

Quantum Awareness im Ingenieurwesen: Welche Kompetenzen werden in der Industrie von morgen gebraucht?

- Erste Ergebnisse einer Delphi-Studie -

Franziska Gerke¹, Rainer Müller¹, Philipp Bitzenbauer², Malte Ubben³, Kim-Alessandro Weber⁴

¹TU Braunschweig, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, ²FAU Erlangen, Physikalisches Institut,

³WWU Münster, Institut für Didaktik der Physik, ⁴LU Hannover, Institut für Quantenoptik

f.gerke@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Quantentechnologien gewinnen rasant an Bedeutung und „Quantum Awareness“ wird auch im Ingenieurwesen immer wichtiger. Damit ergeben sich in der universitären Lehre neue Herausforderungen zur Ausbildung von „Quantum Engineers“. Hier setzt das Projekt an: Es werden Kenntnisse und Kompetenzen im Bereich der Quanteninformationstechnologien identifiziert, die teilweise schon jetzt, vor allem aber in Zukunft, in der Wirtschaft benötigt werden. Diese werden strukturiert, um schließlich messbare Kompetenzstufen abzuleiten.

Mit einer Delphi-Studie soll eine Prognose des Bedarfs von und der Anforderungen an „Quantum Engineers“ ermittelt werden. Die Ergebnisse bilden dann die Basis zur Entwicklung eines Kompetenzmodells oder Rahmenkonzeptes. Der Beitrag thematisiert das methodische Vorgehen und den aktuellen Stand der Studie.

1. Einleitung

Quantentechnologien haben die industriellen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte maßgeblich geprägt. Für die kommenden Dekaden zeichnen sich erstaunliche Fortschritte ab, die auf der Manipulation und Messung einzelner Quantenobjekte beruhen. Welche Anforderungen ergeben sich dadurch an künftige Quanten-Fachkräfte, die mit solchen Quantentechnologien der zweiten Generation (QT 2.0) arbeiten? Welche zusätzlichen Quanten-Kompetenzen benötigen Spezialisten, die nicht aus dem Physikbereich, sondern dem Ingenieurwesen, der Informatik, Mathematik, Chemie oder Biologie stammen? In wie weit benötigen diese ein konzeptionelles, qualitatives Verständnis von Quantenphysik, also „Quantum Awareness“?

Unser langfristiges Ziel ist, basierend auf diesen Fragen, die Entwicklung einer Kompetenzlandkarte / eines Rahmenkonzeptes, anhand dessen Aus- und Fortbildungskonzepte wie auch (Master-)Studiengänge oder Wahl-Vertiefungsfächer entwickelt werden können.

Da dieser Themenbereich jedoch neu ist und entsprechend nur wenige Experten dazu befragt werden können, wird die Studie breit und im Delphi-Design angelegt, das im kommenden Abschnitt näher erläutert wird. Mit einer Pilotrunde wird zunächst ein Überblick über diesen sehr großen, offenen Bereich gewonnen. Dazu werden wenige Fachleute, vorwiegend aus der Wissenschaft, befragt.

Die Antworten werden gebündelt und Ideen gesammelt, welche in der ersten Hauptrunde einer größeren

Personengruppe, die diesmal durch Fachkräfte aus der Industrie dominiert werden soll, zur Beurteilung und Ergänzung vorgelegt werden.

Eine zweite Hauptrunde dient zur abschließenden Bewertung von Inhalten und Zusammenhängen, sodass auf dieser Basis die Entwicklung einer Kompetenzlandkarte ermöglicht wird.

Die Delphi-Studie beschränkt sich nicht nur auf den deutschen, sondern umfasst auch den europäischen Raum als Teil des Quantum Flagships [1], um eine möglichst internationale Einschätzung zu den Themen zu erhalten. Zudem dient sie als Vorbereitung für das Flagship-Projekt QTedu, das im September 2020 starten wird und dessen Ziel neben anderen eben diese Entwicklung einer Kompetenzlandkarte ist.

