

Peter Grünberg Institut (PGI)
Institut für Quantencomputeranalytik (PGI-12)

Wissenstransferstudie: Quantencomputing für KMU

Dr. Daniel Zeuch

Jül-4439

Peter Grünberg Institut (PGI)

Institut für Quantencomputeranalytik (PGI-12)

Wissenstransferstudie: Quantencomputing für KMU

Dr. Daniel Zeuch

Titelbild: Aufbau eines supraleitenden Quantencomputers, der am Forschungszentrum Jülich im Rahmen des europäischen Verbundprojekts OpenSuperQ¹ entwickelt wurde. Der große Zylinder auf der linken Seite zeigt das Innenleben eines Mischungskryostaten, der Teile des Quantencomputers auf Temperaturen von bis zu -273,15°C, oder 10 mK kühlt. Die Ansicht offenbart die im Kryostaten verlaufende Verkabelung, während andere Teile, wie bspw. die Quantum Processing Unit (der Quantenprozessor), in dem geschlossenen goldenen Zylinder verborgen sind. Das Hardware-Rack auf der rechten Seite ist mit klassischen High-Tech-Peripheriegeräten wie Mikrowellengeneratoren und Mikrowellenanalysatoren bestückt.

Title figure: Setup of a superconducting quantum computer developed at Forschungszentrum Jülich as part of the European collaborative project OpenSuperQ.¹ The large cylindrical shape on the left side shows the inner workings of a dilution refrigerator, or cryostat, which cools parts of the quantum computer to temperatures of up to -273,15°C, or 10 mK. The view reveals the wiring within the cryostat, whereas other parts, such as the quantum processing unit (or quantum processor), are hidden inside the closed cylinder attached at the bottom of the cryostat. The rack on the right side houses classical high-tech peripherals such as microwave generators and microwave analyzers.

Berichte des Forschungszentrums Jülich
Jül-4439 · ISSN 0944-2952
Peter Grünberg Institut (PGI)
Institut für Quantencomputeranalytik (PGI-12)
Titelbild: © Sascha Kreklau/Forschungszentrum Jülich

Vollständig frei verfügbar über das Publikationsportal des Forschungszentrums Jülich (JuSER) unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess

Forschungszentrum Jülich GmbH · 52425 Jülich
Zentralbibliothek, Verlag
Tel.: 02461 61-5220 · Fax: 02461 61-6103
zb-publikation@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

This is an Open Access publication distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License 4.0**, which permits unrestricted use, distribution, and



reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Executive Summary (English)

This report summarizes the results of the exploratory knowledge transfer study “Quantencomputing für KMU” (English translation: “Quantum Computing for SMEs”). This study, funded by the Helmholtz Association and conducted between December 2020 and March 2022, focused on the identification of information requirements and the corresponding transfer of basic quantum computing (QC) knowledge from research institutions to small and medium-sized enterprises (SMEs). The study was carried out at Forschungszentrum Jülich, a German hub for QC research.

The application of QC is expected to have immense potential for change of the economy due to a high anticipated computational advantage of quantum computers for various fields such as optimization, simulation and artificial intelligence. However, quantum computing is still at an early development stage, and so far a clear added economic value of QC applications has not been demonstrated beyond doubt. Nevertheless, as major benefits are expected for a wide range of sectors in the future, it is important that the relevant industry starts to address the opportunities and implications of QC now. It tends to be difficult in particular for SMEs to devote the necessary time and financial resources to such an engagement.

A key objective of the study was therefore to find out how quantum-ready German SMEs are. On the basis of the results, relevant specialist knowledge was then to be processed in a target group-oriented manner and communicated to representatives of SMEs.

In evaluating the study’s results, potential QC suppliers and users were considered separately. We observed comparatively higher interest in QC on the part of suppliers. This is mainly due to the fact that quantum computers are already being developed and produced in the laboratory, while profitable use is not yet on the table. High potential was found among some SME suppliers, for example among manufacturers of cables, power sources, measurement and vacuum technology. The surveyed users included companies from data analysis and data processing, chemistry, management consulting and banking sectors.

Knowledge transfer formats that were tested included (i) interviews with entrepreneurs, (ii) closed presentations to employees of individual companies, (iii) and public lectures to mixed audiences, such as at network meetings organized by CCI (chamber of commerce and industry). In addition, a mobile quantum computer model was developed as an exhibit during the study period and used at various events, including a startup business fair. The model proved to be an excellent medium for knowledge transfer, as it generated attention and aroused interest in the topic of QC, thus paving the way for establishing first contact with individuals.

Qualitatively, we found a predominantly interested, albeit often restraint attitude on the side of SMEs with regard to investment in quantum computing. Since QC is new territory for many of our interviewees, we believe that knowledge transfer in this area will continue to be essential to enhance quantum-readiness for German SMEs.

Executive Summary (Deutsch)

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse der explorativen Wissenstransferstudie “Quantencomputing für KMU” zusammen. Diese durch die Helmholtz-Gemeinschaft geförderte Studie befasste sich im Zeitraum Dezember 2020 bis März 2022 mit der Eruierung von Informationsbedarfen und einer darauf abgestimmten Vermittlung von Basiswissen zum Thema Quantencomputing (QC) von der Forschung an kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Die Durchführung der Studie am Forschungszentrum Jülich lag nahe, da dieses einen zentralen deutschen Knotenpunkt in der QC-Forschung darstellt.

Von der QC-Anwendung wird ein immenses Veränderungspotenzial für die Wirtschaft aufgrund eines hohen Rechenvorteils des Quantencomputers für verschiedene Anwendungsfelder wie Optimierung, Simulation und künstliche Intelligenz erwartet. Allerdings befindet sich der Quantencomputer noch in einer frühen Entwicklungsphase und ein klarer wirtschaftlicher Mehrwert von QC-Anwendungen wurde noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen. Da dennoch zukünftig große Vorteile für eine Vielzahl an Sektoren erwartet werden, ist es wichtig, dass sich die betreffende Industrie schon jetzt mit den Möglichkeiten und Auswirkungen des QC auseinandersetzt. Es ist insbesondere für den Mittelstand tendenziell schwierig, die nötigen zeitlichen und finanziellen Ressourcen für eine solche Auseinandersetzung aufzubringen.

Ein wesentliches Ziel der Studie bestand deshalb darin herauszufinden, wie quantum-ready deutsche KMU bereits sind. Auf Basis der Ergebnisse sollte anschließend einschlägiges Fachwissen zielgruppengerecht aufgearbeitet und an Vertreter:innen von KMU vermittelt werden.

Bei der Auswertung der Studienergebnisse wurden potenzielle QC-Zulieferer und -Anwender separat betrachtet. Wir beobachteten vergleichsweise höheres Interesse an QC auf Seiten der Zulieferer. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Quantencomputer schon jetzt im Labor entwickelt und produziert werden, während eine profitable Nutzung noch nicht möglich ist. Großes Potenzial wurde bei einigen KMU-Zulieferern festgestellt, bspw. bei Herstellern von Kabeln, Stromquellen, Mess- und Vakuumtechnik. Unter den befragten Anwendern befanden sich Unternehmen aus den Branchen der Datenanalyse und -verarbeitung, Chemie, Unternehmensberatung und Banken.

Zu den anschließend erprobten Wissenstransferformaten zählten (i) Interviews mit Unternehmer:innen, (ii) geschlossene Vorträge vor Mitarbeiter:innen einzelner Unternehmen sowie (iii) öffentliche Vorträge vor gemischtem Publikum, etwa bei Netzwerktreffen der IHK. Außerdem wurde während der Studienlaufzeit ein mobiles Quantencomputer-Modell als Ausstellungsobjekt entwickelt und auf diversen Veranstaltungen eingesetzt, u.a. auf einer Wirtschaftsmesse. Das Modell hat sich als hervorragendes Medium für den Wissenstransfer herausgestellt, da Aufmerksamkeit erzeugt und dadurch Interesse am Thema QC geweckt wird, was erste Kontaktaufnahmen deutlich erleichterte.

Qualitativ stellen wir auf Seiten der KMU eine überwiegend interessierte, wenn auch zum Großteil zurückhaltende Grundhaltung hinsichtlich des Einsatzes von Investitionen zum Quantencomputing fest. Da QC für viele unserer Gesprächspartner:innen Neuland bedeutete, halten wir intensiven Wissenstransfer auf diesem Gebiet auch in Zukunft für wichtig, um den deutschen Mittelstand quantum-ready zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary (English)	5
Executive Summary (Deutsch)	6
1 Wissenstransfer im Bereich Quantencomputing	8
2 Zielsetzung der explorativen Studie	9
3 Projektablauf	9
4 Bedarfsanalyse im QC-Kontext	10
4.1 Zulieferer	11
4.2 Anwender	12
4.3 Die wichtigsten Erkenntnisse	12
5 Angewandte Formate des Wissenstransfers zur Begegnung der eruierten Bedarfe	13
5.1 Einzelgespräche mit Unternehmensvertreter:innen	13
5.2 Vorträge vor Mitarbeiter:innen einzelner Unternehmen	14
5.3 Öffentliche Präsentationen	14
5.4 Erstellung eines Quantencomputer-Modells	14
5.5 Ausstellung auf einer Industrie-Messe	15
6 Fazit und Ausblick	15
Danksagung	16
Literatur	17

1 Wissenstransfer im Bereich Quantencomputing

Einige neue Quantentechnologien befinden sich am Übergang von der Wissenschaft zum Markt und versprechen einen erheblichen Umbruch in vielen Bereichen der Wirtschaft mit hohem Wertschöpfungspotenzial. Deutschland und Europa sind in diesem Bereich sehr forschungsstark, müssen aber sicherstellen, dass der Transfer in die Wirtschaft gelingt.

