable by an NTM but not by a DTM, hence $P \neq NP$. The practical relevance attached to it is that CCs, which basically resemble DTMs with finite memory, are therefore (likely) not capable of efficiently deciding all problems in NP.

The most interesting subset of NP, which only contains decision problems that a DTM could decide in super-polynomial time (i.e. inefficiently), is called NPC (NP Complete). Informally, these problems are also known as the most difficult problems in NP. All decision problems in NPC have the fascinating characteristic that they are complete for the entire class NP, in the sense that an algorithm A that decides such an NP-complete problem can also be used to decide all other problems in NP as well. The trick is to turn the input instances into input instances of algorithm A using a polynomial-time transformation and to revert the output. This technique is called (polynomial) reduction: all problems in NP are reducible to any NP-complete problem. Closely related to NPC are problems that are at least as hard as any NPC problem, but not necessarily are in NP. These problems are called NP-hard and are not restricted to decision problems (e.g. the famous optimization problem Traveling Salesman Problem (TSP) is NP-hard).

The concept of reductions also leads to a strong argument in favor of $P \neq NP$: Once just a single efficient algorithm would have been found for a NP-complete or NP-hard problem, all problems in NP would be decidable in polynomial time. As this has not yet happened in the last decades, many complexity theorists consider it as mounting evidence that there is none.

In summary, NP contains efficiently (subset P) and (likely) non-efficiently (subset NPC and others) decidable problems by a classical computer. Hence, not all problems are solvable quickly but, as NP is in PH, candidate solutions for all decision problems in NP are at least efficiently verifiable.

Analogously to FP and PO, the class FNP (Function NP) and NPO (NP Optimization) are defined for function and optimization problems, respectively.

So far, we have only discussed algorithms that solve problems always exactly, or deterministically. Two alternatives exist:

1. **Probabilistic algorithms:** The computing models analyzed so far are entirely predictable: a DTM and NTM cannot roll a dice and thus gives seemingly away a lot of algorithmic potential. The classical example of a complexity class taking randomness into account is BPP (Bounded-Error Probabilistic Polynomial), intuitively the set of problems efficiently decidable by probabilistic algorithms. The obvious downside of such randomization is that they might not always generate correct answers. However, as long as they are correct in at least half of the cases, multiple executions of the algorithm lead to (almost arbitrarily) higher confidence, a technique called probability amplification. As DTM algorithms always generate the same output, P is trivially a subset of BPP. Astonishingly enough, although randomized algorithms have more degrees of freedom, it is conjectured that it might not lead to a larger set of efficiently decidable problems ($P=BPP?$). It is worth noting that randomization is not the same concept as the non-determinism of an NTM: the action of a probabilistic algorithm might be based on a coin flip but it still transitions into a single next state, not concurrently into multiple states. Probabilistic extensions of NP tough exist (e.g. so-called Merlin-Arthur games, class MA) but are beyond the scope of this article.

2. **Approximation algorithms:** Another alternative approach is to accept inferior solutions to optimization and search problems. In the infamously complex Traveling Salesman Problem (TSP) the objective is to find a minimal cost loop (starting and ending in the same city) that visits all cities. It is an example of an NP-hard problem, an exact solution cannot be computed efficiently on any computer. But is an optimal solution in all cases required? As long as the error is small enough, it might be an acceptable trade-off to calculate a path that is slightly longer but to get the result quickly (compared to waiting thousands of years just to save a few minutes en route). Turns out that several kinds of approximability exist. The most general one in NPO is called APX (Approximable): it is the set of NPO problems for which polynomial-time approximations algorithms exist such that the error is multiplicatively bounded by a constant c , i.e. the worst value is less than $c \cdot v^*$, for v^* being the optimal value. In simple terms, an efficient approximation algorithm exists and the (relative) error is bounded (and hence does not depend on the size of the input) but c may get arbitrarily large. A better guarantee can be provided for optimization problems that have a PTAS (Polynomial Time Approximation Scheme). For these problems, algorithms exist which can calculate arbitrarily good approximations polynomial in the input size but could be super-polynomial in the admissible (but fixed) error ϵ . PTAS usually depend exponentially on $1/\epsilon$ and hence might take exponentially longer if a smaller error is chosen. The strongest guarantee is found in problems that have an FPTAS (Fully PTAS), where the algorithm also needs to be polynomial in ϵ , and hence can efficiently approximate the problem for any given error.

To cut the long story of classical complexity short, problems can be categorized into classes that characterize their general solvability: exact and efficiently (P; FP; PO), exact and inefficiently (NPC, NPH, FNP; NPO), probabilistically exact and efficient (BPP), efficiently approximable (APX, PTAS, FPTAS), and finally, not solvable at all.

EXCURSE BOX 2

Quantum Complexity Theory

Governed by the astounding laws of quantum mechanics, QCs have access to an armory of computational methods and tricks a classical computer will never have. Consequently, two crucial questions are naturally imposed:

1. Can QCs solve different problems than a classical computer altogether?
2. Which problems can efficiently be solved by a QC but not by a CC?

Regarding the first question, it is clear that QCs cannot decide undecidable problems and indeed, the overall answer is negative too: the set of solvable problems does not change by substituting the underlying model of computation (cf. Church-Turing thesis above).

Regarding the second question, alas, QCs cannot algorithmically speed up arbitrary problems in general. Assuming $P \neq NP$, if just one efficient quantum algorithm for an NP-complete or NP-hard would be known, all of these problems would be efficiently QC solvable (by polynomial reduction). As such an algorithm has not been yet discovered, experts are inclined to believe that NP is not a subset of the class Bounded-error Quantum Polynomial (BQP), the decision problems efficiently decidable by a QC. But does not the quantum peculiarity of superpositions resemble an NTM's concurrency? Yes, however, through measuring the system collapses into a classical state, thus, eradicating the superpositional information. So, NTMs do not equal QTMs, hence NP is not in BQP. NTMs can efficiently solve problems that QTMs cannot

References: [Arora 2007] Arora, S., & Barak, B. (2007). Computational Complexity: A Modern Approach. Complexity. [Arute 2019] Arute, F. et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 574(7779), 505–510. [Arute 1 2019] Arute et al. (2020). Quantum Approximate Optimization of Non-Planar Graph Problems on a Planar Superconducting Processor. [Babbush 2020] Babbush, R. et al. Focus beyond quadratic speedups for error-corrected quantum advantage. arXiv (2020). [Biamonte 2016] Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N., & Lloyd, S. (2016). Quantum Machine Learning. [BSI 2018] Office for Information Security, F. Status of quantum computer development (2018). [Castellanos 2020] https://www.wsj.com/articles/microsofts-quantum-computing-services-attract-new-customers-1158990401 [Chakrabarti 2020] Chakrabarti, S. et al. (2020). A Threshold for Quantum Advantage in Derivative Pricing. [Cormen 2001] Cormen, T. H., Leiserson, C. E., & Rivest, R. L. (2001). Introduction to Algorithms, Second Edition. In Computer [Fourer 2003] Fourer, Robert, David M. Gay, and Brian W. Kernighan. AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming. 2nd ed. Pacific Grove, CA, 2003. [Huang 2020] Huang, H.-Y. et al. Power of data in quantum machine learning. (2020). [Leymann 2019] Leymann, F. Towards a Pattern Language for Quantum Algorithms. (2019). [Leymann 2020] Leymann, F., & Barzen, J. The Bitter Truth About Quantum Algorithms in the NISQ Era. Quantum Science and Technology. (2020) [Nam 2019] Nam, Y et al. (2019). A Ground-state energy estimation of the water molecule on a trapped ion quantum computer. [Tang 2018] Tang, E. A quantum-inspired classical algorithm for recommendation systems. (2018) [Zhu 2016] Zhu, Z. et al. borealis - A generalized global update algorithm for Boolean optimization problems. (2016) [Cobham 1970] Cobham, A. (1970). The intrinsic computational difficulty of functions. Journal of Symbolic Logic, 34(4). [Fourer 2002] Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. W. (2002). AMPL: A Mathematical Programming Language. [Kadowaki 1998] Kadowaki, T., & Nishimori, H. (1998). Quantum annealing in the transverse Ising model. Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics. [Farhi 2014] Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A Quantum Approximate Optimization Algorithm. [Raz 2019] Raz, R., & Tal, A. (2019). Oracle separation of BQP and PH. Proceedings of the Annual ACM Symposium on Theory of Computing. [QAZ 2021] Quantum Algorithm Zoo. Retrieved January 23, 2021, from https://quantumalgorithmzoo.org [Sweke 2020] Conway, J., & Kochen, S. (2010). Thou Shalt Not Clone One Bit! Foundations of Physics, 40(4), 430–433 [Bharti 2021] Bharti, K. et al. (2021). Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms

and further research indicates that this also holds vice versa [Raz 2019]. Esp. this last result might open an entirely new realm of QC applications in the future. From a practical perspective, there is light at the end of the tunnel; two sets of candidate problems exist for which QCs can be practically beneficial:

1. **Efficiently solvable problems (in BPP):** For some of these problems, although polynomial solvable on CCs, Quantum algorithms with a (super-polynomial) speed-up are known (the most famous example being Grover's algorithm for search in unsorted databases with a quadratic improvement).
2. **Problems in BQP but not in BPP:** This is the holy grail of Quantum Computing, problems that are CC intractable but QC polynomially decidable (the most famous example being Shor's integer factorization algorithm). The most likely contenders are problems related to NP-intermediate (in NP but not in P and not NP-complete) decision problems and recently discovered potential candidates outside of the Polynomial Hierarchy, i.e. those problems that are not even efficiently verifiable on classical computers [Arora 2007]. Especially the latter, although no practical use case is yet affected, could lead to a breakthrough where QCs could easily outperform any CC in the future.

Contrary to some public opinion, QCs are not the computational Messiah rescuing us from all earthly resource limitations imposed by classical computer architectures and mathematical necessities. However, they can be a strong ally for particular problem classes.

Dr. Sebastian Senge

Dr. Sebastian Senge holds a PhD in Computer Science/AI. He is interested in Deep (Reinforcement) Learning, Distributed Algorithms and Quantum Computing. As a manager at Accenture he is responsible for large Cloud-related technology & consulting projects as well as Natural Language Processing topics.



Tim Leonhardt

Tim Leonhardt is responsible for quantum computing projects across industries and gained 5 years of experience in silicon quantum computing research, and consulted a German parcel company on network planning. He holds a double M.Sc. in physics, and economics, business and management from RWTH Aachen



Kinan Halabi

Kinan Halabi is a Manager and part of the Accenture Technology Strategy & Advisory Group with focus on strategic development and data driven transformations. Kinan studied Physics at the Albert Ludwigs University of Freiburg with emphasis on Quantum Information, Mathematics and Computer Science.



The long journey from prototype to the ideal quantum computer

When it comes to quantum computing, Germany can look back on excellent research over the last few years. But there is still a long way to go to the ideal quantum computer. NISQ computers are first prototypes that are delivering promising results. But they are still too prone to error. Continuing improvement also depends on applications for quantum computing. Prof. J. Ignacio Cirac is Director of Theory Division, Max Planck Institute of Quantum Optics at Garching and emphasizes the importance of business and industry for the technical improvement of quantum computers.

“Quantum Supremacy” describes the superiority of the quantum computer in comparison to conventional computers. What advantages are you hoping for from the quantum computer? How do you rate the euphoria surrounding this new technology?

Quantum computers promise to be able to solve problems that – as of today – a conventional computer cannot solve. But this is true for ideal quantum computers, not the ones that we can build today. Nevertheless, some prototypes of such quantum computers have already confirmed that they can solve some particular problems faster than any existing conventional supercomputer.

Unfortunately, solving such an academic problem does not imply that we can apply quantum computers practically in industry and business. There is still a long way to go and this will take time since we have to move from small prototypes to scalable devices. Until then, we ask ourselves the question: Can existing or soon-to-be-built prototypes solve

problems that are not merely academic, but have practical applications with a potential impact on business and society? Maybe yes! That is why the euphoria about a “quantum supremacy” is very natural and raises very big expectations.

“As researchers, we really want quantum computing to become a useful tool for industry and society in general.”

If you are talking about a long way to go, what time are you talking about? Is it five years, ten or even more, until quantum computers overtake our conventional computer? When will be the sweet spot between classical and quantum computers?

If we are really talking about all applications a quantum computer promises and not just some very specific ones, then even the most optimistic are talking about a period of ten years or longer.

What is NISQ-technology (Noisy Intermediate Scalable Quantum computers) and how is your current susceptibility to errors to be improved?

Everyone wants quantum computers, but at the moment we only have prototypes. These prototypes are small and have errors. NISQ computers are such prototypes that are prone

to errors and thus cannot run the algorithms that solve general problems. However, even these prototypes already have sufficient power to solve academic problems, as I mentioned before, faster than classic computers. In fact, although NISQ devices cannot realize all the promises of quantum computing, they can be applied to solving some scientific problems we cannot solve with classical computers. This is a very active area of research nowadays, namely where NISQ devices can solve difficult scientific problems.

It is very interesting that you – from your academic perspective – are looking to the application of quantum computing.

It is evident to us too, from an academic standpoint, that we need to develop industrial and other practical applications for quantum computing beyond researching more fundamental aspects. As researchers, we really want quantum computing to become a useful tool for industry and society in general, and to help improve the German industry and economy in the long run. For this, it is urgent that the industry gets involved in the development of quantum computing. In fact, I believe there are many synergies between scientists working on that field and the view coming from the industry.

In which industrial sectors will quantum computers be relevant sooner than elsewhere? Why?

A very crucial question is if NISQ prototypes can also solve practical problems. Indeed, the scientific problems mentioned above are often linked to applications and, probably, the industrial sectors can benefit from them. Specifically, this occurs, just to name an example, in material science. Another sector which may also be able to benefit is chemistry. If we improve the susceptibility of quantum computers to errors and develop existing or new algorithms, the pharmaceutical industry could very quickly profit from NISQ devices. At the next level are optimization problems. It is now being heavily investigated how such problems can be more efficiently solved by existing (or planned) quantum computers. Those problems are ubiquitous in industry, and thus any advance in this direction may have a big impact.

This is also the reason why automobile companies, for example, have high hopes for quantum computers because, for example, batteries for electric cars could be improved significantly through new research results generated by the quantum computer.

Certainly. But when you talk to different people in that sector, you may get a different point of view as well. My personal view so far is that this is, indeed, promising, but it has not been established yet. As of today, it is not yet clear whether this first generations of devices can really help us to solve the problems that are relevant for the automobile industry. Hopefully, this will happen; but I believe there is a lot of research and development needed for that.

From your perspective, it then seems to me that we know that quantum computers will overtake classical computers and then generate a big impact, but we do not yet know when that will be the case.

Exactly. But let me emphasize that, given the enthusiasm that we have nowadays, one has to be prepared for a long time

until we reach the final goal of building a scalable quantum computer. Let me illustrate what I mean with one example. Imagine that after some years of research, we find that NISQ devices have limited advantages with respect to conventional computers regarding industrial applications. That doesn't mean that quantum computing doesn't work, or that we should abandon our efforts. Still, scalable quantum computers will have big advantages, but will take a long time to be built. And, in fact, if we put our efforts now in NISQ devices, it will be simpler to build them. From my point of view, this is important: to realistically assess the status quo of this large project in order to continuously improve it.

In its latest economic stimulus package, the federal government has guaranteed quantum computing start-up aid worth billions of euros. What is the current state of quantum computing in Germany?

One has to make a distinction between the scientific and the industrial part. For the first, Germany is one of the pioneers of quantum computing and has actively participated from the very beginning in its development. Nowadays, German scientists are among the main contributors to quantum computing science. Regarding industry, Germany has not entered the race to build a quantum computer as some other countries, although it is becoming very interested in industrial applications. Start-ups and other entrepreneurial activities are not on the same level as in other countries either. Here we still have a long way to catch up.

How big is the gap compared to countries like the US or China? Can we still close the gap?

It is still very big. In fact, here is where the stimulus package can play a very important role. I think that it has been specially designed to establish connections between science and industry in order to help industry to become a global player. I believe that the stimulus package is the best way to make it work in a country like Germany.

One way to build a bridge between research and industry is the “Munich Quantum Valley”. What is it and what are its goals?

It is a consortium formed by the Max Planck Society, the Fraunhofer-Gesellschaft, the Technical University of Munich, the Ludwig-Maximilians-Universität of Munich and the Bavarian Academy of Sciences and Humanities. With the president of the Bavarian government and several ministries, they have created this consortium. In fact, they have just signed a memorandum of understanding stating to create a consortium in quantum technologies where science and industry collaborate, among other things, to develop quantum computer hardware and software. It aims to make Munich and Bavaria a leading region for quantum technologies in the world. Thanks to our very good scientific basis, we have an excellent starting point. Munich and the whole Bavaria also have a very strong industry that can boost the development of quantum technologies. Thirdly, we have an excellent education to prepare the younger generation for the world of quantum computing. For example, we already have a master's degree in quantum technology in Munich that is a joint effort of the two universities, TUM and LMU. And last but not least, we want to promote and support entrepreneurs

to create intellectual property, together with scientists and industry, and to incubate start-ups that later on can lead the market. Additionally, young people should have the opportunity to transfer their ideas from the academic environment to practice through excellent training and research. This is how it works in other parts of the world and this is how it should also work in Munich, because we are convinced that Munich is in a privileged position to carry this successfully.

That sounds like Silicon Valley for Bavaria. Or is the comparison too ambitious?

Yes, this is a good analogy. We speak of the "Bavarian Quantum Technology Valley" in Europe as one of the most well-known centers for quantum computing in the world. We are very ambitious. Think of the enormous potential that we have in our area, with science, industry, education, and the full support of the local government. Start-ups can benefit from the excellent research that is being carried out at universities here; conversely, through the Munich Quantum Valley, those ideas can find their way directly into business and industry. Furthermore, science will also benefit from that. It is precisely this cycle that makes the idea of the Munich Quantum Valley so interesting.

How long do you have in mind for these goals?

We have already started. We have already brought things together and are working on realizing the most important goals. This includes, for example, building quantum computers, developing the software, and much more. That's the plan for the next five years.

Just like "PlanQK", an institution that is supposed to establish the connection between university and industry when it comes to the use of quantum computing. Is that the main goal of the Munich Quantum Valley?

PlanQK is also playing a very relevant role in putting together science and industry. In the Munich Quantum Valley, we want to leverage this and also collaborate to enhance that connection.

To address a technical problem: Quantum computers can currently only be used under difficult external conditions (temperature on the edge of 0 Kelvin, enormous amount of space, difficult operation, high energy consumption, etc.). What approach is Quantum Brilliance taking to make the quantum computer suitable for everyday use?

Quantum Brilliance is a very promising start-up company, but I am not so familiar with their approach, so that I can only give a general answer. Quantum computers are very powerful, but they can only be operated under stringent conditions, like very low temperatures, pressure or isolated from external fields. A lot has happened in the last 20 years, but still the operation conditions are difficult to reach and this imposes strong limitations to the scaling up. One goal is to relax such conditions in order to make it easier (and cheaper) to be built. This is a major area of research at the moment: Finding platforms that do not require such extreme conditions.

Is it a dream, a vision or a spinning mill when I say that in ten, twenty or thirty years we will have a quantum computer in our hands like a smartphone today?

That's a very interesting question! Go back 100 years to when the first computers were built and ask the same question. Back then, a computer took up an entire house because of its size. Were they able to envision that a computer nowadays can fit on your desk? Almost all leading manufacturers would have told you at the time that it was impossible. You can ask now the same question in the context of quantum computing. Well, it's difficult to imagine today how quantum computers will look in 20–40 years and what will be the most important use. We have learned from history that technology makes huge leaps and it is almost impossible to predict its applications. I firmly believe that with quantum computers the same will happen, namely the most important uses of quantum technologies are still

to be discovered.

The history of technology has always been the search for the brilliant idea that like a row of dominos initiates a new chain of inventions.

That's the way it is. But that is precisely why it is important that we research and look for applications today but keeping an eye on future developments. Only that can provoke the domino effect. We have to give people the opportunity to research and try. Then the applications for the quantum computer will increase and accelerate the advancement of technology. If we do nothing, nothing more will happen.

Let's talk about this interview again in ten years and then see what has happened since then.

With pleasure.

Let's talk about this interview again in ten years and then see what has happened since then.

With pleasure.

Interview: Hannes Mittermaier

Prof. J. Ignacio Cirac

Born in Manresa, Spain. In 1988, he graduated in Theoretical Physics from the Complutense University, Madrid (Spain), and gained his PhD in 1991. Between 1991 and 1996, he was Associate Professor at the University of Castilla-La Mancha (Spain) and Research Associate at the University of Colorado, Boulder (USA).

From 1996 until 2001 he was Professor of Theoretical Physics at the University of Innsbruck (Austria). Since 2001 he is a member of the Max Planck Society and Director at the Max Planck Institute of Quantum Optics in Garching (Germany). In 2002 he also became honorary professor at the Technical University of Munich. He carries out research in quantum computing, quantum optics and many-body physics. He is a member of the Spanish, German (Leopoldina) and Bavarian Academies of Sciences, and corresponding member of the Austrian. He holds seven honorary doctorships.



Photo: Andreas Heddergott/TUM

Ein Quantencomputer mit 1121 Qubits

Wie mehr Rechenleistung den „Quantum Advantage“ zeitnah fördern wird. Das jüngste Konjunkturpaket der Bundesregierung schnürt Quantencomputing mit einer Unterstützung von zwei Milliarden Euro fest ein. Mindestens zwei Quantencomputer sollen von geeigneten Konsortien gebaut werden. Damit soll ein Zeichen gesetzt werden für mehr europäische Souveränität und Eigenständigkeit in einer Technologie, die schon mittelfristig zur breiten Anwendung in Industrie und Wirtschaft gelangen soll.

IT-Riese IBM hat im Januar 2019 mit dem „Q System One“ den ersten schaltungsbasierten kommerziellen Quantencomputer eingeführt. 2021 soll der erste deutsche Quantencomputer gebaut werden. Dirk Wittkopp ist Vice President Development und Geschäftsführer des deutschen IBM Entwicklungszentrums und berichtet von aktuellen Planungen.

Seit wann beschäftigt sich IBM mit dem Thema Quantencomputing? Welche Forschungsergebnisse haben dem Quantencomputer endgültig zum Durchbruch verholfen?

Der Quantencomputer in unserem Rechenzentrum in Ehningen steht bereits und ist seit Jahresanfang live für die Fraunhofer-Gesellschaft als IBM Q Hub und ihre Kunden. Wir sind besonders stolz darauf, dass es sich dabei um das erste IBM Q System weltweit außerhalb der USA handelt. Wir sind, wenn Sie so wollen, schon Jahrzehnte an dem Thema dran. Mitte der 80er-Jahre war dann der Zeitpunkt, an dem verschiedene Forschungsthemen mit der

„Wir glauben, dass die Quantentechnologie innerhalb dieses Jahrzehnts so weit fortschreiten wird, dass es auf verschiedenen Anwendungsfeldern erhebliche Vorteile für Wirtschaft und Wissenschaft bietet wird.“

Quantenmechanik zusammengeführt werden konnten. Wir waren 2016 das erste Unternehmen, das Quantencomputer für Forschung und Entwicklung über die Cloud zugänglich gemacht hat. Aktuell haben wir mehr als 30 solcher Systeme online.

Was erhofft man sich vom Quantencomputer-Standort Deutschland?

Ziel der Kooperation mit der Fraunhofer-Gesellschaft ist es, die Kompetenzen und Strategien rund um das Thema Quantencomputing für die Industrie und anwendungsorientierte Verfahren voranzutreiben. Die gemeinsame Initiative vereint etablierte Partner aus Universitäten, Forschung und Industrie unter dem Dach eines Fraunhofer-Kompetenznetzwerks Quantencomputing. Wir versprechen uns davon, die Rolle Deutschlands als führende Technologie- und Innovationsdrehscheibe zu stärken.

Bis 2023 will IBM mit seiner Quantum Roadmap einen breiten Einsatz des Quantencomputers für die Wirtschaft ermöglichen. Das System „Quantum Condor“ will



Auf der CES 2020 kündigte IBM die Erweiterung des IBM Q-Netzwerks an, das mittlerweile über 100 Unternehmen in verschiedenen Branchen umfasst, darunter: Luftfahrtindustrie, Automobil, Bank- und Finanzwesen, Energie, Versicherungen, Materialien und Elektronik. (Credits: IBM)

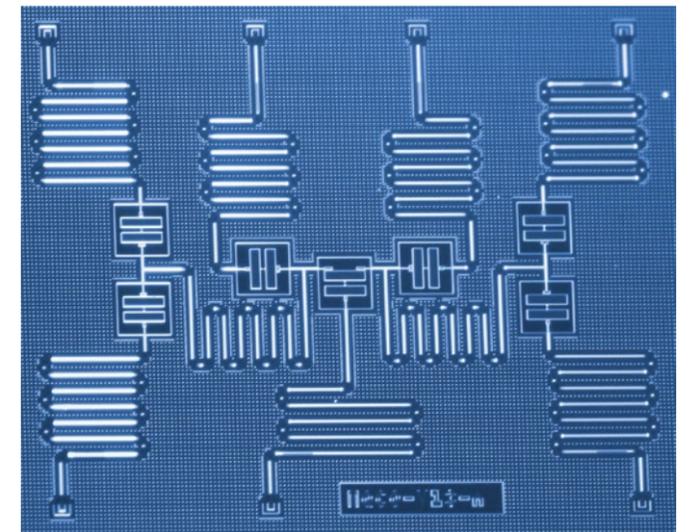


IBM Quantum Hummingbird ist ein 65-Qubit-Prozessor, der in der IBM Cloud für Mitglieder des IBM Q Network verfügbar ist. Quantenprozessoren stützen sich auf die Mathematik der Elementarteilchen, um die Rechenkapazitäten zu erweitern und Quantenschaltungen anstelle der Logikschaltungen digitaler Computer auszuführen. (Credits: Connie Zhou für IBM)

mit einer Leistung von ca. 1100 Qubits bisherige Systeme, die ca. 100 Qubits aufweisen, weit übertrumpfen. Wie ist die technische Revolution, dieser „Quantum Advantage“, möglich?

Für uns ist Quantum Advantage der Wendepunkt für die Quantentechnologie. Wir glauben, dass die Quantentechnologie innerhalb dieses Jahrzehnts so weit fortschreiten wird, dass es auf verschiedenen Anwendungsfeldern erhebliche Vorteile für Wirtschaft und Wissenschaft bietet wird, die über das hinausgehen, was für klassische Computer jemals möglich wäre.

Unser Ziel ist es daher in einem ersten Schritt, in zwei Jahren Beispiele für solche industriellen Anwendungen zu haben. Dazu haben wir uns eine ambitionierte Roadmap auf die Fahnen geschrieben, innerhalb derer wir von der Hardware bis zu den Anwendungen alles parallel weiterentwickeln. Das Modell „Quantum Eagle“ soll ab 2021 mit 127 Qubits rechnen, „Quantum Osprey“ im Jahr darauf mit 433 Qubits, dann folgt „Quantum Condor“ mit 1121 Qubits. Dafür entwickeln wir neue Komponenten, um das Verhalten von mehr Qubits gleichzeitig auslesen zu können. Wir arbeiten auch daran, mehrere Recheneinheiten miteinander zu kombinieren. Die zusätzlichen Verbesserungen in der Kryogenik und der Qubit-Kontrolle für diesen Chip sowie des dazugehörigen rund drei Meter hohen und zwei Meter breiten Kühlelements namens „Goldeneye“ ermöglichen nach unserer Vorstellung auch die für eine vollständige Fehlertoleranz erforderliche Skalierung für Systemen, die Millionen Qubits ansteuern können.



IBM-Wissenschaftler haben einen neuen Ansatz zur Simulation von Molekülen auf einem Quantencomputer entwickelt, der eines Tages dazu beitragen könnte, die Chemie und die Materialwissenschaften zu revolutionieren. Die Wissenschaftler verwendeten erfolgreich sechs Qubits auf einem speziell entwickelten 7-Qubit-Quantenprozessor, um das Problem der Molekülstruktur für Berylliumhydrid (BeH₂) anzugehen – das größte Molekül, das bisher auf einem Quantencomputer simuliert wurde. Die Ergebnisse zeigen einen Forschungsweg für kurzfristige Quantensysteme auf, um unser Verständnis komplexer chemischer Reaktionen zu verbessern, die zu praktischen Anwendungen führen könnten. (Kredit: Kandala et al, IBM)

Wie stellt sich IBM diesen breiten Einsatz für die Wirtschaft vor? Welche Bereiche der Wirtschaft sind die User von „Quantum Condor“?

Die enorme Rechenleistung von Quantencomputern hat das Potenzial, exponentielle Fortschritte und Beschleunigungen bei einer ganzen Reihe von Themen zu ermöglichen, die nicht nur auf eine Industrie beschränkt sind. Nehmen wir beispielsweise das Thema künstliche Intelligenz: KI-Systeme arbeiten umso genauer, je größer die Datenmengen sind, die von den Algorithmen des maschinellen Lernens, die sie trainieren, klassifiziert und analysiert werden können. Je präziser diese Daten nach bestimmten Charakteristika oder Merkmalen eingeordnet werden können, desto präzisere Ergebnisse werden im Anschluss durch die KI geliefert. Beim maschinellen Lernen sind vor allem sogenannte Merkmalsräume interessant – mathematische Räume, die ein Objekt durch seine Messwerte in Bezug auf dessen besondere Eigenschaften bestimmen. Quantensysteme bieten alternative Wege, um einen solchen Raum zu betrachten.

Ein anderes Beispiel ist die Chemie. Die exakte Simulation selbst einer relativ einfachen Verbindung wie Koffein würde ein klassisches IT-System mit so vielen Bits erfordern, wie es Atome in der Milchstraße gibt. Wir haben eine Methode entwickelt, bei der Quantensysteme so eingesetzt werden können, dass dort rechnerisch schwierige Aufgaben ablaufen, während die anderen Teile einer Simulation weiterhin auf klassische Rechner ausgelagert und verarbeitet werden.

So kann beispielsweise heute schon das Verhalten von kleinen Molekülen wie Lithiumhydrid simuliert werden. Wenn eines Tages Hunderte oder gar Tausende von Qubits zusammenarbeiten, um Informationen zu verarbeiten, könnten diese Maschinen alle möglichen natürlichen Systeme simulieren, die wir heute bestenfalls annähernd kennen. Wir könnten sofort wissen, wie sich ein bestimmtes Medikament auf unseren Körper auswirkt. Wir könnten effizientere Batterien bauen, um ein nachhaltigeres Energienetz zu schaffen, oder bessere Düngemittel, um die weltweite Nahrungsmittelversorgung zu verbessern. Quantensysteme könnten auch eingesetzt werden, um effiziente Logistikkäufe zu schaffen, Finanzportfolios dynamisch zu optimieren oder die Materialforschung voranzutreiben.

Programmierer kommunizieren über ein Dualsystem aus Einsen und Nullen mit ihrem Computer. Wie kommunizieren wir mit einem Quantencomputer? Bleibt unser Zugang zu einem Quantencomputer dann doch der herkömmliche Computer? Sehen Sie gerade dahinter eine Lösung, einem mittelständischen Unternehmen, das sich keinen Quantencomputer leisten kann, einen Zugang zu einem Quantencomputer zu gewähren?

Ein Quantenalgorithmus funktioniert in der Tat anders: Hier arbeitet man mit probabilistischen Algorithmen, die keine eindeutigen Ergebnisse, sondern Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ergebnisse liefern. In der klassischen IT folgt ein Algorithmus einer Reihe von Schritten, und am Ende erhält der Anwender ein Ergebnis. Diese beiden Welten muss man

zusammenbringen. Wir haben dafür in einem ersten Schritt vor drei Jahren bereits Qiskit (<https://qiskit.org/>), eine modulare Open-Source-Programmierungsumgebung für die Arbeit mit Quantencomputern auf der Ebene von Schaltungen und Anwendungsmodulen bereitgestellt. Zudem haben wir gerade erst unsere Quantum Software Roadmap veröffentlicht, die es Software-Entwicklern einfacher machen wird, Quantencomputer zu nutzen. Der Zugang zu unseren Systemen erfolgt über die IBM Cloud – also letztlich über herkömmliche Computer, die jeder Nutzer und Unternehmen aller Größen verwenden.

Bereits Anfang 2019 hat IBM mit dem Q-System seinen ersten kommerziell nutzbaren Quantencomputer präsentiert. Was ist seither vergangen? Worin besteht aktuell diese kommerzielle Nutzung? Wird „Quantum Condor“ Q-System ablösen?

Wir haben in den letzten Jahren die Arbeiten an unseren Systemen konsequent vorangetrieben, was letztlich in die eingangs beschriebene Quantum Roadmap mündet – und im Idealfall den Anfang einer Quantenindustrie bildet: Quantenverbindungen zwischen Systemen mit Millionen-Prozessor-Chips – ähnlich den Intranets, die heute bereits in Rechenzentren die Supercomputing-Prozessoren miteinander verbinden. Aber das ist noch Zukunftsmusik.

Welche technischen Voraussetzungen müssen geschaffen werden, um die Leistungsfähigkeit von Qubits in den nächsten Jahren weiter zu optimieren?