Im Folgenden werden neben dem methodischen Vorgehen einige Ergebnisse der Pilotrunde sowie Folgerungen für die erste Hauptrunde, die Mitte 2020 stattfinden soll, dokumentiert.

2. Methodisches Vorgehen

Die Studie basiert auf der Delphi-Methode, die im nächsten Abschnitt vorgestellt wird. Anschließend werden die Fragengestaltung für die Pilotrunde und das Vorgehen zur Auswertung erläutert.

2.1. Delphi-Methode

Delphi-Befragungen können nach Häder ([2], S. 33, s. auch [3]) zur Ermittlung und Qualifikation von Expertenmeinungen eingesetzt werden. Diese treten in der vorliegenden Studie in Form von Begriffsklärung und Prognostizierung künftiger Relevanzen auf.

Ermittelt werden dabei vorwiegend quantitative Einschätzungen, denen aber eine eher qualitativ ausgerichtete Runde, wie die hier beschriebene Pilotrunde, vorangestellt werden kann. (Vgl. [2], S. 36)

Die Delphi-Methode ist durch einen iterativen Befragungs- und Feedback-Prozess geprägt. Die Ergebnisse der vorherigen Befragung werden den Teilnehmenden mitgeteilt und beeinflussen die Antworten und Beurteilungen der nachfolgenden Befragungsrunde, indem zusätzliche Informationen/Kontexte zur Verfügung gestellt werden. (Vgl. ebd., S. 49 f.)

Das Vorgehen wird schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

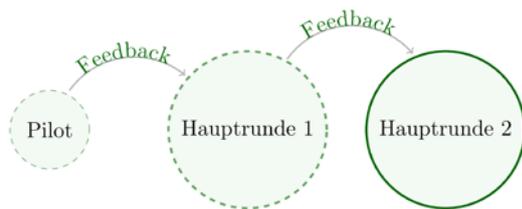


Abb. 1: Schema der Delphi-Methode mit einer Pilot- und zwei Hauptrunden. Der Experten-„Kreis“ ist in der Pilotrunde kleiner, und die Fragen sind noch teilweise offen gehalten, während sie in der zweiten Hauptrunde (nahezu vollständig) geschlossen sind. Über Feedback werden die Hauptrunden jeweils durch die vorhergehende Runde beeinflusst.

2.2. Pilotrunde: Fragebogengestaltung

Der Fragebogen ist in vier Abschnitte gegliedert zuzüglich einer abschließenden Kommentiermöglichkeit und einer E-Mail-/Code-Abfrage. Letztere dient der Zuordnung der Fragebögen aller drei Befragungsrunden zu einem einzelnen Teilnehmenden und, sofern eine E-Mail-Adresse angegeben wurde, dazu sicherzustellen, dass alle Teilnehmenden Rückmeldungen zu den Ergebnissen sowie die Einladung für die nächste Runde erhalten.

Die vier Abschnitte thematisieren die beruflichen Hintergründe und Kompetenzen der Teilnehmenden und ihre Prognosen für Quantentechnologien allgemein, für „Quantum Awareness“ und „Quantum Workforce“. Dieser Gliederung folgt auch die Ergebnisdarstellung im nächsten Abschnitt.

In einzelnen Fragen werden Quantentechnologie-Bereiche angesprochen. In diesen Fällen werden die vier Sektoren Quantencomputer, Quantensimulatoren, Quantenkommunikation sowie Quantensensoren und Metrologie genannt, die auch vom Quantum Flagship [1] in dieser Reihenfolge vorgestellt werden. Über offene Fragen wird die Bestätigung dieser als die zentralen Bereiche und die Ergänzung weiterer, wichtiger Technologiebereiche ermöglicht.

Das Ingenieurwesen wird in den Fragenformulierungen nicht explizit erwähnt, um die Teilnehmenden

nicht auf diesen interdisziplinären Bereich zu fokussieren, sondern auch für andere offen zu bleiben. An die Stelle von „Quantum Engineers“ tritt somit „Quantum Workforce“ oder die Beschreibung als Fachkräfte, die mit Quantentechnologien arbeiten.