Quantencomputing

Die Quantenphysik, entwickelt in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, bildet die Grundlage für viele nicht mehr wegzudenkende Technologien, wie z.B. die Satellitenkommunikation, das Internet und unsere digitalen Computer. Diese basieren auf Quantentechnologien der *ersten Generation*. Seit geraumer Zeit werden neuartige Quantentechnologien der *zweiten Generation* entwickelt.^{2,3,4} Zu diesen zählen verbesserte Messmethoden (*Quantensensorik*), sichere Informationsübertragung (*Quantenkommunikation*) sowie eine neue Art zur Durchführung von Berechnungen: das *Quantencomputing*, kurz QC. Der Quantencomputer gilt hierbei als die herausforderndste Technologie mit dem erwartungsgemäß größten Marktpotenzial,^{2,3} da immense Rechenvorteile auf verschiedenen wirtschaftsrelevanten Gebieten möglich sind.

Zu den Disziplinen, in denen schnellere bzw. genauere Berechnungen durch den Einsatz von QC erwartet werden, gehören wirtschaftliche Optimierung (bspw. für verbesserte Produktionsplanung, Logistik oder Routenberechnungen), Simulation (bspw. für die Entwicklung neuer Materialien oder Chemikalien), maschinelles Lernen (bspw. für zuverlässigere Gesichtserkennung oder autonomes Fahren) sowie Kryptographie.⁵ In Referenz⁶ findet man eine aktuelle Studie zu konkreten QC-Anwendungen speziell für den Mittelstand, die in Zusammenhang mit der Entwicklung der QC-Plattform PlanQK^a stehen. Der potenzielle Einsatz des Quantencomputers zur Entschlüsselung⁷ (neben der Verschlüsselung⁵) im Bereich der Kommunikation gibt der nationalen Entwicklung des QCs neben der rein wirtschaftlichen auch eine sicherheitspolitische Bedeutung.

Aktuelle Quantencomputer befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Zwar wurde das Potenzial von Quantencomputern bereits im Labor angedeutet,^{8,9,10,11} allerdings sind sie noch

kaum in der Lage wirtschaftlich relevante Probleme zu lösen. Der QC-Markt wächst dennoch rasch an,^{2,3,12,13,14,15,16} und es wird erwartet, dass der Durchbruch zur Marktreife abrupt kommen wird – allerdings mit signifikanten Unterschieden zwischen den verschiedenen betroffenen Branchen.⁵ Das derzeitige starke Wachstum des QC-Markts liegt u.a. daran, dass einige große Player wie Google und IBM in den USA oder die USTC in China große Schritte in Richtung der wirtschaftlichen Anwendung nutzbarer Quantencomputer machen. Gleichzeitig entstanden innerhalb der letzten 10 Jahre weltweit viele Start-up-Unternehmen, sowohl auf Seite von QC-Technologieanbietern sowie von QC-Anwendern,¹⁴ und das Geschäft im Venture-Capital nimmt stetig an Fahrt auf.⁵ Für Deutschland und Europa besteht dabei die Gefahr im internationalen Vergleich den Anschluss zu verlieren. Daher ist es wichtig, dass die einschlägige deutsche Wirtschaft sich bereits jetzt mit dem Thema Quantencomputing auseinandersetzt.⁵

Wissenstransfer von der Forschung in den Mittelstand

Die deutsche Politik und Wirtschaft haben gleichermaßen die große wirtschaftliche und strategische Bedeutung der Quantentechnologien und speziell des QCs erkannt.^{17,18} Dies führt dazu, dass in Deutschland insbesondere von der Wirtschaft eine Vermittlung zwischen Wissenschaft und kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) konkret eingefordert wird.¹⁸ In diesem Zusammenhang soll geeigneter Wissenstransfer Unternehmen dazu befähigen sich in Bezug auf die Zukunftstechnologie QC mittel- bis langfristig zu positionieren. Gleichzeitig ist die Forschung zunehmend auf Industriebeiträge bei der Entwicklung von Systemen angewiesen. Der aktive Einbezug des Mittelstandes in große Konsortien aus Wissenschaft und Wirtschaft, was durch Vorgaben der Bundesregierung bereits realisiert wurde,¹⁹ ist besonders sinnvoll, da in Deutschland keine risikofreudigen Technologiegroßkonzerne (wie Google, Amazon oder IBM) bzw. keine kapitalkräftigen Start-up-Unternehmen ansässig sind, die den hochkomplexen Prozess der QC-Entwicklung alleine stemmen könnten. Während es größeren Unternehmen oft leichter fällt sich mit neuen Technologien wie QC zu beschäftigen [siehe bspw. aktuelle Entwicklungen im *Quantum Technology and Application Consortium* (QUTAC)²⁰], ist es für den Mittelstand oft schwierig die nötigen zeitlichen und finanziellen Ressourcen dafür aufzubringen.

Dieser Hintergrund bot die Motivation zu der vor-

^aSiehe <https://plattform.planqk.de/>.

liegenden explorativen Wissenstransferstudie, welche die geforderte Vermittlung mit Fokus auf KMU aufgreift. Die Studie wurde am Forschungszentrum Jülich (FZJ) am Science Office des Peter Grünberg Instituts durchgeführt. Das FZJ ist einer der zentralen Knotenpunkte der QC-Forschung in Deutschland.²¹ Die FZJ-Wissenschaftler:innen erforschen zusammen mit nationalen sowie internationalen Partnern aus Wissenschaft und Industrie zugleich Grundlagen, wie Theorie und elementare Hardware, als auch Software und Anwendungen des Quantencomputers; dies geschieht teilweise in Verbundprojekten wie OpenSuperQ¹, Q(AI)2²² oder QUASIM²³, sowie mit Hilfe der eigenen QC-Nutzerplattform JUNIQ^b. Zudem verfügt der Hauptautor der Studie über langjährige Forschungserfahrung im Bereich QC,^c sodass eine Fokussierung der Studie auf das Thema QC naheliegend war.

In dieser explorativen Studie sollten Wissensstand und -bedarfe in Bezug auf QC im deutschen Mittelstand untersucht werden; dazu gehörte auch die Erörterung geeigneter Zielgruppen und das exemplarische Testen von Wissenstransferformaten. Abgeleitet werden sollten daraus geeignete Maßnahmen, welche die Management-Ebene von KMU in die Lage versetzen, informierte Entscheidungen hinsichtlich potenzieller eigener QC-Investitionen und -Märkte zu treffen.

Der vorliegende Bericht ist folgendermaßen gegliedert. Nach Beschreibung der Studienziele in Abschnitt 2 wird in Abschnitt 3 der Verlauf der Studie dargestellt. Im darauf folgenden Abschnitt 4 diskutieren wir die Erkenntnisse unserer Bedarfsanalyse von Unternehmen in Hinblick auf die benötigten Wissenstransfer-Maßnahmen der beiden Zielgruppen der Studie. Abschnitt 5 beschreibt und beurteilt die angewandten Wissenstransferformate dieser Studie. Fazit und Ausblick in Abschnitt 6 schließen den Bericht ab.

2 Zielsetzung der explorativen Studie

Wie oben geschildert ist das Quantencomputing für verschiedene Wirtschaftszweige und prinzipiell alle Unternehmensgrößen eine in Betracht zu ziehende Zukunftstechnologie. Unsere Erwartung war allerdings, dass es sich aktuell vor allem bei KMU noch

^bKurz für “Jülich UNfied Infrastructure for Quantum computing”. Siehe <https://juniq.fz-juelich.de/>.

^cDie Expertise des Autors lag vor der Studie in den theoretischen Forschungsbereichen Spin-basiertes QC^{24,25,26}, topologisches QC²⁷ sowie die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie als Mittel zur Datenverarbeitung im QC^{28,29}.

um ein Nischenthema handelt.

Unsere Ziele bestanden zunächst darin geeignete Zielgruppen von KMU zu definieren und deren Informationsbedarfe zu erfassen. Weiterhin sollten Konzepte entwickelt werden, um die Entscheidungsträger:innen von KMU zu befähigen, die Position des eigenen Unternehmens zum QC beurteilen zu können. Nicht zuletzt sollten diverse Wissenstransferformate zum Vermitteln von Quantencomputer-Basiswissen exemplarisch erarbeitet und getestet werden.

Viele Großunternehmen beschäftigen sich bereits aktiv mit QC. Deshalb lag der Schwerpunkt unserer Studie bei Stakeholdern im Bereich der KMU, die in zwei designierte Zielgruppen eingeordnet wurden. Auf der einen Seite stehen die *Zulieferer*-Unternehmen, welche die Kompetenz haben die nötige QC-Hardware zu produzieren bzw. zu entwickeln. Auf der anderen Seite stehen die potenziellen *Anwender*-Unternehmen, die QC zur Lösung numerisch aufwendiger Probleme nutzen können.