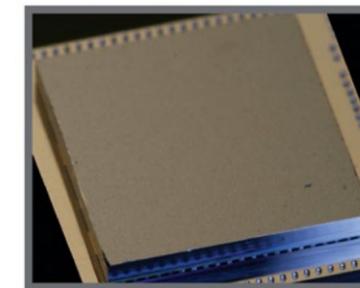
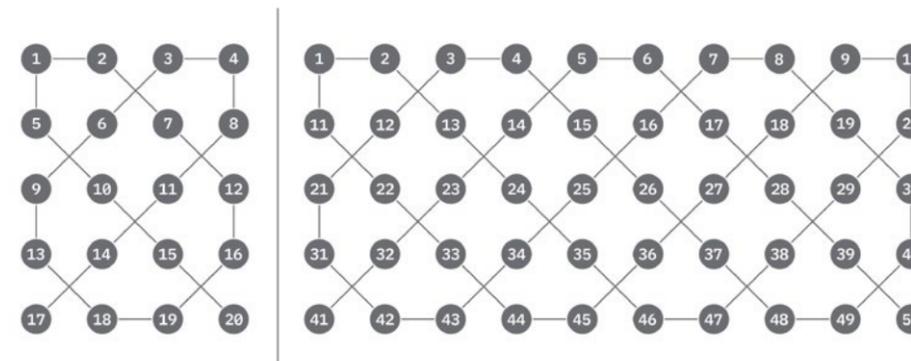
Ziel muss es sein, sogenannte fehlertolerante Quantensysteme zu entwickeln – also Quantencomputer, die eine geringstmögliche Fehlerrate aufweisen, wenn die für die Berechnungen notwendigen Messungen auf den Qubits vorgenommen werden.

Wie sehen Sie aktuell Europa, insbesondere Deutschland, im internationalen Vergleich aufgestellt? Wer liegt im Moment in der Pole-Position im Wettrüsten um die Technologie von morgen?

Ich denke, Europa und auch Deutschland haben verstanden, welche Bedeutung diese Technologie in den nächsten Jahren erlangen kann. Entsprechende Investitionen wurden ja bereits auf verschiedenen politischen Ebenen bereitgestellt, um die angewandte Forschung voranzubringen. Die Kooperation mit der Fraunhofer-Gesellschaft und weiteren Partnern wird hier helfen, Kompetenzen rund um Quantencomputing aufzubauen und eine Gemeinschaft aus Forschern, Entwicklern, IT- und Branchenexperten zu bilden.

Technischer Vorsprung ist essenziell, um sich wirtschaftliche Vormachtstellungen zu sichern. IBM hat zuletzt einige Partnerschaften mit anderen Unternehmen verkündet. Welche Kooperationsmodelle strebt IBM an? Welchen Nutzen erhofft man sich davon?

Wir haben bereits 2017 das IBM Q Network (<https://www.ibm.com/quantum-computing/network/overview/>) aus der Taufe gehoben – ein Netzwerk von aktuell über 130 Forschungseinrichtungen, globalen Unternehmen, Start-Ups und anderen Partnern, die mit uns daran arbeiten, die Technologie zügig weiterzuentwickeln, kommerzielle Anwendungen



A) Schema eines 20-Qubit-Systems und B) 50-Qubit-System zur Veranschaulichung der Qubit-Interkonnektivität. Diese komplexe Verbindungsstruktur ermöglicht maximale Flexibilität für IBM Q-Systeme. Das 50-Qubit ist die natürliche Erweiterung der 20-Qubit-Architektur. C) Foto des Quantenprozessorpaketes für die ersten IBM Q-Systeme. Der Prozessor bietet Verbesserungen beim supraleitenden Qubit-Design, der Konnektivität und der Verpackung. (Credits: IBM)

zu identifizieren und gleichzeitig das Wissen über das komplexe Thema in die Wissenschaft und Wirtschaft zu tragen. Wir wollen, dass das Thema Quantencomputing auf eine breite Wissensbasis gestellt und genutzt wird. Eine globale Gemeinschaft ist hier der Schlüssel, um es voranzutreiben.

Quantencomputing und seine Anwendungen: Welche konkreten Anwendungen profitieren aktuell schon von der Nutzung eines Quantencomputers? Welche Wirtschaftszweige werden zuerst auf Quantencomputing setzen?

Die oben genannten Einsatzgebiete geben schon eine gute Idee, wo sich Quantum etablieren wird: Beispielsweise in der Pharmaforschung bei der Suche nach Molekülen, die sich für Medikamente eignen, ihr Verhalten besser vorherzusagen und die Entwicklungszyklen zu beschleunigen. Die Verbesserung von Batterien, wie es beispielsweise Daimler als Mitglied des IBM Q Network bereits macht, oder die Erforschung der Proteinfaltung, die Einfluss auf die Entstehung von Krebszellen hat. Im Finanzsektor wird Quantencomputing helfen, die Entwicklung von Risikomodelle in Banken und Versicherungen zu verbessern.

Das 21. Jahrhundert steht vor einer der größten Herausforderungen der Menschheitsgeschichte: die Klimafrage. Könnte ein Quantencomputer auch im Kampf gegen die Klimaerwärmung funktional eingesetzt werden? Wie?

Quantencomputer können im Grunde überall dort eingesetzt werden, wo komplexe naturwissenschaftliche Phänomene in mathematische Modelle übersetzt werden können. Supercomputer haben schon in den letzten Jahrzehnten den Meteorologen bei ihren Vorhersagen und der Erstellung von Klimamodellen geholfen. Gleiches kann zukünftig auch für Quantencomputer gelten. Zudem könnten sie dabei helfen, im Detail die Auswirkungen von verschiedensten Emissionen und ihren Wechselwirkungen mit der Atmosphäre besser zu verstehen und uns allen dabei helfen, den Klimawandel und seine Folgen so gut wie irgend möglich abzufedern.

Wir befinden uns derzeit in einer Übergangsphase. Unsere herkömmlichen Computer sind an ihre physikali-

schen Grenzen gestoßen. Gerade das macht den Quantencomputer immer lukrativer. Welche Grenzen kann aber ein Quantencomputer selbst haben? Besteht das Risiko, dass auch er in 20, 30 oder 40 Jahren an seinen Endkapazitäten angelangt sein wird?

Auch wenn klassische Computer beispielsweise in der Prozessoren-Entwicklung an physikalische Grenzen stoßen – Stichwort Leckströme –, bleiben sie nach wie vor und noch für lange Zeit die Triebfedern für Innovation. Allein die Tatsache, dass wir unsere Quantensysteme nicht autark, sondern nur in Verbindung mit bestehenden Computern nutzen können, zeigt, dass wir noch sehr lange herkömmliche Computer nutzen werden. Und was das Ende von Quantum Computing angeht: Wir haben noch nicht mal richtig angefangen, das Potenzial auszuschöpfen.

Interview: Hannes Mittermaier

Dirk Wittkopp

Als IBM Vice President und Geschäftsführer der IBM Deutschland Forschung & Entwicklung GmbH leitet Dirk Wittkopp eines der großen IBM Global Labs, die gemeinsam die Software- und Systemprodukte von IBM entwickeln. Sein Team in Deutschland arbeitet an einem breiten Spektrum dieses Portfolios, darunter System Z- und Power-Server, Betriebssysteme, Speichersoftware, Datenverwaltungs- und Analysesoftware, Cloud-Plattformen sowie Lösungen für IBM Security, Internet of Things, KI-Lösungen für die Finanzbranche, Blockchain sowie Quantum Computing.

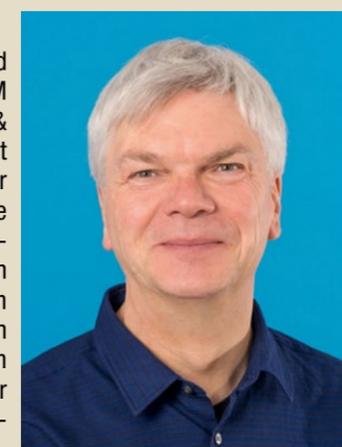


Foto: IBM

Solving problems with quantum annealing

Quantum computing is increasingly becoming a big player in digitization and will provide competitive advantages in industry and business. The Canadian company D-Wave Systems has been involved in the development and commercial use of quantum computers for almost exactly ten years. Murray Thom is Vice President of Software and Cloud Services at D-Wave and is responsible for the application possibilities of quantum computing.

D-Wave announced on May 11, 2011 that it had developed the first commercial quantum computer. Now almost exactly 10 years later: What happened to this commercialization project for the quantum computer? According to the company's own statements, this quantum computer was equipped with 128 qubits at the time. Where is your technology today?

Founded in 1999, D-Wave was the first commercial quantum computing company. From the beginning, D-Wave has been focused on delivering practical value to customers and business users. In 2011, we officially moved our R&D to a new phase when we announced our collaboration with Lockheed Martin, a first-of-its-kind significant quantum computing relationship. This allowed outside scientists to work with quantum systems for the first time, and provided critical feedback for D-Wave's continuing R&D effort and quantum hardware development. Since then, the company has continued to innovate:

In 2018, D-Wave brought down the barriers to quantum computing when it launched its Leap™ quantum cloud service. Leap brought the first publicly available, live, quantum computer to global developers, enabling them to start coding on a quantum computer in real time, for free.

In 2019 at the Web Summit conference in Lisbon, Portugal, global automotive company Volkswagen crossed a threshold when it debuted the first ever quantum application in production, a quantum shuttle service. Volkswagen partnered with public transportation provider CARRIS to equip MAN buses with a quantum-optimized traffic management system. This system used a D-Wave quantum computer to calculate the fastest route for each of the nine participating buses individually in real time.

In February 2020, D-Wave launched Leap 2, the newest version of our quantum cloud service that now gives developers and enterprises a first-of-its-kind, comprehensive environment for developing and deploying hybrid quantum applications.

In September 2020, D-Wave launched Advantage, the first and only quantum computer built for business. Advantage leverages 5,000+ qubits, 15-way qubit connectivity, and an expanded hybrid solver service to run problems with up to one million variables.

This gives customers the ability to solve far larger, more complex problems and drive real-world value for their businesses.

The D-Wave quantum computer is not a “universal quantum computer”, but an “annealing quantum computer”. What is the difference and what does that mean for the use of your quantum computer?

Currently, there are no universal quantum computers. NISQ gate model systems are not universal due to their struggle with noise. D-Wave builds quantum annealers, designed to get quantum computing into the hands of developers and enterprises to solve real problems with quantum computing today, something other approaches state will take up to 20 more years to accomplish. Longer term, all quantum computers are on a path to universal, and in fact, D-Wave has a roadmap for a universal quantum annealer. In the short term, with our Advantage quantum system and hybrid solver services, we can solve problems with up to a million variables, opening the door to real, in-production hybrid quantum applications. These use cases have commercial value today and will benefit enterprises long before gate model quantum computers are either universal or have scaled enough to provide useful results.

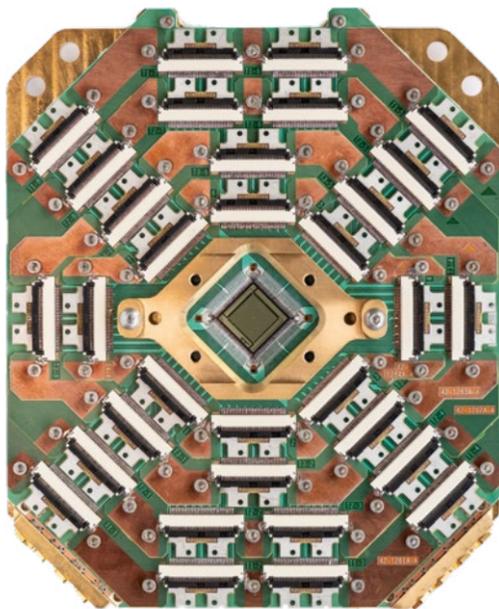
For a long time it was said that conventional computers equipped with simulated annealing technology had no less computing power or could even solve problems faster than the annealing quantum computer. The advantage of the quantum computer has now been scientifically proven. How does it compare to conventional computers?

Quantum computers aren't for every type of problem. In fact, there are many problems that can be solved better or more efficiently without a quantum computer. Where quantum computers can be most powerful is when they are solving very complex problems, known as NP-hard problems.

On many of those complex problems, quantum annealing represents an efficient way to find good answers to a large section of problems. A number of our customers have already seen better performance using D-Wave quantum computers than using classical counterparts. Additionally, there are examples of some problems that can only be solved efficiently with algorithms developed using D-Wave.



ADVANTAGE SYSTEM: D-Wave's latest quantum system, Advantage, boasts 5000+ qubit and 15-way qubits connectivity, powering large-scale, in-production hybrid quantum applications.



ADVANTAGE CHIP: D-Wave's new chip is twice the size of the previous model chip and four times the area. It contains more than 1 million Josephson junctions, which are equivalent to transistors on a classical computing chip. Getting to that number had never been done before.

For example, biotechnology company Menten AI developed the first process using hybrid quantum programs to determine protein structure for de novo protein design, with very encouraging results often outperforming classical solvers. Menten AI's unique protein designs have been computationally validated, chemically synthesized, and are being advanced to live-virus testing against COVID-19.

“Quantum supremacy” describes the superiority of the quantum computer in comparison to conventional computers. How does D-Wave want to give medium-sized companies access to quantum computers?

While quantum supremacy is certainly interesting, it requires proving that a quantum computer can solve a synthetic – though not necessarily practical – problem faster or better than any possible classical system, ever.

At D-Wave, we're instead focused on the idea of “customer advantage.” The priority is to help customers demonstrate clear business benefit from using a quantum computer in a real-world problem over a classical system. D-Wave customers have shown early signs of this already in real-world problems. Advantage customers like Menten AI have already seen speedup by as much as 100x over the best available classical solvers. Others, like Save-On-Foods, are now able to much more efficiently tackle business problems like grocery optimization. That's far more important to us than demonstrating supremacy over a theoretical problem.

To address the second portion of your question, the future of quantum computing is hybrid and in the cloud. With flexible access via the cloud, we've seen forward-thinking businesses of all sizes leverage our technology to solve complex problems and build scalable applications. Cloud access brings the power of quantum

“On many of those complex problems, quantum annealing represents an efficient way to find good answers to a large section of problems.”

computing to more and more companies, from startups to Fortune 500 companies. And more importantly, we're seeing that access enable developers and business to begin to use quantum computing in creative, new ways that impact their business tangibly.

Your product, the Advantage™ quantum system, claims to be the first and only quantum computer that enables customers to develop and run in-production hybrid quantum applications. What advantages does the Advantage™ quantum system bring?

Yes, Advantage is the first quantum computing system built for business from the ground up, and is also the most connected commercial quantum computer in the world. Available today in our Leap quantum cloud service, Advantage leverages 5,000+ qubits, 15-way qubit connectivity, and an expanded hybrid solver service to run problems with up to one million variables. This gives customers the ability to solve far larger, more complex problems and drive real-world value for their businesses.

Advantage was designed with precision and a new fabrication process to meet customers' requirements, and has several key technical improvements that lead to better quality solutions for bigger and more complex problems, including:

- 5,000+ qubits with 15-way qubit connectivity, two and a half times more than our previous 2000 qubit system. Higher qubit count and greater connectivity are important for embedding larger, denser problems with more constraints. These are the kinds of problems that are most relevant for business users, such as schedule optimization or transportation routing.
- More than 1 million Josephson junctions, compared to 120,000 in the 2000 qubit system.
- Our new chip topology, Pegasus, enables the embedding of larger problems with fewer physical qubits than the 2000 qubit topology. When using the HSS and DQM solver, we can run problems with 1 million variables.

The following case: A classic medium-sized company wants to convert digitally. How can your quantum computer for commercial use come into use?

One of the biggest challenges we hear from businesses is “how do we get started in quantum computing?” The reality is that while we work to make it easy to get started using our quantum computer, you do have to think differently to get started. That's why D-Wave recently introduced D-Wave Launch, a jump-start program for businesses who want to get started building hybrid quantum applications today, but may need additional support. In four phases, D-Wave collaborates with customers to 1) help discover which of their business challenges are best suited for our hybrid quantum service, 2) work together with the customer team to build a quantum proof-of-concept, 3) pilot the hybrid quantum application, and 4) put the hybrid quantum application into production.

Launch helps businesses identify and address relevant business problems using quantum computing, today.

D-Wave's quantum computers have a broad array of use cases in industries including medicine, transportation, logistics, machine learning, and beyond. To derive business benefit from quantum computers, we help users identify the right problems, often in the form of optimization problems, and then help them map those problems onto the quantum processor.

Let's talk about quantum applications: Which solutions do you offer to help the food industry by using the quantum computer?

Western Canadian grocery retailer Save-On-Foods is using hybrid quantum algorithms developed on the Advantage system to bring grocery optimization solutions to their business, with pilot tests underway in-store. The company has been able to reduce the time an important optimization task takes from 25 hours to a mere 2 minutes of calculations each week. Even more important than the reduction in time is the ability to optimize performance across and between a significant number of business parameters in a way that is challenging using traditional methods.

On your website I also found that you are collaborating with Volkswagen (VW). What optimization based on quantum technology are you using at VW? Is your solution also available for other automobile manufacturers?

Volkswagen is an early adopter of D-Wave's quantum technology. In 2019, we announced a collaboration with Volkswagen to route buses to optimize traffic flow in Lisbon, Portugal during the Web Summit conference. This use case was among the first real-world quantum applications that directly impacted people in a tangible way.

In 2020, VW expanded its quantum use cases through the Advantage system and hybrid solver service to build a paint shop scheduling application. The algorithm they designed optimizes the order in which cars are painted in their factories. By using the hybrid solver service, the number of color switches were reduced significantly, leading to performance improvements. VW is also employing our quantum technology in machine learning research and for the discovery of new battery materials. BMW is another auto manufacturer that leverages D-Wave's systems to optimize their production lines. Using quantum algorithms, the company streamlined the complexity and requirements for programming robots used in PVC application and joint sealing. Today we work individually with auto manufacturers to identify and build the right quantum applications for their business. As the platform and use cases evolve, we expect that reusable quantum applications will emerge.

Which commercial applications of the quantum computer affect science & healthcare? What do you mean by “designing peptide therapeutics on a quantum computer?”

Protein design pioneer Menten AI has developed the first process using hybrid quantum programs from D-Wave to determine protein structure for de novo protein design with very encouraging results often outperforming classical solvers. Menten AI's unique protein designs have been computationally validated, chemically synthesized, and are being advanced to live-virus testing against COVID-19.

This is one example of how Menten AI is creating the next generation of protein-based drugs and enzymes powered by machine learning and quantum computing.

How can quantum computing be used for forecasting financial crashes?

In an increasingly data-heavy world, quantum computing can play a critical role for financial services firms – from securities pricing to portfolio optimization. These financial institutions can harness quantum computing to more effectively analyze unstructured or

unwieldy data sets, and therefore, make better decisions for clients, improve customer service, optimize portfolios and more. You mentioned forecasting financial crashes. One of our partners, Multiverse Computing, published a paper on how quantum annealing is especially useful in calculating equilibrium market values of institutions after a shock. They say that annealing can provide a potentially more efficient way to assess financial equilibrium and predict financial crashes than the current systems in place. They're already working with banks to demonstrate quantum annealing's value and power with real-world financial problems.

Additionally, D-Wave customer Accenture – the global professional services company – is exploring quantum, quantum-inspired, and hybrid solutions to develop applications across industries. Accenture recently conducted a series of business experiments with a banking client to pilot quantum applications for currency

arbitrage, credit scoring, and trading optimization, successfully mapping computationally challenging business problems to quantum formulations, enabling quantum readiness.

What other possible tasks for the quantum computer will be found in our industry in the first few years?

In many ways, we don't know. And yet, with quantum computing, the opportunities really are endless. We're seeing good early traction. Fields as diverse as pharmaceuticals, transportation, manufacturing, and retail, all stand to benefit from investment in quantum computing today. A 451 Research study recently showed that 81% of Fortune 1000 decision-makers already have a quantum computing use case in mind for the next three years. Their priorities are increasing efficiency and productivity at an organizational level, boosting profitability, and solving large and complex business problems that may not be solvable with current methods, tools, and technology. Now is the time for executives to take quantum computing investment seriously, because the competition is already exploring how to solve complex problems and gain first-to-market advantages.

Interview: Hannes Mittermaier

Murray Thom

Murray Thom is Vice President of Software and Cloud Services at D-Wave, responsible for the Leap quantum application environment, Ocean tools, system software, and documentation. Previously Murray led a team engaged in customer projects related to algorithms, applications, and performance testing.

Since joining the company in 2002 Murray has been involved in all aspects of systems engineering and processor development for D-Wave's quantum computers. Some of these project areas include cryogenic refrigeration systems, superconducting electrical filters, cryogenic chip packaging, magnetic screening and shielding, QPU signals, and automated test systems.



Quantum accelerators: a new trajectory of quantum computers

Marcus Doherty

Quantum Brilliance

Expanding the vision of quantum computing

The prevailing picture of a quantum computer is one of a quantum mainframe that competes with classical supercomputers to solve only the most difficult problems. The origins of this picture being the various quantum hardware technologies of today that are constrained to mainframe roles because they are large and fragile machines that require ultra-low temperatures and/or pressures and complex control systems to operate. Similar to the classical mainframes of the 1960s, the future of quantum mainframes is likely to be one where there are a few quantum mainframes in each supercomputing and cloud computing facility around the world, but otherwise not widely employed.

What changed this picture for classical computing was the advent of the microprocessor, which enabled classical computers to dramatically reduce their size, weight and power and so become widely distributed, connected and parallelized, and eventually mobile. In addition to leaps in microprocessor hardware, the classical computing revolution of the 20th century also demanded leaps in how we thought about employing computers, what we applied them to and the software architectures we created to orchestrate them. In the 21st century, a similar revolution in hardware, software and thinking is required for quantum computers to break out of the mainframe and dramatically broaden their roles and applications.

If you switch your picture of a quantum computer from a quantum mainframe to a quantum accelerator card that is small enough for you to hold in your hands, then your ideas about how

quantum computers can be employed, what they can be applied to and when they will be useful, dramatically change. Instead of asking “When will this quantum computer outperform a classical supercomputer?”, you will ask “When will this quantum computer outperform that CPU or GPU in my desktop computer for that task?”. Instead of asking “How do I redesign my supercomputer facility to accommodate a quantum computer?”, you will ask “How do I integrate hundreds of quantum computers into the racks of my current supercomputer?”. You may even begin to ask “What if my satellite, vehicle, manufacturing plant, or desktop computer had one or more quantum computers accelerating certain tasks or making some tasks possible for the first time?”.

Quantum Brilliance is developing quantum accelerators

Quantum Brilliance is an Australian-German company whose aim is to deliver quantum accelerators to the world and to support those who aim to discover and develop their applications, build the software architectures to employ them and integrate them into computing systems. In doing so, Quantum Brilliance is seeking to make quantum computers useful sooner, by focusing on outperforming CPUs and GPUs of comparable size, weight and power, and to dramatically expand their scope of applications by making them robust enough for massive-parallelization with classical computers in computing centers and deployment in mobile platforms.

Quantum Brilliance’s accelerators are based on diamond quantum computers, which can operate in ambient conditions with comparatively simple control systems, whilst delivering competi-

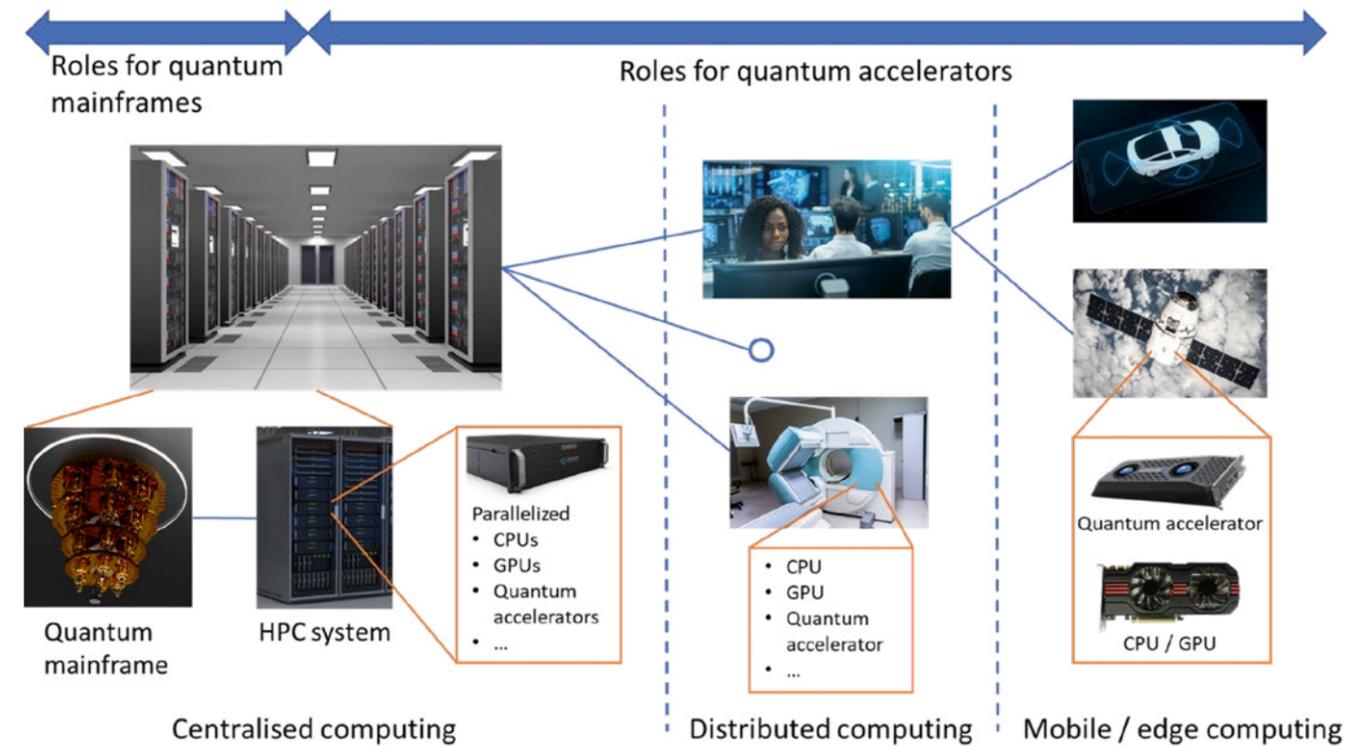


Figure 1: The distinct roles of quantum mainframes and quantum accelerators.

Image credit: the CPU/ GPU image was created by Rwindr and is available on Pixabay.

tive performance. Room-temperature diamond quantum computing is not new. In its 20+-year history [1], German researchers have pioneered impressive achievements, including demonstrations of quantum algorithms [2], quantum simulations [3,4], quantum error correction [5,6] and high-fidelity operations [5-7]. But, in recent years, it has not scaled past a handful of qubits due to challenges with qubit fabrication yield and precision. Quantum Brilliance’s core innovations address this barrier to scaling as well as the miniaturization and integration of control structures that is crucial to realizing chip-scale quantum microprocessors.

In the following, I further introduce diamond quantum computing and the pathway to quantum accelerators being pursued by Quantum Brilliance, discuss the employment and applications of quantum accelerators, as well as the opportunities for researchers and industry to engage with quantum accelerators today.

The road to quantum accelerators

Room-temperature diamond quantum computers consist of an array of processor nodes (see concept diagram in figure 3). Each processor node is comprised of a nitrogen-vacancy (NV) center (a defect in the diamond lattice consisting of a substitutional nitrogen atom adjacent to a vacancy) and a cluster of nuclear spins: the intrinsic nitrogen nuclear spin and up to ~4 nearby ¹³C nuclear spin impurities. The nuclear spins act as the qubits of the computer, whilst the NV centers act as quantum buses that mediate the initialization and readout of the qubits, and intra- and inter-node multi-qubit operations. Quantum computation is controlled via radiofrequency, microwave, optical and magnetic fields.

Room-temperature and pressure operation is owed to the remarkable properties of the NV center [8]. Namely, its optical electron spin initialization and readout mechanism that retains high fidelity and contrast under simple off-resonance illumination in ambient conditions as well as its long electron spin coherence time (~1 ms), which is the longest of any solid-state electron at room temperature. These properties allow the NV center to operate effectively as a quantum bus that can initialize, read out and connect the otherwise weakly interacting and highly-coherent nuclear spin qubits.

Thus far, diamond quantum computation using three qubits within a single node or two qubits in two nodes has been performed. Demonstrated initialization and readout fidelities exceed 99.6% [5], whilst single and two qubit gate fidelities exceed 99.99% and 99%, respectively, with corresponding gate times ranging up to ~10 μs [5-7]. Recent work shows that gate fidelities exceeding 99.999% and gate times below ~1 μs are possible with more advanced quantum control techniques [9], which will enable diamond to cross thresholds for fault-tolerant operation and achieve large circuit depths.

Key to scaling beyond a handful of qubits and nodes is the precise fabrication of arrays of NV centers that are separated by a few nanometers. This precision is required to magnetically-couple the electron spins of the NV centers so that they may mediate the inter-node multi-qubit operations. However, this precision cannot be achieved with high yield using the existing ‘top-down’ nitrogen ion-implantation techniques for creating NV centers, owing to the limits of implantation mask fabrication and the scattering of implanted ions [10].

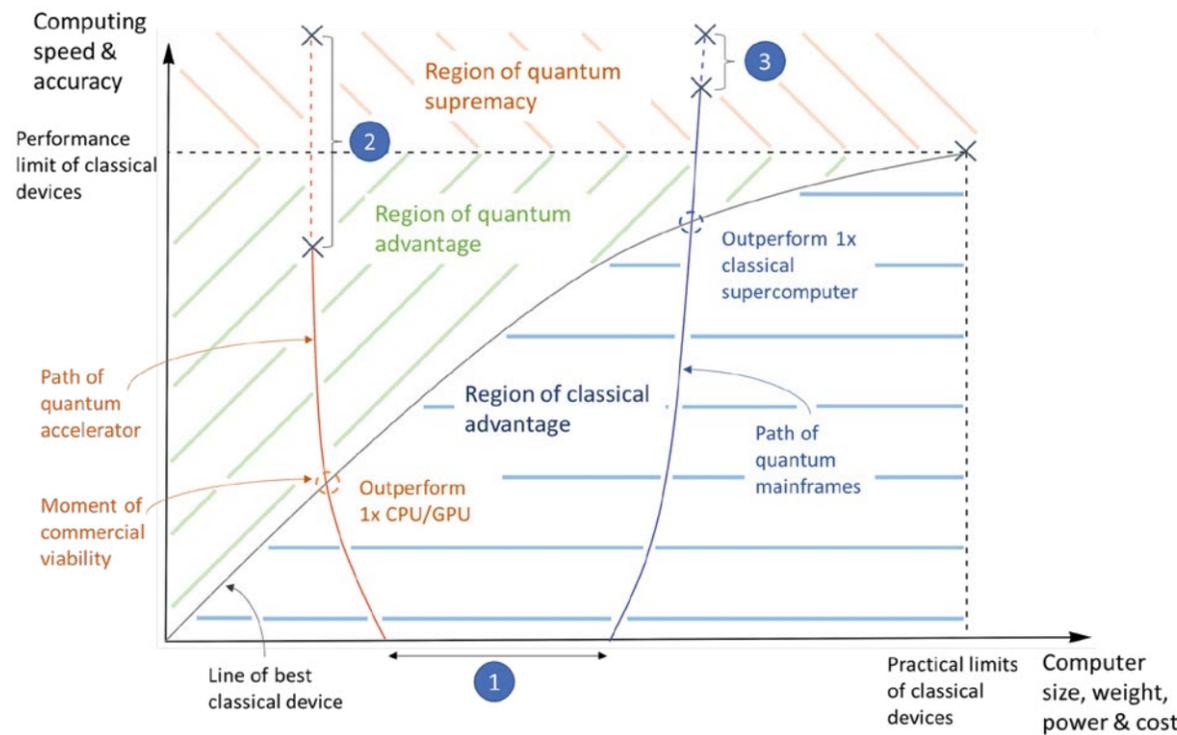


Figure 2: Vision of the different trajectories of quantum accelerators and quantum mainframes. (1) Paths distinguished by the relative size of qubits, their ability to operate in ambient conditions and the simplicity of their control systems. (2) Likely range of the ultimate performance limits of quantum accelerators. (3) Likely range of the ultimate performance limits of quantum mainframes.

One of Quantum Brilliance’s key inventions is a ‘bottom-up’ atomically-precise fabrication technique for diamond that circumvents these limitations through designer surface chemistry and lithography. The technique draws inspiration from the atom-scale fabrication techniques for silicon that were pioneered in Australia [11]. Another of Quantum Brilliance’s key inventions is the integrated quantum chip that miniaturizes and integrates the electrical, optical and magnetic control systems of diamond quantum computers. The combination of these two inventions enables the simultaneous scaling-up of qubit numbers with scaling-down of the total size, weight and power of diamond quantum computers, and thus the realization of compact and robust quantum accelerators for mobile and parallelized applications.

Quantum Brilliance’s goal is to build quantum accelerators containing >50 qubits that outperform CPUs/GPUs of comparable size, weight and power in important applications within the next 5 years. In 2021, Quantum Brilliance will deliver its first Quantum Development Kits (QDKs), which will contain up to 5 qubits in a 19-inch rack-mountable unit. These QDKs will support benchmarking, hardware and software integration with classical computing systems, accelerator co-design and application discovery activities with Quantum Brilliance’s customers and R&D partners. Over the next five years, the QDKs will be progressively upgraded with more qubits, reduced in size and ruggedized, through the implementation of atomically-precise diamond fabrication and on-chip control system integration.

Alongside its hardware development, Quantum Brilliance is

developing software architectures and high-performance emulators to help users develop and test software for the integration and application of quantum accelerators and to evaluate their current and future performance. Quantum Brilliance’s current software architecture is based upon the XACC framework developed specifically for quantum accelerators by Quantum Brilliance’s collaborators at the Oak Ridge National Laboratory [12]. Quantum Brilliance’s quantum emulator is distinguished from other quantum simulators by its detailed model of diamond quantum computers (e.g. qubit topology, native operations, errors and operation times) and scalability on high-performance computing systems. This enables users to experience the behavior and performance of current and future quantum accelerator hardware at close to full scale in qubit number.