Mit vorwiegend offenen Fragen soll ein grober Überblick gewonnen werden, bevor in den Hauptrunden mit zunehmendem Anteil geschlossener Fragen konkretere Resultate ermittelt werden. Entsprechend ist die Zielgruppe von vergleichsweise geringem Umfang und setzt sich vorwiegend aus Personen mit Tätigkeit in der Wissenschaft zusammen. Die Kontaktaufnahme erfolgte vorwiegend über bestehende Netzwerke des Quantum Flagship.

2.3. Auswertung

In diesem Aufsatz werden ausgewählte erste Ergebnisse dargelegt, um einen Überblick über den aktuellen Stand der Studie zu bieten, sie sind noch nicht empirisch abgesichert.

Zur Visualisierung der Daten, die mit Hilfe von Ratingskalen erhoben wurden, wird auf Diverging Stacked Bar Charts [4] zurückgegriffen. In diesen wird für jede zu bewertende Aussage ein Balken dargestellt, dessen Länge auf 1 normiert ist. Jeder Balken ist relativ zur Skalenmitte ausgerichtet. Eine Tendenz zur Zustimmung der Befragten zeigt sich in einem Ausschlag des Balkens nach rechts, ein Ausschlag nach links deutet auf eine Ablehnung hin.

Die offenen Fragen wurden zunächst mit Knime [5] ausgewertet. Dazu wurden die Antworten bereinigt, also Rechtschreibfehler korrigiert, Füllwörter und Satzzeichen entfernt, etc. Außerdem wurde das Wort „quantum“ ignoriert, da die Nennung dieses Begriffs im Quanten-Kontext keinen Mehrwert liefert und die Unterschiede in den Schriftgrößen der anderen Begriffe sonst teilweise kaum erkennbar wären.

Den verbliebenen Wörtern wurden abhängig der Antwortlängen Werte zugeordnet, wobei hohe Werte durch blaue Farbe gekennzeichnet sind, geringere Einzelwerte weisen einen stärkeren Rotton auf. Die Werte der einzelnen Wörter werden summiert, wodurch sich die Schriftgrößen und Anordnungen der Wörter in den WordClouds ergibt.

Zur weiteren Auswertung erfolgt noch eine qualitative Inhaltsanalyse, wie sie von Mayring [6] beschrieben wird. Sie ist nicht Teil dieser Übersicht erster Ergebnisse, wird aber benötigt, um anhand der Kategorien Items zu formulieren, die dann in den Hauptrunden beurteilt und ergänzt werden können.

3. Ergebnisse aus der Pilotrunde

Den Fragebogen zur Pilotrunde haben im März (\pm eine Woche) 26 Personen beantwortet. Diese Gruppe Teilnehmender wird im nächsten Abschnitt näher beschrieben, danach folgen die Ergebnisse zu den drei weiteren, oben genannten Bereichen.