Im Bereich der Volkswirtschaft werden KMU in Kleinst-, Klein- und mittlere Unternehmen unterteilt.³⁰ Bei der Zuteilung werden allgemein die Anzahl der Mitarbeiter:innen sowie Umsatzerlös und Jahresbilanzsumme als Kriterien herangezogen, allerdings weichen verschiedene Definitionen leicht voneinander ab. Bspw. liegt die Obergrenze der Mitarbeiter:innen für mittlere Unternehmen nach Empfehlung der Europäischen Kommission bei 250³¹, und laut Institut für Mittelstandsforschung Bonn bei 500³². Für die vorliegende Studie wurde die Anzahl der Mitarbeiter:innen für KMU (von bis zu 500) als alleiniges Kriterium verwendet, da diese Information im Regelfall am einfachsten zugänglich war.

3 Projektablauf

Die Wissenstransferstudie “Quantencomputing für KMU” wurde von der Helmholtzgemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) in der Förderlinie “explorative Studie” gefördert. Die Zeitdauer betrug ein Jahr und vier Monate bei einem Arbeitsumfang von 0,5 VZÄ (Vollzeitäquivalent). Die ursprüngliche Förderdauer war auf 1 Jahr bemessen, jedoch wurde auch auf Grund von Beeinträchtigungen bedingt durch die Corona-Pandemie eine (kostenneutrale) Verlängerung des Projekts bewilligt.

Abbildung 1 zeigt einen groben zeitlichen Überblick des Projektablaufs. Zu Beginn der Studie erstellten wir eine Liste von zu kontaktierenden Unternehmen mit potenziellem wirtschaftlichen Interesse für das Thema Quantencomputing.

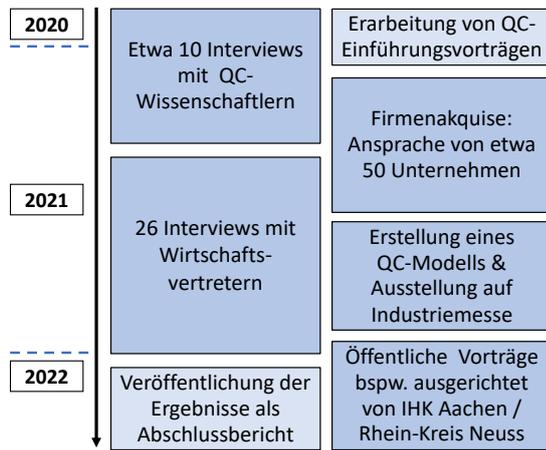


Abbildung 1: Übersicht über den Projektablauf der vorliegenden Wissenstransferstudie.

Gleichzeitig wurden Präsentationen erarbeitet, die Unternehmer:innen eine geeignete Übersicht zu QC geben sollten. Bei den Inhalten dieser Präsentationen orientierten wir uns an ebenfalls zu Beginn der Studie durchgeführten Gesprächen mit QC-Wissenschaftler:innen, die mit dem Forschungszentrum Jülich assoziiert sind. Die während der Studie entwickelten Inhalte und Darstellungen der Präsentationen wurden durch Feedback der Interviewpartner:innen aus der Wirtschaft stetig weiterentwickelt.

Die Ansprache der ausgewählten KMU zur Eruiierung deren Bedarfe erfolgte zunächst per E-Mail und später telefonisch, wobei letzteres Vorgehen die Resonanz deutlich erhöhte. Grundlage für die Auftaktgespräche waren die oben genannten Präsentationen, die für die jeweiligen Unternehmen nützliche Informationen zielgruppengerecht darstellen. Im Zuge der Studie führten wir so Interviews mit einzelnen Wirtschaftsvertreter:innen durch und hielten in einigen Fällen Vorträge vor Mitarbeiter:innen einzelner Unternehmen. Dadurch gewannen wir bei zahlreichen Unternehmen Einblicke in Vorwissen, Bedarfe und Beurteilung hinsichtlich QC. Weiterhin hielten wir zahlreiche geschlossene Vorträge für Gäste des Forschungszentrums Jülich, und darüber hinaus einige öffentliche Vorträge vor gemischtem Publikum und mit unterschiedlichsten Veranstaltern; unter diesen hervorzuheben sind die Unternehmenskommunikation des Forschungszentrums Jülich³³, die IHK Aachen³⁴, der Rhein-Kreis Neuss³⁵, TechLabs Aachen^{36,d}, bzw. die VHS Frankfurt³⁷. Eine weitere Veranstaltung der IHK Köln befand sich zum Zeitpunkt des Verfassens dieses Berichts noch in Planung.

^dEine Aufzeichnung dieses TechTalks³⁶ ist verfügbar unter <https://youtu.be/JJz6S9pDTsU>.

Einige dieser Veranstaltungen fanden (u.a. auf Grund langer Planungszeiten) erst im Nachgang der Studie statt.

Zudem entwickelten wir zusammen mit Kolleg:innen des Forschungszentrums Jülich ein Quantencomputer-Modell nach dem Vorbild eines sogenannten supraleitenden Quantencomputers, der während der Studie am Forschungszentrum Jülich im Verbundprojekt OpenSuperQ¹ entwickelt wurde (siehe auch das Titelbild des vorliegenden Berichts). Wir präsentierten dieses Modell als explizites Wissenstransfermedium zuerst auf unserem Ausstellungsstand auf einer Start-up-Messe in Düsseldorf, dem “Digital Demo Day”³⁸, und später erneut auf weiteren Präsenzveranstaltungen. Weitere durchgeführte Aktivitäten während der Studie umfassten die Teilnahme an verschiedenen Online-Weiterbildungen und Netzwerkveranstaltungen, bspw. die “WissKon21”³⁹, der “ML4Q Technology Day”⁴⁰ oder die QC-Industrie-Konferenz “Ein Quantum Weihnacht”^{41,e}, veranstaltet von der Koordinierungsstelle für Quantentechnologien des Landes Nordrhein-Westfalen (QT.NMWP.NRW) in Kooperation mit Leichtbau BW.

Wie oben bereits erwähnt, war auch die Coronapandemie während der gesamten Studiendauer allgegenwärtig und hatte Auswirkungen auf den Studienablauf. Das Planen von Präsenz-Treffen mit Unternehmer:innen wurde durch die Umstände erschwert. Großveranstaltungen wie Messen oder wissenschaftliche Tagungen fanden nur selten statt und wurden zum Teil in virtuelle Räume verlegt. Eine vorteilhafte Auswirkung der Pandemie war hingegen eine gewisse Selbstverständlichkeit bei vielen kontaktierten Unternehmer:innen Videokonferenzen durchzuführen.

4 Bedarfsanalyse im QC-Kontext

Abbildung 2 gibt einen grafischen Überblick über die zentralen gesammelten Daten. Wie in Abbildung 2(a) gezeigt, haben knapp die Hälfte der kontaktierten Unternehmen auf die initiale Kontaktanfrage reagiert. Die insgesamt 26 Unternehmen, mit denen Kontakt bestand, verteilten sich fast zu gleichen Teilen auf die beiden spezifischen Zielgruppen, d.h. potenzielle Zulieferer- und Anwender-Unternehmen für den Bereich Quantencomputing. Der Großteil der befragten Unternehmen fiel in die hier angewandte Definition von KMU, da die Anzahl der Mitarbeiter in den meisten Fällen bei unter 500 lag [siehe Abbildung

^eEine Aufzeichnung dieser Veranstaltung ist verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=SEds1MXWa00>.

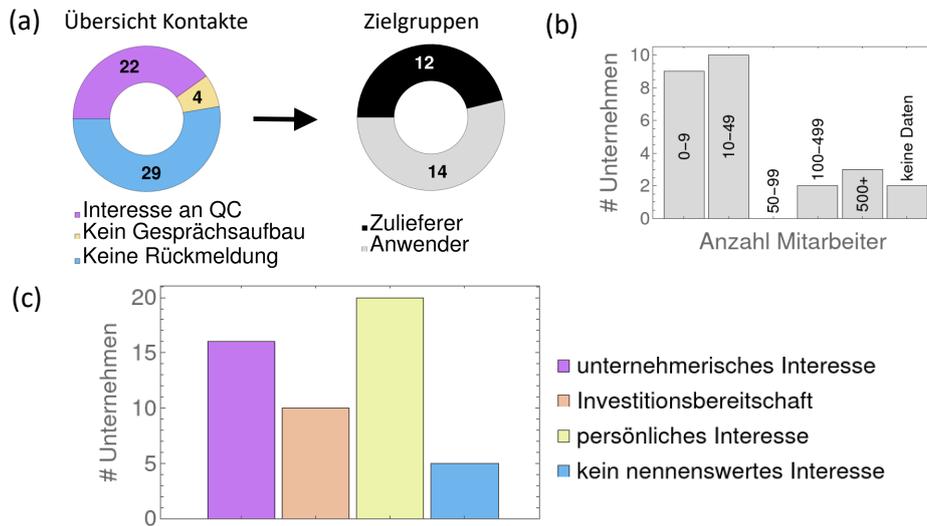


Abbildung 2: Übersicht über die kontaktierten Unternehmen. (a) zeigt in Kreisdiagrammen zunächst die angesprochenen Unternehmen und ihr Interesse an QC sowie die Unternehmen, die daraus abgeleitet letztendlich an der Studie teilgenommen haben. (b) bildet die Anzahl der partizipierenden Unternehmen in Abhängigkeit ihrer Größe ab. (c) zeigt eine differenzierte Darstellung des beobachteten Interesses auf Seiten der Interviewpartner:innen.