The employment and applications of quantum accelerators

Like quantum computing more broadly, the roles and applications of quantum accelerators are early in their discovery and development. Here, I provide some examples of applications that illustrate how massively-parallelized and mobile quantum accelerators can deliver significant advantages and broaden the roles and applications of quantum computers.

Massively-parallelized quantum accelerators promise a leap in the simulation of molecular dynamics (MD). MD simulations are used extensively to model large molecules or large numbers of interacting molecules to study phenomena like the structure, conformations and interactions of biomolecules and molecular

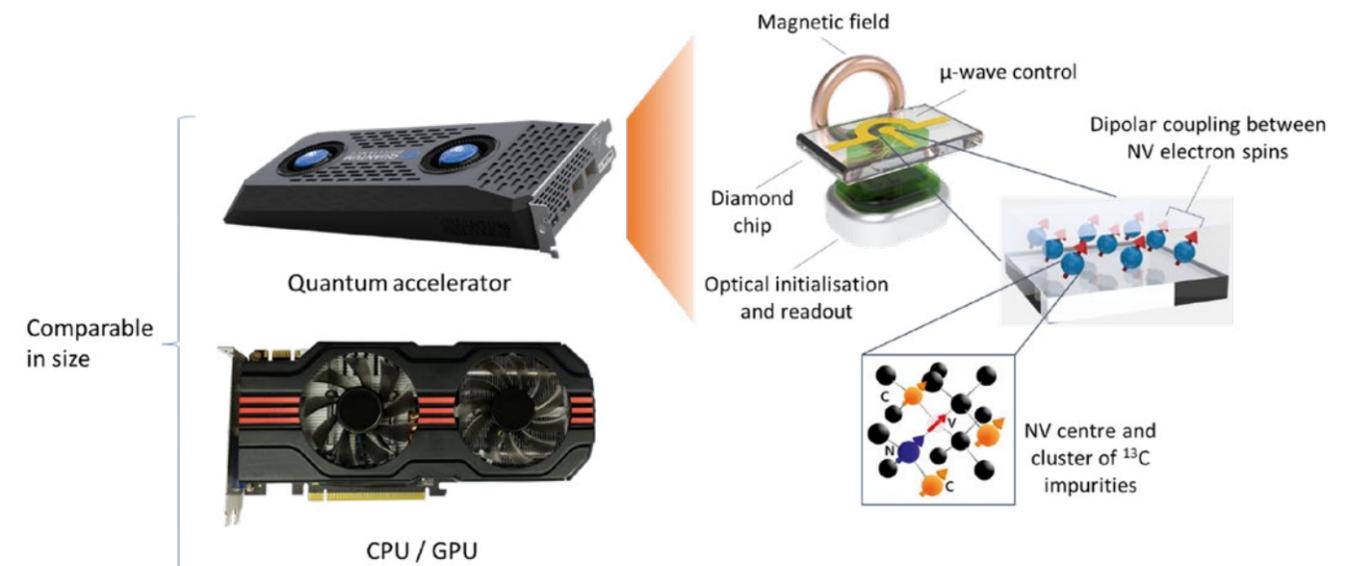


Figure 3: Concept diagram of Quantum Brilliance’s diamond quantum accelerator. Image credit: the CPU/ GPU image was created by Rwindr and is available on Pixabay.

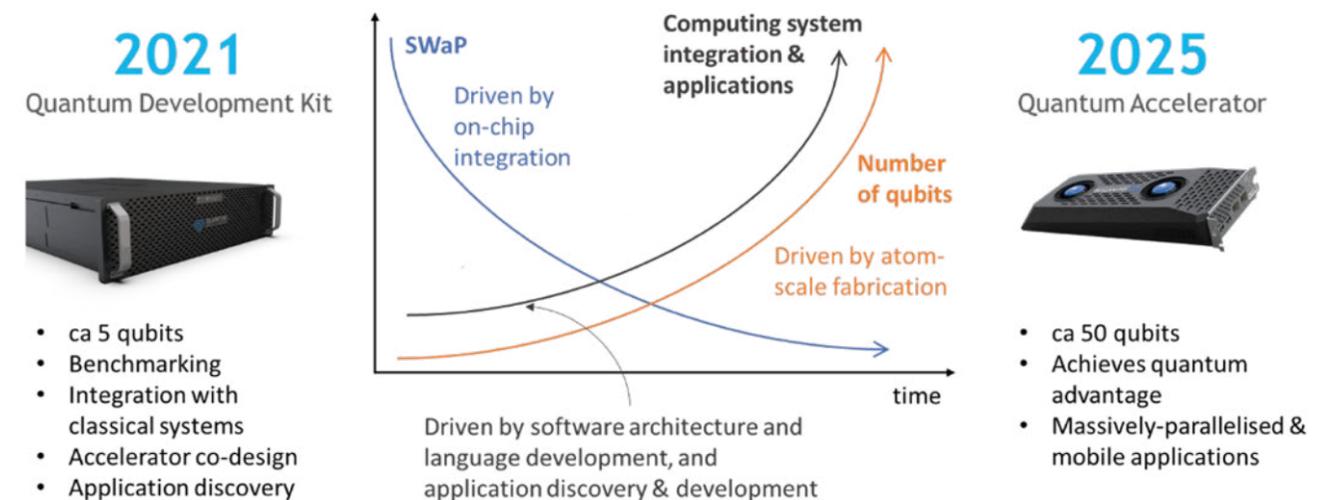


Figure 4: Quantum Brilliance’s roadmap to diamond quantum accelerators in the next 5 years.

diffusion, transport and interactions with solid interfaces [13]. They have applications in drug design, chemical synthesis, energy storage and nanotechnology [13].

Conventional MD techniques treat the atoms of the molecules as point particles and employ effective potentials and forces to solve the classical dynamics of the atoms. This has a variety of critical limitations: (1) by assuming adiabaticity, excited states of the molecules are ignored, which are often pivotal in interactions, reactions and energy transfer, (2) the use of restricted sets of empirical or ab initio data for the effective potentials and forces reduces accuracy and generalizability, and (3) bond breaking and formation is ignored, which prevents modeling of chemical reactions [13].

The Quantum Mechanics/ Molecular Mechanics (QM/MM) formalism of MD was invented to overcome these limitations of conventional techniques [13]. In QM/MM, molecules are divided into parts that are to be treated using quantum mechanics (i.e. reaction sites of proteins, reactive groups of molecules) and treated using conventional molecular mechanics. In this way, the accuracy and generality of QM calculations is gained for the important parts, whilst retaining the speed of MM calculations for the other parts.

The trouble is that the QM calculations are computationally expensive on classical computers, which severely limits the utility of QM/MM approaches today. The obvious solution is to split the QM and MM calculations between quantum accelerators

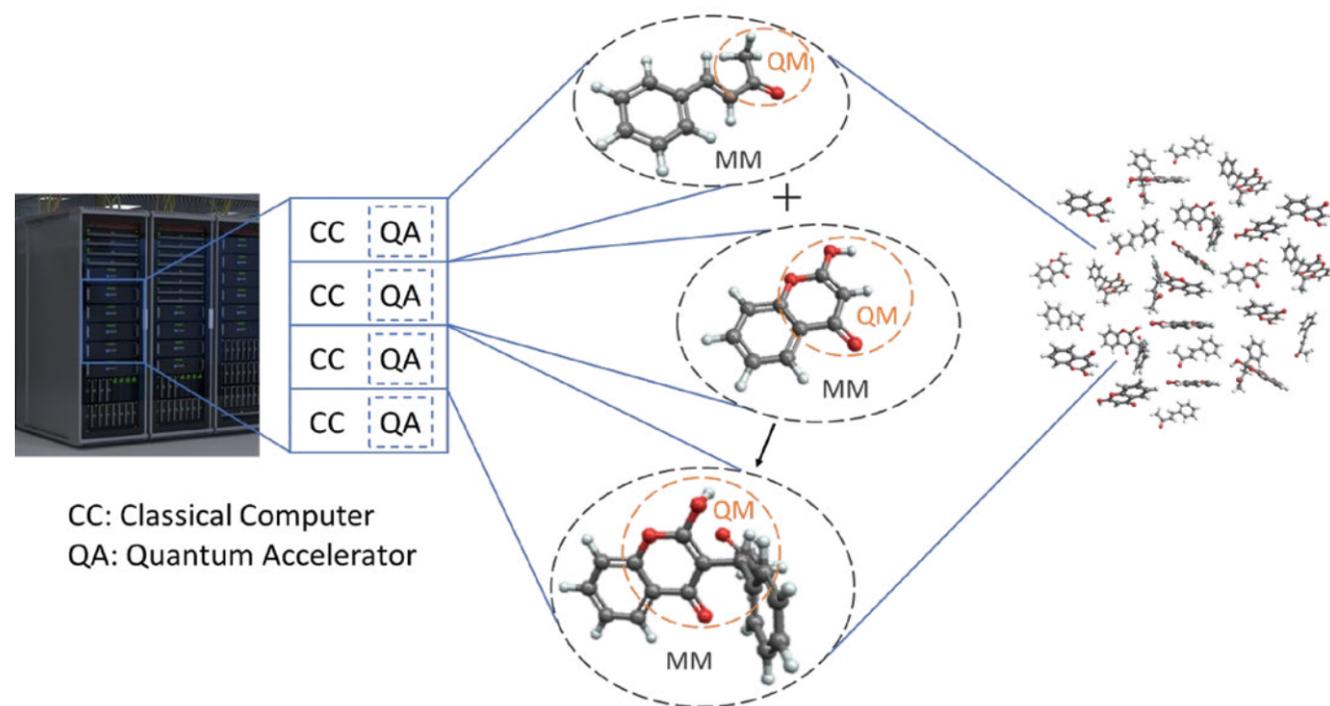


Figure 5: The employment of massively-parallelized quantum accelerators to implement larger scale and more accurate QM/MM simulations in MD.

and classical computers, respectively, and exploit the significant efficiency gains of quantum computing methods for quantum chemistry calculations [14]. By parallelizing over many quantum accelerators, rather than just one quantum mainframe, QM/MM simulations of systems of many interacting molecules becomes possible. Thus, enabling a dramatic increase in the size, accuracy and scope of MD simulations. For example, the study of multiple reactions and conformation changes within a system of biochemicals in drug design or the impact of reaction byproducts during chemistry at a solid-liquid interface in catalysis design.

Mobile quantum accelerators promise a leap in signal and image processing in autonomous and intelligent technologies at the network edge. A key ingredient to automated and intelligent technologies is the processing of signals and images to identify features and the most-likely sequence of events. Current AI/ML solutions are inefficient at dealing with the combinatorial explosion of possibilities and correlations between events at different times [15]. In edge computing, where computing resources and time are constrained, they must introduce severe approximations (e.g. ignoring correlations), which introduce inaccuracies [15]. Various high-value applications in defence, autonomous vehicles etc cannot accept these inaccuracies and thus are seeking a solution. For example, speech-to-text or signal-to-text conversion for human-machine teaming, or feature and behavior identification in satellite/field intelligence and surveillance (see figure 5).

A promising solution is the Hybrid ML-Quantum Decoder,

which is a combination of a neural network operating on a classical computer and a quantum decoding algorithm operating on a quantum accelerator. The neural network accepts a signal or video and generates a high-correlated probability time series of events/ feature identifications. The quantum accelerator then implements the quantum decoder algorithm to efficiently find the most-likely sequence of events [15]. This hybrid approach is distinguished by the benefits of:

- (1) a dramatic speed-up that avoids the approximations and inaccuracies made by current classical technologies, since the quantum decoder algorithm is up to n^5 more efficient than the best classical algorithms (depending on the quality of the neural network's output) [15]
- (2) addressing the memory constraints of quantum computers by using the neural network to filter and compress the large amounts of data in the signal/ video into a dense output that can be encoded in and processed by a modest number of qubits
- (3) adaptability, because the neural network can be re-built/-trained for different applications, whilst the quantum decoder algorithm and accelerator configuration remain the same.

Opportunities for industry and research

At this early stage of quantum accelerators, there are numerous opportunities for researchers and companies to undertake novel high-impact science and development of high-value products and applications. Opportunities include:

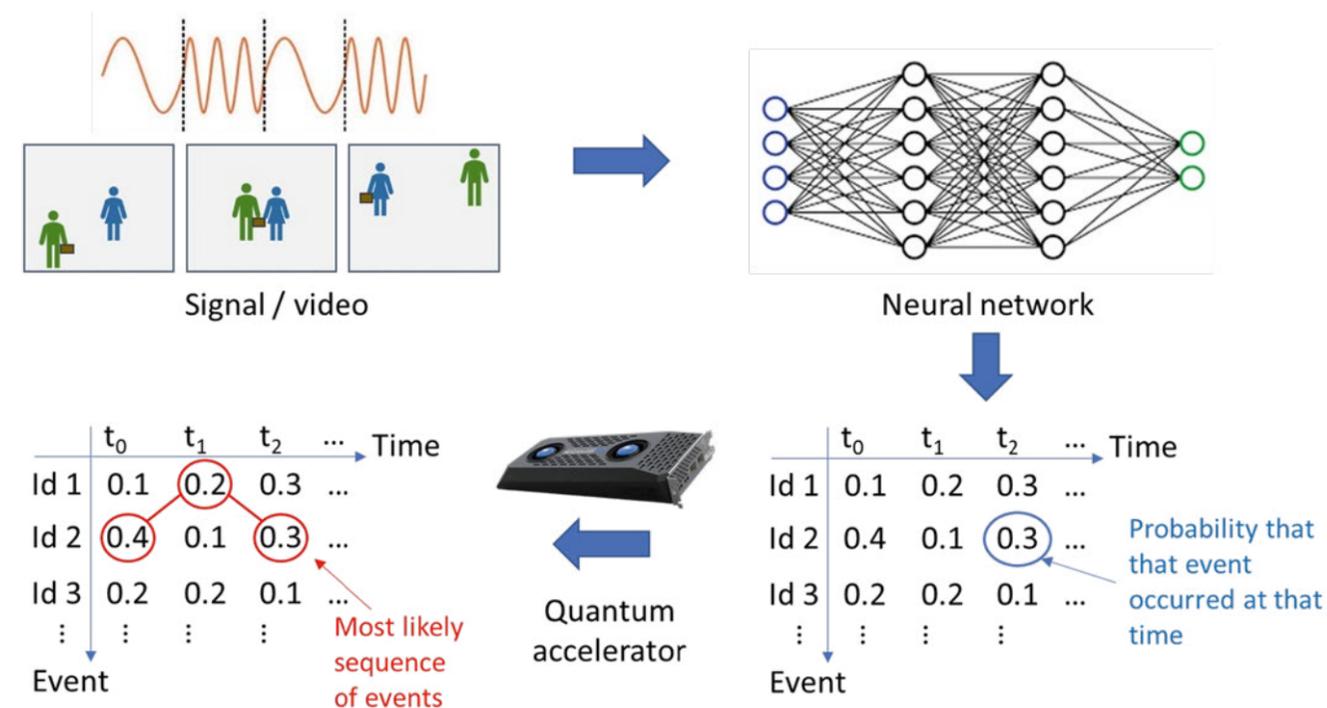


Figure 6: The application of mobile quantum accelerators as hybrid ML-quantum decoders in satellite intelligence and surveillance.

and classical computers, respectively, and exploit the significant efficiency gains of quantum computing methods for quantum chemistry calculations [14]. By parallelizing over many quantum accelerators, rather than just one quantum mainframe, QM/MM simulations of systems of many interacting molecules becomes possible. Thus, enabling a dramatic increase in the size, accuracy and scope of MD simulations. For example, the study of multiple reactions and conformation changes within a system of biochemicals in drug design or the impact of reaction byproducts during chemistry at a solid-liquid interface in catalysis design.

Mobile quantum accelerators promise a leap in signal and image processing in autonomous and intelligent technologies at the network edge. A key ingredient to automated and intelligent technologies is the processing of signals and images to identify features and the most-likely sequence of events. Current AI/ML solutions are inefficient at dealing with the combinatorial explosion of possibilities and correlations between events at different times [15]. In edge computing, where computing resources and time are constrained, they must introduce severe approximations (e.g. ignoring correlations), which introduce inaccuracies [15]. Various high-value applications in defence, autonomous vehicles etc cannot accept these inaccuracies and thus are seeking a solution. For example, speech-to-text or signal-to-text conversion for human-machine teaming, or feature and behavior identification in satellite/field intelligence and surveillance (see figure 5).

A promising solution is the Hybrid ML-Quantum Decoder,

which is a combination of a neural network operating on a classical computer and a quantum decoding algorithm operating on a quantum accelerator. The neural network accepts a signal or video and generates a high-correlated probability time series of events/ feature identifications. The quantum accelerator then implements the quantum decoder algorithm to efficiently find the most-likely sequence of events [15]. This hybrid approach is distinguished by the benefits of:

- (1) a dramatic speed-up that avoids the approximations and inaccuracies made by current classical technologies, since the quantum decoder algorithm is up to n^5 more efficient than the best classical algorithms (depending on the quality of the neural network's output) [15]
- (2) addressing the memory constraints of quantum computers by using the neural network to filter and compress the large amounts of data in the signal/ video into a dense output that can be encoded in and processed by a modest number of qubits
- (3) adaptability, because the neural network can be re-built/-trained for different applications, whilst the quantum decoder algorithm and accelerator configuration remain the same.

Opportunities for industry and research

At this early stage of quantum accelerators, there are numerous opportunities for researchers and companies to undertake novel high-impact science and development of high-value products and applications. Opportunities include:

- Discovery and development of applications of quantum accelerators.
- Design and development of programming languages and software to efficiently employ, manage and optimize integrated clusters of classical computers and quantum accelerators.
- Design and development of software to optimize the compiling of programs for and performance of quantum accelerators.
- Co-design and -development of quantum accelerator hardware for targeted applications.

Importantly, these opportunities lie in fields that may have previously discounted quantum computing as being not applicable, impractical or inaccessible due to the prevailing picture of cloud-access to a few mainframe quantum supercomputers. Thus, quantum accelerators have the potential to reopen as well as add various scientific disciplines, industries and defence sectors to the advantages of quantum computing by enabling massively-parallelized and mobile quantum computing.

If you wish to learn more about how your science or industry can benefit from using quantum accelerators, or if you wish to learn more about how you can engage in R&D of quantum accelerators and their applications, then I encourage you to contact Quantum Brilliance.

Acknowledgements

Figures prepared by Dr Johannes Kostka, Quantum Brilliance.

References: [1] J. Wrachtrup, S.Ya Kilin and A.P. Nizovtsev, *Optics and Spectroscopy* 91, 459 (2001). [2] K. Xu et al *Physical Review Letters* 118, 130504 (2017). [3] Y. Wang et al *ACS Nano* 9, 7769 (2015). [4] F. Kong et al *Physical Review Letters* 117, 060503 (2016). [5] G. Waldherr et al *Nature* 506, 204 (2014). [6] T. Taminiau et al *Nature Nanotechnology* 9, 171 (2014). [7] X. Rong et al *Nature Communications* 6, 8748 (2015). [8] M.W. Doherty et al *Physics Reports* 258, 1 (2013). [9] Y. Chen, S. Stearn, S. Vella, A. Horsley and M.W. Doherty, *New Journal of Physics* 22, 093068 (2020). [10] See for example: I. Bayn et al *Nano Letters* 15, 1751 (2015). [11] M Fuechsle et al *Nature Nanotechnology* 7, 242 (2012). [12] A.J. McCaskey, D.I. Lyakh, E.F. Dumitrescu, S.S. Powers and T.S. Humble, *Quantum Science and Technology* 5, 024002 (2020). [13] P. Atkins and R Friedman, *Molecular Quantum Mechanics* (Oxford University Press: Oxford, 2005); C.J. Cramer, *Essentials of Computational Chemistry: Theories and Models* (Wiley: West Sussex, 2004). [14] See for example: C. Hempel et al *Physical Review X* 8, 031022 (2018). [15] J. Bausch, S. Subramanian and S. Piddock, arXiv:1909.05023 (2020).

Dr Marcus Doherty

Dr Marcus Doherty is a co-founder of Quantum Brilliance and leads the company's R&D programs in the scaling of room-temperature diamond quantum computers, the integration of quantum and classical computing, and the co-discovery and -development of the applications of diamond quantum accelerators.



Quantum Advantage für Europa?



Verfahren der Post-Quantum-Kryptographie führen auch in einem Quantencomputing-Zeitalter zu ausreichender Sicherheit gegenüber Angriffen auf die Datenverschlüsselung.

Wie kaum eine andere Technologie erlebt Quantencomputing derzeit ständige Forschungs- und Anwendungsfortschritte. Der Kampf um die Quanten-Vormacht ist längst entbrannt und zu einem globalen Wettrüsten mutiert. Europa hinkt den Branchenführern aus China und den USA hinsichtlich der Industrialisierung noch hinterher. Umso wichtiger sind gemeinsame europäische Wege, die Europa zu einem ernsthaften Player befördern. Sebastian Luber ist Senior Director im Bereich Technology & Innovation beim deutschen Unternehmen Infineon, das im Quantencomputing durch zahlreiche Innovationen eine zunehmend wichtige Rolle spielt.

Anlässlich der DIGICON 2020 haben Sie einen Vortrag gehalten, was schwarze Schwäne mit Quantencomputing zu tun haben. Erläutern Sie!

In meiner Arbeit bei Infineon beschäftige ich mich regelmäßig mit der Planung von Projekten und deren Absicherung durch ein adäquates Risiko- und Chancenmanagement. Trotzdem kommt es immer wieder vor, dass ungeplante Dinge mit großen Auswirkungen passieren. Das bezeichnen wir manchmal als „Schwarzer Schwan“-Ereignis, abgeleitet aus dem Buch „Black Swan“ von N. Taleb. Dort referiert der Autor über große Auswirkungen unwahrscheinlicher Geschehnisse auf den Weltverlauf. Sehr interessant finde ich dabei Überlegungen, wie man grundsätzlich damit umgehen kann. Neben der Wichtigkeit einer gewissen Grundrobustheit zum Abfedern der Auswirkungen bietet die Dynamik solcher Ereignisse auch oft große Chancen, wenn man schnell darauf reagieren kann.

Quantencomputing, das ja auf einem vollkommen andersartigen Ansatz als klassische Rechner basiert, könnte nun auch zu disruptiven Entwicklungen mit entsprechenden Chancen und Risiken führen, auch wenn solche Zukunftsvorhersagen natürlich immer mit Vorsicht zu genießen sind.

Wie kann Quantencomputing in puncto Energieeffizienz behilflich sein?

Hier sehe ich mehrere Aspekte: Zum einen bei der Reduzierung des Energieverbrauchs von Computern selbst. Ein Quantencomputer kann bestimmte Aufgaben deutlich energieeffizienter lösen als ein klassischer Rechner, das wurde auch bereits im Experiment mehrfach nachgewiesen. So hat Google im Oktober 2019 in der Fachzeitschrift Nature veröffentlicht, dass sie mit einem Quantencomputer aus supraleitenden Schaltkreisen eine Rechnung durchführen konnten, die auf einem klassischen Rechner ein Vielfaches an Zeit und damit auch Energie gebraucht hätte. Allerdings funktioniert das bisher nur für rein akademische Fragestellungen. Bei hoffentlich erfolgreicher Weiterentwicklung ist aber davon auszugehen, dass auch praxisrelevante Probleme für Quantencomputer zugänglich wer-

den. Einer der ersten adressierbaren Bereiche ist dabei wahrscheinlich die Chemie und deren Herstellungsprozesse wie z. B. das Haber-Bosch-Verfahren für die Herstellung von Stickstoffdünger. Allein hierfür wird weltweit eine riesige Menge an Energie verbraucht. Möglicherweise könnte eine bessere Simulation von chemischen Reaktionen mittels Quantencomputern hier zu Einsparungen führen.

An welcher Schaltstelle von Infineon arbeiten Sie und was hat Ihre Tätigkeit mit Quantencomputing zu tun?

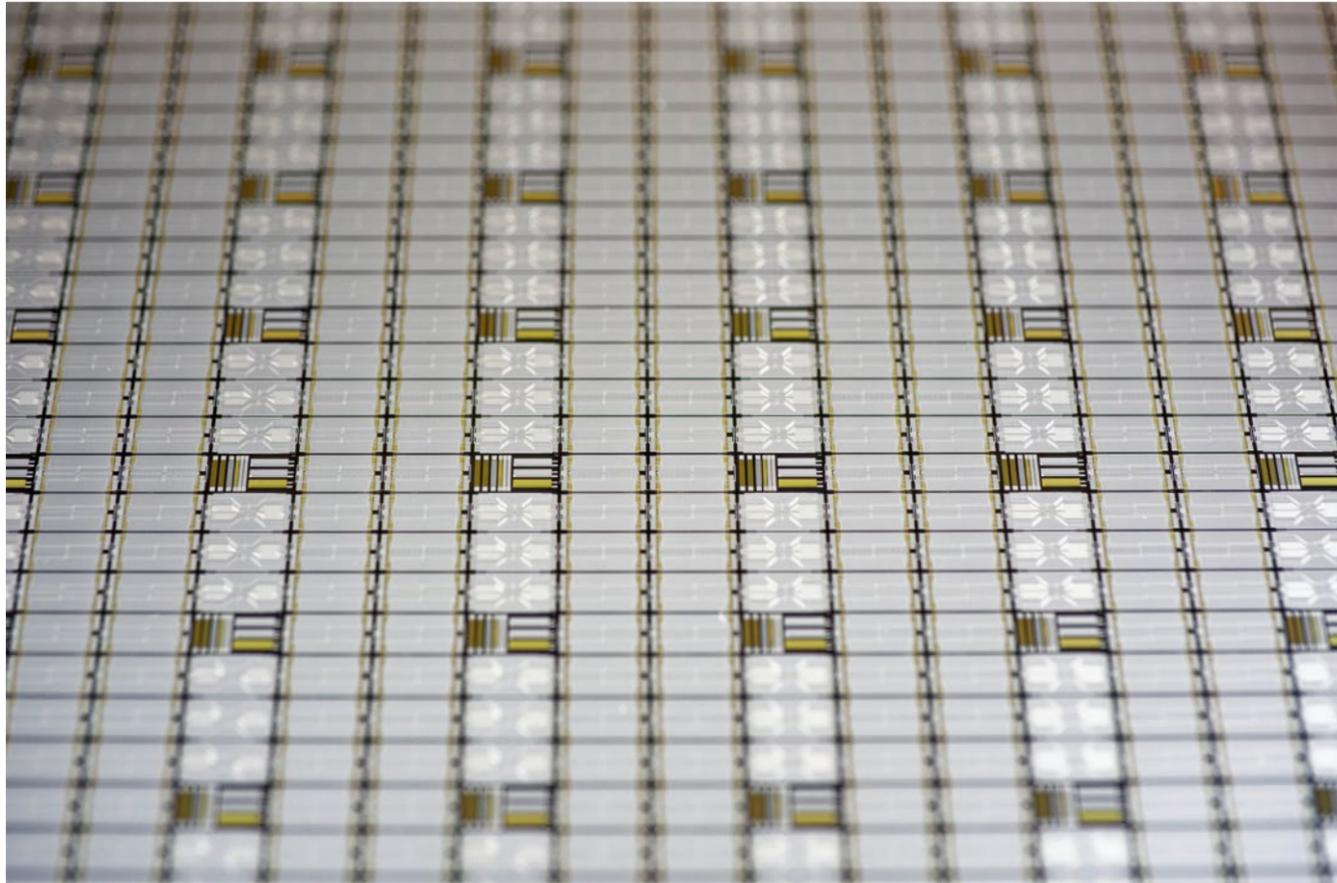
Ich selbst bin in der Technologie & Innovationsabteilung der Automotive Division beschäftigt, das ist der größte von insgesamt vier Infineon Geschäftsbereichen. In dieser Abteilung behandeln wir vor allem Fragestellungen, die übergreifend für die gesamte Automotive Division relevant sind. Das Thema Quantencomputing betrachte ich allerdings vor allem in meiner Rolle als Leiter einer sogenannten iCommunity

zu Quantentechnologien der zweiten Generation. Eine iCommunity ist eine konzernweite Expertengruppe mit Mitgliedern unterschiedlicher Geschäftsbereiche. Nachdem Infineon keine zentrale Forschung hat, nutzen wir gerne solch eine Struktur für die Behandlung langfristiger Themen, wie es die Quantentechnologien und davon insbesondere das Quantencomputing sind.

Was ist das Potenzial eines Quantencomputers in Relation zum herkömmlichen Computer?

Riesig und beschränkt zugleich. Ein universeller Quantencomputer hat einerseits das Potenzial, bisher quasi unlösbare Aufgaben für uns zugänglich zu machen. Ein gern genommenes Beispiel ist das Faktorisieren großer Zahlen, auf dessen Basis viele herkömmliche Verschlüsselungsverfahren aufgebaut sind. Während hier klassische Computer nur sehr aufwendige Algorithmen nutzen können, gibt es mit dem Shor-Algorithmus für Quantencomputer ein sehr effizientes Verfahren, das in Kombination mit einem leistungsfähigen System viele gängige Verschlüsselungscodes in kürzester Zeit knacken könnte. Andererseits kann ein Quantencomputer seine Stärken bisher auch nur bei speziellen Problemstellungen ausspielen. Er ist daher eher

„Ein Quantencomputer kann bestimmte Aufgaben deutlich energieeffizienter lösen als ein klassischer Rechner, das wurde auch bereits im Experiment mehrfach nachgewiesen.“



Industrielle Fertigungsverfahren ermöglichen die Herstellung hochreproduzierbarer Ionenfallenchips mit skalierbaren Designs (Kontakt: Dr. C. Rössler)

als Ergänzung für klassische Computer zu sehen, der aber in bestimmten Bereichen disruptives Potenzial hat.

2017 hat Infineon die erste Post-Quantum-Kryptographie auf einem kontaktlosen Sicherheitschip entwickelt. Was ist das genau?

Die Post-Quantum-Kryptographie („Post Quantum Cryptography“, PQC) soll auch nach („post“) einer zukünftigen Verfügbarkeit leistungsfähiger Quantencomputer eine ausreichende Sicherheit bei der Datenverschlüsselung ermöglichen. Infineon hat dazu den New-Hope-Algorithmus realisiert. Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes Schlüsselaustauschsystem. Es erlaubt zwei Parteien, ein Geheimnis bzw. einen Schlüssel auszuhandeln, auch wenn ein Angreifer die Kommunikation beider Parteien abhört.

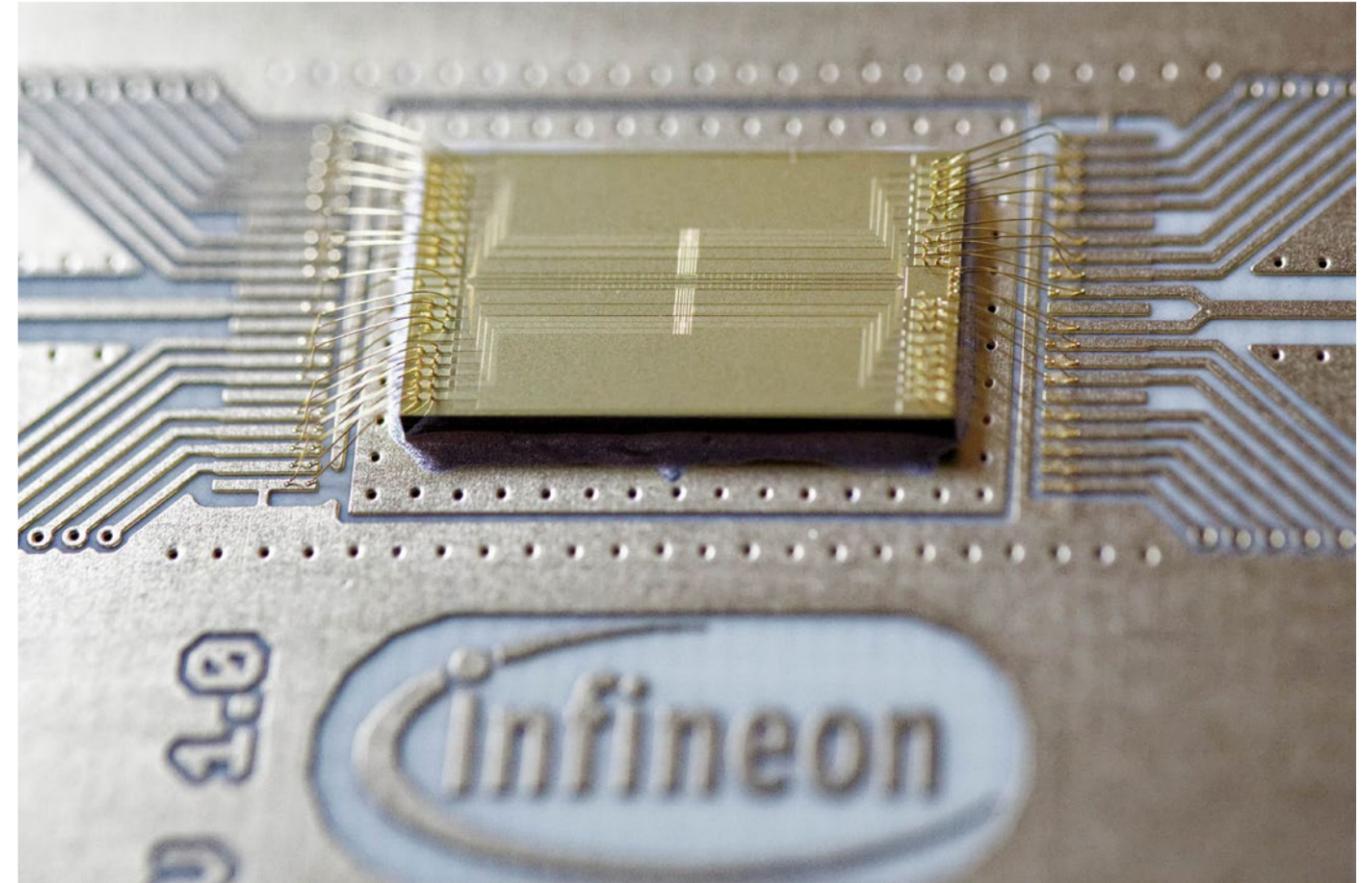
Dieser ausgehandelte Schlüssel wird dann für die Absicherung der weiteren Kommunikation genutzt. Dies ist z. B. wichtig, wenn ein kontaktloser Sicherheitschip wie ein Reisepass oder eine EC-Karte mit einem Terminal kommuniziert. Angreifer sollen dabei nicht in der Lage sein, die Daten – z. B. mittels einer Antenne aus der Entfernung – mitzulesen oder zu verändern. Die Herausforderung auf kontaktlosen Sicherheitschips besteht darin, die neuen Verfahren mit wenig Speicher zu implementieren und sicherzustellen, dass diese auch mit kontaktloser Stromversorgung noch ausreichend leistungsfähig sind.