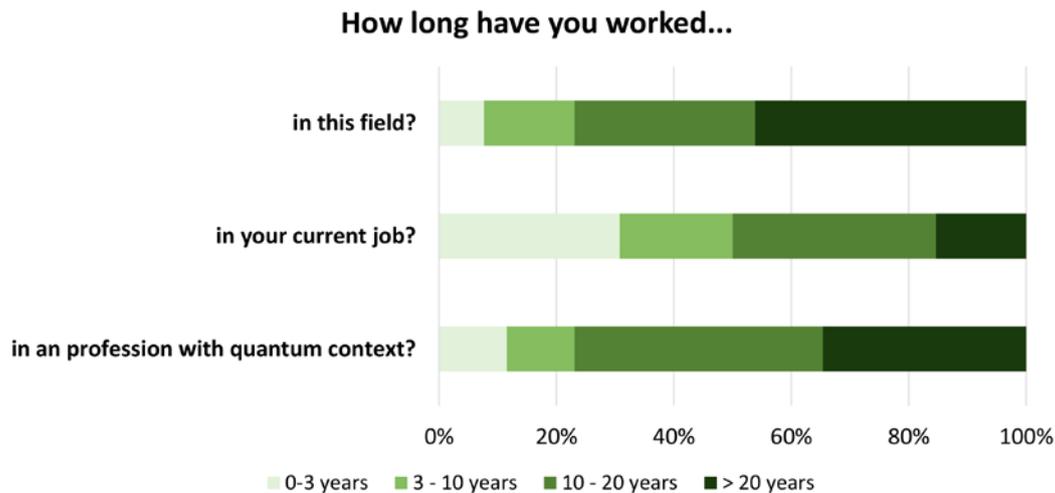


Abb. 2: Übersicht über die Angaben zu den beruflichen Erfahrungsjahren.

3.1. Teilnehmende

Alle Teilnehmenden wurden angehalten, ihren Beruf anzugeben, welche Bereiche (Industrie, IT, Wissenschaft, Lehre, Ausbildung, Forschung, Anwendung) sie beruflich abdecken und wie lange sie bereits in diesem Bereich, in dem aktuellen Job und in einem Beruf mit Quanten-Kontext arbeiten (vgl. Abbildung 2). Vorwiegend nahmen Personen aus der Wissenschaft und Lehre an der Studie teil, rund 60 % arbeiten in der Forschung, lediglich vier ordnen sich der Industrie zu, nur zwei dem Anwendungs-Bereich.

Zudem wurde eine Einschätzung der eigenen Kompetenz in diesem Zusammenhang erfragt, wobei eine Skala von 1 (sehr hoch) bis 6 (sehr niedrig) vorgegeben wurde. Rund drei Viertel der Teilnehmenden schätzten ihre eigene Kompetenz hoch oder sehr hoch, lediglich 16 % als (eher) niedrig. Diese Einschätzung spiegelt sich auch in den Angaben zu den beruflichen Erfahrungsjahren wider, die in Abbildung 2 dargestellt werden: Über drei Viertel der Befragten arbeiten seit mindestens zehn Jahren in einem Beruf mit Quanten-Kontext.

Anhand der Angaben wurden die Personen hinsichtlich beruflichem Hintergrund, Erfahrung und Kompetenz charakterisiert, um einzelne Antworten zu den anderen Fragen vor diesem Hintergrund bewerten zu können.

Zudem wurde gefragt, in welchen Ländern die Teilnehmenden arbeiten. Deutschland ist mit 11 von 26 Zuordnungen überrepräsentiert, die anderen Teilnehmenden verteilen sich auf 9 weitere Länder europaweit, eine Person machte keine Angabe.

3.2. Quantum Technologies

Zum fachlichen Einstieg wurden die Teilnehmenden nach ihrem Verständnis von Quantentechnologien der zweiten Generation gefragt. Die WordCloud in Abbildung 3 visualisiert die zentrale Rolle der Verschränkung (entanglement), in Kombination mit der Superposition und der Manipulation/Kontrolle von einzelnen (single) Quantenobjekten. Weitere Schlagworte sind „computing“ und „communication“, zwei große Quantentechnologie-Bereiche.

Anschließend wurden die Teilnehmenden um eine Stellungnahme gebeten, ob Quantentechnologien für