2(b)]. Im Einklang mit dem Stimmungsdiagramm in Abbildung 2(c) konnte hinsichtlich des Themas QC bei den meisten angesprochenen Unternehmen Gesprächsbereitschaft festgestellt werden.

Die beiden Zielgruppen sind vor unterschiedlichem Hintergrund zu betrachten. Dies liegt vor allem daran, dass die QC-Entwicklung schon jetzt Zulieferer mit in die aktuelle Wertschöpfungskette einbezieht, während es für viele Anwender noch schwierig ist eine konkrete Wertschöpfung durch die Nutzung von QC zu erzielen. Außerdem basiert der Beitrag der Zulieferer zum Großteil auf klassischer Technik, und nicht auf quantenmechanischen Berechnungen wie im Falle der Anwender. Dies vereinfacht den Zugang für die Zulieferer-Industrie zum Thema ein Stück weit. Im Folgenden analysieren wir die Daten entsprechend differenziert für Zulieferer und Anwender.

4.1 Zulieferer

Die Bedarfe der Zulieferer umfassten ein breites Spektrum. Die meisten Ansprechpartner:innen waren nur wenig an der grundlegenden Funktionsweise von Quantencomputern interessiert. Mehr Interesse bestand an dem aktuellen Entwicklungsstand von QC und an der speziellen Technik, für die das individuelle Unternehmen als Zulieferer in Frage kommt. Wir sprachen allerdings auch mit Unternehmer:innen vom anderen Ende des Spektrums, d.h. mit solchen, die sich bereits ihrer Rolle als Zulieferer bewusst waren und sich vor allem für das theoretische Grundgerüst des Quantencomputers interessierten.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die be-

fragten Unternehmen im Bereich der potenziellen Zulieferer. Der Großteil der in der Studie repräsentierten Unternehmen beschäftigte bis zu 50 Mitarbeiter:innen [siehe Abbildung 3(a)]. Wie in Abbildung 3(b) dargestellt, bestand prinzipielles Interesse an QC bei fast zwei Dritteln dieser Unternehmen. Auffällig ist auch die Tatsache, dass etwa die Hälfte eine nennenswerte Investitionsbereitschaft von zeitlichen und/oder finanziellen Ressourcen zeigte.

Das wesentliche Interesse der Zulieferer lag dabei vor allem in der Herstellung und Entwicklung von Spezialkabeln, Mikrowellenbauelementen, Kühltechnik und speziellen Stromquellen. Wie bereits oben angesprochen ist ein Großteil der Technik, der im Quantencomputer zum Einsatz kommt, klassischer Natur. Allerdings muss bereits bestehende Technik oft an besondere Umstände angepasst werden. So werden etwa Kabel und Mikrowellenbauelemente bei extrem kalten Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (bis zu $-273,14\text{ °C}$, oder 10 mK) betrieben oder bestimmte Stromquellen müssen extrem stabile Ausgabeströme generieren. Diese Anpassung an QC-relevante Bedingungen erfordert den Einstieg in eine technische Entwicklung, die durch die Teilnahme an staatlich geförderten Projekten erfolgen kann. Wir machten die Erfahrung, dass der Einstieg in die Entwicklung für viele kleine Unternehmen aufgrund limitierter Personalkapazitäten äußerst schwierig ist. Aber auch mittlere Unternehmen gaben an, dass das QC wegen zu geringer finanzieller Ressourcen derzeit nicht auf der eigenen Agenda stünde.

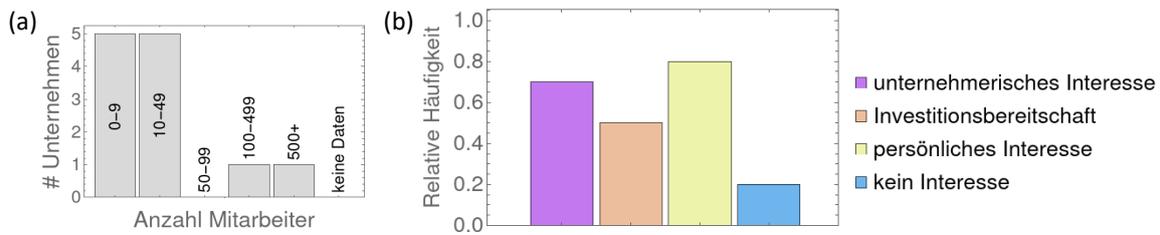


Abbildung 3: Übersicht über die 12 partizipierenden potenziellen *Zulieferer*. (a) führt die Unternehmensgrößen auf, (b) zeigt die relative Häufigkeit von unterschiedlichen Arten von Interesse und Investitionsbereitschaft hinsichtlich QC.

Eine kleine Anzahl der kontaktierten Unternehmen ist bereits seit einigen Jahren im QC-Geschäft aktiv. Bei den befragten Unternehmen handelt es sich hierbei vor allem um Unternehmen, welche von Hochschulabsolventen gegründet wurden, die Kontakte in die Wissenschaft gehalten haben und dadurch regelmäßig in Entwicklungsprojekte eingebunden sind.

4.2 Anwender

Zu den kontaktierten Anwendern zählten Software-Unternehmen, die Datenanalyse betreiben, Chemieunternehmen, Automotive-Zulieferer, Unternehmensberatungen und Banken^f. Die meisten Rückmeldungen mit Interesse an QC-Informationen zeigten die Unternehmen im Bereich der Datenanalyse sowie die Banken. Keine Anteilnahme an diesem Thema bestand vor allem auf der Seite der Unternehmensberatung.

Unter Beschränkung auf KMU hatten nur insgesamt zwei der 10 befragten Unternehmen akuten Bedarf an tiefergehenden QC-Informationen. Dies scheint auf den ersten Blick wenig, ist zum jetzigen QC-Entwicklungsstand aber eine erwartbare Zahl. Das geringe Interesse der anderen potenziellen Nutzer lässt sich zum Großteil darauf zurückführen, dass viele Gesprächspartner:innen keinen Bedarf für ihr Unternehmen an größerer Rechenleistung sahen — was die Nutzung von QC im Normalfall unattraktiv macht.

Wir weisen an dieser Stelle darauf hin, dass Quantencomputer erwartungsgemäß nicht einfach nur Rechen-Beschleunigungen für bereits gängige Berechnungen mit sich bringen. Darüber hinaus werden voraussichtlich Berechnungen ermöglicht, mit denen klassische Computer hoffnungslos überfordert sind, da für die Durchführung auf klassischen Computern untragbare Vereinfachungen gemacht werden

müssten.^g Es ist also möglich, dass Anwender — obgleich zunächst nicht an größeren Rechenleistungen interessiert — zu einem späteren Zeitpunkt neue QC-Anwendungsfälle für sich entdecken werden. Dies ist allerdings in Zusammenhang mit der auf sehr wenige Anwender begrenzten Studie nicht vorgekommen.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die befragten potenziellen Anwender-Unternehmen. Wie in Abbildung 4(a) dargestellt, liegt die Anzahl der Mitarbeiter:innen zum Großteil bei bis zu 50. Das QC-Interesse, gezeigt in Abbildung 4(b), fällt etwas geringer aus als im Fall der Zulieferer [vgl. Abbildung 3(b)].

In Gesprächen mit aufgeschlossenen Interviewpartner:innen wurde vor allem der aktuelle Stand der Technik thematisiert, inklusive der deutschen und europäischen QC-Bemühungen. Die Vorhersage der mittelfristigen Entwicklung sowie die kontrovers diskutierte Frage ob Deutschland und Europa im internationalen Vergleich im QC-Entwicklungsrennen aufholen können, waren ebenso regelmäßig Teil der Gespräche.

4.3 Die wichtigsten Erkenntnisse

Als Hauptergebnis der explorativen Studie kann festgehalten werden, dass der deutsche Mittelstand solides Potenzial für das Feld Quantencomputing aufzuweisen scheint: Wir haben den Eindruck, dass etwa die Hälfte der kontaktierten KMU die Möglichkeit und das Interesse hat sich an der QC-Wertschöpfungskette zu beteiligen. Dies gilt zum einen für Zulieferer von Spezialtechnik. In Deutschland ansässig sind etwa Hersteller und Entwickler von Spezialkabeln, Kühltechnik, Spannungsquellen, Mikrowellengeneratoren und Photonik-Bauelementen. Diese Unternehmen konnten zum Teil bereits Erfah-

^fWir merken an, dass Banken i. A. nicht in die Kategorie KMU fallen; aufgrund eines hohen Maßes an Eigeninitiative wurden sie dennoch in diese Studie mit aufgenommen.

^gEin prominentes Beispiel hierfür ist die Simulation funktionaler Materialien bzw. Chemikalien.⁴² Der Aufbau von Materie beruht auf quantenmechanischen Effekten, welche schon für kleine Moleküle auf klassischen Computern nicht hinreichend genau simuliert werden können.