„Wichtig wird auch eine gute Unterstützung von PQC-Algorithmen in kommenden Hardwaregenerationen, um durch eine Umstellung keine Einbußen bezüglich Performance und Sicherheit zu erleiden.“

Was ist seitdem an neuen Technologien technisch passiert, was ist schon in unserem Alltag implementiert?

Seit 2017 hat es große Fortschritte in der Standardisierung und Verbesserung von Angriffen gegeben. Da die neuen Standards aber noch nicht finalisiert sind, ist PQC noch nicht im Alltag angekommen. Kryptographen sind in der Regel sehr konservativ und wollen sicherstellen, dass die Verfahren nach ihrer Einführung auch das erwartete Sicherheitslevel einhalten können. Dies ist sicher sinnvoll, da ein Umstieg auf neue kryptographische Verfahren sehr aufwendig und teuer ist. Allerdings steigt das Bewusstsein für die Notwendigkeit für einen Umstieg in vielen Bereichen der Industrie. Dazu hat etwa das BSI schon Handlungsempfehlungen für den Hochsicherheitsbereich ausgesprochen.

Dort müssen Daten für mehrere Jahrzehnte geschützt werden und eine Absicherung gegen Quantenangriffe ist dringend erforderlich. Wichtig wird auch eine gute Unterstützung von PQC-Algorithmen in kommenden Hardwaregenerationen, um durch eine Umstellung keine Einbußen bezüglich Performance und Sicherheit zu erleiden. Dies ist etwas, woran wir aktuell bei Infineon und mit Partnern in Forschungsprojekten wie Aquorypt, FutureTPM oder PQC4MED arbeiten, gefördert vom BMBF und der EU im Rahmen des Horizon 2020 Programms.



Professionelle Aufbau- und Verbindungstechnik und Standard-Sockel unterstützen einen modularen Aufbau und weitere Skalierung. (Kontakt: Dr. C. Rössler)

Infineon ist Europas größter Halbleiterhersteller. Was haben Halbleiter mit Quantencomputern zu tun?

Es gibt ja momentan noch viele konkurrierende Ansätze, um einen Quantencomputer zu realisieren. Manche davon basieren ähnlich wie heutige klassische Computer auf Halbleitern, das heißt, dass die elementaren Bausteine der Quantencomputer, die sogenannten Qubits, direkt im Halbleiter realisiert werden. Aber auch bei anderen Ansätzen ist eine Menge an klassischer Halbleiter-Elektronik nötig, um einen Quantencomputer zum Leben zu erwecken. Und vor allem hinsichtlich einer Weiterentwicklung der heutigen, doch noch sehr limitierten Quantenprozessoren, wird die Expertise der Halbleiterindustrie hinsichtlich Skalierung und Fertigungsprozessen immer wichtiger. Das liegt daran, dass in der Halbleiterindustrie standardmäßig Millionen Bauteile in gleichbleibender Qualität gefertigt werden müssen, um deren Funktionsfähigkeit zu garantieren. Die Methoden, die das ermöglichen, helfen auch dabei, identische Qubits zu realisieren. Kleine Abweichungen der Qubits oder deren Umgebung würden einer Skalierung zu größeren Systemen im Wege stehen.

Jüngst hat Infineon den Prototypen eines neuen Quantenprozessors auf Ionenbasis vorgestellt, der für die industrielle Realisierung optimiert wurde. Was verbirgt sich dahinter und warum könnte es Infineon auf die Überholspur bringen in der Quantentechnologie?

Der 2 x 9 Ionen-Quantenprozessor war unser Pilot, um zu zei-

gen, wie die industrielle Fertigungskette eines Ionenprozessors vom Konzept bis zur Applikation realisiert werden kann. Die dort verwirklichte parallele Anordnung zweier Ionen-Arrays konnte einen Schritt in Richtung Skalierung jenseits rein linearer Ketten aufzeigen, ein wichtiges Ergebnis auf dem Weg zu einem leistungsfähigen Quantencomputer. Durch unsere Fertigungskompetenz sowie starke akademische Partner an der Universität Innsbruck und der ETH Zürich schaffen wir schnelle Lernzyklen und können unsere ersten Prototypen zügig zu mittelskaligen Quantenprozessoren weiterentwickeln.

Wir befinden uns ökonomisch in einer schwierigen Zeit. Was hat das für Einflüsse auf die Vermarktung von Quantencomputing?

Die unterschiedlichen Bereiche der Wirtschaft sind ja unterschiedlich stark durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie betroffen. Während zum Beispiel die Reisebranche massive Einbußen zu verzeichnen hat, sieht man eine weiter zunehmende Dynamik in der Digitalisierung. Deswegen sehe ich von dieser Seite eher eine positive Entwicklung für die Vermarktung. Besorgniserregender ist aus meiner Sicht die Zunahme der wirtschaftlichen Auseinandersetzungen weltweit, vor allem zwischen den USA und China. Hier zeigt sich die Wichtigkeit einer starken und eigenständigen europäischen Wirtschaft einhergehend mit einer technologischen Souveränität. Dazu braucht es immer wieder mutiges und schnelles Handeln und eine kontinuierliche Umsetzung der ja exzellenten Forschung in

die Wirtschaft mit starken Unternehmen. Und eine Akzeptanz in Politik und Gesellschaft, dass auch manche Versuche dabei krachend scheitern werden.

Nehmen wir ein herkömmliches mittelständisches Unternehmen: Wann und vor allem wie würden Sie ihm empfehlen, auf Quantencomputing zu setzen?

Das hängt sicher sehr von der Branche ab, in dem das Unternehmen aktiv ist, und welche Aufgaben dort anfallen. Vor allem Unternehmen, die komplexe Simulations- und Optimierungsanforderungen haben, werden wahrscheinlich als erste von Quantencomputern profitieren können. Darunter fallen beispielsweise die Chemie-, Finanz- und Automobilbranche. Und auch wenn der praktische Nutzen von Quantencomputern noch etwas entfernt scheint, so ist gerade für diese Branchen aus meiner Sicht eine frühzeitige Beschäftigung mit Quantencomputern zu empfehlen. Die Nutzung solcher Systeme unterscheidet sich doch deutlich von klassischen Computern und benötigt andersartige Kompetenzen, die nicht von heute auf morgen aufgebaut werden können. Wahrscheinlich am sinnvollsten ist dafür der Aufbau von Partnerschaften entweder mit Quantencomputing-Unternehmen bzw. Startups selbst oder mit engagierten Forschungsgruppen. Und dann gibt es natürlich auch noch die Anbieterseite, auf der sich mittelständischen Unternehmen zusätzliche Absatzmöglichkeiten eröffnen könnten. Hier wären Elektronik, Photonik oder Tieftemperaturtechnologie ebenso wie Softwarelösungen Beispiele für relevante Bereiche.

Wie bewerten Sie den „Systemwandel“, der gerade zwischen herkömmlichem Computing und neuem Quantencomputing passiert? In welchem Zeitraum wird der Quantencomputer ein nicht mehr verzichtbarer Standard für breite Teile der Wirtschaft sein? Was sind noch zu überwindende Hindernisse?

Systemwandel ist vielleicht etwas hoch gegriffen. Auch wenn Quantencomputer in der Zukunft zu massiven Verbesserungen in einigen Bereichen führen können, so sehe ich sie doch als Ergänzung zu klassischen Computern und nicht als Ersatz. Trotzdem ist das Potenzial beträchtlich, was mich wieder zu den „schwarzen Schwänen“ bringt. Und der nötigen Bereitschaft, sich bietende Gelegenheiten und Chancen aus einer Anwendung von Quantencomputern zu ergreifen und sich so einen Vorteil gegenüber der Konkurrenz zu verschaffen. Die Schätzungen, ab wann Quantencomputer in der Breite zum Einsatz kommen werden, variieren natürlich. Persönlich rechne ich mit ersten wirklich praxisrelevanten Anwendungen in fünf bis zehn Jahren, während leistungsfähigere Rechner – beispielsweise für das Knacken heutiger Verschlüsselung – sicher noch etwas weiter entfernt sind.

Es gibt allerdings noch einige Hindernisse zu überwinden. Auf Hardwareseite liegt ein Großteil der Herausforderungen für eine Weiterentwicklung im Engineering. Da bin ich angesichts der Erfolgsgeschichte der Halbleiterindustrie sehr zuversichtlich, dass bei entsprechenden Investitionen auch praktikable Lösungen gefunden werden. Gleiches sehe ich für die Software. Es gibt aber teilweise auch noch auf der physikalischen Ebene die Notwendigkeit zu signifikanten Verbesserungen, z. B. bei den Eigenschaften der elementaren Bausteine, den Qubits. Hier

kann es sicher immer noch passieren, dass sich eingeschlagene Pfade als Sackgassen erweisen, auch wenn man schon weit vorangekommen ist.

Ihr Ausblick: Wie steht es um die sog. „Quanten Supremacy“ oder den „Quantum Advantage“? Hinkt Europa anderen Kontinenten nach oder ist das Quantencomputing ein globales Projekt, an dem am Ende jeder profitiert? Und wie steht Deutschland im internationalen Vergleich da?

Mit dem Erfolg von Google bei supraleitenden Schaltkreisen und den kürzlich veröffentlichten Ergebnissen einer chinesischen Forschergruppe basierend auf Photonen ist aus meiner Sicht auch im Experiment hinreichend nachgewiesen, dass Quantencomputer Aufgaben schneller lösen können als klassische Computer, was auch als „Quantum Supremacy“ bezeichnet wird. Wo bei sich natürlich die Messlatte durch Verbesserungen bei klassischen Computern oder durch Anwendung von künstlicher Intelligenz immer wieder verschiebt. Wohl auch deswegen gibt es hier immer wieder einen Disput, aber für mich ist dieser Meilenstein definitiv erreicht.

Für einen Quantenvorteil in relevanten Anwendungen, also einen „Quantum Advantage“, sind sicher noch einige Entwicklungsschritte nötig. Aber ich bin optimistisch, dass diese auch in absehbarer Zeit erreicht werden.

International sehe ich beim Quantencomputing Deutschland und Europa in einer ähnlich paradoxen Situation wie in anderen Bereichen der Digitalisierung. Während es exzellente Forschung hierzulande gibt, sind andere Länder in der wirtschaftlichen Verwertung der Ergebnisse besser und schneller. Aber eigentlich gibt es keinen Grund, warum wir das nicht auch schaffen sollten. Und mit den in Aussicht gestellten Mitteln des Konjunkturpakets der Bundesregierung und den verschiedenen Länderinitiativen gibt es eine gute Anschubfinanzierung, also packen wir's an!

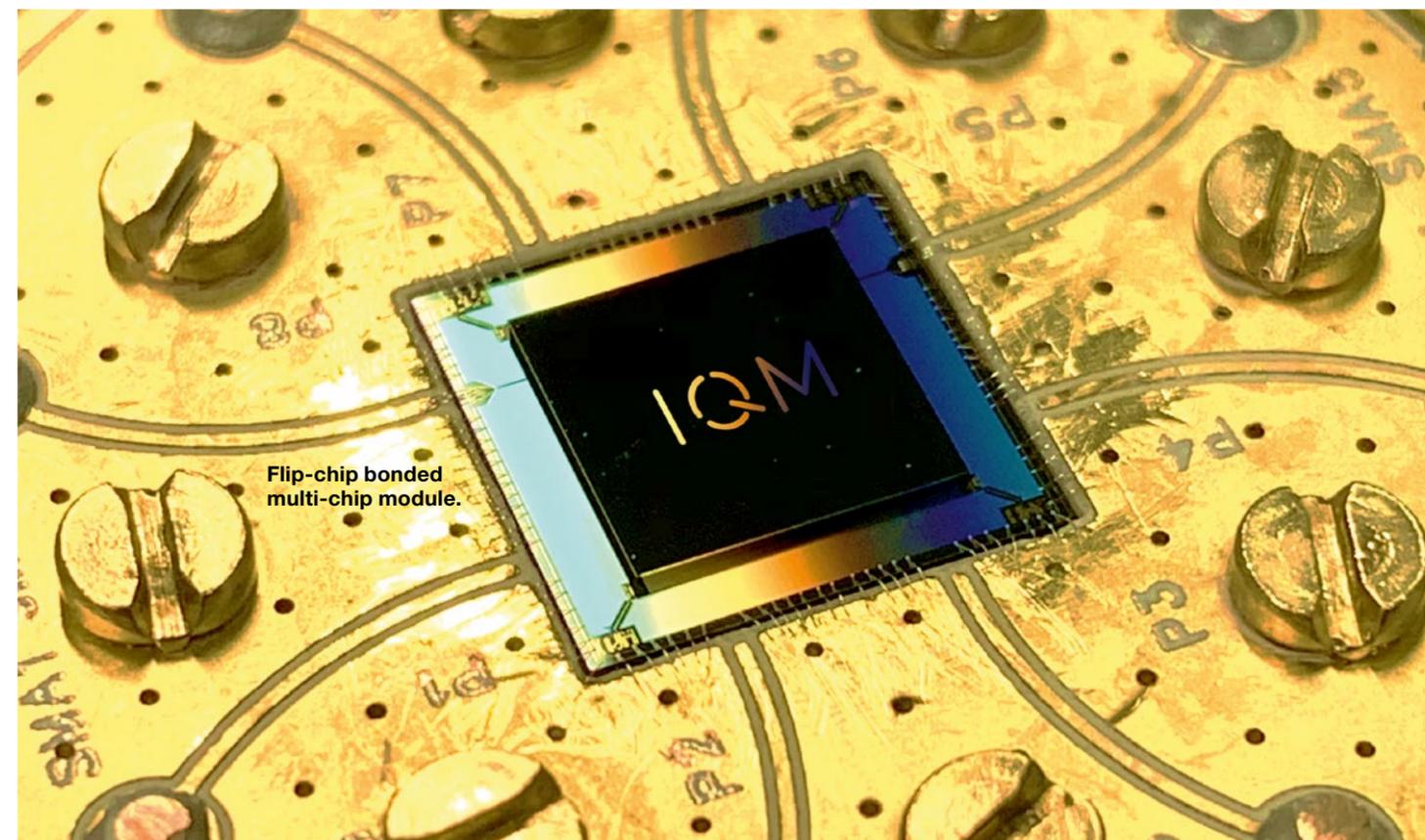
Interview: Hannes Mittermaier

Dr. Sebastian Luber

Dr. Sebastian Luber ist promovierter Physiker und Senior Director für Technology & Innovation bei der Infineon Technologies AG. Als Leiter einer konzernweiten Expertengruppe („iCommunity“) zu Quantentechnologien der zweiten Generation ist er in verschiedenen Gremien zu Quantentechnologien engagiert, unter anderem war er auch Mitglied des Expertenrats der Bundesregierung zur Ausarbeitung einer nationalen Roadmap Quantencomputing. Davor war Luber in verschiedenen Funktionen im Unternehmen tätig. Unter anderem als Technology Line Manager für MEMS Technologien, als Leiter standortübergreifender Forschungs- und Entwicklungsteams für automobiler Sensortechnologien und als Programmleiter für digitale Drucksensoren.



Fotos: Infineon Technologies Austria (62), Privat



Closing the gaps in Quantum Computing: Co-Development and Co-Design

IQM Quantum Engineers

IQM Quantum Computers

The current attention to quantum computing thrives on the great promises this technology makes. To commercialize quantum computing, however, one still must close gaps in product-market fit and technology. We introduce two independent business models that have the potential to close both gaps in a consecutive manner. For the first business model, we give an example and technical details of its implementation. For the second model, we give a possible integration path and comment on the business potential. Such novel approaches to quantum computing are necessary to attract the necessary capital and the scarce quantum talents to create an ecosystem for full-stack, scalable quantum computers.

1. Current gaps in quantum computing

Quantum computing promises to be a disruptive technology in the field of high-performance computing. Its possible applications range from material science, finance, drug design, to novel applications for machine learning and artificial intelligence [1,2].

Much of the promise of quantum computing comes from the exponential growth in computing power with increasing number of qubits in a quantum computer, which are the equivalent of a bit in a quantum computer. Where bits in a traditional computer can be either one (1) or zero (0) qubits can be in a state called superposition. This can be imagined

as if the qubits were in multiple states at the same time. The second resource from quantum mechanics a quantum computer makes use of is entanglement, which is a strong correlation between qubits only possible for quantum systems.

While the concept of superposition and entanglement has already many times been proven in both science and practice, much of the effort in quantum computing is centered on reaching quantum advantage: connecting technological achievements to solve real-world problems. Quantum advantage means the inflection point where quantum computers outperform any classical computer in a specific meaningful and useful task. Reaching this goal is a grand scientific, technological, as well as a business challenge. Many quantum computing teams, whether in academia, startups, or in technology giants, are racing to achieve quantum advantage first. The challenge is great due to the multi-fold nature of the problem, but the potential rewards are even greater. Once quantum advantage has been demonstrated in a specific business problem, it will lead to the rapid expansion of the quantum computing market. On the way there, at least two big gaps to reach quantum advantage can be identified. Both need to be solved by the quantum computing community.

a. Gap in quantum computing technology

The first gap arises from technology, where the current challenge is that the known algorithms for the aforementioned applications require more powerful hardware than what is currently available [3]. For a fault-tolerant approach to quantum computing, the main challenge is the required number of qubits and the necessity of error-correction to fully execute many useful algorithms. The currently available approach to quantum computing uses so called Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) computers. In a NISQ device, the number of qubits inside the machine is limited and the qubits are affected by all kinds of environmental noise, leading to insurmountable errors in the calculations.

A simple, even though insufficient, benchmark for the hardware is the number of qubits integrated in a quantum processor. While the community is currently at 50+ qubits, true quantum advantage will require hundreds or even thousands of qubits, all of excellent quality, to be reached [4]. Rapid progress is being pursued both on the hardware and the algorithms sides to close this gap [2]. Another aspect of the technology gap is the uncertainty for which application quantum advantage will be reached first. Much work still needs to be done to not only define the correct fields for the first applications of quantum computing, but also to pinpoint the exact problems to solve within those fields. This requires interdisciplinary work, incorporating domain knowledge of each discipline coupled with deep understanding of quantum computing.

To ensure continuous progress on the way to quantum advantage, the system size of quantum computers should progress in parallel with software developments, meaning that enough resources must be dedicated to hardware development. With fast development in software before the hardware has been developed and deployed, the benefits of such software will not be realized. Another scenario is that with insufficient hardware development, much of the software innovation and

development will dwindle. One approach to efficiently develop the hardware further is proposed in Sec. 2, where we present a Co-Development approach for quantum computers in a public-private partnership.

A shortcut that could close the technology gap is to utilize application-specific quantum processors, that we call QuASICs. Their classical counterparts (ASICs or Application-Specific Integrated Circuits) have been used for decades in computing for several applications [5]. The concept of QuASICs promises to deliver a hardware-efficient shortcut to quantum advantage. One specific way to do so is described in Sec. 3, where we describe how QuASICs can be designed through a Co-Design approach where hardware and algorithms are jointly developed and adapted to a specific problem.

b. Gap in product-market fit

The second gap relates to the creation of markets for quantum computing from a business point of view. The current generations of quantum computers mainly serve educational and research purposes, and at most implement proof-of-concept solutions for real world problems. While education and research are notable markets in itself, the desired solutions are often highly customized while the sales volume is small. Product and component reusability issues need to be resolved to create a sustainable business in the quantum computing industry. The challenge also comes back to the question about the first use-cases for quantum computing and the industry's willingness to invest upfront. If there is no industry involvement in the search of specific industry and scientific area specific solutions, the development of quantum computing will be impeded.

Generally, there are at least three potential markets for quantum computing that fulfill the above criteria: Education, scientific computing, and industrial applications. The success factors in these markets are very similar to the classical High-Performance Computing (HPC) market. Just like for HPC markets, it can be assumed that now and for the foreseeable future on-premise quantum computers will be expensive machines that take a certain amount of space and consume a lot of electricity. Also, while some argue that quantum computing should be delivered via the cloud from the very beginning, the cloud might not be the right choice for some applications where direct access to the machine is required. Such applications include teaching, cases where the information being processed is sensitive, or where network latency and queuing for quantum computing slots mandate an on-premise solution.

As stated before, three main early markets for quantum computing are education, scientific computing, and industrial applications. Below, we discuss the potential and gaps in each market.

In education, the early access to the upcoming technology is key to enable future engineers. Educational applications can also accept high maintenance and low availability, which translate to low fidelity, small number of qubits, and considerable downtime. High maintenance and low availability are the characteristics of early quantum computers, as are small qubit numbers. The education market can tolerate these factors as the whole point of having quantum computers in the education

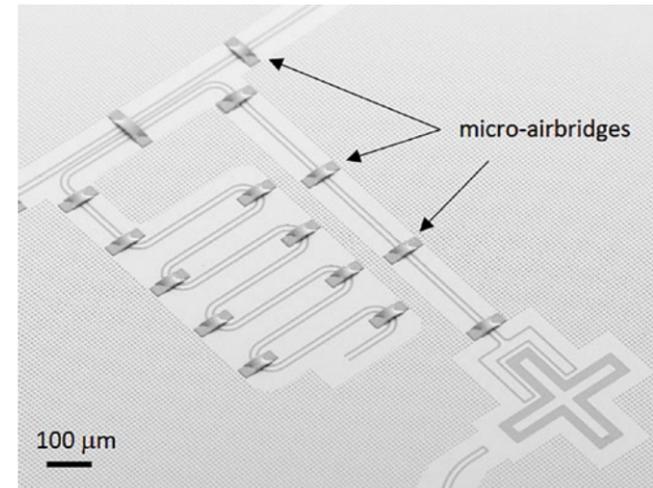


Figure 1: Scanning electron micrograph of a fabricated single qubit transmon, coupled to a coplanar waveguide readout resonator and transmission line. In this qubit device, on-chip micro-airbridges are applied to improve the grounding at microwave operating frequencies.

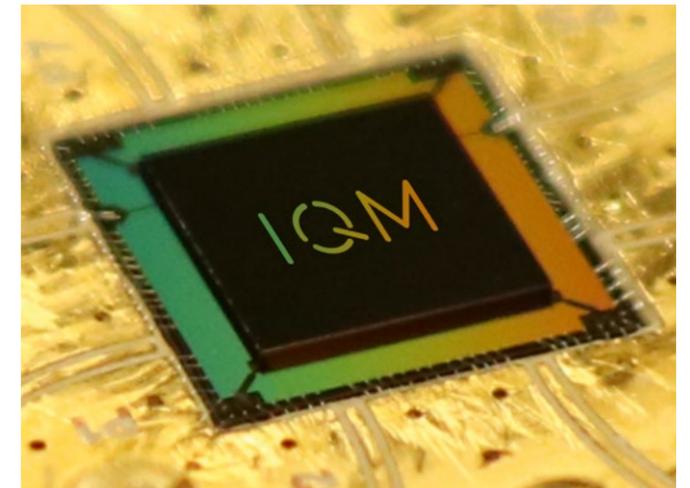


Figure 2: Optical micrograph of a flip-chip bonded multi-chip module that has superconducting inter-chip routing.

space is to train the next generation of quantum physicists and quantum computing experts. This market can also be expanded by using educational systems to provide quantum readiness to companies, e.g., via cloud access to the system.

The second market is scientific computing, which aims to solve hard scientific problems not accessible analytically. In this area domain knowledge and the ability to adapt the computing system can be assumed, which makes it easier for the scientific computing audience to be early adopters of quantum computing systems. In addition, they tolerate limited usability and availability as they are aware of the initial limitations. Generally, in scientific computing the problems to be solved are massive and complex, often intractable yet life-changing. Therefore, any form of accelerators like quantum computers, even with the limited capabilities at early stages, are welcome. In Sec. 2 we present a solution to close the gap in the two above mentioned markets by developing on-premise systems for research and education in a Co-Development approach.

The last of the early markets is industrial applications. Out of the three, this one has the most stringent requirements. In this market, generally perfect functionality is presumed, as well as commercial-grade usability and availability. Certain corporate or industrial users might loosen their strict criteria in order to train their people in quantum computing. Most customers will, however, require very well-defined specifications and a high technology readiness level. Therefore, this market will most likely be the last one to be exploited.

Closing the gap in product-market fit for quantum computing is all about identifying the 'low-hanging fruits' for the third market related to industrial use-cases. Hence, building solutions for real-world applications that can be executed on NISQ devices is a top priority. While the potential of the field

is great, it is also important to identify the right markets that tolerate certain characteristics of early quantum computers. This means that quantum computing companies can generate revenue with the near-term technology and solutions. We present a possible solution to close this gap in Sec. 3 through a partnership approach between end-users and quantum computing providers.

2. Business model 1: System sales to early adopters

The level of complexity of quantum computing technology, especially in building large-scale quantum processors, is at the threshold where scalability cannot be addressed in research institutions alone. Instead, product-oriented development processes from industrial companies are required to build the next generation of large-scale quantum computers.

The main objective is not just the construction of more and better-quality qubits, but the integration and scaling of these together with the electronics and control software. Today, this has been achieved for several dozen qubits, and several hundred are projected soon. This level of development with the scaling challenges is analogous to the situation of biotech companies about 5-8 years ago when developing today's life-saving mRNA technology platform.

The same also applies in the space sector, where the state stimulates the market with large orders from startups. In this parallel, government stimulus mobilizes the procurement function for quantum computers and eliminates the early market risk of the burgeoning industry before the technology is mainstream around the middle of the decade. A market-oriented

T₁, T₂ by Cooldown date

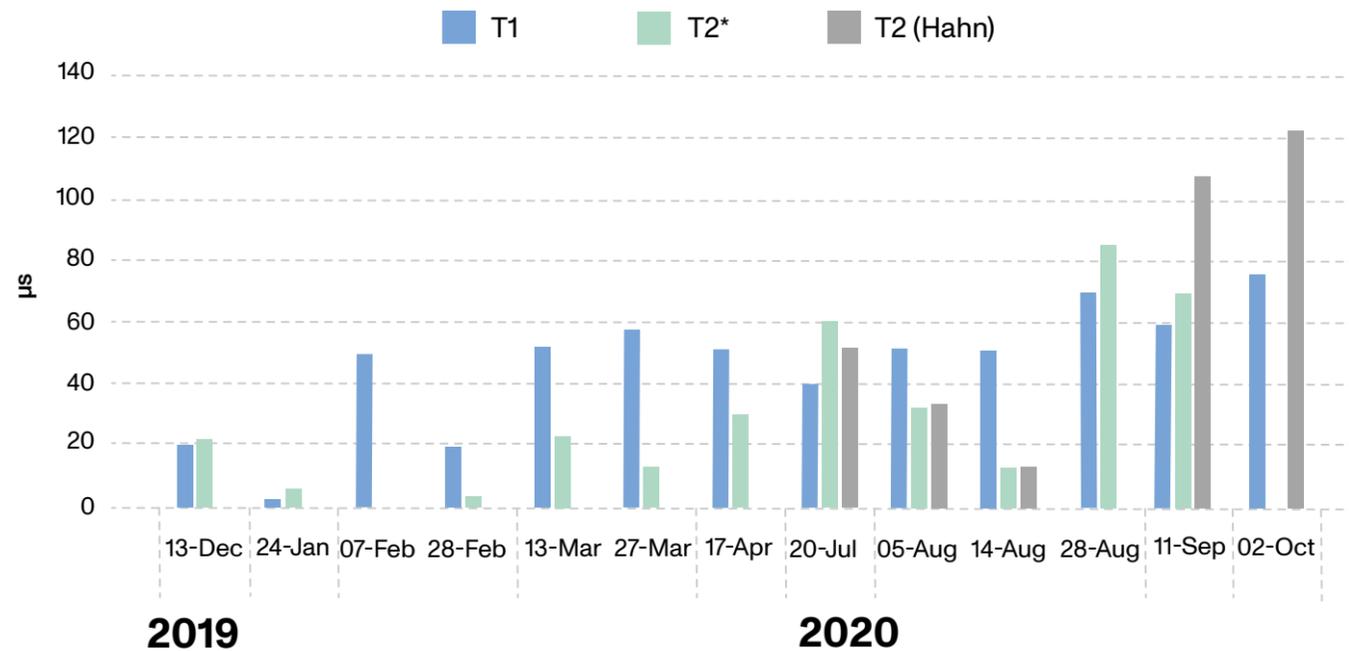


Figure 3: Measurements of qubit coherence data for fabricated single qubit devices from October 2019 till October 2020 with various design and fabrication recipes for process development varied in different batches.

state stimulus pulls the suppliers in an industrial consortium on a learning curve to cost-effective, reliable production. This has created a market for on-premise quantum computers for research and education today.

a. Self-amplified R&D process through Co-Development tenders

One way to efficiently scale the systems and their capabilities is through Co-Development in existing ecosystems. To implement these ecosystem efforts to build quantum computers, a system integrator who can bundle the capabilities available in an existing ecosystem is required to ensure success. This system integrator can work together with industry partners and local research centers. Commercial tenders can be an appropriate way to go in order to ensure that both the ecosystem requirements are met, and commercial traction for the system suppliers is generated.

The above-mentioned Co-Development projects, or generally projects centered around hardware procurement and development, are key drivers of the ecosystem development. This is because available hardware will result in more knowledge of the systems via tests and experiments. In addition, these development projects will create and encourage new teams and startups to participate. Without such tangible opportunities the development might take much longer.

b. Example: Finland's first quantum computer:

One way to implement such a self-amplified R&D process is shown in Finland, where VTT Technical Research Centre of Finland (VTT) announced in late 2020 that it will be developing a quantum computer together with IQM as a partner chosen in a competitive tender. The Finnish quantum computer project, with a government funded budget of 20.7 million EUR in total [6], aims to co-develop quantum computers in three consecutive phases: 5, 20, and 50 qubits. The overarching goal for the project is to become the catalyst to kick-start the proper development of the industrial quantum sector. To enable the development, the delivered system will be open so that all Co-Development partners benefit in the best possible way.

The quantum computing platform in this project is the superconducting transmon qubit. This is the most popular choice of qubit across the industry for the moment due to its desirable properties in terms of controllability and resilience to noise. The qubits are fabricated on high-resistivity silicon wafers that are cooled down by dilution refrigerators to near absolute zero at 20mK (-273° Celsius) during operation.

The qubit circuits are fabricated at the Micronova clean-room facility in Espoo, Finland. The current process relies on ultra-low-loss linear microwave structures fabricated from sputtered niobium using optical lithography with a typical

minimum feature size of about 3 μm. In addition, electron beam lithography is used to define aluminum structures that serve as Josephson junctions. The junctions are made from a layer of aluminum oxide between aluminum leads, acting as the nonlinear elements of the qubit system. These nonlinearities make it possible to isolate the two lowest energy states of the system, so that the circuit can be used as a qubit. The process is based on 150 mm high-resistivity silicon wafers. A superconducting niobium film is first deposited and etched into microwave components, followed by the electron beam lithography and shadow angle evaporation to define the Josephson junctions.

Apart from the qubits itself, the fabrication process makes use of superconducting 3D integration technologies to enable building scalable quantum processors. One approach for 3D integration are superconducting airbridges (see Figure 1). They enable flexible signal routing by allowing crossing of signal lines and therefore to create non-planar connectivity between qubits. The airbridges also improve the coherence times and controllability of the qubits by improving the microwave properties of the chip. For future scaling of the processor size, more advanced technologies than airbridges are needed. One solution is a superconducting flip-chip technology (see Figure 2), that allows control lines to access qubits packed in a 2D array from above. This way even the qubits in center of the 2D grid can be addressed with microwave pulses. Future developments include the development of control lines coming from below the chip, also known as through-silicon-vias (TSVs). They will enable stacking modules on top of another to pack more qubits into the QPU while leaving an access path to control the qubits in all layers.

The most important metric that defines qubit quality is the time for which a qubit can store quantum information. This time is described by two timescales called T₁ and T₂ respectively. T₁ describes the timescale at which energy of the qubit decays, in other words how long the qubit can stay in the 1-state before spontaneously decaying into the 0-state. T₂ on the other hand describes the timescale at which the coherence of the quantum state is kept alive. To analyze the quality of our qubits, we present data of measurements in single qubits. The data points in Figure 3 show the development of the T₁ and T₂ times since we started experiments approximately one year ago. The T₂ time can be measured in multiple different ways, two of which are shown here (T₂* and T₂ Hahn). These times are important figures of merit showing not only the quality of the materials and fabrication process, but also the control over the measurement environment and protection from environmental noise. For qubit frequencies of 3 GHz and a T₁ of 76 μs, the intrinsic qubit quality factor is approximately 2 × 10⁶, which is state of the art.