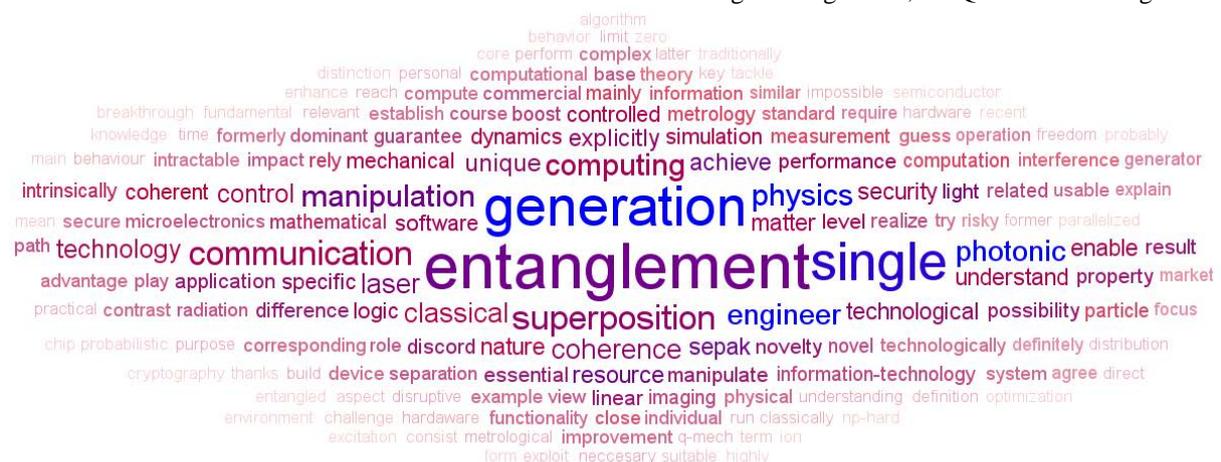


Abb. 3: WordCloud zum Verständnis von Quantentechnologien der zweiten Generation und was sie von anderen Technologien unterscheidet.

die industrielle Entwicklung zentral sind - heute und in 5 bis 10 Jahren. Nur rund 60 % der Teilnehmenden stimmten der Aussage zu, dass diese Technologien bereits heute von zentraler Bedeutung seien. Kritiker sahen vorwiegend die Entwicklung noch nicht weit genug fortgeschritten, um den Quantentechnologien eine zentrale Bedeutung beizumessen.

In naher Zukunft sah jedoch lediglich eine Person, die sich selbst dem Industrie-Bereich zuordnete, nicht die zentrale Bedeutung von Quantentechnologien für die industrielle Entwicklung. Diese räumte sie ihnen erst in 15 bis 20 Jahren ein.

Detailliertere Einschätzungen zeigt Abbildung 4: die Teilnehmenden sollten auf einer sechsstufigen Skala angeben, für wie wichtig sie - heute und in naher Zukunft - Quantentechnologien für ihren Sektor, die Industrie, die Wissenschaft und die Gesellschaft halten.

Die Relevanz wurde besonders in der Wissenschaft und im eigenen Bereich, der vorwiegend eben die Wissenschaft ist, besonders hoch eingeschätzt. In der Industrie wurde eine starke Erhöhung der Relevanz prognostiziert. Dies passt zu den oben beschriebenen Stellungnahmen, nach denen Quantentechnologien in

5 bis 10 Jahren deutlich mehr Befragte eine zentrale Bedeutung beimessen.

Auch für die Gesellschaft wurde eine starke Relevanzsteigerung erwartet. Bei Betrachtung der einzelnen Einschätzungen fällt auf, dass von den vier Teilnehmenden, die die Relevanz heute besonders niedrig einschätzten, zwei aus der Gruppe der vier Industrie-Angehörigen stammen.

Anschließend wurden die Befragten zu einer Einschätzung der Wichtigkeit von Quantencomputern, Quantensimulatoren, Quantenkommunikation sowie Quantensensoren und Metrologie für die Industrie in naher Zukunft (in 5 bis 10 Jahren) auf einer sechsstufigen Skala aufgefordert. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 5: Der Bereich Sensoren und Metrologie wurde tendenziell als am wichtigsten eingeordnet, dicht gefolgt von der Quantenkommunikation. Quantensimulatoren und -computer wurden als weniger wichtig, aber durchaus noch wichtig, eingeordnet.