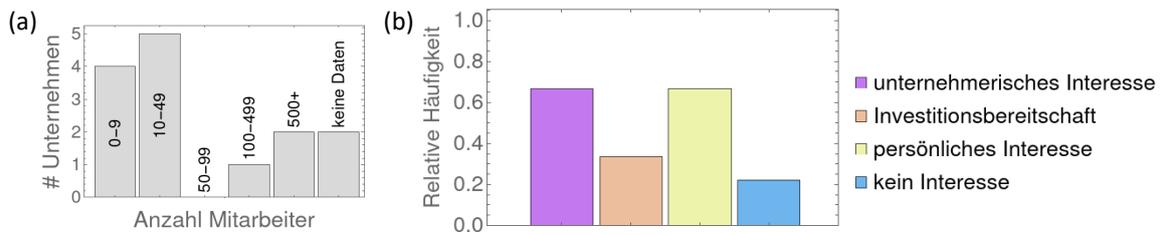


Abbildung 4: Übersicht über die 14 partizipierenden potenziellen *Anwender*. (a) führt die Unternehmensgrößen auf, (b) zeigt die relative Häufigkeit von unterschiedlichen Arten von Interesse und Investitionsbereitschaft hinsichtlich QC.

rung mit Quantentechnologien und speziell QC sammeln. In vielen Fällen sind sich diese Unternehmen ihrer potenziellen Rolle in der Wertschöpfungskette des QC aber nicht von vornherein bewusst, was einen weiterführenden Wissenstransfer erfordert.

Auf der Anwenderseite gibt es ebenfalls mittelständische Unternehmen in einigen Wirtschaftsbereichen, die sich für QC interessieren und Bedarf am Zugang zu dieser Technologie haben. Dies gilt unserer Erfahrung nach besonders für die Bereiche Finanztechnologie (z.B. in Bezug auf Betrugsdeckung oder Big Data Analyse) sowie Luftfahrt- und Automotive-Zulieferer. Nachfragen zur aktuellen QC-Entwicklung erhielten wir auch aus dem Bereich Venture Capital. Allerdings weisen in der Kategorie der Anwender vermehrt größere Unternehmen mit mehr als 1000 Beschäftigten Potenzial hinsichtlich QC auf, sodass hier keine klare Abgrenzung zu KMU selbst gemacht werden kann. Ein zielgerichteter Wissenstransfer ist jedoch auch hier vonnöten.

Häufig wurde auch die Frage gestellt, wie ein Quantencomputer theoretisch Rechenvorteile erzielen kann. In der Tat machten wir die Erfahrung, dass die Frage nach dem *wie* in vielen öffentlichen Vorträgen oder Berichten nur dürftig behandelt ist, was vermutlich vor allem der Komplexität des Sachverhalts geschuldet ist. Erfreulicherweise haben wir während der Studie eine simple sowie anschauliche Erklärung eines effizienten Quantenalgorithmus entwickelt, deren Darlegung bei vielen Veranstaltungen (bspw. in unserem Vortrag in der Jülicher Vortragsreihe *Wissenschaft online*³³) auf Begeisterung stieß.

Wir haben in unserer Studie den teilnehmenden KMU einen Quanten-Score zugeteilt. Diese Bewertung vereint dabei die Kriterien (i) *wirtschaftliche Nähe zu QC*, (ii) *Quantum-Readiness* und (iii) *unternehmerisches Interesse* in einer einzigen Punktzahl von 1 bis 5 Sternen. Bei dieser eigens für die Studie erstellten Bewertung fließen die drei genannten Kriterien zu gleichen Teilen ein. Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse. Diese weisen auf eine vergleichs-

weise hohe Involvierung der potenziellen Zulieferer-Unternehmen in die QC-Wertschöpfungskette hin, was in Übereinstimmung mit der obigen Diskussion steht. Nicht zuletzt sehen wir es als ein vielversprechendes Zeichen, dass mehrere deutsche KMU mit hervorragendem Vorwissen und bereits bestehendem Bezug zu QC identifiziert werden konnten.

5 Angewandte Formate des Wissenstransfers zur Begegnung der eruierten Bedarfe

Im Folgenden werden nun die Formate vorgestellt, welche von den Informationsbedarfen der Unternehmen abgeleitet wurden und am vielversprechendsten schienen, um das benötigte Wissen von der Forschung in die Wirtschaft zu transferieren.

5.1 Einzelgespräche mit Unternehmensvertreter:innen

Das Führen von Einzelgesprächen war das Hauptinstrument unserer Studie. In den meisten Fällen erfolgten diese in Form von klassischen Telefonaten, und in einigen Fällen als Video-Telefonate. Letztere wurden von den Gesprächspartner:innen als äußerst

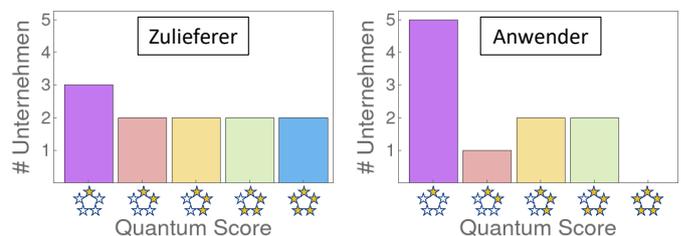


Abbildung 5: Ergebnisse unserer 5-Sterne-Bewertung des Quanten-Scores, getrennt nach Zulieferern und Anwendern und nur bezogen auf KMU. Die Daten deuten an, dass die angesprochenen Zulieferer derzeit mehr Potenzial für Ihr Unternehmen hinsichtlich QC sehen als die Anwender.

geeigneter Kommunikationsweg, gerade aufgrund der Pandemie-bedingten Einschränkungen, empfunden.

Diese Gespräche fanden häufig mit Geschäftsführer:innen statt, in einigen Fällen aber auch mit Leiter:innen der Entwicklungsabteilung oder mit aufgeschlossenen Mitarbeiter:innen. In einzelnen Fällen haben die Erstgespräche aufgrund des hohen Interesses zu weiteren Vorträgen vor mehreren Mitarbeiter:innen geführt (siehe Abschnitt 5.2). Durch diese Gespräche sammelten wir den Großteil der Informationen, die die Basis für die Bedarfsanalyse in Abschnitt 4 bildeten.

5.2 Vorträge vor Mitarbeiter:innen einzelner Unternehmen

Für einen Teil der interessierten Unternehmen wurden auf die jeweilige Branche zugeschnittene, 30- bis 45-minütige Vorträge zum Thema Quantencomputing erstellt und gehalten. Diese Vorträge, die ausnahmslos über Videokonferenzen gehalten wurden, erfreuten sich großer Begeisterung. Die angesetzte Diskussionszeit von etwa 15 bis 30 Minuten wurde stets komplett genutzt. Dabei deckten die gestellten Fragen, genauso wie die vorangegangenen Vorträge, viele verschiedene Themengebiete ab: von der prinzipiellen theoretischen Funktionsweise von QC über dessen technische Realisierung bis hin zu Anwendungen und der staatlichen Förderung bei einem Einstieg in Forschungsprojekte.

Unser Angebot eines kostenfreien Vortrags stieß dagegen bei einigen Unternehmen nicht auf Zuspruch, was mit vollen Terminkalendern begründet wurde bzw. auf wenig Anteilnahme an QC zurückzuführen war. Andererseits fand bei einer kleinen Anzahl von Unternehmen ein regelmäßiges Grup-

penseminar statt, zu dem wir als externer Sprecher eingeladen wurden, um einen Gastvortrag zu halten.

5.3 Öffentliche Präsentationen

Gegen Ende der Studie ergab sich, zum Teil aufgrund unserer eigenen Initiative, die Möglichkeit, das eigene Thema im Rahmen öffentlicher Veranstaltungen, die von verschiedenen Organisatoren gehostet wurden (siehe auch Abschnitt 3), zu präsentieren. Bei einigen dieser Veranstaltungen trafen wir auf ein besonders breites Spektrum an Zuhörer:innen, angefangen bei Unternehmer:innen über Wissenschaftler:innen aus verschiedensten Forschungsbereichen bis hin zu Pressevertreter:innen oder auch politischen Entscheidungsträger:innen.

Diese Vorträge zu QC wurden von den Zuhörern durchweg positiv aufgenommen, auch wenn bald deutlich wurde, dass die Inhalte im Normalfall nur einen groben Überblick über das Thema QC vermitteln können.

5.4 Erstellung eines Quantencomputer-Modells

Erfolgreicher Wissenstransfer lebt von anschaulichen und greifbaren Demonstrationen, die komplizierte Technik und komplexe theoretische Konzepte vereinfacht darstellen. Um Interesse zu wecken sowie einen einfacheren Zugang zum Quantencomputing zu verschaffen, haben wir zusammen mit Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen am Forschungszentrum Jülich, sowie mit einigen externen Partner:innen, ein 50 cm hohes, tragbares Modell eines Modell-Quantencomputers erstellt. Das Modell basiert auf einem supraleitenden Quantencomputer, der im *OpenSuperQ*-Projekt¹ am Forschungszentrum Jülich entwickelt wurde. Abbildung 6 zeigt eine Großaufnahme eines zentralen Schaltkreises dieses Modells.