To implement 2-qubit gates, we use transmon qubits with flux-tunable couplers (Figure 4). Specifically, we have demonstrated on-demand iSWAP gate operations. The iSWAP is a gate that can be used to create entanglement and is an important building block towards a large-scale quantum computer. Figure 5 shows how the populations in the two qubits are being exchanged while the iSWAP interaction is turned on.

While developing process-tomography techniques for the

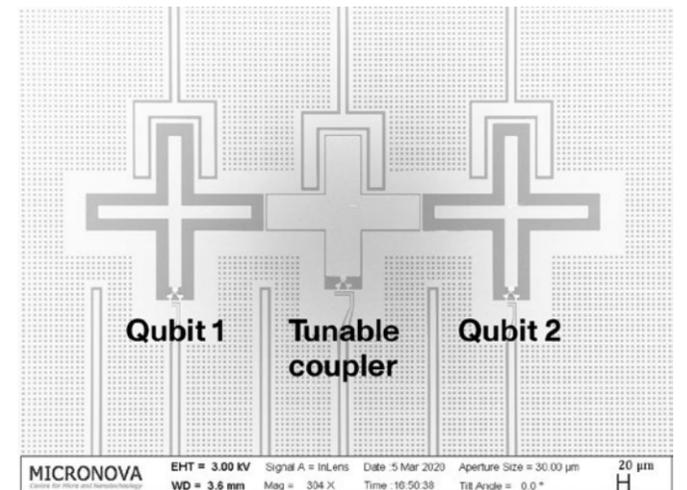


Figure 4: The scanning electron micrograph of a transmon-based 2-qubit gate with a flux-tunable coupler. The qubit-qubit coupling strength can be tuned on/off on demand with a flux pulse to the coupler.

measurements of gate accuracies, we have numerically studied the maximal iSWAP gate accuracy the chips are capable of. Considering the qubit and coupler decoherence, we find that the theoretical maximum iSWAP gate fidelity of 96.5% with a gate time of 74 ns. The gate fidelity for this sample is limited by the relatively short coherence times of the coupler and therefore can be improved significantly with better sample designs. The gate time can also be improved with pulse optimization.

To design the processor layout, we use several simulation tools. There are two main device simulation tools employed to design and optimize superconducting quantum processors: (i) 3D finite element modelling (FEM) for predicting the electromagnetic properties of a circuit geometry, and (ii) first principles studies of the dynamics of superconducting qubits for the purpose of optimized driving, readout, and gate operation. These techniques not only provide powerful predictive capabilities for device design and performance optimization, but also identify the underlying mechanisms that contribute to qubit decoherence.

For the 5-qubit processor, we developed a hybrid model of design: combining parametric FEM simulation with analytical tools. The model is remarkably accurate and efficient in predicting complex measurement structures. The designed and measured measurement properties agree with the design within 2% accuracy. The demonstrated design accuracy allows aggressive frequency multiplexing in future processors, strongly reducing the number of measurement lines required.

3. Business Model 2: Application-Specific Integrated Quantum Circuits

In the first business model discussed in Sec. 1, the revenue of a system integrator is created through scaling hardware in an ecosystem approach. In this section, we describe a second

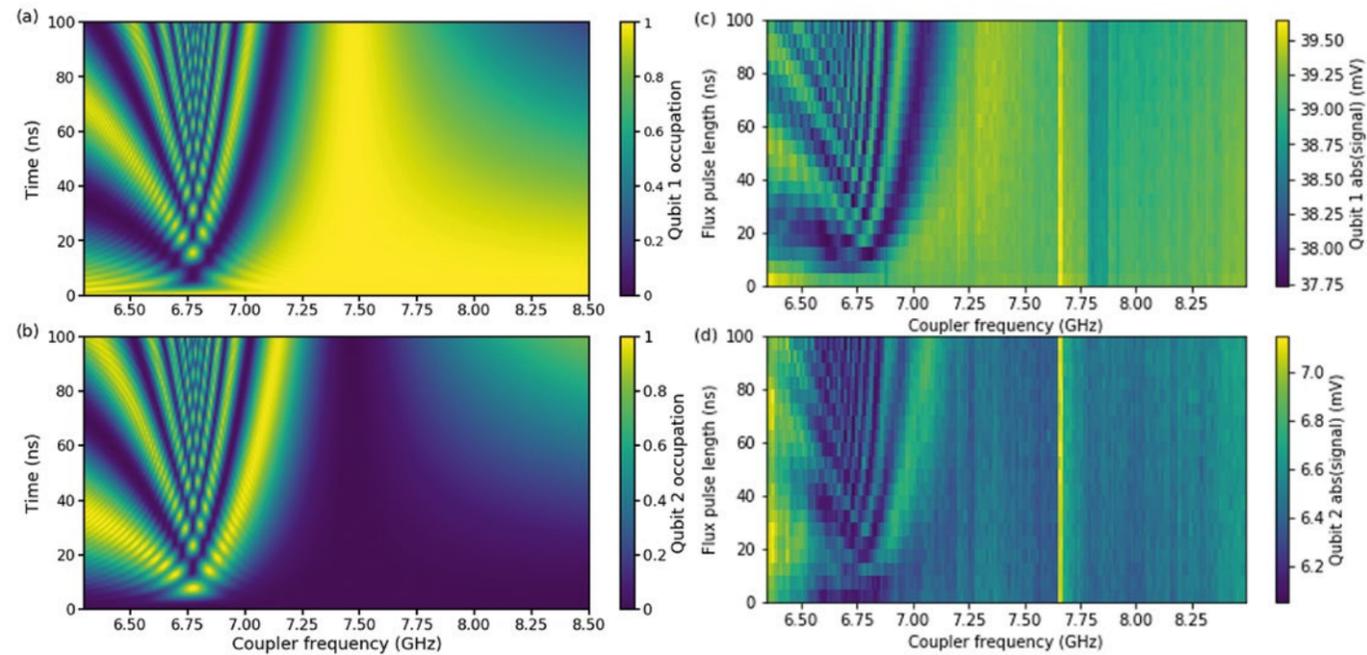


Figure 5: Coherent exchange of occupation starting from the first excited state of qubit 1. On the left in figures (a) and (b) a simulation of our system is shown, with real data on the right in (c) and (d). The top images show the population (how close the state is to “1”) of qubit 1, and the bottom the population of qubit 2. If qubit 1 is initially in the “1” state and the coupler frequency is set to 7.40GHz, the system will remain unchanged over long times. By shifting the coupler frequency down towards 7GHz for 40ns, the population can now be transferred into qubit 2.

business model which focuses on utilizing hardware in the most efficient way and on simultaneously closing the technological gap and the gap in the product-market fit.

In the current NISQ era, quantum processors contain physical qubits that are error-prone and unable to be used for prolonged computation. To overcome this issue, error-corrected qubits would be needed to mitigate qubit decoherence. Such error-corrected qubits are known as logical qubits, and a large number (~100-10 000) of physical qubits is required to create one logical qubit. Since these numbers are currently out of range, more efficient implementations of quantum computing systems are needed.

It is important for the optimization of hardware efficiency to consider the system as a whole, including the algorithms, processor topologies, and computational elements on-chip. Simultaneous optimization of the parameters of all these parts for the most hardware-efficient solution possible is necessary as a path forward. The optimization process is tightly bound to the chosen application, implying that the resulting processor will be specific to it. Such application-specific processors are at the heart of finding a hardware-efficient implementation to reach quantum advantage.

a. Hardware-efficiency of application-specific processors

Especially in the current NISQ era of quantum computing, hardware efficiency is undoubtedly one of the most critical

factors that determines how big of a problem you can tackle in the first place. Just as classical computer architectures use ASICs to efficiently process specific tasks, one can imagine an analogous concept for quantum computing, namely a kind of quantum ASIC or QuASIC that processes a specific quantum algorithm more efficiently. Since application-specific quantum processors are designed to address only a particular type of problem (unlike CPUs, for example, which are processors that can perform a variety of tasks), involving actual end-users in the development process is a necessary and beneficial path.

A quite recent use case for the utilization of application-specific processors to implement a very specific task is Bitcoin mining [7]. Bitcoin mining requires an immense amount of computing power, consuming a huge amount of energy. The cost due to the energy consumption can even exceed the profits from mining, driving miners to use hardware setups specifically adapted to the problem.

The above example describes clearly how advantageous the use of application-specific processors can be. By design, such processors can perform the required calculations highly efficient. This efficiency can be achieved through several means: examples include the possibility of directly integrating logic functions on a chip, which can speed up a calculation, or reducing the physical size to effectively lower power consumption. The universality that non-optimal CPUs have is thus given up and exchanged for a specified, but more efficient operation.

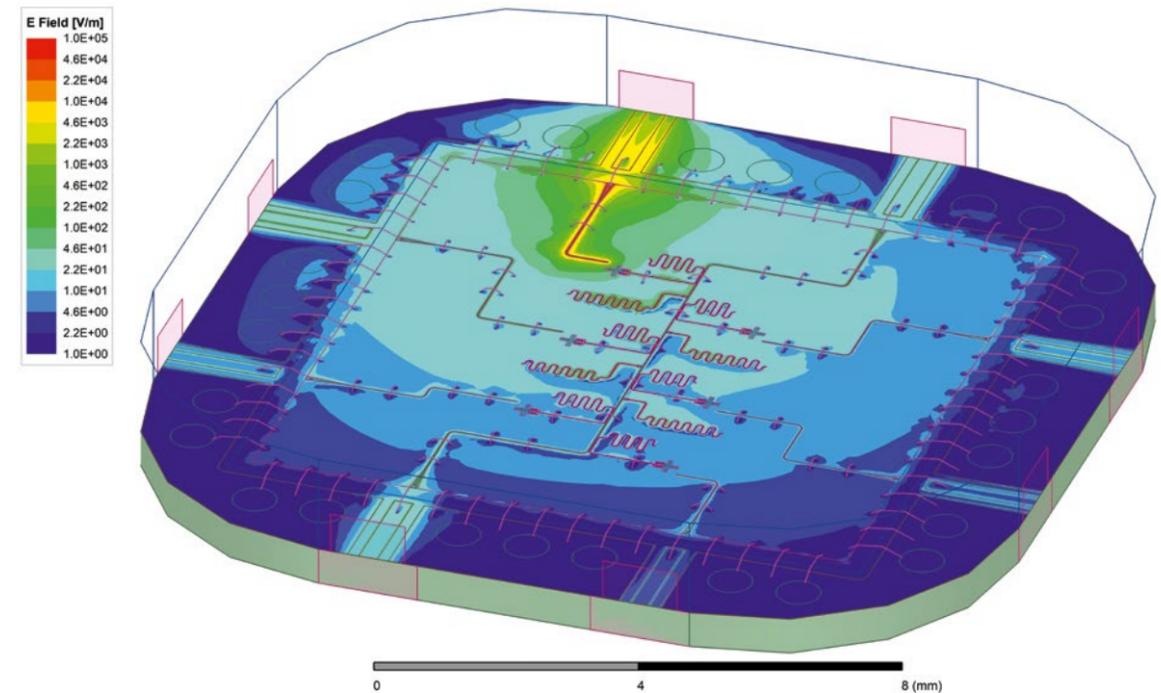


Figure 6: FEM simulation result of a 6 qubit chip. A qubit is driven with an electromagnetic signal from the top lead, and the simulation shows how the electric field affects the rest of the chip. Airbridges can also be seen throughout. As a part of a hybrid design strategy the simulation enables highly accurate design of chip properties.

b. Implementation through research partnerships

As quantum computing technologies are moving towards commercial usefulness, corporations have started to build internal teams with an understanding about how the technology can create business value for them. The companies who are early adopters of quantum computing are often characterized by significant use of supercomputing resources in their day-to-day business or R&D. These corporations are ideally suited to enter research partnerships with quantum companies to share and leverage quantum expertise.

The industries where quantum computing is poised to create significant business value are material development, chemistry (including the pharmaceutical industry), finance as well as machine learning. Some of these industries, such as the pharmaceutical industry, are characterized by the need to increase the success rate of R&D projects. We believe this desire will also be a key driver towards the early adoption of quantum technologies in the field. Naturally, the adoption will accelerate once business benefits are proven for specific use cases. Such acceleration of benefits can be efficiently triggered by research partnerships where common goals are clearly set.

A difficulty that companies are facing is to narrow down on problems which are suitable for a quantum computer. This is complicated by the scarcity of quantum software experts who can translate classical algorithms to quantum and can innovate the path to solutions of problems that are beyond the scope

of current classical capabilities. Additionally, understanding of the capabilities of current generation quantum hardware is limited. Therefore, partnerships are well-suited to share the scarce resources with deep domain knowledge.

In this context, implementing research partnerships first means working with end-users to define specific problems that could be solved by quantum computers and then designing QuASICs together to solve that particular problem. Solving such problems in a partnership is at the heart of a process we call Co-Design (see Figure 7). While Co-Design in itself is not a solution, synergies of efficient interdisciplinary research groups working towards a tangible business goal with a specific quantum processor can close the technology gap in a very efficient manner. By designing application-specific processors we believe the necessary links to industry can be created, leading to specific measurable outcomes demonstrating quantum advantage.

Another goal of Co-Design partnerships is to ensure a product-market fit. It helps companies to find the right problems solvable with quantum computers. Having a specific focus tied with the understanding of the current and near-term quantum hardware capabilities will create value for their business in a structured manner. Once the specific problems are identified, the goal is to scale the system size to create quantum advantage. This means mainly the application-specific QPU for the agreed use case.

Partnership model for quantum advantage

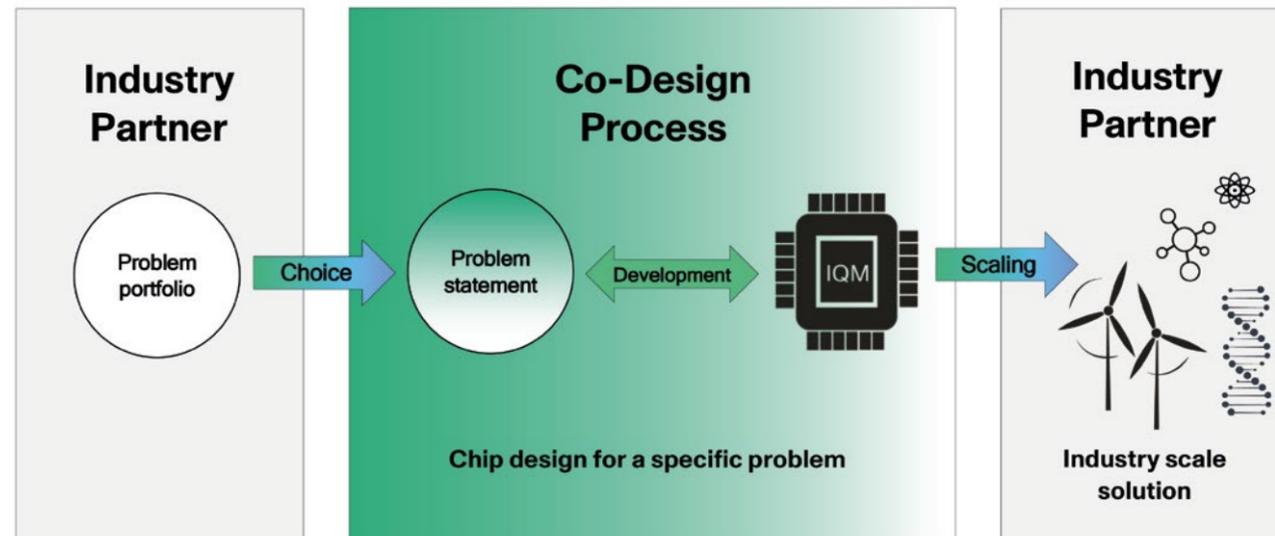


Figure 7: Partnership model for Co-Design

a. Co-Design solutions towards quantum advantage

In the process of Co-Designing quantum computers, we aim to extend the standard quantum computing toolbox to design more efficient processors (see Figure 8). In purely digital quantum computing only qubits and discrete quantum gates are used. There is no fundamental reason why the toolbox should be so limited. Extensions of the toolbox can take place at different levels and include the quantum operations, the computational units, and the hardware layout.

At the level of quantum operations, the standard digital paradigm is implemented in specific quantum gates, activated through the precise control of qubit dynamics and couplings. Here, the gates are usually turned on for a fixed time. One possibility that is currently attracting interest is to go beyond the gate paradigm by considering time as a free parameter in the computation. Such continuous (also known as analog) time evolution may involve blocks that include more than one or two qubits. Moreover, when considered in combination with single-qubit rotations, they give rise to digital-analog quantum computing (DAQC); a novel paradigm of universal quantum computation [8,9]. Crucially, DAQC does not rely on repeatedly switching on and off two-qubit gates, which considerably slows down the execution of quantum algorithms and makes them more exposed to decoherence. Instead, analog blocks in DAQC may remain switched on during the whole length of the protocol and be combined only with high-fidelity single-qubit rotations. This novel scheme will potentially close the technology gap during the transition to fully error-corrected quantum

computers. Nevertheless, more research needs to be done to rigorously characterize the advantage of DAQC with respect to standard digital computation.

The computational elements in the toolbox do not need to be limited to qubits, i.e. two-level systems. Quantum systems different than qubits can also be built on the chips. For example, qudits (multi-level quantum systems), may be well suited to simulate certain problems involving multi-level atoms. In a similar way, vibrational environments and nuclear motion in molecules may be better implemented when adding chip elements that correspond to a tunable continuum of modes.

Finally, a third option we consider when designing application-specific processors is to shape the hardware topology and optimize the chip layout for the final purpose of the processor. Along this line, simulating materials like graphene may be more efficient with a chip where the qubits are arranged in a hexagonal lattice, so that the chip already simulates naturally at least part of the physics.

4. Summary and outlook

In this article, we have outlined the importance of two business models: Co-Development and Co-Design. Co-Development is implemented through an ecosystem approach and early hardware sales. Co-Design is at the heart of application-specific quantum computers in industry partnerships. These two approaches are in response to the current technology and funding challenges that the quantum computing industry

What is Co-Design?

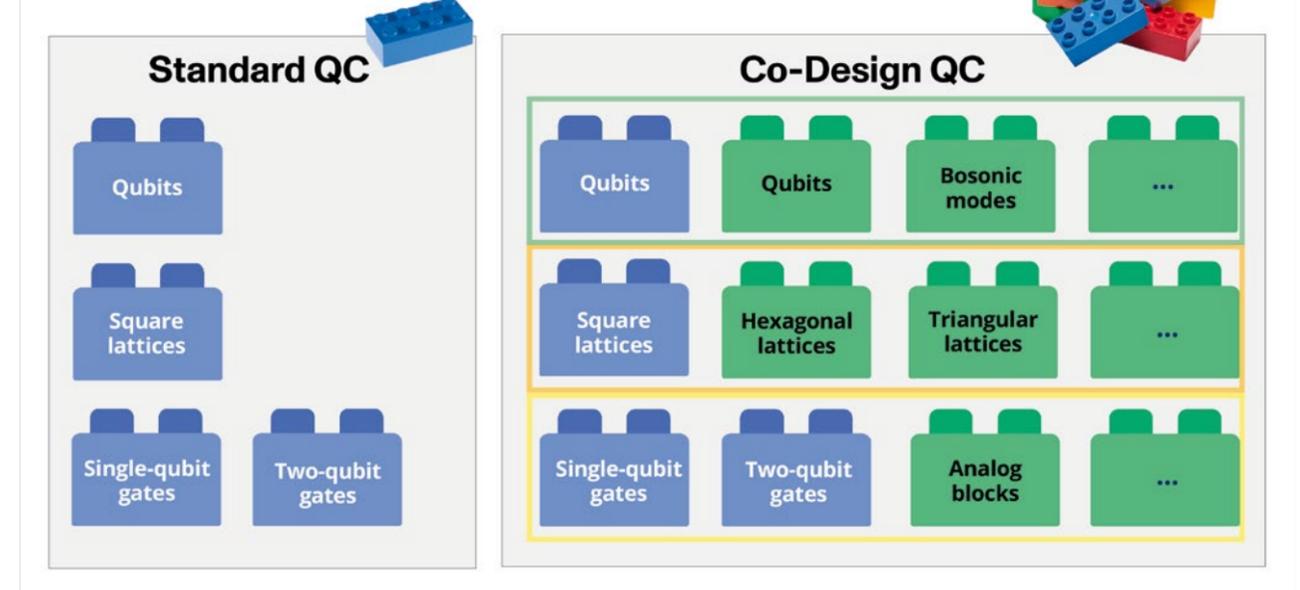


Figure 8: Building blocks for Co-Design quantum computers.

faces. We believe quantum computing will see steady developments towards new solutions and features if the prospective customers and quantum computing developers work together to solve problems.

The Co-Development business model leverages momentum from initial public funding to generate a viable, fast growing ecosystem. This happens in full analogy to known success stories, just as pharmacy and aerospace. A key ingredient here is building a local supply chain in state funded projects.

Being an early technology, quantum computing can learn from traditional computing where specific solutions such as Graphical Processing Units (GPUs) and Field-programmable Gate Arrays (FPGAs) were added to the computing mix to strengthen the overall offering while the processor technology is developing. This is our goal with Co-Design, where specific processor architectures provide business value for certain use-cases.

Lastly, we want to encourage the community, possible hardware and software providers as well as users, to get familiarized with quantum computing to be prepared for the potential new business opportunities it brings. While reaching exponential speedup with fully error-corrected quantum computers will take a long time, even small speedup can generate significant business value. For problems with significant business impact, already a small improvement in speed or accuracy can make a big difference. Therefore, shortcuts to quantum advantage through Co-Designed quantum computers for specific applications can produce significant business value in the near-term.

Literaturverzeichnis: [1] Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information*, 2(1), 1-8. [2] Bharti, K., et al. (2021). Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. *ArXiv ePrint*: 2101.08448. [3] Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. [4] McArdle, S., Endo, S., Aspuru-Guzik, A., Benjamin, S. C., & Yuan, X. (2020). Quantum computational chemistry. *Reviews of Modern Physics*, 92(1), 015003. [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Application-specific_integrated_circuit [6] <https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/vtt-build-finlands-first-quantum-computer> [7] Song, Y.-D., & Aste, T. (2020). The Cost of Bitcoin Mining Has Never Really Increased. *Front. Blockchain*, 3, 44. [8] Parra-Rodriguez, A., Lougovski, P., Lamata, L., Solano, E., & Sanz, M. (2020). Digital-analog quantum computation. *Phys. Rev. A*, 101, 022305. [9] Martin, A., Lamata, L., Solano, E., & Sanz, M. (2020). Digital-analog quantum algorithm for the quantum Fourier transform. *Phys. Rev. Research*, 2, 013012.

IQM Quantum Computers

IQM is the European leader in superconducting quantum computers, headquartered in Espoo, Finland. Since its inception in 2018, IQM has grown to 70+ employees and has also established a subsidiary in Munich, Germany, to lead the Co-Design approach. IQM delivers on-premises quantum computers for research laboratories and supercomputing centers and provides complete access to its hardware. For industrial customers, IQM delivers quantum advantage through a unique application-specific Co-Design approach. IQM has raised € 71 Million from private VCs and public funds and has recently won the co-innovation project tender to build Finland's first quantum computer with VTT.

Quantentechnologien im Praxischeck – Konzepte und Anwendungsfelder

Alexander Kaffenberger, Anne-Marie Tumescheit

Fujitsu Technology Solutions GmbH

Quantentechnologien entwickeln sich sehr dynamisch. Forschungsinstitute und Universitäten, aber auch Firmen treiben die Entwicklung. Folglich entstehen verschiedene Modelle mit eigenen Vor- und Nachteilen, deren Praxisreife ganz unterschiedlich ist. Welches sind die wichtigsten Anwendungsfelder, in denen Quantentechnologie großen Einfluss haben wird? Wie weit sind die einzelnen Konzepte und welche können schon heute wirtschaftlich eingesetzt werden?

In den vergangenen Jahren galt das Label „Künstliche Intelligenz“ vielen als Synonym für moderne, schnelle und überlegene technologische Lösungen. Eine ähnliche Situation erleben wir im Moment mit Quantentechnologien. Die vielfältigen Entwicklungen im Bereich der Systeme, Anwendungen und Services, die aus Quantentechnologien hervorgegangen oder von ihnen inspiriert worden sind, sind bereits für einige praktische Anwendungsfälle relevant. Doch eben nur für einige. Auch das Etikett „Quanten“ bedeutet bei Weitem nicht immer dasselbe: Simulator, Emulator, adiabatisches System, Ionenfalle sind nur einige der Begriffe, die in diesem Zusammenhang genannt werden.

Die Erprobung bzw. der Einsatz von Quantentechnologien sollte daher immer gemeinsam mit z. B. der geschäftlichen Fragestellung betrachtet und entschieden werden. Aber für welche Fragestellungen eignen sich Quantencomputer und was ist eigentlich der Unterschied zwischen einem Quanten Gate Computer mit 49 Qubits, einem adiabatischen Quantencomputer, einem One-Way Quantencomputer, einem Quanten Annealer mit mehr als 2.000 Qubits und Simulated Annealing oder Digital Annealing?

Fragestellungen für Quantentechnologien

Theoretisch können mithilfe von Quantentechnologie alle Probleme bearbeitet bzw. gelöst werden, die auch auf herkömmlichen Computern, also deterministischen Turing-Maschinen, berechnet werden können. Aufgrund der technisch jedoch sehr komplizierten Umsetzung, der Berücksichtigung der Nachteile von quantenmechanischen Effekten bei wohldefinierten Operationen und der Tatsache, dass eine neuartige Programmierung entwickelt werden muss, liegt das Hauptaugenmerk der Forschung vor allem auf den Bereichen, in denen heutige Rechnerarchitekturen nicht praktikable Laufzeiten oder sehr viel Speicherplatz benötigen würden. Somit stehen momentan vier Anwendungsfelder im Mittelpunkt:

- (energetische) **Optimierungsaufgaben** (z. B. Metropolis-Hastings-Algorithmus)
- **Kryptografische Verfahren** (z. B. der Shor-Algorithmus)
- **Suche in sehr großen Datenmengen** (z. B. der Grover-Algorithmus)
- **Quantum Artificial Intelligence**

Insbesondere die näherungsweise bzw. (ausreichend) gute Lösung von Optimierungsaufgaben ist eines der Gebiete, auf dem schon seit den 50er-Jahren geforscht wird und das daher gut verstanden ist. Dies und die Tatsache, dass ein Qubit theoretisch unendlich viele Zustände darstellen kann, sind auch der Grund dafür, dass den Quanten Approximation Optimierungsalgorithmen (QAOA) aktuell die besten Chancen eingeräumt werden, die sogenannte Quantenüberlegenheit (engl. Quantum Supremacy) zu beweisen (ob dies nicht schon geschehen ist und die wissenschaftliche Diskussion dazu, sollen in diesem Artikel nicht Thema sein).

Optimierung und der Metropolis-Hastings-Algorithmus

Kombinatorische Optimierung ist der Prozess, eine oder mehrere optimale Lösungen eines Problems zu finden. Gesucht werden diese Lösungen in einem diskreten (endlichen), aber sehr großen Konfigurationsraum (also einer Menge von Zuständen). Die Menge der möglichen Lösungen kann jeweils mit mehreren Bedingungen definiert sein und das Ziel ist es, mit der besten Lösung die

Zielfunktion zu optimieren, also z. B. die Kosten zu minimieren oder den Gewinn zu maximieren. Da die Problemräume in bestimmten, sehr schweren Fragestellungen sehr groß sind, ist es extrem schwierig oder manchmal sogar unmöglich, optimale oder sogar eine einzige gute Lösung dieser Probleme mit klassischen Computern in angemessener Zeit oder Genauigkeit zu finden.

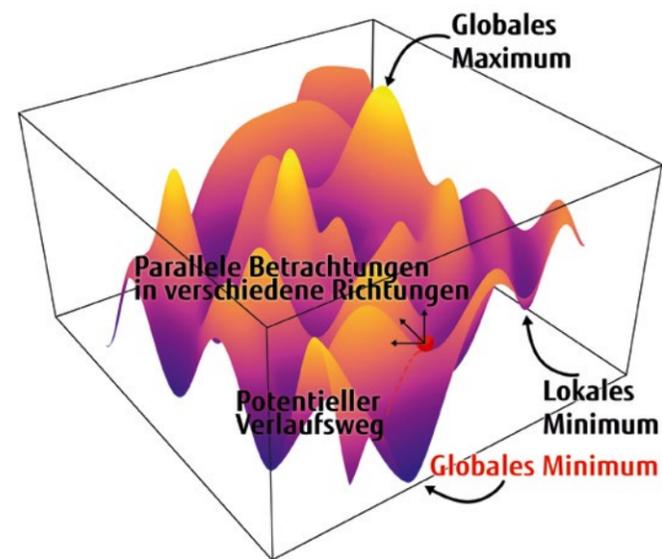
Für Unternehmen im privaten Sektor und auch für die öffentliche Hand stellen kombinatorische Optimierungsprobleme oftmals eine große Herausforderung dar, da diese Fragestellungen nicht oder nicht performant genug beantwortet werden können. Die Aufgabenstellungen sind dabei oftmals einfach zu beschreiben, stellen sich aber schnell als sehr schwer zu lösen heraus. Kombinatorische Optimierungsprobleme lassen sich in Reihenfolge-, Zuordnungs-, Gruppierungs- und Auswahlprobleme aufgliedern, und innerhalb dieser Klassen findet man dann Unterklassen, wie z. B. das Knapsack-Problem, das Traveling-Salesman-Problem (TSP), Boolesche Erfüllbarkeit (SAT), das Constraint Satisfaction Problem (CSP), Maximum Cut (MAX-CUT), Graphen-Ähnlichkeit, Portfolio-Optimierung, Routenoptimierung, (Termin-) Planung, (Aufgaben-) Zuweisung, Software-Validierung usw. Alle Probleme, die in diesen Klassen enthalten sind, haben die Eigenschaft, dass es für ihre Beantwortung nicht nur eine, sondern durchaus extrem viele, qualitativ unterschiedliche Lösungen geben kann. Ganz wesentlich ist auch noch die Eigenschaft, dass kein bekannter Algorithmus existiert, der diese Probleme einfach direkt ausrechnen kann. Das Durchsuchen der sehr großen Problemräume nimmt also enorm viel Rechenkapazität und -zeit in Anspruch.

Anhand eines Beispiels wollen wir uns einmal ansehen, wie groß Such- oder Problemräume werden können. Ausgangsszenario ist ein Fußballstadion. In diesem Stadion existiert ein Block mit 500 Sitzplätzen. Es sollen jeweils 20 Fan-Gruppen, die z. B. aus bis zu 5 Personen bestehen dürfen, auf die 500 Sitze so verteilt werden, dass die Personen jeder Gruppe benachbart sitzen können, und es muss ein Mindestabstand zwischen den Gruppen herrschen. Auch sollen bestimmte Sitzmuster für die Gruppen zugelassen sein. Die Aufgabe ist erst einmal einfach zu verstehen und man würde sich ohne technische Hilfsmittel wahrscheinlich im Tetris-Verfahren ans Ausprobieren von allen möglichen Kombinationen machen. Wie wir oben festgestellt haben, gehört auch diese Aufgabe als Zuordnungsproblem mit dem Ziel, Sitzplätze zu optimieren, zu einer Klasse von Problemen, die sehr schwer zu lösen sind. Es ist also tatsächlich notwendig, in dem benannten endlichen Suchraum Lösungen durch geschicktes Suchen zu finden. Der Versuch, eine Lösung nach der anderen durch sequentielles Ausprobieren zu finden, kann im Übrigen relativ viel Zeit in Anspruch nehmen, da wir in diesem Beispiel tatsächlich von über 10^{3000} möglichen Kombinationen[i] sprechen. Das Finden von guten und gewünschten Lösungen gewinnt auch deshalb an Komplexität, da das Nichteinhalten der gewünschten Sitzmuster zwar den Suchraum nicht vergrößert, allerdings durch Strafterme die Berechnung umfangreicher macht. Es ist zu erwarten, dass ein Standard-Computersystem signifikant länger rechnet, um alle möglichen Kombinationen auf gültige Lösungen zu testen. Man stelle sich also vor, was es bedeutet, eine Verteilung von unterschiedlichen Gruppen auf ein gesamtes Stadion mit mehr als 50.000 Plätzen optimal und unter Einhaltung von speziellen Regeln, wie z. B. dem Mindestabstand, durchzuführen. Dies führt v.a. bei Echtzeit-Anforderungen regelmäßig zu Herausforderungen

[i] $2500 \cdot 20 = 210000 = (210)1000 = (1024)1000 \sim (103)1000 = 103000$

für Standardverfahren, da in unserem Beispiel die Verteilung der Gruppen auf das gesamte Stadion eben nicht während der online-Buchung oder kurz danach durchgeführt werden kann.

Bereits 1953 publizierten Nicholas Metropolis et al. zur Lösung solcher Probleme einen Algorithmus, der 1970 von W. Keith Hastings generalisiert wurde. Der Metropolis-Hastings-Algorithmus stellt Optimierungsprobleme als Energielandschaft bzw. Energiefunktion dar. In dieser Funktion wird dann eine schrittweise Abkühlung des Systems simuliert, ähnlich wie die langsame Abkühlung eines Metalls oder Glases, mit der erreicht werden soll, dass die Atome bzw. Moleküle sich optimal – also einem Energieminimum entsprechend – anordnen (wodurch oft eine besonders hohe Festigkeit oder Langlebigkeit erreicht wird). Für bestimmte Formen der „simulierten Abkühlung“ (engl. Simulated Annealing) konnte bewiesen werden, dass sie das globale Minimum der vorher definierten Energielandschaft finden. In unzähligen anderen Fällen zeigt die praktische Erprobung, dass ein sehr gutes lokales Minimum gefunden wird.