Bei Betrachtung der Einzelantworten fällt auf, dass alle fünf Personen, die den Quantencomputer als sehr wichtig einordneten, die drei anderen Bereiche eben-

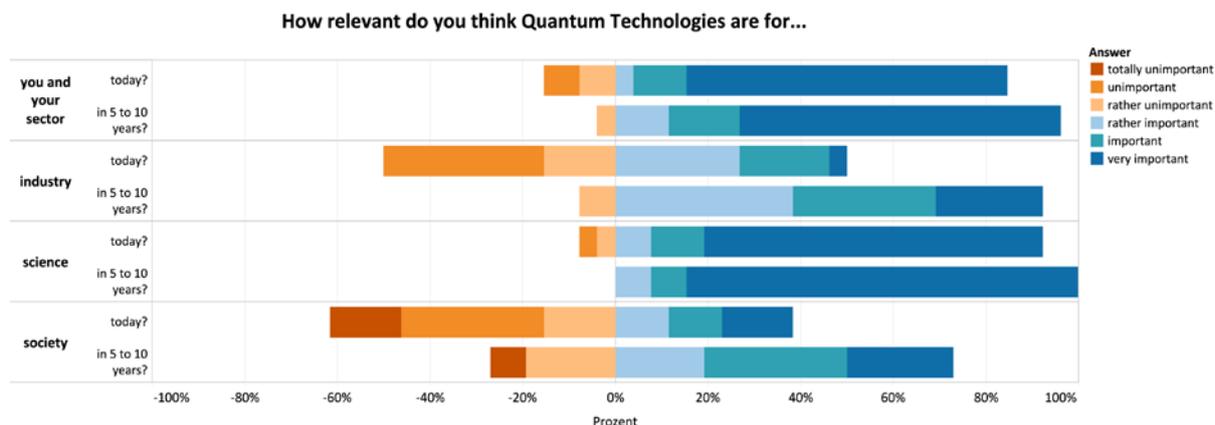


Abb. 4: Einschätzung der Relevanz heute und in naher Zukunft in vier Bereichen (eigener Sektor, Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft) auf einer sechsstufigen Skala von sehr niedrig (totally unimportant) bis sehr hoch (very important).

How do you estimate the importance that the following four areas will have for quantum industry in 5 to 10 years?

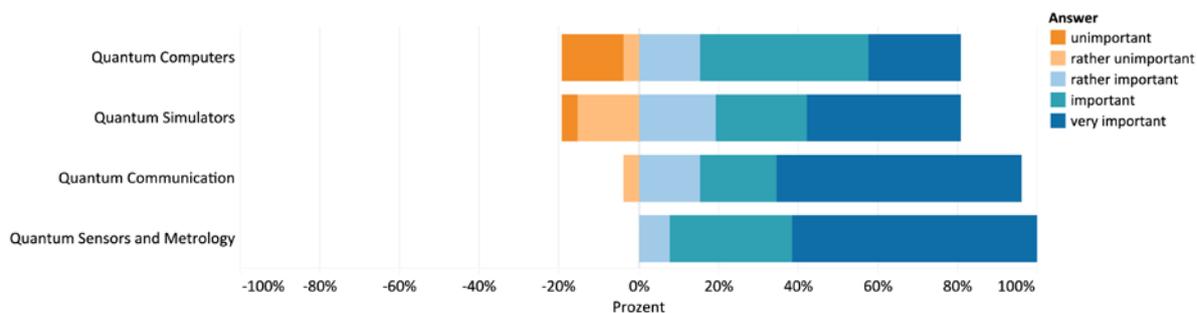


Abb. 5: Einschätzung der Wichtigkeit von Quantencomputern, Quantensimulatoren, Quantenkommunikation sowie Quantensensoren und Metrologie für die Quantenindustrie in naher Zukunft auf einer sechsstufigen Skala, wobei die niedrigste Stufe (totally unimportant) nicht gewählt wurde



Abb. 7: WordCloud zu Gründen für die Wichtigkeit von Quantum Awareness.