Anhand der Details des Modells lässt sich anschaulich und leicht die technische Komplexität der Entwicklung eines supraleitenden Quantencomputers erklären, so natürlich auch Vertreter:innen aus Wirtschaft und Industrie. So wird etwa durch die sichtbaren Kühlelemente und viele explizit eingebaute Mikrowellenkabel und Bauelemente deutlich, dass klassisch hergestellte Kühl- und Mikrowellentechnik zentrale Bestandteile dieses Quantencomputers sind. Andererseits lässt sich anhand des Modells zeigen, dass ein beträchtlicher Anteil der aktuellen Herausforderungen der QC-Entwicklung im Bereich des klassischen Ingenieurwesens liegt.

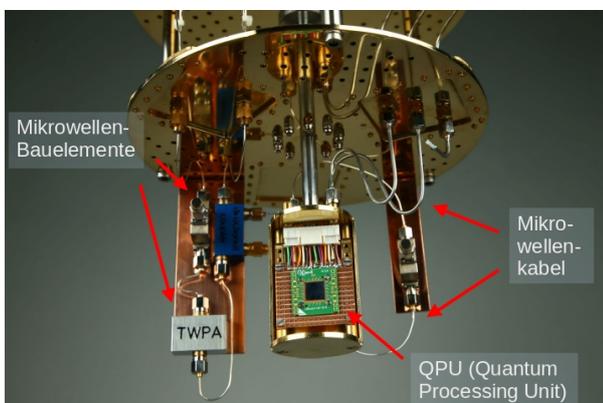


Abbildung 6: Nahaufnahme des QC-Modells, das während der Studie erstellt wurde. Fokus liegt auf Quantenprozessor (QPU) und zgh. Schaltkreisen. Foto: Helmut Timmermanns (FZJ/ZE-2).

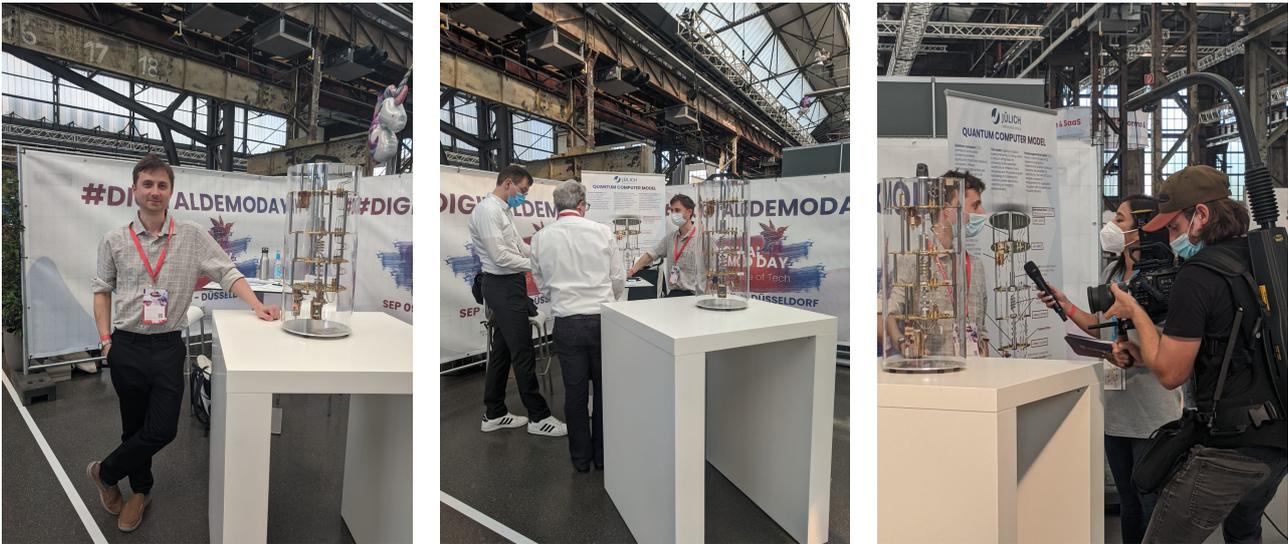


Abbildung 7: Fotos des Ausstellungsstands auf dem Digital Demo Day 2021, Düsseldorf³⁸. Die Aussteller vor Ort waren Daniel Zeuch (siehe u.a. linkes Bild), Daniel Stadler [QT.NMWP.NRW] (links im mittleren Bild) und Jan Timper [Forschungszentrum Jülich] (nicht im Bild). Das in den Bildern gezeigte QC-Modell hat bei der Veranstaltung viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Fotos: Radhika Vaidyanathan.

5.5 Ausstellung auf einer Industrie-Messe

Einer der ersten Einsätze des QC-Modells fand im Rahmen des Digital Demo Days 2021³⁸ statt, einer Start-up-Messe in Düsseldorf. Abbildung 7 zeigt Fotos des Modells als alleiniges Ausstellungsstück unseres Messestandes. Wie erhofft zog das Modell viel Aufmerksamkeit auf sich und sorgte dafür, dass wir auf dieser Veranstaltung mit vielen interessierten Wirtschaftsvertreter:innen in Kontakt kamen.

6 Fazit und Ausblick

Rückblickend werten wir diese Studie als Erfolg. Zur Herausforderung des Transfers akademischen Wissens zum Thema Quantencomputing (QC) in die Wirtschaft wurden zahlreiche Formate entwickelt und getestet: direkte, persönliche Ansprache, geschlossene und öffentliche Vorträge bzw. Netzwerktreffen, sowie die Teilnahme an einschlägigen Messen. Der Fokus lag dabei auf KMU, da diesen häufig nur geringe Ressourcen zur Verfügung stehen, um sich mit aufstrebenden Technologien wie QC zu befassen. Im Lauf der Studie wurden viele Entscheidungsträger:innen in die Lage versetzt das Verhältnis ihres Unternehmens zum Quantencomputing zu beurteilen.

Die Resonanz auf unternehmerischer Seite war von vielen positiven Reaktionen geprägt: ein Großteil der angesprochenen Wirtschaftsvertreter:innen hat sich gerne mit dem Thema QC auseinandergesetzt und einen wertvollen Beitrag zu der Studie gelie-

fert. Dies war häufig auch bei geringem unternehmerischen Engagement der Fall, denn viele unserer Gesprächspartner:innen wiesen eine rege persönliche Anteilnahme an dem Thema QC auf (vgl. etwa Abbildung 2). In einigen Fällen traf bei den Gesprächspartner:innen der Vorschlag, bei nationalen Verbundprojekten mitzuwirken, auf Resonanz. Häufig machten wir allerdings die Erfahrung, dass begrenztes Kapital bzw. Personal auch bei prinzipiellem Interesse an einer Forschungsbeteiligung ein klares Hindernis für KMU darstellt.

Durch unsere Studie hat sich unsere Erwartung bestätigt, dass viele KMU über für sie relevante wirtschaftliche QC-Aspekte noch nicht Bescheid wissen. Dazu zählen beispielsweise die sehr spezifische Anwendbarkeit von Quantencomputern, deren erwarteter enormer Gewinn an Rechenleistung in einigen Disziplinen und die Tatsache, dass bestimmte deutsche Hightech-Zulieferer schon jetzt durch einen Einstieg in das Gebiet QC profitieren können. Damit einhergehend deuten unsere gesammelten Daten darauf hin, dass potenzielle Anwender im Vergleich zu Zulieferern (vor allem auf Grund des nur schwer vorhersehbaren Zeithorizonts des Erreichens der QC-Marktreife) etwas weniger Interesse an QC aufweisen. Dies spiegelt sich auch in dem Quanten-Score wider, dessen Verteilung in Abbildung 5 dargestellt ist.

In einigen Interviews wurde von Seiten der Industriepartner:innen das auch als “European Paradox”^{43,44} bekannte Phänomen thematisiert. Hiernach wird in Deutschland zwar Spitzenforschung betrieben, allerdings gelingt auf wirtschaftlicher Sei-

te nur selten die Ausreifung neuartiger Technologien hin zu international konkurrenzfähigen Produkten. Entsprechend besteht das Ziel im Bereich QC nun weiterhin darin, dass Deutschland bzw. Europa in der industriellen Entwicklung von Quantencomputern sowie deren Anwendungen im internationalen Vergleich aufholt bzw. nicht den Anschluss verliert. Wie bereits in der Einleitung 1 diskutiert ist dabei auch die Einbindung agiler KMU sinnvoll. Diese Ansicht teilt auch die Bundesregierung, was exemplarisch durch eine Ausschreibung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) für QC-Demonstrationsaufbauten^{19,h} aus dem Jahr 2021 belegt wird: In dieser Bekanntmachung wird explizit darauf hingewiesen, dass eine Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft mit besonderem Fokus auf KMU eine Voraussetzung für Förderung ist.

Von den geplanten Wissenstransfer-Maßnahmen, die im Förderantrag für diese Studie angegeben waren, wurden die meisten erfolgreich umgesetzt. Dazu zählen (i) die Kontaktaufnahme mit wirtschaftsnahen Wissenschaftler:innen und die zeitweise sehr enge Zusammenarbeit mit der Koordinierungsstelle für Quantentechnologien des Landes Nordrhein-Westfalen (QT.NMWP.NRW), (ii) Interviews mit etwa 10 Wissenschaftler:innen zum Stand der Technik und zu den Bedarfen der Forschung aus der Industrie zum Aufbau einer QC-Wertschöpfungskette (deren Informationen in unsere Präsentationen und E-Mail-Ansprachen eingingen) sowie (iii) die Erarbeitung und exemplarisches Testen von Wissenstransferformaten (siehe Abschnitt 5). (iv) Die Ergebnisse sind in Form dieses Berichts der Öffentlichkeit zugänglich. Der mit Abstand wichtigste Punkt (v) ist der direkte Kontakt mit Vertreter:innen der Wirtschaft. In diesem Fall hatten wir statt der im Förderantrag intendierten 10 Interviews mit Vertreter:innen von insgesamt 26 Unternehmen Kontakt, worunter in 22 Fällen ausführliche Gespräche geführt und auf die Branche zugeschnittene Vorträge gehalten wurden [vergleiche Abbildung 2(a)].