BU: Minimumsuche für eine Kosten-/Energiefunktion

Auch wenn der Metropolis-Hastings-Algorithmus nicht immer der effizienteste Weg ist, um ein Optimierungsproblem zu lösen, ist es ein genereller Weg. Aber eben auch einer, der auf herkömmlichen Rechenarchitekturen weiterhin sehr zeitintensiv ist. Dennoch sollten wir uns den Begriff des „Annealing“ merken, wir werden gleich wieder auf ihn stoßen. [1] [2]

Quantencomputer ist nicht gleich Quantencomputer

Viele Firmen und deren Wissenschaftler verkünden in regelmäßigen Abständen neue Durchbrüche bei Quantencomputern. Die in den Pressemitteilungen genannte Anzahl der Qubits und die verschiedenen Umsetzungen können jedoch schnell für Verwirrung sorgen.

Ein „echter“ Quantencomputer ist ein System, das tatsächlich mit Quanten-Bits, also quantenmechanischen Zuständen arbeitet. Alleine hier gibt es aber bereits grundlegend verschiedene Konzepte: Ein universeller Quantencomputer, auch als Quanten Gate

Computer bezeichnet, ist das am schwierigsten umzusetzende Konzept. Er basiert darauf, dass die Quantenregister beliebig durch physikalische Operationen, sogenannte Quanten-Gatter, manipuliert werden können (das können z.B. Laserstrahlen, magnetische Einstrahlungen o. ä. sein). Das würde in etwa dem entsprechen, was wir heute auch als „normalen“ Computer bezeichnen – nur eben viel schneller. Quantum Gate Computer sind aktuell mit maximal 72 Qubits ausgestattet. [3]

Daneben gibt es das Konzept der Einweg-Quantencomputer (engl. One-Way quantum computer). Bei diesen wird zunächst ein vom Problem unabhängiger Quantenzustand erzeugt und die eigentliche Berechnung erfolgt durch gezielte Messungen an diesem Zustand. Die Messungen beeinflussen ihrerseits den Zustand des Systems und bestimmen außerdem, wo als nächstes gemessen wird.

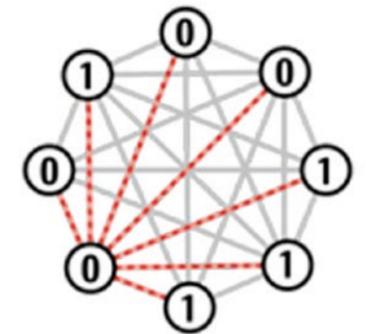
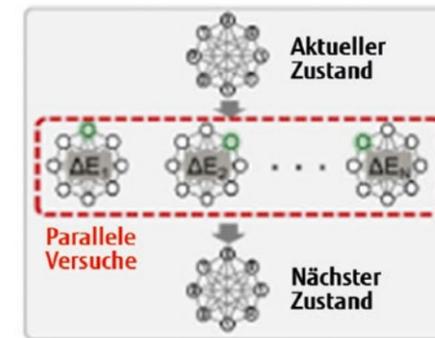
Das dritte – und im Gegensatz zum Einweg-Quantencomputer deutlich verbreitetere Konzept – ist der adiabatische Quantencomputer. Hier werden vereinfacht gesprochen zwei Quantenzustände erzeugt: der erste, komplizierte Quantenzustand entspricht der Lösung des Problems, der zweite ist ein experimentell einfach herzustellender und wohldefinierter Zustand. Durch die schrittweise Überführung des zweiten in den ersten Zustand ist es möglich, die Lösung des komplizierten Problems zu finden. Diese Art von Quantenrechnern kann aufgrund ihrer Natur im wesentlichen kombinatorische Optimierungsprobleme lösen – ist aber technisch einfacher zu realisieren, da während des Messens bzw. davor und danach keine Manipulationen durch Quantengatter (engl. quantum gates) mehr erforderlich sind. Solche Quantenrechner gibt es seit September letzten Jahres mit mehr als 5.000 Qubits – wobei die volle Konnektivität der Qubits untereinander nicht gegeben ist.

Neben den verschiedenen Konzepten von Quantencomputern gibt es eine Vielzahl von verschiedenen physikalischen Implementierungen der Quanten bzw. Quantenzustände. Diese reichen von der Nutzung der Spins der Elektronen über die Energiewerte von Ionen bis zur Nutzung von Photonen oder supraleitenden Schaltkreisen mit Kreisströmen. [4]

Annealing für Optimierungsaufgaben

Die Nutzung von Simulated Annealing auf Rechnern, basierend auf der Von-Neumann-Architektur, wurde bereits thematisiert und hat sich in den letzten Jahrzehnten in der Praxis bewährt. Wird statt eines klassischen Rechners nun ein adiabatischer Quantencomputer für die Lösung des Problems genutzt, dann spricht man vom „Quantum Annealing“. Das ermöglicht theoretisch eine deutlich schnellere Rechenzeit, bringt aber all die Nachteile von Quantenrechnern mit sich: technisch sehr anspruchsvolle Umsetzung und Umgebung, notwendige Fehlerkorrekturen der Lösung etc.

Eine intelligente Kombination des Simulated Annealing und der Prinzipien von Quanten Annealern stellen die Digital Annealer dar. Sie basieren nicht auf der Von-Neumann-Architektur, sind aber dennoch „klassische“ Computerchips mit allen dementsprechenden Vorteilen wie geringe Größe oder Standardanforderungen an Infrastruktur und Umgebung. Ähnlich wie beim Tunneling im Quantum Annealing erhöht der Digital Annealer die Ausbruchswahrscheinlichkeit aus einem lokalen Energiezustands-Minimum mithilfe dynamischer Energie, und erhöht die Konvergenzgeschwindigkeit mithilfe paralleler Zustandsauswertung. Daher ist



Die Architektur des Digital Annealers ist von der Quantenmechanik inspiriert. (Quelle: Fujitsu)

er viel schneller als traditionelle Simulated Annealing Techniken. Digital Annealing zeichnet sich außerdem durch stochastische Parallelität und volle Vernetzbarkeit der gegenwärtig 8.192 Hardware-Bits aus – Eigenschaften, die von den quantenmechanischen Phänomenen Superposition und Verschränkung inspiriert sind – wodurch das System in der Lage ist, große Probleme schnell und mit hoher Präzision zu lösen. Außerdem werden die Probleme auf die gleiche Weise formuliert wie beim Simulated oder Quanten Annealing – als Energielandschaft. Mathematisch wird dies mit QUBOs realisiert. [5] [6] [7]

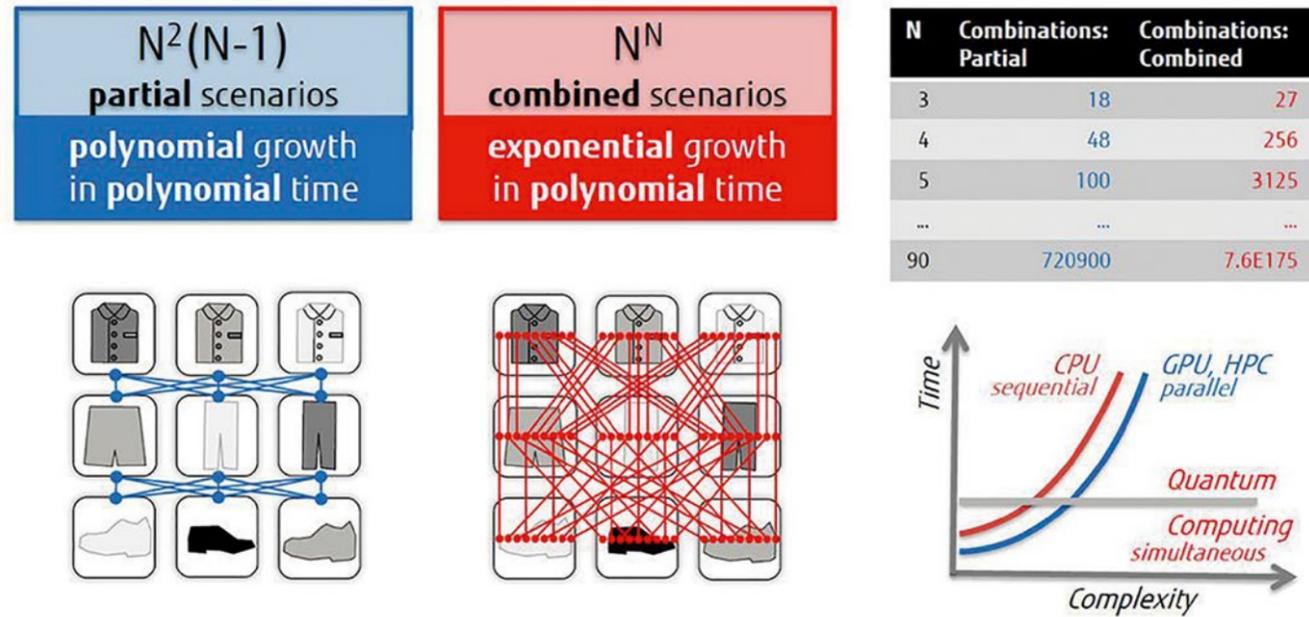
Was sind QUBOs?

QUBO steht für Quadratic Unconstrained Binary Optimization und ist eine Möglichkeit, Optimierungsprobleme als mathematische Formulierung (quadratisches Polynom mit einer endlichen Menge von binären Variablen) darzustellen. Weitere Darstellungen für Optimierungsprobleme sind z.B. HOBOS (Higher Order Binary Optimization) oder lineare Gleichungen (also nicht quadratische oder von höherer Potenz). Grundsätzlich ist die Formulierung über HOBOS vorteilhafter, da das Optimierungsproblem als Gleichung eleganter dargestellt werden kann. Gängige Solver, also Computerprogramme, die mathematische Probleme numerisch lösen, können aber in den meisten Fällen HOBOS nicht direkt verarbeiten, d.h. HOBOS müssen unter Einbindung zusätzlicher Variablen vorher in quadratische oder lineare Formulierungen umgewandelt werden. Aus diesem Grund wird die Darstellung über QUBOs oft bevorzugt und ermöglicht die Weiterverarbeitung von Optimierungsproblemen durch entsprechende Solver, wie z.B. Quanten Annealer, Digital Annealer oder im Simulated Annealing.

Optimierungsprobleme werden also über QUBOs in quadratischen Gleichungen dargestellt, wobei jeweils immer zwei Variablen miteinander korreliert werden. Zugelassen für die Optimierung sind grundsätzlich immer alle möglichen diskreten Zustände der Variablen. Mithilfe des Beispiels „Kombination von Kleidungsstücken“ soll der Aufbau eines QUBOs deutlich werden. Nehmen wir an, dass wir drei verschiedenfarbige Hemden (also z.B. rot, grün, blau) und drei verschiedenfarbige Hosen (ebenfalls rot, grün, blau) kombinieren wollen. Hemd und Hose in derselben Farbe passen immer optimal zueinander. Grundsätzlich ist es aber zulässig, alle Hemden und alle Hosen miteinander zu

kombinieren. Zulässig ist auch, dass alle sechs Kleidungsstücke gleichzeitig angezogen werden. Diese Freiheit beschreibt das uneingeschränkte (= unconstrained) Verwenden der Variablen. Die binäre (= binary) Information an dieser Stelle beschreibt die beiden zulässigen Möglichkeiten, ein Kleidungsstück entweder anzuziehen oder nicht anzuziehen. Nun ist es allerdings unvorteilhaft, wenn man mehr als ein Hemd oder eine Hose gleichzeitig anzieht oder Farben kombiniert, die nicht gut zusammenpassen. Daher führt man Bedingungen in Optimierungsgleichungen ein, die dies berücksichtigen. Diese Bedingungen werden als Strafterme formuliert, die das Ergebnis der Gleichung beeinflussen. Im Bekleidungsbeispiel bestraft man dann z.B. das gleichzeitige Tragen von mehr als einer Hose so hoch, dass die Optimierungsgleichung in diesem Fall im Ergebnis einen großen Wert bekommt. Damit fallen diese Kombinationen in der Gesamtschau aller möglichen guten oder optimalen Kombinationen heraus. Ein optimales Ergebnis einer Optimierungsgleichung ist nämlich eines mit einem möglichst geringen Wert (oder Energieminimum). Auch das Kombinieren von Hemd und Hose unterschiedlicher Farben in unserem Beispiel wird leicht bestraft und stellt damit zwar eine mögliche, aber keine gute Lösung dar. In kombinatorischen Optimierungsproblemen liegt also neben der mathematischen Darstellung der Optimierungsfunktion immer auch die Aufgabe in der Erweiterung der Gleichung durch Strafterme, die für eine entsprechende Gewichtung, abhängig von der Relevanz der Bedingung im geschäftlichen Kontext, sorgen. Gewichtet werden können dabei entweder einzelne Variablen oder die Kombination aus zwei Variablen (was den quadratischen Charakter des QUBOs ausmacht). Die Tatsache, dass in diesem Beispiel nur zwei Variablen (Hemd und Hose in entsprechenden Farben) gewählt wurden, dient nur der Vereinfachung. Es ist durchaus möglich, mehrere Variablen miteinander zu korrelieren, wobei alle berücksichtigt, aber jeweils immer nur zwei Variablen kombiniert betrachtet und gewichtet werden.

Vorstellen kann man sich die Kombination von Hemden und Hosen auch, indem man z.B. die Hemden auf der y-Achse und die Hosen auf der x-Achse eines Koordinatensystems anbringt. An den jeweiligen Gitterpunkten entstehen dann die möglichen Kombinationen, die man dann jeweils mit Strafen belegen kann, wenn bestimmte Kombinationen nicht gewünscht sind.



Ein einfaches Beispiel für einen Fall der kombinatorischen Optimierung: Finde die Kombination aus drei Hemden, drei Hosen und drei Paar Schuhe, die am besten zueinander passen. Das Problem: Wenn alle Kombinationen durchgespielt werden, ergibt sich eine Unzahl an Verbindungen und Kombinationsmöglichkeiten. (Quelle: Fujitsu)

Tauscht man die Hemd-Hose-Kombinationen durch Magnete aus, kommt man im Übrigen zu einem Versuchsaufbau, der auf Ernst Ising zurückgeht. Im Ising-Gittermodell sind in einem mehrdimensionalen Gitter Ferromagnete angeordnet, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften gegenseitig beeinflussen und bezogen auf das Gesamtsystem einen Zustand suchen, der möglichst energiearm ist. Diese für die Magnete optimale (binäre) Ausrichtung (also nach Norden oder Süden) kann ebenfalls in einer Energiegleichung dargestellt werden, die identisch mit den oben beschriebenen QUBOs ist.

QUBOs stellen also eine sehr gute Möglichkeit dar, Optimierungsfragestellungen für Solver wie z.B. Quanten Annealer oder Digitale Annealer bis hin zu neuromorphen Computersystemen zu formulieren. [8] [9] [10]

Anwendung in der Praxis: Portfolio-Optimierung

Die Anwendung von Quantentechnologie im Unternehmensumfeld ist heute im Wesentlichen noch Zukunftsmusik, nicht jedoch die Nutzung ihrer Vorteile. Welche vielfältigen Probleme Digital Annealing bereits heute lösen kann, zeigen die folgenden Beispiele aus den verschiedensten Branchen. Den Anfang macht die Finanzbranche.

Die ideale Zusammenstellung eines Portfolios ist eine Wissenschaft, die in den Medien gut und gerne auch einmal esoterisch dargestellt wird. Wer sich damit beschäftigt hat, wie beispielsweise das eigene Aktienportfolio aussehen sollte, kann das sicher gut nachvollziehen. Dabei gibt es eine Reihe handfester Regeln und Fakten, die man zum Teil nur festlegen, zum Teil aber auch erst durch statistische Korrelationen oder

anderweitige Kombinationen berechnen muss. Verbriefung nennt sich das Verfahren, bei dem ein Pool verschiedener finanzieller Vermögenswerte gestaltet wird. Das können Aktien, aber auch Leasing-Verträge sein. Aus einem sehr großen Pool an vorhandenen Leasingaufträgen sollte hier eine Teilmenge ausgewählt werden, sodass ein bestimmtes Portfoliovolumen erreicht wird, während gleichzeitig eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigt werden muss.

Bild: Portfolio Risk Optimization_Bsp Commerzbank AG.pdf BU: Das Filtern der verschiedenen Optionen ist eine Aufgabe kombinatorischer Optimierung und daher für den Quanten Annealer von Fujitsu geeignet. (Quelle: Fujitsu)

Diese Faktoren lassen sich grob in Parameter und Bedingungen unterteilen. Zu den Parametern gehören zunächst die mehreren Tausend Leasingobjekte selbst, aus denen ausgewählt werden muss. Jedes ist dabei mit einem Leasing-Volumen und einer Laufzeit ausgestattet, die berücksichtigt werden müssen. Zu den Bedingungen, die ebenfalls in die Optimierung einfließen müssen, gehört zum Beispiel das maximale Volumen des Portfolios, die maximale Anzahl von erlaubten Short-Leasingobjekten – einer von vielen Faktoren zur Steuerung des Risikoprofils, das minimale Gesamtvolumen der Summe aller großen Leasingverträge, regulatorische Vorgaben und vieles mehr. All diese Informationen wurden im Rahmen der Quanten-inspirierten Optimierungsservices (QIOS) aufgenommen und kombinatorisch optimiert. In ersten Berechnungen zusammen mit der Main Incubator GmbH konnte der Digital Annealer den Auswahlprozess beschleunigen und einen höheren Effizienzgrad erzielen als mit derzeit im Einsatz befindlichen Ansätzen. [11] [12] [13] [14]

Business Challenge: Portfolio Risk Optimization

Sad car manufacturer, only with the promises to receive the money in the future

Leasing / Financing

Receivables

Happy people with a new car

Securitization

Investors

Die Commerzbank-Einheit Incubator Main möchte mithilfe von Digital Annealing die Absicherung von Leasing-Verträgen optimieren. (Quelle: Fujitsu)

Optimierte Infrastruktur: Datenflüsse

Daten sind das neue Öl, oder Gold. Dieser nicht mehr ganz taufrische Vergleich aus den 2010er-Jahren hat sich in beeindruckender Art und Weise in den Marktwerten der Elektronik- und Technologiekonzerne niedergeschlagen. Es kann nicht mehr gelehrt werden, dass Daten unsere Unternehmen und unsere Gesellschaft so stark wie nie zuvor antreiben. Zu einer gewinnbringenden Verarbeitung von Daten gehört aber auch immer ein performanter Transport derselben, und hier kommen die Telekommunikationsanbieter ins Spiel, die sich gegenwärtig darum bemühen, noch mehr Daten noch schneller zu transportieren. Dieser Datenaustausch findet über Mobilfunknetze und festverbaute Leitungsinfrastruktur statt, die unsere Ballungszentren und auch ländlichen Gebiete wie ein Geflecht aus Nervenbahnen miteinander verbinden.

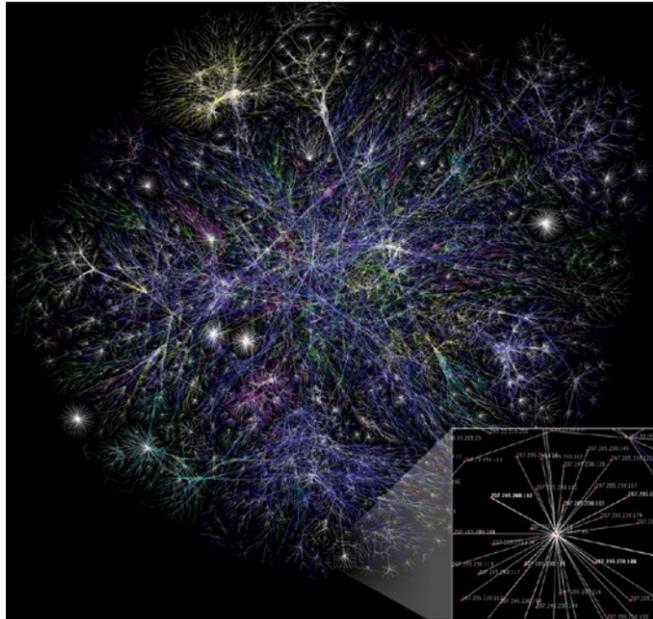
Alle Nutzer*innen der Leitungs- und Mobilinfrastruktur erwarten heutzutage einen performanten Zugriff auf Informationen, die auf der ganzen Welt verteilt in Rechenzentren liegen. Die grundsätzliche Erwartung an Telekommunikationsanbieter ist es, den bestmöglichen Up- und Download zu erhalten und dass Schwankungen ggf. abgefedert werden. Die steigende Tendenz, dezentral zu arbeiten (Stichwort: Homeoffice), und die aktuelle Einschränkung des Bewegungsradius der Bevölkerungen bringt dabei zusätzliche Dynamik in den Datentransfer. Vor allem kurzfristige ungeplante Events können jeweils zu kurzfristigen regionalen Auslastungs-Spitzen führen. Oder auch ganze Rechenzentren können, ebenso wie kleinere Netzelemente, ausfallen und damit bestimmte Netzsegmente aus dem Spiel nehmen. Für Telekommunikationsanbieter liegt also eine der Hauptaufgaben für eine performante Datenübertragung darin, kurz-, mittel- und

langfristige Überlastungen von Netzsegmenten und Netzknoten auszugleichen. Es hat sich gezeigt, dass ein lokales Umleiten von Überlast das Gesamtsystem eher belastet und dafür an anderen Stellen Spitzen verursacht. Deshalb muss der Telekommunikationsanbieter die Ziele aller Datenpakete in seinem Netzwerk im Auge behalten und jedem eine geeignete Route zuweisen, sodass alle Pakete gemeinsam ihr Ziel in der bestmöglichen Zeit erreichen. Das ist eine komplexe kombinatorische Aufgabe, die mit der heute verfügbaren Rechenleistung kaum zu lösen ist. Nur durch die Optimierung des Gesamtsystems, bestehend aus Knoten und Verbindungen, lässt sich eine nachhaltige Reduzierung der Last erreichen. Das konnte Fujitsu gemeinsam mit den T-Labs in einer Erprobung des Digital Annealers zeigen. [15]

Die grüne Welle – Optimierung des Verkehrsflusses

Für den nächsten praktischen Anwendungsfall von kombinatorischer Optimierung begeben wir uns gedanklich in die deutsche Großstadt Hamburg. Die verantwortliche Behörde für den Hamburger Hafen, die Hamburg Port Authorities (HPA), haben eine Vision entwickelt: Der Straßenverkehr im Hafengebiet soll optimiert werden.

Der Hamburger Hafen ist der drittgrößte europäische Hafen, auf dem pro Jahr 900 Millionen Container umgeschlagen werden. Im Hinterland-Verkehr docken 200 Züge pro Tag an, um Güter, die von ca. 10.000 Schiffen pro Jahr bewegt werden, an- und abzutransportieren. Unzählige LKW belasten täglich die Straßen vom und zum 7.200 ha großen Hafengelände. Die zunehmende Überlastung der betroffenen Straßen hat nicht nur Auswirkungen auf das Hafengelände selbst, sondern wirkt sich auch negativ auf die Luftqualität aus.



Teile einer "Karte" des Internets, basierend auf Daten von opte.org am 15.01.2005. Jede Linie beschreibt zwei Knotenpunkte, welche zwei IP-Adressen repräsentieren. Die Länge der Linien beschreibt die Verzögerung zwischen den Knotenpunkten. Diese Karte beschreibt weniger als 30% der Klasse C-Netzwerke, welche Anfang 2005 von dem Datensammelprogramm erreicht werden konnten.

Als Hauptverursacher der ungenügenden Verkehrssteuerung wurden ineffiziente Ampelschaltungen ausgemacht, die den Grad der Überlastung maßgeblich beeinflussen. Diese Erkenntnis veranlasste die HPA dazu, ein Projekt zum Entwurf eines intelligenten Ampelphasenmanagements für das Hafengebiet zu starten. Dazu wurde die technische Infrastruktur des Verkehrssystems in den letzten Jahren kontinuierlich ausgebaut. Neben der Aufrüstung auf den OCIT-Standard (ein Standard für offene Schnittstellen in der Straßenverkehrstechnik) werden die Straßen mit einem dichten Netz von Schleifensensoren, Wärmebildkameras und Bluetooth-Sensoren ausgestattet. Zusätzlich zu den Anforderungsschleifen direkt an der Kreuzung installierte das Verkehrsmanagement eine Vielzahl von Zählschleifen im Straßennetz. Diese können zwischen PKW und LKW unterscheiden und erfassen Abbiegeströme spurgenaue. So entsteht ein umfassendes Bild der Verkehrssituation auf den wichtigen Straßen des Hafennetzes.

Man könnte nun annehmen, dass Staus mit dieser komplexen Überwachung des Verkehrs praktisch nicht mehr möglich sind. Tatsächlich sieht die Wirklichkeit aber anders aus. Die Belastung der Straßen nimmt zu und der Stress-Level steigt. Dies liegt vor allem daran, dass die Koordination der Verkehrssteuerung in Echtzeit sehr schnell an die Grenzen der Kapazität von herkömmlichen Steuersystemen stößt. Wenn man insgesamt die Grünzeiten der Lichtsignalsteuerung optimieren will, müssen die Daten des gesamten Netzes zusammengeführt und leistungsfähig verarbeitet werden. Bis jetzt war die Verarbeitung der Verkehrsdaten in Echtzeit nur an einzelnen Kreuzungen möglich. Man stellte fest, dass nicht nur eine hohe Rechenleistung, sondern auch ein ganz neuer Ansatz zur Berechnung der nicht-parallelisierbaren kombinatorischen Optimierung notwendig war. Daher reichte es nicht aus, auf leistungsfähigeren GPUs in High Performance



Unzählige Container werden täglich an- und abtransportiert, verladen und gelagert. Den Verkehrsfluss zu verbessern, ist eine spannende Optimierungsaufgabe.

Computing Umgebungen zu rechnen, da diese die zugrundeliegende rechnerische Herausforderung NP-harter Probleme nicht in der benötigten Zeit lösen können. Mit QIOS und dem Digital Annealer steht der HPA nun die Möglichkeit zur komplexen Berechnungen einer hohen Anzahl möglicher Szenarien in wenigen Sekunden zur Verfügung. Das ermöglicht Operationen nahe Echtzeit.

Das Ziel des aktuellen Optimierungsprojektes mit Fujitsu ist es, in Echtzeit für die aktuelle Verkehrslage optimale Signalschaltungen für alle Lichtsignalanlagen im gesamten Verkehrsnetz auszuwählen, um die Verkehrsteilnehmer vorausschauend durch den Hafenverkehr zu leiten, zum Beispiel durch Priorisierung erkannter Lkw-Züge. Darüber hinaus ermöglicht ein Verkehrslagebild weitere Analysen, z. B. für Reisezeitberechnungen und Verlustzeitbilder. Das Projekt zielt darauf ab, die Kapazität des bestehenden Straßennetzes im Rahmen einer Gesamtnetzbeurteilung zu erhöhen. Das dient auch der Nachhaltigkeit, denn die CO₂-Emissionen resultieren im Straßenverkehr zu großen Teilen aus ungleichmäßiger Fahrweise. So sollen nicht nur die Stillstandzeiten mit laufendem Motor reduziert werden, sondern auch die Schadstoffemissionen durch unnötiges Beschleunigen und Bremsen (Kraftstoffverbrauch, Bremsbelag- und Reifenabrieb) im Netz verringert werden. Die Optimierung des Verkehrs geht also Hand in Hand mit dem Schutz der Umwelt. [16]

Entwicklung von Wirkstoffen und Medikamenten

Die Entwicklung von Wirkstoffen und Medikamenten ist oftmals ein langwieriger und sehr kostenintensiver Prozess. Das liegt insbesondere daran, dass eine Vielzahl von Stoffen nach dem Versuch-und-Irrtum-Prinzip getestet werden müssen. Woran liegt das?



Ohne computergestützte Methoden wäre die Entwicklung neuer Medikamente beinahe unmöglich. Doch auch hier kann kombinatorische Optimierung noch einmal für deutliche Verbesserungen sorgen. (Quelle: Fujitsu)

Um eine Krankheit zu bekämpfen, muss ein entsprechendes Medikament oder ein Wirkstoff mit dem Stoff oder Lebewesen (z. B. Bakterien) interagieren können, das die Krankheit auslöst, oder aber mit den Zellen im menschlichen Körper, die bereits befallen worden sind. Diese Wechselwirkung basiert in vielen Fällen darauf, dass zwei Moleküle – eines auf jeder Seite der Interaktion – zueinander passen und miteinander reagieren. Denn ohne einen „ersten Kontakt“ können keine weiteren Prozesse in Gang gebracht werden. Nun bieten krankheitserregende Lebewesen oder erkrankte Zellen oft nicht nur eine Option für eine mögliche Andockstelle, sondern viele. Und wirksame Medikamente können sozusagen von überall kommen – von der Anwendung bereits bekannter Stoffe, über deren Abwandlung bis zur Nutzung vollkommen neuer Moleküle steht eine riesige Auswahl biologischer und chemischer Komponenten zur Verfügung. Natürlich werden bereits heute Einschränkungen vorgenommen. So orientieren sich Wissenschaftler*innen z. B. an Best Practices: Welche Moleküle eines Krankheitserregers oder einer erkrankten Zelle eignen sich der Erfahrung nach besonders gut, um dort mit Medikamenten anzugreifen? Welche genauen Spezifikationen hat diese Kontaktstelle? Das können elektrische Ladungen, die physikalisch ausgebildete Form, die dort platzierten Aminosäuren und vieles mehr sein. Dazu wiederum suchen die Wissenschaftler*innen in einer Vielzahl an Datenbanken die passenden, potenziellen Gegenstücke. Dennoch führt das in aller Regel zu einer viel zu großen Auswahl an Molekülen, die dann alle aufwendig im Labor getestet werden müssen.

Mithilfe des Digital Annealer konnte das Auffinden guter Kombinationen nicht nur deutlich beschleunigt, sondern auch noch mit einem Score versehen werden. Dazu wurden zunächst die Moleküle bzw. Proteine in einen digitalen Zwilling umgewandelt, die später das Ziel des Medikaments werden sollten. Anschließend wurden die Nebenbedingungen mithilfe eines QUBOs formuliert. Um jedoch effizient eine optimale Kombination aus Faktoren (und damit den zugehörigen, potenziellen Wirkstoff) zu finden, brauchte es eine Datenbank, in der die Werte der Funktionen der Nebenbedingungen für alle eingetragenen Wirkstoffe gespeichert waren. In einem Projekt mit dem Pharmakonzern POLARISqB

musste diese erst zusammen mit Spezialisten von Fujitsu erstellt werden. Nach der Optimierung der Eingangsparameter dauerte die Suche für jeden QUBO weniger als eine Sekunde und der zeitgleich berechnete Score gab die Qualität des Ergebnisses in Bezug auf die Nebenbedingungen an. Damit konnte ein Prozess, der normalerweise mehr als ein Jahr dauert, insgesamt auf acht Wochen reduziert werden. [17] [18] [19]

Quanten-Systeme und der Wert von Brückentechnologien

Wenn universelle Quantencomputer mit einer ausreichend großen Anzahl an Qubits für die reguläre Nutzung zur Verfügung stehen, werden sie die IT-Welt gehörig auf den Kopf stellen. Alleine die Konsequenzen für heute durch kryptografische Verfahren geschützte Daten und der Umgang damit sind nicht abzusehen. Aber bis es soweit ist, wird es noch eine Weile dauern. IBM hat zum Beispiel erst Ende 2020 angekündigt, dass sie mit der Implementierung ihres Quanten Gate Computers auf der Grundlage von supraleitenden Schaltkreisen mit 49 Qubits an Grenzen gestoßen sind, die sie mit dieser Technologie sehr wahrscheinlich nicht überwinden können. Sie setzen ihre Forschungsbemühungen daher in Richtung Silizium-Ionen fort und wollen mit der Quantelung derer Energieniveaus eine deutliche Miniaturisierung der Architektur und eine verbesserte Nutzung von Quanten-Gattern erreichen.[20] Auch Photonen-basierte Implementierungen gewinnen an Zuspruch, liegen aber in der Forschung noch weit zurück. [21]

Für die Lösung einer Vielzahl an Aufgaben werden wir daher um die Nutzung von Brückentechnologien nicht herumkommen. Und das ist kein Manko, sondern eine Stärke. Quantencomputer sind erst einmal ein Stück Hardware – erst die Anwendung generiert den wahren Mehrwert. Und wie vorher dargelegt, muss dazu ein Problem in einem QUBO Ansatz formuliert werden. Brückentechnologien stellen daher nicht nur ein Bindeglied zu zukünftigen Quantencomputern dar, sondern bieten die Möglichkeit, relevante Problemstellungen bereits heute adressieren zu können.