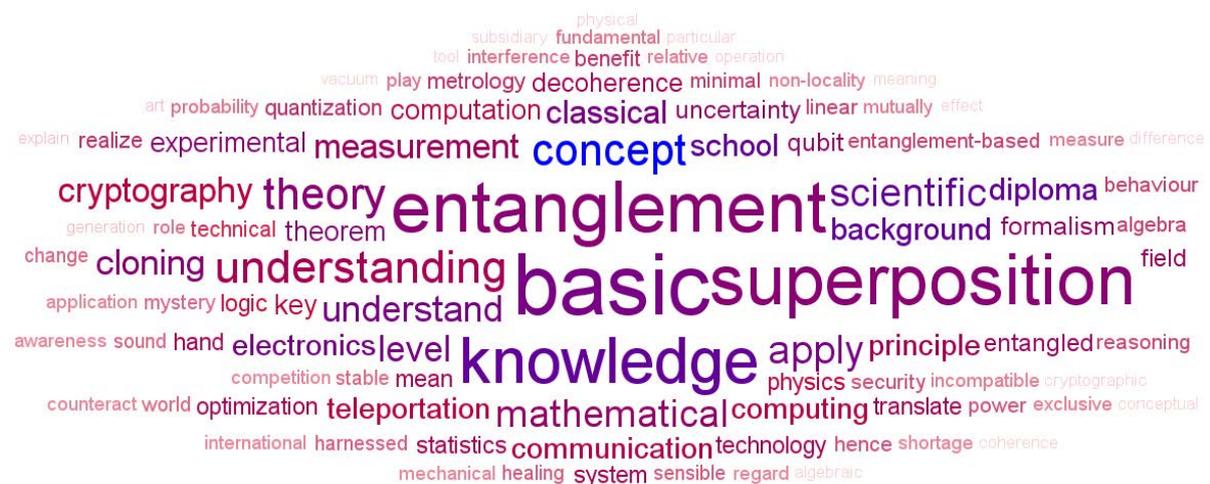


Abb. 8: WordCloud zu absolut notwendigen Kompetenzen im Kontext von Quantum Awareness.

Als wünschenswert werden Grundlagen aus diversen interdisziplinären Bereichen und der Physik angeführt. Im Kontext von Quantentechnologien werden der Anwendungsbezug bzw. das Verständnis für die Funktion und für die quantenphysikalischen Hintergründe, die physikalische Realisierung sowie Möglichkeiten und Grenzen gelistet.

3.4. Quantum Workforce

Für Fachkräfte im Quanten-Sektor wurden als notwendige oder wünschenswerte Kompetenzen und Kenntnisse aus dem Bereich der Quantentheorie vorwiegend dieselben wie für Quantum Awareness genannt. Abseits der Quantentheorie sind besonders solche aus den Bereichen Mathematik und Informatik, aber auch anderen interdisziplinären Kontexten und der Experimentalphysik wünschenswert.

Quantenphysik-Aspekte, die als weniger wichtig für Fachkräfte außerhalb des Physik-Bereichs empfunden werden, sind insbesondere stark mathematisch-formale, klassische Theorien wie die zum Wasserstoffatom und die Wellenmechanik, sowie Interpretationen der Quantenphysik. „Vielleicht ist ‚shut-up and calculate‘ der Weg, den man gehen sollte (eher:

‚shut-up and apply‘)“, so ein Experte mit hoher selbsteingeschätzter Kompetenz aus der Industrie.

Die Befragten schätzten die Wichtigkeit von Fachkräften mit Quantum Awareness in den vier Bereichen Quantencomputer, Quantensimulatoren, Quantenkommunikation sowie Quantensensoren und Metrologie ähnlich wie die Relevanz der Bereiche für die Quantenindustrie (vgl. Abbildung 5), wie auch in Abbildung 9 zu erkennen.

Abschließend wurde gefragt, in welchen anderen Bereichen solche Fachkräfte benötigt werden. Genannt wurden neben diversen MINT-Bereichen beispielsweise auch Landwirtschaft oder Verteidigung und Sicherheit, relevant werden sie „im Grunde in allen [Bereichen], denn Kommunikation und ihre Sicherheit ist überall wichtig“.