Die während der Studie gewonnenen Erkenntnisse sowie die entwickelten Wissenstransferformate fließen in viele aktuelle FZJ-Aktivitäten im Bereich QC ein, die zunehmend durch Kooperationen mit der Industrie geprägt sind [z.B. im Zusammenhang mit dem geplanten “Center for Quantum Science and Engineering (CQSE)”⁴⁵]. Beispielsweise wird derzeit eine Kopie des in der Studie erarbeiteten QC-

Modells (siehe Abschnitt 5.4) als Exponat in Brüssel im Auftrag der EU-Kommission ausgestellt.ⁱ Zudem mündete die Erarbeitung des QC-Modells in zwei FZJ-interne Nachfolgeprojekte, nämlich die Gestaltungen (i) eines virtuellen QC-Modells⁴⁶ sowie (ii) eines kleinen 3D-gedruckten QC-Modells^j. So wie das ursprüngliche Modell selbst gehören nun auch diese beiden häufig Verwendung findenden Wissenstransfermedien zum QC-Outreach-Repertoire des Forschungszentrums Jülich.

Daniel Zeuch, der Hauptautor der Studie, hat während der Studienzeit breites Wissen auf vielen Ebenen der QC-Thematik dazugewonnen, etwa in Bezug auf Anwendungen für die Wirtschaft, Erklärungen der theoretischen Grundzüge von QCs für Laien, sowie über den experimentellen Aufbau und die Funktionsweise bestimmter QCs im Labor. Die Erfahrungen kommen ihm nun als Postdoktorand am PGI-12 des FZJ, dem *Institute for Quantum Computing Analytics*^k, zugute. Dort füllt er u.a. eine Rolle als Bindeglied zwischen Wissenschaft und QC-Nichtexperten aus, bspw. im Industrie-Anwendungsprojekt QUASIM²³. Des Weiteren wirkt Daniel Zeuch an der Überarbeitung einer Studie zum Thema “Entwicklungsstand Quantencomputer”⁷ für das Bundesministerium für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) mit.

Die zielgruppenspezifische Ausarbeitung von Wissenstransferformaten, die Ermittlung und Kontaktaufnahme von QC-relevanten Unternehmen sowie die Auswertung von gesammelten Daten nehmen Zeit in Anspruch, die häufig während der wissenschaftlichen Arbeit nicht zur Verfügung steht. Dieser zielgruppenrelevante Transfer von Wissen aus der Forschung in Wirtschaft und Gesellschaft ist beim Thema QC nach wie vor eine große Herausforderung, die es aufgrund der oben beschriebenen Dringlichkeit–bspw. durch weitere Wissenstransferstudien–anzunehmen gilt.

Danksagung

Die zentralen Ergebnisse dieser Studie kamen durch die rege Beteiligung potenzieller QC-Stakeholder zustande. Unser Dank gebührt deshalb in erster Linie allen Unternehmer:innen, die sich die Zeit nahmen mit uns informative Gespräche zu führen. Bei

ⁱSiehe folgende Meldung: <https://www.fz-juelich.de/de/aktuelles/news/meldungen/2022/schaustuecke-erfolgreicher-europaeischer-grossforschung>.

^jSiehe bspw.: https://www.linkedin.com/posts/danielzeuch_perhaps-some-of-you-remember-my-post-on-activity-6977588358604537856-GBJZ/.

^k<https://www.fz-juelich.de/de/pgi/pgi-12>

^hEine Übersicht über die Projekte, die derzeit in der genannten Maßnahme¹⁹ gefördert werden, befindet sich hier: <https://www.quantentechnologien.de/projektlandkarten/quantencomputing.html>.

einem noch so fernen und ungreifbaren Themengebiet wie dem Quantencomputing ist dies nicht selbstverständlich.

Diese Studie ist auch das Resultat vieler Diskussionen und Kooperationen des Hauptautors mit vielen Wissenschaftler:innen, Ingenieur:innen und dem Unterstützungspersonal am Forschungszentrum Jülich. Dazu zählen Anna Bauer, Sebastian Droege, Wolfgang Speier, Luise Snyders, Dirk Schlotmann, Silke Behlau, Claudia Funk, Andrea Raccanelli, Anne Schmidt, Roudy Hanna, Benedikt Frohn, Albert Hertel, Jonas Kölzer, Markus Jerger, Daniel Weigand, Hendrik Bluhm, Maria Pohl, Jacqueline Lippertz, Herbert Feilbach, Jens Schnitzler, Lotte Geck, Mike Haferkorn, Stefan Winkel, Helmut Timmermanns und Stefan van Waasen. Hervorheben möchten wir weiterhin diejenigen Wissenschaftler:innen, die sich für die Experten-Interviews in der Anfangsphase des Projekts zur Verfügung gestellt haben: Pavel Bushev, David DiVincenzo, Frank Wilhelm-Mauch, Tommaso Calarco, Carsten Degenhardt, Johannes van den Boom, Kristel Michielsen, Thomas Lippert und Markus Beckers. Viele wertvolle Beiträge wurden auch von Kolleg:innen außerhalb des Forschungszentrums geleistet; besonders hervorzuheben sind hier Daniel Stadler (QT.NMWP.NRW), Oliver Breunig und Marian Barsoum (beide Universität zu Köln/ML4Q), Jörgen Stenarson (Low Noise Factory, Schweden), Patrizia Herrmann und Jana Bodenstedt (beide Digital Innovation Hub Düsseldorf), Christel Hofmann und Radhika Vaidyanathan. Wir bitten um Nachsicht im Falle von versehentlichen Nichtberücksichtigungen.

Wir möchten uns insbesondere bei Verena Thaler, Hanna Buschan und Jan Timper (alle Forschungszentrum Jülich) für ihre tatkräftige Unterstützung in Form von regelmäßigen Besprechungen, kritischen Begutachtungen unserer Arbeit, wegweisenden Ratschlägen und aufmunternden Worten während der Studie bedanken. Geschätzte Hilfe beim Verfassen dieses Berichts lieferten neben Verena Thaler und Jan Timper auch Anna Bauer, Christel Hofmann sowie Daniel Stadler.

Darüber hinaus gilt unser Dank der Helmholtz-Gemeinschaft für die Förderung der Studie.

Literatur

- [1] Internationales Forschungsprojekt OpenSuperQ – an Open Superconducting Quantum Computer, 2018. Gefördert in der europäischen *Quantum Flagship* Initiative. URL <https://opensuperq.eu/>. Stand: 20.09.2022.
- [2] Henning Kagermann, Florian Süssenguth, Jorg Körner, and Annka Liepold. Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. *National Academy of Science and Engineering (acatech) Germany*, 2020. URL <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/>.
- [3] Henning Kagermann, Florian Süssenguth, Jorg Körner, and Annka Liepold. The Innovation Potential of Second-generation Quantum Technologies. *National Academy of Science and Engineering (acatech) Germany.*, 2020. URL <https://en.acatech.de/publication/the-innovation-potential-of-second-generation-quantum-technologies/>.
- [4] Alexandra Heimisch-Röcker and Christina Müller-Markus. acatech HORIZONTE: Quantentechnologie. *National Academy of Science and Engineering (acatech) Germany*, 2020. URL <https://www.acatech.de/publikation/acatech-horizonte-quantentechnologie/>.
- [5] Martin Streichfuss, Michael Alexander, Frederik Hammermeister, and Alexander Heuer. Quantencomputer / Wann kommt der Durchbruch? *Roland Berger GmbH*, 2021. URL <https://newsroom-de.rolandberger.com/documents/quantencomputer-wann-kommt-der-durchbruch-410369>.
- [6] Regina Finsterhölzl, Nicole Wittenbrink, Benedict Wenzel, Christoph Grzeschik, et al. Quantencomputing – Software für innovative und zukunftsfähige Anwendungen. *Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH*, 2022. URL <https://www.iit-berlin.de/publikation/quantencomputing-software-fuer-innovative-und-zukunftsfaeehige-anwendungen/>.
- [7] Frank K Wilhelm, Rainer Steinwandt, Brandon Langenberg, Liebermann Per J, et al. Status of quantum computer development - Entwicklungsstand Quantencomputer. *Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik*, 2020. URL <https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Quantentechnologien-und-Post-Quanten-Kryptografie/Entwicklungsstand-Quantencomputer/entwicklungsstand-quantencomputer.html>. Stand: 20.09.2022.
- [8] Frank Arute, Kunal Arya, Ryan Babbush, Dave