Die Digital Annealer Unit bietet als Brückentechnologie viele Vorteile. (Quelle: Fujitsu)

Kooperationen mit Universitäten auf der ganzen Welt

Ebenso wie in den Jahrzehnten der Entwicklung der Von-Neumann-Architektur bestimmt auch bei der Entwicklung der Quantencomputer die Anzahl der verfügbaren Qubits die Größe der Probleme, die adressiert werden können. Bei herkömmlichen IT-Systemen steht beispielsweise die 64 Bit-Architektur dafür, wie viele Bits der Rechner benutzt, wenn er Informationen im Speicher ablegt, und wie groß die Registerbreite ist, die der Prozessor nutzen kann, um mathematische Berechnungen durchzuführen. Eine 64 Bit-Maschine kann also 2^{64} Werte darstellen, während eine 32 Bit-Maschine nur 2^{32} Werte in einem Register darstellen kann. Das ist auch relevant, wenn es um die Menge des adressierbaren Speichers geht. Da ein Qubit theoretisch unendlich viele Zustände annehmen kann, hinkt der Vergleich natürlich. Dennoch kann man sich gut vorstellen, dass jedes Qubit einer Entität bzw. einem Objekt entspricht. Für das Kleidungsbeispiel aus dem Abschnitt über die QUBOs würden wir also drei Qubits für die Hemden und drei Qubits für die Hosen benötigen. So wird sehr deutlich, wie weit der Weg noch ist, den Quantencomputer in ihrer Entwicklung gehen müssen. Und auch der Digital Annealer stößt mit seinen aktuell 8.192 Hardware-Bits an Grenzen. Aus diesem Grund arbeiten die Fujitsu Laboratories Ltd. in Japan beständig daran, diese zu erhöhen. In ersten Laborversuchen ist es bereits gelungen, die Lösung von Problemen mit 1.000.000 benötigten Entitäten zu berechnen.

Um dieses Ziel zu erreichen, haben die Fujitsu Laboratories mit dem Digital Annealer unter Anwendung einer neuen parallelen Suchtechnologie die weltweit erste praktische Lösung im Maßstab von einem Megabit für eine Ising-Maschine erfolgreich demonstriert. [22]

Aber nicht nur die Weiterentwicklung der Brückentechnologien ist ein wichtiges Thema. Im März 2020 wurde die Zusammenarbeit mit dem Start-Up Quantum Benchmark, das von führenden Wissenschaftler*innen des Institute for Quantum Computing der University of Waterloo gegründet wurde, beschlossen, um die Entwicklung von Methoden zur Fehlerkorrektur in Quantencomputern voranzutreiben. Darüber hinaus gibt es auch einen regen Austausch über die Entwicklung von Quantenalgorithmen, die insbesondere in den Bereichen Pharmazie- und Materialforschung für Verbesserungen sorgen können. [23]

Im Oktober letzten Jahres verkündeten Fujitsu und Dataport die gemeinsame Unterstützung eines Lehrstuhls für Kombinatorische Optimierung in der Industrie an der Technischen Universität in Hamburg. Die Stiftungsprofessur ist auf zehn Jahre ausgelegt. Damit soll die Grundlagenforschung auf diesem wichtigen Einsatzgebiet weiter vorangetrieben werden und gleichzeitig ein Beitrag zur Ausbildung neuer Talente für Wissenschaft und digitale Wirtschaft geleistet werden. [24]

Ebenso im Oktober wurden die Kooperationen mit RIKEN und der University of Tokyo, mit der TU Delft in den Niederlanden und der Osaka University angekündigt. Im ersten Projekt geht es insbesondere um die Einbindung von Quanten- und Quanten-inspirierten Technologien in große Rechenzentren, sodass eine reibungslose und sich ergänzende Zusammenarbeit beider Architekturen möglich ist. Gemeinsam mit der TU Delft wird an der Entwicklung von Diamanten-basierten Spin Qubits gearbeitet. In diesen aus Farbdefekten bestehenden Qubits können gleich mehrere verschiedene Spins (Elektronspin, Kernspin) für verschiedene Aufgaben genutzt werden. Der Elektronspin lässt sich schnell manipulieren und eignet

sich gut, um Quantenoperationen durchzuführen. Die Kernspins besitzen extrem langlebige Quantenzustände, bis hin zu 70s, und sind deshalb vielversprechende Kandidaten für Quantenspeicher. Die Zusammenarbeit mit der Osaka University bezieht sich vor allem auf die Entwicklung von Quantenalgorithmen und Methoden zur Fehlerkorrektur. [25]

Quantenalgorithmen – Ausblick

Dass die Anzahl der verfügbaren Qubits erhöht werden muss, steht außer Frage. Doch wann es soweit sein wird, ist ungewiss, ebenso wie die Frage, wie Quantencomputer dann in der Praxis genutzt werden können. Und auch die Steigerung der verfügbaren Hardware-Bits des Digital Annealer genügt nicht für alle Probleme. Daher wird natürlich auch stetig an den Algorithmen und Datenstrukturen geforscht, wie die oben beschriebenen Kooperationen zeigen. Zu den aktuellen Entwicklungen aus diesem Bereich ein kurzer Ausblick.

Feature Selection – Die Feature Selection ist ein Verfahren, bei dem im Vorfeld die Datenmenge bzw. die Anzahl ihrer Eigenschaften reduziert werden soll, damit der eigentliche Trainingsalgorithmus weniger Zeit benötigt. Das grundlegende Verfahren dahinter wird in der statistischen Analyse schon länger angewendet: Die Eigenschaften der Daten werden auf Korrelationen untereinander hin untersucht. Werden zwei oder mehr Eigenheiten identifiziert, die eine starke Korrelation zueinander aufweisen, kann man diese entweder durch Zusammenführung und die Auswahl eines und Eliminierung der anderen Eigenschaften verringern. Stellt man die Frage nun anders herum, erhält man geschickterweise wieder ein Optimierungsproblem: Welche Auswahl an Features bzw. Eigenschaften beschreibt die vorhandenen Daten optimal? Hierzu kann ein QUBO entworfen werden, der die entsprechende Feature Selection vornimmt. Der Prozess hat zwei weitere Vorteile: Normalerweise erfordert die Auswahl von relevanten Eigenschaften immer mindestens eine*n Domänenexpert*in, der aus der Erfahrung heraus eine Grundmenge vorgibt und beim Auswahlprozess unterstützt. Das ist aber nicht immer möglich und in diesem Fall auch nicht notwendig, da die Auswahl direkt an Hand der Daten erfolgt und zwar so, dass die Features möglichst unabhängig voneinander und aussagekräftig sind. Zum zweiten kann so einer potenziellen Zerlegung von Problemen, die normalerweise zu groß sind, um sie auf aktueller Hardware zu lösen, zugekommen werden. [26]

QBoost – Boosting ist ein adaptives Verfahren, welches viele („tausende“) „einfache“ bzw. schwache Klassifizierer bewertet und hieraus einen sehr guten oder starken Klassifizierer baut. Hierbei wird die Bewertung der Klassifizierer über einen QUBO-spezifischen Ansatz realisiert. Der Quanten-Ansatz versetzt hierbei den QBoost-Algorithmus in die Lage, alle vorgegebenen schwachen Klassifizierer gleichzeitig zu bewerten sowie auch in einem passenden Ensemble zusammenzustellen. [27]

Quantum Machine Learning

Maschinelles Lernen (ML) stellt eine potenziell interessante Anwendung für Quantencomputing dar. Aktuelle klassische Ansätze für ML benötigen riesige Rechenressourcen und in vielen Fällen kostet das Training sehr viel Zeit. Quantencomputer versprechen nicht nur eine mehrfache Beschleunigung des Modelltrainings, sondern erlauben es auch, noch größere Datenmengen einzube-

ziehen, die für ein gut trainiertes Modell erforderlich sind. Von Quantencomputern ist Folgendes zu erwarten:

- Schnellere Laufzeiten für das Training von ML-Modellen
- Erhöhte Lernkapazität, da sie in der Lage sind, aus riesigen Datenmengen zu lernen

Die beiden oben genannten Aspekte werden in Kombination bessere und effizientere ML-Modelle ermöglichen. [28]

Ein Beispiel zu Quantenneuronalen Netzen: Ein Datensatz mit etwa 10.000 Merkmalen benötigt auf einem klassischen Computer 10.000 Bits. Auf einem universellen Quantencomputer kann der gleiche Datensatz auf nur 14 Qubits abgebildet werden. Steigt die Anzahl der Features, sagen wir auf 10 Millionen, bleibt die Anzahl der benötigten Qubits bei nur 25. Auf einer klassischen Hardware führt das Einlesen von Datensätzen ohne jegliche Reduktion der Dimensionen schnell zu einem Speicherüberlauf. Bei QNN sieht man deutlich eine logarithmische Effizienz für den Speicherplatzbedarf der Trainingsdaten. Was die Abbildung von Fließkommazahlen betrifft, so gibt es bereits polynomielle Unterprogramme, um die Fließkommazahlen auf die Quantenzustandsamplitude der beteiligten Qubits abzubilden.

Ein weiterer rechenintensiver Schritt beim Training eines neuronalen Netzwerks ist der Backpropagation-Schritt, der im Grunde genommen den Gradienten in Bezug auf alle Gewichte berechnet, für den Gradientenabstiegs-Optimierungsalgorithmus. Der Gradientenabstiegsalgorithmus ist an sich ein sehr schneller Algorithmus für die Optimierung von kontinuierlichen Funktionen. Bei neuronalen Netzwerken ist die Optimierungsfunktion jedoch eine multivariate Funktion mit Millionen bis Milliarden von zu optimierenden Parametern. Klassischerweise wird der Gradient mithilfe des Backpropagation-Algorithmus berechnet. Auf einem Quantencomputer können die Gradienten berechnet werden, indem man zwei Vorwärtsdurchläufe durchführt, einen auf die betreffende Variable und den zweiten Durchlauf mit einem kleinen Offset zum Variablenwert. Die Erwartungswerte, die sich aus den beiden Durchläufen ergeben, können dann verwendet werden, um den Gradienten in Bezug auf die Variable zu berechnen. [29]

Über dieses Beispiel hinaus gibt es mehrere Gattermodell-Algorithmen wie Grovers Algorithmus, den HHL Algorithmus usw., die als unterstützende Subroutinen für Quantum Machine Learning Modelle dienen können. Der Vorteil von Quantencomputern für verschiedene Modelle des maschinellen Lernens wurde bereits für einige der bekanntesten ML-Algorithmen theoretisch bewiesen, z. B. für Neuronale Netze, Support Vector Machines (SVM), Principle Component Analysis (PCA), Reinforcement Learning, Bayes'sche Inferenz und Boltzmann-Maschinen. [30]

Seit Anfang 2020 ist Fujitsu assoziierter Partner des Projektes PlanQK. Ziel der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Initiative ist die Entwicklung einer Plattform und eines Ökosystems für Quantenunterstützte Künstliche Intelligenz. Nutzer*innen, Entwickler*innen und Spezialisten soll so gleichermaßen ein leichter Zugriff auf Ressourcen und Konzepte ermöglicht werden. Das unterstützen wir gerne und blicken mit Spannung auf die aktuellen Entwicklungen. [31]

Die Autoren möchten sich ganz herzlich für Zulieferungen, Anregungen und Hilfestellungen bei Dr. Abhishek Awasthi, Dr. Sebastian Engel, Dr. Christian Münch, Andreas Rohnfelder, Isabel Schwende und Dr. Stefan Walter bedanken.

Referenzen: [1] Metropolis, Nicholas; Rosenbluth, Arianna W.; Rosenbluth, Marshall N.; Teller, Augusta H.; Teller, Edward (1953). „Equation of State Calculations by Fast Computing Machines“. *The Journal of Chemical Physics*. 21 (6): 1087. Bibcode:1953JChPh..21.1087M. doi:10.1063/1.1699114. [2] A. Das and B. K. Chakrabarti (Eds.), *Quantum Annealing and Related Optimization Methods*, Lecture Note in Physics, Vol. 679, Springer, Heidelberg (2005). [3] <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristleccone-googles-new.html> [4] Quantencomputer – Wikipedia [5] Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr, C. D.; Vecchi, M. P. (1983). „Optimization by Simulated Annealing“. *Science*. 220 (4598): 671–680. Bibcode:1983Sci..220..671K. CiteSeerX 10.1.1.123.7607. doi:10.1126/science.220.4598.671. JSTOR 1690046. PMID 17813860. S2CID 205939. [6] Khachatryan, A.; Semenovskaya, S.; Vainshtein, B. (1979). „Statistical-Thermodynamic Approach to Determination of Structure Amplitude Phases“. *Sov. Phys. Crystallography*. 24 (5): 519–524. [7] Khachatryan, A.; Semenovskaya, S.; Vainshtein, B. (1981). „The Thermodynamic Approach to the Structure Analysis of Crystals“. *Acta Crystallographica*. 37 (A37): 742–754. Bibcode:1981AcCrA..37..742K. doi:10.1107/S0567739481001630. [8] Endre Boros, Peter L. Hammer & Gabriel Tavares (April 2007). „Local search heuristics for Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO)“. *Journal of Heuristics. Association for Computing Machinery*. 13 (2): 99–132. doi:10.1007/s10732-007-9009-3. S2CID 32887708. [9] Di Wang & Robert Kleinberg (November 2009). „Analyzing quadratic unconstrained binary optimization problems via multicommodity flows“. *Discrete Applied Mathematics. Elsevier*. 157 (18): 3746–3753. doi:10.1016/j.dam.2009.07.009. PMC 2808708. PMID 20161596. [10] Annealing and QUBO Tutorials: Services : Fujitsu Deutschland [11] main incubator nutzt Digital Annealing-Technologie zur Optimierung von Verbriefungstransaktionen - Fujitsu Deutschland [12] main incubator ist schon dabei: Digital Annealing - Fujitsu-Interview (it-finanzmagazin.de) [13] Helping Main Incubator with Digital Annealer - YouTube (Kann gerne bei Online-VÖ als Video eingebunden werden) [14] Digitally transforming finance with Main Incubator - YouTube (Kann gerne bei Online-VÖ als Video eingebunden werden) [15] Mehr Internet für alle: T-Labs und Fujitsu optimieren die Nutzung der Netzinfrastruktur [16] Wie kann der Hamburger Hafen als Blueprint für intelligente Städte dienen? - YouTube (Kann gerne bei Online-VÖ als Video eingebunden werden) [17] POLARISqb and Fujitsu • POLARISqb [18] Digital Annealer speeds up Polarisqb's drug discovery platform 10,000 times faster than traditional molecular analysis - Fujitsu Global [19] Accelerating Drug Discovery : Fujitsu Global [20] IBM Research - Zurich, Quantum technology & computing [21] Light-Based Quantum Computer Exceeds Fastest Classical Supercomputers - Scientific American [22] Fujitsu Develops New Tech for Quantum-Inspired, 'Digital Annealer,' Achieving Megabit-class Performance (hpcwire.com) [23] Fujitsu Laboratories and Quantum Benchmark Begin Joint Research on Algorithms with Error Suppression for Quantum Computing (finanznachrichten.de) [24] Press Release: Fujitsu gibt der Kombinatorischen Optimierung in der Industrie einen akademischen Schub – mit einem neuen Lehrstuhl an der TU Hamburg (tuhh.de) [25] Fujitsu Commences Joint Research with World-Leading Institutions for Innovations in Quantum Computing - Fujitsu Global [26] Andrew Milne, Maxwell Rounds, and Phil Goddard, Optimal feature selection in credit scoring and classification using a quantum annealer, White Paper 1Qbit. [27] Hartmut Neven, Vasil S. Denchev, Geordie Rose and William G. Macready, QBoost: Large Scale Classifier Training with Adiabatic Quantum Optimization, Workshop and Conference Proceedings 25:333–348, 2012 Asian Conference on Machine Learning. [28] Peters et al., Machine learning of high dimensional data on a noisy quantum processor, Fermilab-Pub-20-624-QIS, arXiv: 2102.09581. [29] Biamonte et al., Quantum Machine Learning, Nature 549, 195-202 (2017). [30] Peters et al., Machine learning of high dimensional data on a noisy quantum processor, Fermilab-Pub-20-624-QIS, arXiv: 2102.09581. [31] <https://planqk.de>

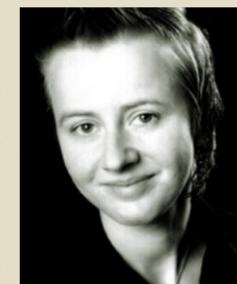
Alexander Kaffenberger

Alexander Kaffenberger ist seit 17 Jahren bei Fujitsu tätig. Zunächst als IT-Projektmanager und Business Developer, u.a. für die Bereiche Cloud Service und Big Data. 2017 übernahm er die Leitung des Big Data Competence Center. Anfang 2020 wechselte er in den Bereich Digital Incubation und wirkt dort als Quantum Ecosystem Manager.



Anne-Marie Tumescheit

Anne-Marie Tumescheit ist seit 2015 in der Wissenschaftskommunikation tätig, zunächst als CvD von Fraunhofer Innovisions und stv. Leitung der Medienproduktion beim Fraunhofer-Verbund IUK-Technologie. 2019 erfolgte der Wechsel zu Fujitsu, wo sie nun den Digital Incubation mit Marketing- und Kommunikationsmaßnahmen betreut.



Status Quo und Roadmap von IBM Quantum und erste Lösungsansätze

Basil Moshous, Stefan Kister, Carsten Dieterle, Mark Mattingly-Scott

IBM Deutschland GmbH

Einleitung

In den vergangenen Dekaden haben wir viele Probleme in Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft äußerst erfolgreich mit Computern gelöst. Es gibt aber bis heute schwierige Probleme, die sich nicht mit klassischen Computern lösen lassen. Mit der Entwicklung der Quantencomputer zeichnet sich eine alternative Herangehensweise an einige dieser schwer fassbaren Probleme ab. Aber um diese Probleme erfolgreich zu lösen, bedarf es mehr als nur Quantencomputer. Wir müssen ein komplett neues Ökosystem – von der Hardware über die Programmierung bis hin zu den Algorithmen – entwickeln und bereitstellen. Zusätzlich müssen wir auch die Industrie mit Partnerschaften in die Forschung mit einbeziehen.

In diesem Artikel fassen wir die Herangehensweise der IBM bei der Entwicklung eines solchen Quantum-Ökosystems zusammen und geben einen Einblick in Anwendungsfelder der Finanzindustrie.

IBM Quantum – Technologie

Die IBM Quantenprozessoren nutzen Elementarteilchen, um über deren quantenmechanischen Interaktionen Quantenschaltungen anstelle der Logikschaltungen digitaler Computer auszuführen. Wir repräsentieren Daten unter Verwendung der elektronischen Quantenzustände künstlicher Atome, die als supraleitende Transmon-Qubits bekannt sind. Diese Atome können bei dem von IBM gewählten Aufbau durch Sequenzen von Mikrowellenimpulsen verbunden und manipuliert werden, damit funktionsfähige Schaltkreise entstehen. Die Energiedifferenz der einzelnen zu unterscheidenden Zustände ist dabei so gering, dass die quantenmechanischen Zustände der Qubits durch minimalste Interaktionen mit der Außenwelt zerstört werden.

Die zentralen Herausforderungen bei Quantencomputern bestehen heute darin herauszufinden, wie die Zustände der Qubits lange genug interaktionsfähig bleiben, die Fehlertoleranz

verbessert werden kann und gleichzeitig die Qubits zu großen Verbänden verschaltet werden können. Denn nur so kann ein Verbund von vielen Qubits komplexe Algorithmen mit geringen Fehlern berechnen.

IBM hat eine Metrik - das Quantum Volume - eingeführt, welche Auskunft über die Leistungsfähigkeit der Quantencomputer angibt [1]. Sie berücksichtigt unter anderem die Anzahl der verfügbaren Qubits, die Fehlerrate der Gates, die Fehlerrate der Messungen und das Übersprechen zwischen den Zuständen benachbarter Qubits. Ein höheres Quantum Volume bedeutet, dass längere Algorithmen ausgeführt werden können und Ergebnisse genauer sind. Diese Metrik wird inzwischen auch von anderen Anbietern von Quantencomputern genutzt.

IBM Q Systems Roadmap

Seit Mitte der 2000er haben IBM Forscher supraleitende Qubits untersucht, die Kohärenzzeiten erhöht und gleichzeitig die auftretenden Fehler verringert. Diese Forschung ermöglichte Anfang 2010, erste Multi-Qubit-Systeme zu fertigen.

Lassen Sie uns nun auf die Roadmap unserer IBM Quantencomputer eingehen, die uns von den heutigen lauten, relativ kleinen Geräten mit bis zu 65 Qubits zu den geplanten universellen Quantencomputern mit mehr als einer Million Qubits führen wird [2].

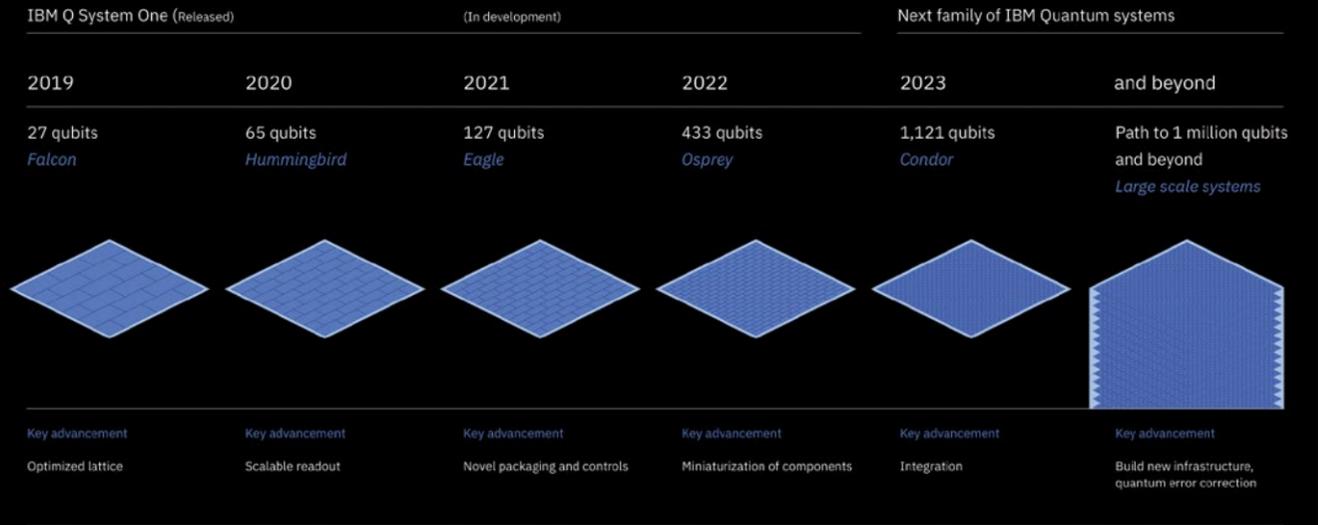
Im Folgenden werden wir einige Codenamen verwenden. Vogelnamen werden dabei als Codenamen für IBM Q Prozessoren genutzt, Städtenamen als Codenamen für die einsatzfähigen IBM Q Systeme.

Cloud Zugang für IBM Q Systeme

Um Zugriffe auf IBM Q Systeme zu vereinfachen, hat sich IBM entschieden, seine Quantencomputer über einen Cloud-Zugang verfügbar zu machen [3].

Heute stellen wir mehr als zwei Dutzend IBM Q Systeme über die IBM Cloud bereit, an denen unsere Kunden experimentieren

Scaling IBM Quantum technology



Ein Blick auf die IBM Q Quanten System Roadmap. Von den heutigen eher kleinen und verrauschten Systemen zu den fortschrittlichen Quanten-Systemen der Zukunft [X2].

können. Das Angebot umfasst auch einen kostenfreien Zugang zu ausgewählten Systemen, damit jeder Interessierte die neue Technologie ausprobieren kann.

Für dieses Angebot sind unter anderem die 5-Qubit-IBM Q Canary-Prozessoren und die 27-Qubit-IBM Q Falcon-Prozessoren verfügbar.

Quantum Volume als Metrik für die Leistungsfähigkeit von Quantencomputern

Auf einem im Jahr 2020 installierten IBM Quantum Falcon-System lief eine Quantenschaltung, die zunächst ein Quantum Volume von 32 und dann von 64 erreicht hat. Im weiteren Verlauf des Jahres wurde das System noch soweit verbessert, dass IBM im Dezember 2020 sogar ein Quantum Volume von 128 erreichen konnte [4].

An diesem Beispiel sieht man, dass die Erhöhung der Qubits in einem System nur ein Faktor ist, um bessere Ergebnisse zu erzielen. Die Verbesserungen am Compiler, die Verfeinerung der Kalibrierung der Zwei-Qubit-Gates, die optimierte Rauschbehandlung und die Anpassungen der Mikrowellenimpulse für das Auslesen sind genauso essenziell.

Die Weiterentwicklung unserer IBM Q-Prozessoren ist damit eng mit den Erkenntnissen des Betriebs und der Verbesserung der aktuellen IBM Q-Systeme verbunden.

Im 2. Halbjahr 2020 haben wir dann den 65 Qubit-IBM Quan-

tum Hummingbird-Prozessor in der IBM Cloud zur Verfügung gestellt, auf den wir nun unsere Erkenntnisse anwenden werden.

Optimierung der Ausleselektronik

Beim Hummingbird-Prozessor haben wir eine Optimierung der Ausleselektronik vorgenommen. Bisher wurde jedes einzelne Qubit mithilfe eines eigenen Kanals ausgelesen. Der Hummingbird-Prozessor nutzt nun ein Multiplexing, um 8 Qubits über einen Kanal auszulesen [2]. Diese Technologie reduziert die Gesamtmenge an Kabeln und Komponenten, die zum Auslesen erforderlich sind. Dadurch verbessert sich die Skalierbarkeit, während alle Hochleistungsmerkmale der Falcon-Prozessorgeneration erhalten bleiben. Wir haben zusätzlich die Latenzzeit der Signalverarbeitung im zugehörigen Steuerungssystem erheblich reduziert. Diese Optimierungen beeinflussen Rückkopplungs- und Feed-Forward-Systemfunktionen und erlauben uns in Zukunft die Kontrolle von Qubits anhand von klassischen Operatoren, während gleichzeitig Quanten-Programme laufen. Wir werden im Folgenden noch darauf eingehen, dass wir für diese Funktionalität auch unseren Software Stack anpassen werden.

100-Qubit-Meilenstein

Nächstes Jahr werden wir den 100-Qubit-Meilenstein mit unserem geplanten 127-Qubit-IBM Quantum Eagle-Prozessor übertreffen. Im Zuge dieser Weiterentwicklung werden die folgenden Optimierungen zum Einsatz kommen:



Mitglieder des IBM Quantum Teams bei der Entwicklung von neuen Kühlsystemen für die nächste Generation von Quantencomputern. Quelle: Connie Zhou für IBM [X2]

Durchkontaktierungen und mehrstufige Verkabelung

Durchkontaktierungen und mehrstufige Verkabelung, die eine große Dichte klassischer Steuersignale effektiv auffächern und gleichzeitig die Qubits in einem separaten Bereich schützen können, sind in diesem Design die fundamentalen Neuentwicklungen. Diese Technologien ermöglichen es uns, bei dem Prozessor die benötigten hohen Kohärenzzeiten aufrechtzuerhalten.

Fehlerkorrektur

Mit dem in diesem Jahr eingeführte Ansatz der festen Frequenz für Zwei-Qubit-Gatter und einer hexagonalen Qubit-Anordnung haben wir in Falcon ein empfindliches Gleichgewicht zwischen Konnektivität und Reduzierung von Übersprechfehlern gefunden. Dieses Qubit-Layout hat uns ermöglicht, die „heavy-hexagonal“ Fehlerkorrektur zu implementieren [9].

Klassische Rechenfunktionen

Mit dem Eagle-Prozessor werden wir klassische Rechenfunktionen auf den Qubits in Echtzeit einführen. Diese Funktionen ermöglichen die Ausführung einer breiteren Familie von Quantenschaltungen und -codes [5].

Skalierbare Konstruktionsprinzipien

Die für unsere kleineren Prozessoren festgelegten Konstruktionsprinzipien werden uns ermöglichen, 2022 unser IBM Quantum Osprey-System mit 433 Qubits herauszubringen. Effizientere und dichtere Steuerungen und eine neu entwickelte Kühl-Infrastruktur stellen sicher, dass die Skalierung unserer Prozessoren nicht die Leistung einzelner Qubits beeinträchtigt, weitere Störquellen einführt oder einen zu großen Platzbedarf erzeugt.

1000-Qubit-Meilenstein

Im Jahr 2023 planen wir den IBM Quantum Condor-Prozessor mit 1.121 Qubit vorzustellen, der die Erfahrungen aus früheren Prozessorgenerationen berücksichtigt und gleichzeitig die kritischen Zwei-Qubit-Fehler weiter senkt, damit wir längere Quantenschaltungen ausführen können.

Wir betrachten Condor als einen Meilenstein, der zeigt, dass wir in der Lage sind, Fehlerkorrekturen effizient zu implementieren und unsere Geräte zu skalieren. Dabei ist er gleichzeitig komplex genug, um potenzielle Quantenvorteile zu untersuchen – Probleme, die wir auf einem Quantencomputer effizienter lösen können als auf dem besten Supercomputer der Welt.

Neue Kühlsysteme

Einige der dringenden Herausforderungen bei der Skalierung eines Quantencomputers sind in der Entwicklung des Condor-basierenden Quantensystems berücksichtigt.

Für Quantensysteme, die aus mehreren Quanten-Prozessoren bestehen, müssen zusätzlich neue Kühlsysteme entwickelt werden. Aus diesem Grund haben wir schon heute begonnen, einen neuen Super „Dilution Refrigerator“ zu entwickeln. Dieser ist mit Blick auf ein Millionen-Qubit-System entworfen. Grundlegende Machbarkeitstests sind inzwischen abgeschlossen. Mit einer Höhe von ca. 3 Metern und einer Breite von fast 2 Metern ist dieser „Goldeneye“ genannte Gigant einzigartig.

Fehlertolerante Quantencomputer

Um eine Skalierung eines Quantencomputers über mehrere Kühlsysteme hinweg zu erreichen, müssen die Quanten-Prozessoren über „Quantum Interconnects Links“ gekoppelt werden.

Auch wenn wir die Entwicklung von fehlertoleranten Quantencomputern schon antizipieren, müssen wir die aufgeführten Hindernisse noch lösen. Dabei stehen wir vor einigen der größten Herausforderungen in der Geschichte des technologischen Fortschritts.

Aufgrund unserer Vision sehen wir aber innerhalb des kommenden Jahrzehnts einen fehlertoleranter Quantencomputer als erreichbares Ziel an.

IBM Quantum – Programmierung

Vor fast 5 Jahren hat das IBM Quantum-Team den Zugang zu unseren ersten IBM Q-Quantencomputern in der IBM Cloud ermöglicht. Heute führen Mitglieder der IBM Quantum Community jeden Tag Milliarden von Schaltkreisen auf den in der Cloud zur Verfügung gestellten IBM Quantum Rechnern aus.

Wir haben zwei Möglichkeiten für Entwickler geschaffen, um Erfahrungen mit der Quanten-Programmierung zu sammeln. Sie können:

- In einem Deep Dive-Ansatz mit Qiskit [6-8], unserem Open Source, Full Stack Quanten-Software-Framework in die Quanten-Programmierung einsteigen,
- oder mit der IBM Quantum Experience [3] Experimente mit Quantenschaltungen designen und Experimente über eine Webanwendung durchführen.

In beiden Umgebungen setzen wir auf einen kompletten Stack, der von der Anwendungsentwicklung bis hinunter auf die Hardware-Ebene reicht. Dieser Stack besteht grob aus zwei Bereichen:

1. Die Quantum Code Ausführungsschicht auf Hardware- und Simulator-Ebene
2. Die Quantum Code Programmierschicht

Quantum Code auf realen und simulierten Systemen ausführen

Ausführen von Schaltungen auf reeller Hardware

Quanten-Schaltkreise sind die Grundlagen für unseren Software-Stack. Qiskit bietet eine Reihe von Werkzeugen

- zum Designen von Quantenprogrammen auf der Ebene von Schaltkreisen und Impulsen
- zur Optimierung der Einschränkungen eines bestimmten physikalischen Quantenprozessors
- und zur Verwaltung der Batch-Ausführung von Experimenten auf Backends, die über das Internet verfügbar sind.

Qiskit ist modular aufgebaut und vereinfacht das Hinzufügen von Erweiterungen für Schaltungsoptimierungen und Backends und kann auch für Quanten-Systeme anderer Anbieter genutzt werden.

Für Qiskit haben wir die OpenQASM (Open Quantum Assembly Language) entwickelt und frei zur Verfügung gestellt [10]. Auch hier hat IBM Ende 2020 Erweiterungen vorgeschlagen, um zusätzliche Algorithmen abbilden zu können, bei denen Quantum und klassische Rechnungen verschränkt werden [12]. Wie im Artikel schon vorher beschrieben, brauchen wir diese Funktionalität für unsere kommenden Quanten-Systeme.

Ausführung von Schaltungen auf Simulatoren

Zusätzlich bietet Qiskit ein leistungsstarkes Simulator-Framework für den Qiskit-Software-Stack. Es enthält optimierte C++-Simulator-Backends zum Ausführen kompilierter Schaltungen und Werkzeuge zum Erstellen hochgradig konfigurierbarer Rauschmodelle. Damit können realistische Simulationen mit Fehlern, die während der Ausführung auf realen Geräten auftreten, durchgeführt werden. Reale Experimente können so mit unseren Erwartungen verglichen werden.

Quantum Code schreiben

Schaltkreise

Qiskit bietet eine Reihe von Werkzeugen

- zum Erstellen von Quantenprogrammen auf der Ebene von Schaltkreisen und Impulsen
- zur Optimierung für die Einschränkungen eines bestimmten physikalischen Quantenprozessors
- und zur Verwaltung der Batch-Ausführung von Experimenten auf Remote-Zugriffs-Backends.

Charakterisierung (Experimentalist Toolbox)

Das Charakterisierungs-Framework bietet Schaltungen und Analysemethoden, um die Fehlerquellen unserer Geräte zu verstehen und zu charakterisieren. Solche Parameter umfassen T1, T2*, T2, Hamiltonian-Parameter wie die ZZ-Interaktionsrate und Regelfehler in den Quantum Gates.