- Bacon, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779):505–510, 2019. doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>.
- [9] Stephen Shankland. Google quantum computer leaves old-school supercomputers in the dust. *CNET*, 2019. URL <https://www.cnet.com/news/google-quantum-computer-leaves-old-school-supercomputer-in-dust/>. Stand: 20.09.2022.
- [10] Han-Sen Zhong, Hui Wang, Yu-Hao Deng, Ming-Cheng Chen, et al. Quantum computational advantage using photons. *Science*, 370(6523):1460–1463, 2020. doi: 10.1126/science.abe8770.
- [11] Daniel Garisto. Light-Based Quantum Computer Exceeds Fastest Classical Supercomputers. *Scientific American*, 2020. URL <https://www.scientificamerican.com/article/light-based-quantum-computer-exceeds-fastest-classical-supercomputers/>. Stand: 20.09.2022.
- [12] Philipp Gerbert and Frank Ruess. The next decade in quantum computing—and how to play. *Boston Consulting Group*, 2018. URL <https://www.bcg.com/publications/2018/next-decade-quantum-computing-how-play>. Stand: 20.09.2022.
- [13] Matt Langione, Corban Tillemann-Dick, Amit Kumar, and Vikas Taneja. *Boston Consulting Group*, 2019. URL <https://www.bcg.com/en-ca/publications/2019/quantum-computers-create-value-when>. Stand: 20.09.2022.
- [14] Evan R MacQuarrie, Christoph Simon, Stephanie Simmons, and Elicia Maine. The emerging commercial landscape of quantum computing. *Nature Reviews Physics*, 2(11):596–598, 2020. doi: <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00247-5>.
- [15] Michel Kurek. Patents, publications and investments in quantum technologies. *Publications and Investments in Quantum Technologies (September 20, 2020)*, 2020. URL <https://papers.ssrn.com/sol3/id=3734185>.
- [16] Jean-François Bobier, Matt Langione, Edward Tao, and Antoine Gourévitch. What Happens When ‘If’ Turns to ‘When’ in Quantum Computing? *Boston Consulting Group*, 2021. URL <https://www.bcg.com/publications/2021/building-quantum-advantage>. Stand: 20.09.2022.
- [17] Die Bundesregierung. Bund fördert Quantentechnologien. 2021. URL <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/quantencomputing-1836542>. Stand: 20.09.2022.
- [18] Michael Förtsch, Wilhelm Kaenders, Max Riedel, Thomas Strohm, and Michael Totzeck. Förderung von Quantentechnologien. *VDI Technologiezentrum GmbH*, 2017. URL https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie_bf.pdf.
- [19] Bekanntmachung – Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema „Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten“, Bundesanzeiger vom 07.05.2021. *Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)*, 2021. URL https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2021/05/3591_bekanntmachung. Stand: 20.09.2022.
- [20] Andreas Bayerstadler, Guillaume Becquin, Julia Binder, Thierry Botter, et al. Industry quantum computing applications. *EPJ Quantum Technology*, 8(1):25, 2021. doi: <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x>.
- [21] Forschungszentrum Jülich. Quantentechnologie. URL <https://www.fz-juelich.de/de/forschung/information/quantentechnologie>. Stand: 20.09.2022.
- [22] Nationales Forschungsprojekt Q(AI)2 – Quantum Artificial Intelligence for the Automotive Industry, 2021. Gefördert Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). URL https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Projekte/210917_BMBF_QuanTech_Projektumrisse_Q_AI_2.pdf. Stand: 20.09.2022.
- [23] Nationales Forschungsprojekt QUASIM – Quantum Computing Enhanced Service Ecosystem for Simulation in Manufacturing, 2022. Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). URL <https://www.quasim-project.de/>. Stand: 20.09.2022.
- [24] Daniel Zeuch, Robert Cipri, and Nicholas E Bonesteel. Analytic pulse-sequence construction for exchange-only quantum computation. *Physical Review B*, 90(4):045306, 2014. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.045306>.
- [25] Daniel Zeuch and NE Bonesteel. Simple de-

- rivation of the fong-wandzura pulse sequence. *Physical Review A*, 93(1):010303, 2016. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.010303>.
- [26] Daniel Zeuch and NE Bonesteel. Efficient two-qubit pulse sequences beyond cnot. *Physical Review B*, 102(7):075311, 2020. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.075311>.
- [27] Caitlin Carnahan, Daniel Zeuch, and NE Bonesteel. Systematically generated two-qubit anyon braids. *Physical Review A*, 93(5):052328, 2016. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.93.052328>.
- [28] Daniel Zeuch, Fabian Hassler, Jesse J Slim, and David P DiVincenzo. Exact rotating wave approximation. *Annals of physics*, 423:168327, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aop.2020.168327>.
- [29] Daniel Zeuch and David P DiVincenzo. Refuting a proposed axiom for defining the exact rotating wave approximation. *arXiv preprint arXiv:2010.02751*, 2020. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.02751>.
- [30] Kleine und mittlere Unternehmen. *Wikipedia—Die freie Enzyklopädie*. URL https://de.wikipedia.org/wiki/Kleine_und_mittlere_Unternehmen. Letzte Aktualisierung: 10.06.2022.
- [31] Europäische Kommission. Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. 2003. URL https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=uriserv:OJ.L_.2003.124.01.0036.01.DEU. Stand: 20.09.2022.
- [32] Mittelstandsdefinition des IfM Bonn. *Institut für Mittelstandsforschung Bonn*. URL <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/mittelstandsdefinition-des-ifm-bonn/>. Stand: 20.09.2022.
- [33] Daniel Zeuch. Jülich baut einen Quantencomputer. *Wissenschaft online / Forschungszentrum Jülich GmbH*, Januar 2022. URL <https://webconf.fz-juelich.de/playback/presentation/2.3/1d47928ab7fb76dc62e522f5fe1718a6f5cdd570-1643290739029>. Stand: 20.09.2022.
- [34] Daniel Zeuch and Daniel Stadler. Quantencomputing – Anwendungen und Bedarfe für die Wirtschaft. *IHK Aachen*, Februar 2022. URL <https://www.ihk.de/aachen/innovation/innovation/ihk4kmu-5002434>. Stand: 20.09.2022.
- [35] Daniel Zeuch. Rhein-Kreis Neuss – Digitale Zukunft gestalten. *Strukturwandel & Wirtschaftskonferenz, Rhein-Kreis Neuss*, Mai 2022. URL <https://www.rhein-kreis-neuss.de/de/verwaltungspolitik/nachrichten/pressemeldungen-aus-dem-jahr-2022/strukturwandel-wirtschaftskonferenz-rhein-kreis-neuss-blickt-in-die-digitale-zukunft/>. Stand: 20.09.2022.
- [36] Daniel Zeuch. (Almost) Everything about Quantum Computing. *Techlabs Aachen*, Juni 2022. URL <https://techlabs.notion.site/TechTalks-Meet-the-Experts-Daniel-Zeuch-Almost-Everything-about-Quantum-Computing-01efdc27a8534ad5a93092ea5facfd49>. Stand: 20.09.2022.
- [37] Daniel Zeuch. Europas schnellster Quantencomputer. *VHS Frankfurt*, November 2022. URL https://vhs.frankfurt.de/VHSFFM/media/InfocenterDownloads/Programm_02_2022/VHS_Ffm_Programm_2022_2.pdf. Stand: 20.09.2022.
- [38] Digital Demo Day. *digihub Düsseldorf / Rheinland*. September 2021. URL <https://www.digihub.de/events/digital-demo-day-2021>. Stand: 20.09.2022.
- [39] WissKon21 – Nawik-Konferenz für kommunizierende Forschende. *Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation (NaWik) gGmbH*, 2021. URL <https://www.nawik.de/wisskon/veranstaltungen/wisskon20/>. Stand: 20.09.2022.
- [40] ML4Q Technology Day. *Matter and Light for Quantum Technologies (ML4Q)*, 2021. URL <https://ml4q.de/ml4q-technology-day-2021/>. Stand: 20.09.2022.
- [41] Ein Quantum Weihnacht. *NMWP Management GmbH*, 2021. URL <https://portal.nmwp.de/event/event/view/manage/95994>. Stand: 20.09.2022.
- [42] Yudong Cao, Jonathan Romero, Jonathan P Olson, Matthias Degroote, et al. Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing. *Chemical reviews*, 119(19):10856–10915, 2019. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00803>.
- [43] European Commission. Green paper on innovation. 1995. URL <https://www.ihk.de/aachen/innovation/innovation/ihk4kmu-5002434>.

//europa.eu/documents/comm/green_papers/pdf/com95_688_en.pdf. Stand: 20.09.2022.

- [44] Maria Argyropoulou, Klas Eric Soderquist, and George Ioannou. Getting out of the European Paradox trap: Making European research agile and challenge driven. *European Management Journal*, 37(1):1–5, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.emj.2018.10.005>.
- [45] Mit Quantentechnologien zur Hightech-Region – Quantum-Ready. *Forschungszentrum Jülich GmbH*, 2021. URL <https://effzett.fz-juelich.de/strukturwandel/quantum-ready>. Aus: “Neues Denken, neue Chancen - wie Forschung zum Strukturwandel beiträgt”, Broschüre des Forschungszentrums Jülich. Stand: 20.09.2022.
- [46] Sebastian Droege and Daniel Zeuch. Virtual quantum computer model. *Forschungszentrum Jülich GmbH*, 2022. URL <https://apps.fz-juelich.de/qcmodel/>. Stand: 20.09.2022.

Jül-4439 • Januar 2023
ISSN 0944-2952

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