Algorithmen

Qiskit enthält ein generisches Framework von domänenübergreifenden Quantenalgorithmen, gegen das Anwendungen für Quantumcomputing entwickelt werden können.

Anwendungen

Aufbauend auf dem gesamten Stack ermöglicht Qiskit eine ein-

fache Methode, an Quantencomputern Forschung zu betreiben. Man kann in jeder Ebene des Stacks entwickeln, Experimente durchführen und den Ablauf der Programme anpassen. Hiermit ist dann schlussendlich auch eine Entwicklung für spezifische Anwendungsfälle in Industriesektoren möglich, die das große Potenzial der Quantenvorteile ausnutzen.

IBM Quantum Network

Nachdem wir die Technologie unserer IBM Quantum-Systeme besprochen und einen Einblick in die Frameworks gegeben haben, die wir zu deren Programmierung zur Verfügung stellen, kommen wir in diesem Abschnitt nun auf das IBM Quantum Network zu sprechen [13, 14].

Da wir ein sehr dynamisches Umfeld haben, in dem ständig neue Erkenntnisse gewonnen werden, sehen wir eine Plattform zum Austausch von Informationen als essenziell an.

Die Grundidee des „IBM Quantum Networks“ ist es, in einer Zusammenarbeit mit Partnern folgende Bereiche zu stärken:

- Ausbildung und Training
- Zugang zur Technologie
- Beschleunigung der Forschung
- Entwicklung von Anwendungen

Im IBM Quantum Network arbeitet IBM mit Interessierten, Universitäten, Instituten, innovativen Unternehmen und Early Adoptern zusammen und bietet über die Cloud Zugriff auf die leistungsstärksten Quantensysteme der IBM. Wir sind der Überzeugung, dass nur durch diesen Austausch von Ideen, Forschung und Tests die Quantencomputer ihr volles Potenzial entfalten und Durchbrüche erzielen werden.

Je nach Grad des Engagements bietet IBM den Teilnehmern „Open“- „Member“- und „Partner“-Angebote an.

In Deutschland wurde zum Beispiel mit der Fraunhofer-Gesellschaft eine Forschungs-Kollaboration geschlossen [15]. Im Zuge dieser Zusammenarbeit haben wir in 2020 einen IBM Q System One Quantencomputer in der Nähe von Stuttgart installiert. Das System ist seit Januar in Betrieb und das erste seiner Art in Europa.

Die Kooperation hat sich zum Ziel gesetzt, anwendungsorientierte Quantencomputerstrategien unter vollständiger Datenhoheit des europäischen Rechts zu entwickeln. Derzeit arbeiten bereits mehr als zehn Fraunhofer-Institute in verschiedenen Bereichen der Quantentechnologie.

Das forschungstechnisch sehr aktive IBM Quantum Network ist Anfang 2021 schon auf weit über 100 Mitglieder im Member- und Partner-Status angewachsen.

IBM Quantum – Anwendungsfelder am Beispiel der Finanzindustrie

Vorteile in der Kreditrisikoanalyse und bei der Vorhersage der Preisentwicklung von Derivaten

Quantencomputern wird ein sehr großes Einsatzfeld in Wissenschaft und Industrie zugeschrieben. Denn überall dort, wo mathematische Probleme die klassischen Systeme von heute vor große Herausforderungen stellen, könnten zukünftige Quanten-

computer diese Probleme viel schneller lösen, und sogar neue, noch nie angedachte Probleme angehen.

Zum Beispiel ist in der Finanzdienstleistungsbranche das Rechnen auf Quantencomputern ein sehr lukratives Feld (vgl. z.B. [16]). Die dort verwendeten mathematischen Verfahren lassen sich gut auf einem Quantensystem abbilden. So konnten Forscher von IBM und andere Mitglieder des IBM Quantum Networks schon viele Berechnungen mit unterschiedlichen Quantenalgorithmen auf wissenschaftlichem Niveau angehen und gute Ergebnisse aufzeigen, die das zukünftige Potenzial dieser neuen Technologie erkennen lassen.

Die mathematischen Verfahren umfassen hier:

- Optimierung (vgl. zum Beispiel in den Anwendungsfeldern Portfolio Optimierung/Management oder Transaktionen-/Sicherheitenabwicklung) [17-20]
- Simulation (vgl. zum Beispiel in den Anwendungsfeldern Kreditrisikoanalyse oder Preisentwicklung von Optionen/Derivaten) [21-30]
- Maschinelles Lernen (vgl. zum Beispiel in den Anwendungsfeldern Kreditbewertung oder Geldwäsche-/Betrugserkennung) [31-36]

Damit eröffnet sich ein großes Anwendungsspektrum für einen möglichen Einsatz von Quantencomputern, um zukünftig Verbesserung von geschäftskritischen Finanzberechnungen zu erzielen.

Aber die heutigen Quantencomputer sind noch zu fehlerbehaftet und nicht leistungsstark genug, um schon jetzt Vorteile in realen Anwendungsfällen gegenüber klassischen Verfahren zu zeigen. Daher stellt sich vielfach die Frage, wann und welche Anwendungen am ehesten von Quantenvorteilen profitieren und wie leistungsfähige Quantencomputer ausgestattet sein müssen, um diese Anwendungen deutlich besser laufen zu lassen, als es klassische Systeme können.

Auch wenn diese Frage nicht einfach zu beantworten ist, gibt es schon gute Abschätzungen auf Basis der heutigen Arbeiten über relevante Finanzberechnungen auf Quantencomputern.

Zum Beispiel haben IBM Forscher einen Quantenalgorithmus für die Berechnung von Kreditrisiken, im Speziellen dem „Economic Capital Requirement“ (ECR), entwickelt [24]. Das ECR ist eine wichtige Risikometrik, um regulatorische Anforderungen zu erfüllen. Über die Ermittlung des ECR stellen Finanzunternehmen gegenüber der Regulierungsbehörde dar, wie viel Rückstellungskapital erforderlich ist, um eine Insolvenz zu vermeiden.

Für die Berechnung des ECR werden heute häufig Monte-Carlo-Simulationen auf klassischen Computern eingesetzt, bei denen nach dem Zufallsprinzip simuliert wird, wie sich der Gesamtverlust im Laufe einer Zeitvorgabe und innerhalb eines Vertrauensintervalls entwickelt. Hierzu muss eine große Anzahl dieser Simulationen ausgeführt werden, damit die Ergebnisse zu einer vernünftigen Antwort konvergieren.

Der in diesem Artikel dargestellte Ansatz basiert auf dem „Quantum Amplitude Estimate“ (QAE) Algorithmus, mit dem die ECR-Metrik mit einer quadratischen Beschleunigung im Vergleich zu klassischen Monte-Carlo-Simulationen berechnet werden kann. Doch für wirtschaftlich relevante ECR-Berechnungen mit dem QAE-Algorithmus sind die heutigen Quantencomputer leider noch zu fehlerbehaftet und haben zu wenige Qubits. Trotzdem

konnten die Forscher eine Abschätzung darüber geben, wie sich die Laufzeit der Berechnungen auf zukünftigen fehlertoleranten Quantencomputern mit dem beschriebenen Quantenalgorithmus darstellen würde. Ein wichtiger Aspekt bei dieser Abschätzung ist die Schaltkreistiefe in Abhängigkeit der Problemgröße – in diesem Fall von der Anzahl der zu berücksichtigenden Credit Assets.

Hierbei spielt insbesondere die Betrachtung der sogenannten Clifford+T Gates eine wesentliche Rolle, deren Anzahl die notwendige Schaltkreistiefe (T-Depth) bestimmen, also die mögliche Anzahl an Gate-Operationen, die auf dem Quantencomputer in der Zeit durchführbar ist, in der das System noch als kohärent gilt. Die T-Gates gelten als die aufwendigsten zu prozessierenden Gates in fehlertoleranten Quantensystemen.

Für ein Portfolio mit 1 Million Assets ermittelten die Forscher eine Laufzeit im Bereich von nahezu Echtzeit, wenn man entsprechende Näherungen und Aggregationen bei den Assets berücksichtigt, die auch heute schon für die Vereinfachung der klassischen Monte-Carlo-Simulationen herangezogen werden.

Ein weiteres Beispiel im Kontext von Preisgestaltung von Derivaten liefern in einem neuen Vorabdruck [37] Quantenforschungsteams von IBM und Goldman Sachs. Sie geben dort eine erste detaillierte Schätzung über die Quantum Computing-Ressourcen ab, die benötigt werden, um Quantenvorteile bei der Ermittlung der Preisgestaltung von Derivaten zu erzielen. Ein Derivatkontrakt ist ein finanzieller Vermögenswert, dessen geschätzter Wert darauf basiert, wie sich der Preis einiger Vermögenswerte – wie Futures, Optionen, Aktien, Währungen und Rohstoffe – im Laufe der Zeit ändert. Die Möglichkeit, das mit jedem dieser Verträge verbundene Risiko genauer zu bewerten oder einzuschätzen – selbst wenn der Vorteil relativ gering ist – könnte große Auswirkungen auf die Finanzdienstleistungsbranche haben.

Auch wenn sich die Forscher auf die Preisgestaltung der Derivate konzentriert haben, kann die Arbeit für andere Arten von Risikoberechnungen übertragen werden. Derivate sind ein guter Ausgangspunkt, da von ihnen jedes Jahr weltweit enorme Mengen gehandelt werden.

Wie bei der Kredit-Risikoanalyse werden Derivate häufig mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen auf klassischen Computern berechnet, sodass auch hier der QAE-Algorithmus zur Berechnung auf dem Quantencomputer herangezogen wurde.

Die Forscher führen zudem eine neue Methode ein, um die Frage der zukünftigen Ressourcen von Quantencomputern besser einschätzen zu können. Der neue Ansatz – die sogenannte Re-Parametrisierungsmethode – kombiniert vortrainierte Quantenalgorithmus mit Ansätzen von fehlertoleranten Quantencomputern, um den geschätzten Ressourcenbedarf auf Quantensystemen bei der Berechnung von Preisentwicklungen für Finanzderivate dramatisch zu reduzieren.

Diese Ressourcenschätzungen geben einen Schwellenwert für die Leistungsfähigkeit von zukünftigen Quantencomputern an, ab dem sie in der Lage sind, Vorteile bei der Berechnung von Derivaten-Preisen gegenüber klassischen Ansätzen zu demonstrieren (Quantum Advantage). Ein wichtiges Element in dieser Abschätzung sind wieder die T-Gates. Die untersuchten Anwendungsfälle benötigen 7500 logische Qubits und eine T-Depth von 46 Millionen Gates oder Operationen. Unter der Annahme, dass die Preisgestaltung bestimmter Arten von Derivaten innerhalb

von 1 Sekunde berechnet werden soll, müssten die T-Gates mit 10Mhz oder schneller umgesetzt werden, um einen Quantenvorteil in diesem Szenario zu erreichen. Diese Ressourcenanforderungen sind für die heutigen Systeme unerreichbar.

Die Forscher von IBM und Goldman Sachs haben versucht, so viel konkretes, quantifizierbares Detail wie möglich aufzuzeigen, was notwendig ist, um einen möglichen und sinnvollen Quantenvorteil im Kontext Derivatepreisfindung zu erreichen. Damit wurde auch gezeigt, wo die Herausforderungen bei der Erreichung des Quantenvorteils noch bestehen und wo die spezifischen Engpässe noch liegen, die wir heute haben. Das macht die Fokussierung zukünftiger Forschungsarbeit einfacher.

Die transparente Darstellung dieser Schätzungen ermöglicht es, dass Forscher nun jede Unterroutine in diesem Algorithmus und in dieser Schätzung untersuchen können, um den Einfluss der jeweiligen Schritte auf die Gesamtlaufzeit zu bestimmen. Zum Beispiel können sich Algorithmus- oder Fehlerkorrektur-Forscher nun die für ihr Fachgebiet spezifischen Teile herausnehmen, um diese dann insofern zu verbessern, dass sie den größten Einfluss auf den Quantenvorteil bei der Preisberechnung von Derivaten haben.

Abschließend kann man also festhalten, dass aktuelle Anwendungsfälle noch nicht in der Größenordnung von realen Business-Problemen auf Quantencomputern berechenbar sind. Die aktuellen Forschungsergebnisse in allen Bereichen der Technologie machen aber zuversichtlich, dass das Erreichen eines Quantenvorteils in absehbarer Zukunft möglich sein wird. IBM hat für sich in seiner Roadmap ein klares Ziel mit einer ambitionierten Zeitachse definiert, weitere Verbesserung von Algorithmen, Schaltkreisoptimierung und Fehlerkorrektur sowie neue Hardware-Architekturen zur Verfügung zu stellen.

Referenzen: [1] What Is Quantum Volume, Anyway? [2] IBM's Roadmap For Scaling Quantum Technology [3] IBM Quantum Experience [4] Twitter: IBM achieved a Quantum Volume of 128 [5] Rethinking quantum systems for faster, more efficient computation [6] Qiskit – Open-Source Quantum Development [7] Building Quantum Skills With Tools For Developers, Researchers and Educators [8] Celebrating 2020, Qiskit's Best Year Yet [9] Hardware-aware approach for fault-tolerant quantum computation [10] Open Quantum Assembly Language [11] IBM Quantum offers advanced system access to academic researchers [12] A New OpenQASM for a New Era of Dynamic Circuits [13] The IBM Quantum Network: Organizations Collaborate on Quantum Goals [14] IBM Quantum offers advanced system access to academic researchers [15] IBM and Fraunhofer bring Quantum Computing to Germany [16] Daniel J. Egger, Claudio Gambella, Jakub Marecek, Scott McFaddin, Martin Mevissen, Rudy Raymond, Andrea Simonetto, Stefan Woerner, Elena Yndurain, "Quantum computing for Finance: state of the art and future prospects", arXiv:2006.14510v02 [quant-ph] [17] Lee Braine, Daniel J. Egger, Jennifer Glick, Stefan Woerner, "Quantum Algorithms for Mixed Binary Optimization applied to Transaction Settlement", arXiv:1910.05788 [quant-ph] [18] Austin Gilliam, Stefan Woerner, Constantin Goculea, „Grover Adaptive Search for Constrained Polynomial Binary Optimization“, arXiv:1912.04088 [quant-ph] [19] Samuel Mugel, Carlos Kuchkovsky, Escolastico Sanchez, Samuel Fernandez-Lorenzo, Jorge Luis-Hita, Enrique Lizaso, Roman Orus, „Dynamic Portfolio Optimization with Real Datasets Using Quantum Processors and Quantum-Inspired Tensor Networks“, arXiv:2007.00017 [quant-ph] [20] Charles Hadfield, Sergey Bravyi, Rudy Raymond, Antonio Mezzacapo, „Measurements of Quantum Hamiltonians with Locally-Biased Classical Shadows“, arXiv:2006.15788 [quant-ph] [21] Kazuya Kaneko, Koichi Miyamoto, Naoyuki Takeda, Kazuyoshi Yoshino, "Quantum Pricing with a Smile: Implementation of Local Volatility Model on Quantum Computer", arXiv:2007.01467 [quant-ph] [22] Nikitas Stamatopoulos, Daniel J. Egger, Yue Sun, Christa Zoufal, Raban Iten, Ning Shen, Stefan Woerner, "Option Pricing using Quantum Computers", arXiv:1905.02666 [quant-ph] [23] Panagiotis K1. Barkoutsos, Giacomo Nannicini, Anton Robert, Ivano Tavernelli, Stefan Woerner, "Improving Variational Quantum Optimization using CVar", arXiv:1907.04769 [quant-ph] [24] Daniel J. Egger, Ricardo Garcia Gutierrez, Jordi Cahuè Mestre, Stefan Woerner, "Credit Risk Analysis using Quantum Computers", arXiv:1907.03044 [quant-ph] [25] Stefan Woerner, Daniel J. Egger, "Quantum Risk Analysis", arXiv:1806.06893 [quant-ph] [26] Paul Burchard, "Lower Bounds for Parallel Quantum Counting", arXiv:1910.04555 [quant-ph] [27] Samudra Dasgupta, Kathleen E. Hamilton, Arnab Banerjee, "Designing a NISQ reservoir with maximal memory capacity for volatility forecasting", arXiv:2004.08240 [q-fin.RM] [28] Michael Boratko, Xiang Lorraine Li, Rajarshi Das, Tim O'Gorman, Dan Le, Andrew McCallum, "ProtoQA: A Question Answering Dataset for Prototypical Common-Sense Reasoning", arXiv:2005.00771 [cs.CL] [29] Yohichi Suzuki, Shumpei Uno, Rudy Raymond, Tomoki Tanaka, Tamiya Onodera, Naoki Yamamoto, "Amplitude esti-

mation without phase estimation", arXiv:1904.10246 [quant-ph] [30] Tomoki Tanaka, Yohichi Suzuki, Shumpei Uno, Rudy Raymond, Tamiya Onodera, Naoki Yamamoto, "Amplitude estimation via maximum likelihood on noisy quantum computer", arXiv:2006.16223 [quant-ph] [31] Christa Zoufal, Aurélien Lucchi, Stefan Woerner, "Quantum Generative Adversarial Networks for Learning and Loading Random Distributions", arXiv:1904.00043 [quant-ph] [32] Christa Zoufal, Aurélien Lucchi, Stefan Woerner, "Variational Quantum Boltzmann Machines", arXiv:2006.06004 [quant-ph] [33] Vojtech Havlicek, Antonio D. Córcoles, Kristan Temme, Aram W. Harrow, Abhinav Kandala, Jerry M. Chow, Jay M. Gambetta, "Supervised learning with quantum enhanced feature spaces", arXiv:1804.11326 [quant-ph] [34] Christa Zoufal, Aurélien Lucchi, Stefan Woerner, "Variational Quantum Boltzmann Machine", arXiv:2006.06004 [quant-ph] [35] Amira Abbas, David Sutter, Christa Zoufal, Aurélien Lucchi, Alessio Figalli, Stefan Woerner, "The power of quantum neural networks", arXiv:2011.00027 [quant-ph] [36] Yunhao Liu, Srinivasan Arunachalam, Kristan Temme, "A rigorous and robust quantum speed-up in supervised machine learning", arXiv:2010.02174 [quant-ph] [37] Shouvanik Chakrabarti, Rajiv Krishnakumar, Guglielmo Mazzola, Nikitas Stamatopoulos, Stefan Woerner, William J. Zeng, "A Threshold for Quantum Advantage in Derivative Pricing", arXiv:2012.03819 [quant-ph]

Dr. Basil Moshous

Dr. Basil Moshous ist promovierter Physiker und arbeitet nach Forschungen am CERN und MPI für Physik/DESY nun als CTO für Hardware Sales bei IBM. Als Thought Leader ist er in innovativen Initiativen aktiv. Er ist Mitglied der IBM Academy of Technology und ein IBM Quantum Ambassador.



Dr. Stefan Kister

Dr. Stefan Kister ist promovierter Chemiker und arbeitet seit vielen Jahren als Senior Client Technical Architect im technischen Vertrieb bei IBM Deutschland. Schwerpunkt bildet dabei die Beratung von Kunden aus dem Finanzsektor zu Themen wie Hybrid Cloud, Data & AI und Quanten Computing.



Carsten Dieterle

Carsten Dieterle ist ein IBM zertifizierter Senior IT Architekt im Bereich Public/Defense und arbeitet seit 25 Jahren bei IBM. Im August 2020 wurde er zum IBM Q Ambassador ernannt. Er ist ein Mitglied des Technical Expert Council von IBM DACH, der Open Group und der IBM Academy of Technology.



Dr. Mark Mattingly-Scott

Dr. Mark Mattingly-Scott hat einen Bachelor of Science in Computer und Elektronik sowie einen Dokortitel in Philosophie. Er arbeitet seit 31 Jahren bei IBM und ist seit 2019 Quantum Ambassador Leader für EMEA und seit 2020 auch für AP. In 2020 wurde er zum IBM Quantum Business Leader für DACH ernannt.



Die agile Transformation: Groß denken, klein beginnen, schnell lernen



Marcus Raitner ist überzeugt, dass Elefanten tanzen können. Als Agile Coach begleitet er deshalb Unternehmen auf ihrer Reise zu mehr Agilität und menschlicher Lebendigkeit. In seinem Blog „Führung erfahren!“ schreibt er seit 2010 über die Themen Führung, Agilität, Digitalisierung und vieles mehr.



Die agile Transformation muss groß gedacht werden, um Silos aufzubrechen, aber gleichzeitig klein zu starten, um gemeinsam zu lernen, ohne eine Lösung überzustülpen. Entscheidend dafür ist die Förderung einer offenen Lernkultur jenseits von Information Hiding und Cover your Ass.

Groß denken

Sprache ist bisweilen verräterisch. Traditionelle hierarchische Organisationen bestehen aus funktionalen Abteilungen, die Verantwortungsbereiche abteilen, Macht in Form von Budget und Mitarbeitern aufteilen und die Wertschöpfung unterteilen. Divide et impera, teile und beherrsche, ist eine seit dem römischen Reich bewährte Maxime der Organisation, deren Kern es ist, eine „zu beherrschende Gruppe (...) in Untergruppen mit einander widerstrebenden Interessen aufzuspalten“ (Wikipedia). Das Ergebnis sind Silos, deren Mauern durch entsprechend dieser Maxime auf Konkurrenz ausgerichtete Bewertungs- und Anreizsysteme Jahr für Jahr dicker und höher werden.

Ohne an dieser Struktur und der zugrundeliegenden Maxime anzusetzen, wird Agilität innerhalb dieser Silos versanden. Das kleine agile Projekt innerhalb einer Abteilung wird kaum einen großen Unterschied machen, weil diese Abteilung selbst nur ein winziges Glied der Wertschöpfungskette ist und damit das für die Agilität so wichtige Feedback zur Arbeit der Abteilung erst am Ende einer langen Reihe von Übergaben zur Verfügung steht.

Ein wesentliches Merkmal von echter Agilität ist es, über die Grenzen der Silos hinweg entlang der Wertschöpfung in einem interdisziplinären Team zu arbeiten. Genau dieses Merkmal arbeiteten bereits 1986 Hirotaka Takeuchi und Ikujiro Nonaka in ihren Untersuchungen erfolgreicher Produktentwicklungsteams heraus und beschrieben es in ihrem Artikel „The New New Product Development Game“ (Harvard Business Review).

Die agile Transformation muss also in diesem Sinne groß denken und Silos aufbrechen, um die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu fördern, Übergaben zu reduzieren und

letztlich den Regelkreis von Versuch und Validierung zu verkürzen. Andernfalls wird aus der unscheinbaren Raupe kein schöner Schmetterling, sondern nur eine etwas buntere Raupe, orientierungslos und erschöpft von dem sinnlosen Theater der Transformation.

Klein beginnen

Es gibt keine Blaupausen für eine agile Organisation und auch keinen Masterplan für die Transformation, egal wie überzeugend die Versprechen entsprechender Berater auch klingen. Der Versuch, Patentrezepte und scheinbar bewährte Modelle der eigenen Organisation überzustülpen, führt in die Cargo-Kult-Hölle. Nicht weil die Blaupausen und Modelle grundsätzlich falsch oder schlecht wären, sondern weil sie nicht Ergebnis gemeinsamer Erfahrungen sind. Die agile Transformation ist und bleibt eine gemeinsame Lernreise.

Auch der längste Marsch beginnt mit dem ersten Schritt.
Laozi (Daodejing, Kap. 64)

Jede Organisation muss sich im Rahmen der agilen Transformation Schritt für Schritt ein geeignetes Modell erarbeiten. Die agile Transformation kann nicht auf dem Reißbrett entworfen und dann von Heerscharen von Change-Managern exekutiert werden, sondern entwickelt sich selbst in agiler Weise aus einem ersten Minimum Viable Product (MVP) über zahlreiche Zwischenstände, deren Nutzen idealerweise mit geeigneten Kennzahlen belegt werden kann.

Die Führungsaufgabe in der agilen Transformation lautet nicht, das beste Modell einer agilen Organisation

auszuwählen oder ein eigenes zu konzipieren und das dann auszurollen. Dieser Top-Down-Ansatz verletzt das agile Prinzip der Selbstorganisation, weil es die Menschen und Teams zu passiven Objekten der Transformation degradiert, obwohl das Ziel gerade autonome, selbstverantwortliche und aktive Subjekte auf Augenhöhe sein müssen.

Schnell lernen

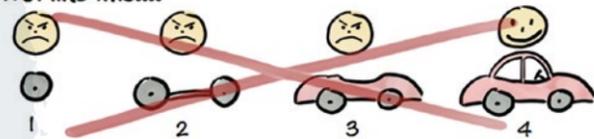
Wer seiner agilen Transformation diese Sackgasse ersparen will, tut gut daran, die Rolle des Schachmeisters an den Haken zu hängen und mehr wie ein Gärtner zu agieren. Ziel muss es sein, einen Rahmen zu schaffen, in dem ein geeignetes agiles Organisationsmodell nach und nach aus der Zusammenarbeit von selbstorganisierten Teams entsteht. Dieser gemeinsame Lernprozess lässt sich nicht durch Blaupausen abkürzen.

Sehr wohl lässt sich aber das Lernen beschleunigen durch Austausch und Vernetzung. Das bereitwillige Teilen von Erfahrungen und Erkenntnissen auch und gerade außerhalb des eigenen Silos ist entscheidend. Dabei kann ein Programm wie Working Out Loud helfen, entscheidend ist aber das Vorbild von Führungskräften. Solange jede Führungskraft erst mal wie bisher den eigenen Laden in Ordnung bringt und hält, entsteht garantiert kein fruchtbarer Austausch und es bleibt bei Information Hiding und lokalen Optimierungen.

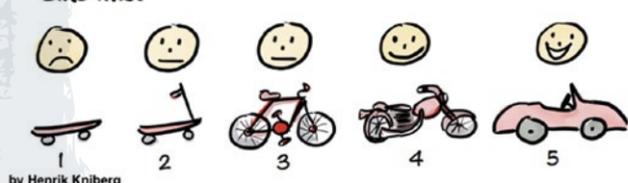
Das Buch zum Manifest für menschliche Führung. Erhältlich als Taschenbuch und E-Book bei Amazon



Not like this....



Like this!



by Henrik Kniberg

Die Vertreter des Data-Science und AI-Teams von MaibornWolff nahmen den ersten Preis des Innovation Awards für das IoT-Bike virtuell entgegen. Hier im Gespräch mit Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, Vorstandsvorsitzende des Digitale Stadt München e.V., und Kurt Kapp, Landeshauptstadt München.



Prof. Claudia Linnhoff-Popien, LMU München und Vorstandsvorsitzende Digitale Stadt München e.V., eröffnete die DIGICON 2020, die zum ersten Mal als virtuelle Veranstaltung stattfand.



Auch die Mitgliederversammlung des Digitale Stadt München e.V. fand in diesem Jahr digital statt und lief im Anschluss zur DIGICON über Zoom live aus dem ISH.

Die DIGICON 2020 wurde live aus dem Information Security Hub (ISH) übertragen. Im Bild die Gastgeber Andrea Gebekken, Geschäftsführerin für Commercial, Security, IT & Digital, Flughafen München, und Michael Zaddach, Senior Vice President IT, Flughafen München.

MÜNCHEN

DIGICON 2020 – Digitale Kompetenzen: Wie Krisen große Veränderung bewirken
314 registrierte Teilnehmer aus 237 Firmen und über 400 Logins zum Live-Stream, visionäre und lebendige Remote-Vorträge, eine hybride Panel-Diskussion und ein packender Wettbewerb um den 5. Münchner Digital Innovation Award – das war die DIGICON 2020. In diesem Jahr fand das Event in einer hybriden Form statt – in kleinem Kreis in den wunderbaren Räumlichkeiten des ISH am Flughafen München und bequem bei Ihnen zu Hause als Live-Stream und Video on Demand.



Kurt Kapp, Leiter der Wirtschaftsförderung und Stellvertreter des Referenten für Arbeit und Wirtschaft der Landeshauptstadt München, und Frau Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, Vorstandsvorsitzende von Digitale Stadt München e.V., bei der Verleihung des 5. Münchner Digital Innovation Awards.

Save the Date
DIGICON 2021
16. & 17. November

Fotos: Simon Debes

DIGITALISIERUNG in Zahlen

JPMorgan erwartet ein Bitcoin-Kursziel von **146.000** Dollar.



Das finnische Startup IQM bekam für die Entwicklung von Quantencomputern finanzielle Unterstützung vom EIC Accelerator Programm in Höhe von **17,5 Mio. Euro**.



IBM hat 2020 über **9000** Patente angemeldet, von denen viele einen Bezug zu Quantum Computing haben.



Der globale Healthcare AI Markt wird voraussichtlich mit einer jährlichen Rate von über **41 %** wachsen.



Das Startup Sana Labs hat für die Personalisierung von Trainingskursen mittels Machine Learning **18 Mio.** Dollar von EQT Ventures erhalten.



Laut Algorithmia's Third Annual Survey haben **83 %** aller befragten Unternehmen ihr Budget für AI und Machine Learning von 2019 zu 2020 erhöht.



Laut einer Studie des Digitalverbands Bitkom und des Deutsche Städte- und Gemeindebundes erwarten **88 %** der Kommunen, dass die Corona-Krise die Digitalisierung in Städten und Gemeinden vorantreiben wird.



Das Machine Learning T5 Modell von Google kann Texte aus über **100** Sprachen verarbeiten.



IBM plant für 2023 die Entwicklung eines **1121-Qubit** Quantencomputers.



Ein Team der University of Science and Technology in China gibt an, einen Quantencomputer entwickelt zu haben, der klassische Berechnungen um das **100 Billionenfache** schneller durchführen kann.



Foto: I23RF

FACHBEIRAT



Patric Fedlmeier
CIO Provinzial Rheinland



Dr. Norbert Gaus
Executive VP SIEMENS



Dr. Sandro Gaycken
Direktor ESMT



Dr. Michaela Harlander
Vorstand ISAR AG



Dr. Markus Heyn
GF Bosch



Dr. Martin Hofmann
CIO Volkswagen



Manfred Klaus
Sprecher der GF Plan.Net



Andrea Martin
CTO IBM



Dr. Niko Mohr
Partner McKinsey



Dr. Christian Plenge
BL Messe Düsseldorf



Frank Rosenberger
Group Director TUI



Dr. Ralf Schneider
CIO Allianz Group



Stephan Schneider
Manager Vodafone



Michael Zaddach
Flughafen München

IMPRESSUM

REDAKTION

Chefredaktion Claudia Linnhoff-Popien (V. i. S. d. P.)
Chef vom Dienst Robert Müller

Fachbeirat Patric Fedlmeier, Dr. Norbert Gaus, Dr. Sandro Gaycken, Dr. Michaela Harlander, Dr. Markus Heyn, Dr. Martin Hofmann, Manfred Klaus, Andrea Martin, Dr. Niko Mohr, Dr. Christian Plenge, Frank Rosenberger, Dr. Ralf Schneider, Stephan Schneider, Michael Zaddach

Redaktion Steffen Illium, Hannes Mittermaier, Claudia Huber

Redaktionsassistenten Katja Grenner, Lea Kar, Lydia Untersträßer

Mitarbeiter dieser Ausgabe Thomy Phan, Kyriell Schmid

Schlussredaktion Barbara Haber, Ingrid Taylor

ANFRAGEN AN DIE REDAKTION

redaktion@digitaleweltmagazin.de

GRAFIK

Layout Stefan Stockinger, www.stefanstockinger.com

ANZEIGEN

Ansprechpartner

redaktion@digitaleweltmagazin.de

Es gilt die gültige Preisliste, Informationen hierzu unter www.digitaleweltmagazin.de/mediadaten

HERSTELLUNG

ColorDruck Solutions GmbH,
Gutenbergstraße 4, 69181 Leimen

VERTRIEBSWEGE

www.digitaleweltmagazin.de/magazin/
Ebenfalls online über SpringerLink (Berlin, Heidelberg, New York) erhältlich.
Alle Artikel werden von GoogleScholar indiziert.

HERAUSGEBER

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien, Institut für Informatik, Ludwig-Maximilians-Universität München, Oettingenstr. 67, 80538 München, Tel. +49 89 2180-9153, www.digitaleweltmagazin.de

RECHTE

Dieses Magazin und alle in ihm enthaltenen Beiträge, Abbildungen, Entwürfe und Pläne sowie Darstellungen von Ideen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung einschließlich Nachdrucks ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers strafbar. Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Bildmaterial übernehmen Redaktion und Verlag keine Haftung.

Grüne, lokale und günstige KI Rechenleistung für Ihr Unternehmen.

KI Docker Instanzen in Erneuerbaren Energien Anlagen

- ✓ 100% Ökostrom
- ✓ ExaMesh Green HPC Siegel
- ✓ 2. Deckungsbeitrag für Altanlagen*
- ✓ Deutlich mehr GPU, CPU, RAM und SSD pro Instanz als vergleichbare Anbieter

* 2021 bricht für bis zu 5.000 Windkraftanlagen die EEG Vergütung weg. Mit dem 2. Deckungsbeitrag durch ExaMesh Instanzen in den Anlagen können wir sie zusammen mit dem Betreiber am Netz halten. So retten wir über vier Gigawatt Ökostrom, was über zwei Atomkraftwerken entspricht, und betreiben mit einem Bruchteil der Energie sog. High Performance Computing. Mehr Infos unter examesh.de/eeg

EXAMESH

Jetzt gratis KI Docker Instanz testen
examesh.de/dwm

Die DIGITALE WELT erscheint auch digital.
Sichern Sie sich JETZT Ihr kostenloses Abo unter
digitaleweltmagazin.de/magazin/

Licht ins Dunkel bringen

Quanten-inspirierte Services für die Portfolio Optimierung

FUJITSU



shaping tomorrow with you