How important will employees with "Quantum Awareness" be in these four areas in 5 to 10 years?

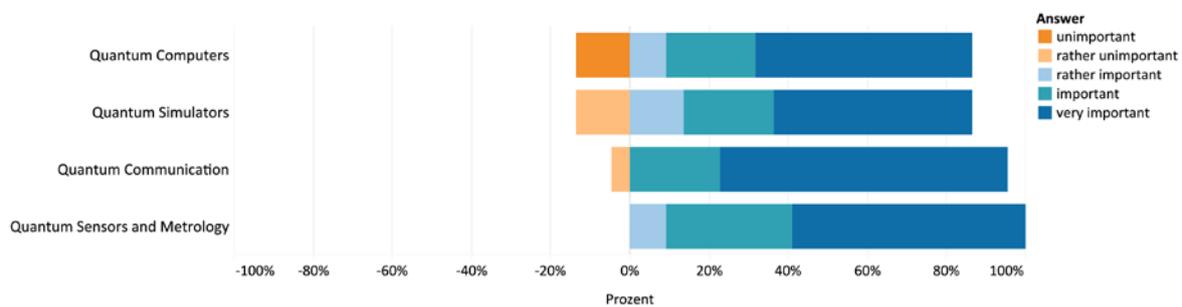


Abb. 9: Einschätzung der Wichtigkeit von Fachkräften mit Quantum Awareness in den Bereichen Quantencomputer, Quantensimulatoren, Quantenkommunikation sowie Quantensensoren und Metrologie in naher Zukunft auf einer sechsstufigen Skala, wobei die niedrigste Stufe (totally unimportant) nicht gewählt wurde.

4. Interpretation und Folgerungen für die erste Hauptrunde

Quantentechnologien, die auf der Kontrolle und Manipulation von einzelnen Quantenobjekten basieren und beispielsweise das Phänomen der Verschränkung ausnutzen, sind oder werden in naher Zukunft zentral für die industrielle Entwicklung. Die wachsende Relevanz zeigt sich in dem Shift der Antworten zur Beurteilung, ob die Technologien heute bzw. in Zukunft von zentraler Bedeutung sind, und in der Einschätzung der Wichtigkeit für die vier abgefragten Bereiche, unter denen der Industrie die größte Steigerung prognostiziert wurde.

Besonders hohe Relevanz werden für die Bereiche Quantenkommunikation und Quantensensoren/Metrologie erwartet, doch auch Quantencomputern wird großes Potential zugeschrieben. Dabei gilt besonderes Augenmerk der Sicherheit. Ursache dafür dürfte die einfache Entschlüsselung aktueller, auf Primfaktorzerlegungen basierender Kryptographieverfahren durch Quantencomputer sein. Entsprechend rückt die physikalisch abhörsichere Kommunikation unter Nutzung von Quantenphänomenen in den Fokus der Forschung.

Das Arbeitsfeld, in dem schon bald Quanten-Fachkräfte benötigt werden dürften, zeigt sich entsprechend vielfältig. Neben dem Ingenieurwesen, dem einige Befragte besondere Bedeutung beimessen, und interdisziplinären Naturwissenschaften zählt etwa auch der Bereich Sicherheit und Verteidigung zu den möglichen Einsatzgebieten von Fachkräften mit besonderen Kenntnissen und Kompetenzen aus dem Quanten-Bereich.

Diese Fachkräfte werden mit Quantentechnologien arbeiten und müssen über ein grundlegendes Verständnis von Quantenphysik, aber auch über weitere, interdisziplinäre Kompetenzen und Kenntnisse, etwa aus Mathematik und Informatik, verfügen.

Welche genau das sein sollten, insbesondere auch wie tief mathematisch, ist in der ersten Hauptrunde zu klären. Dazu werden die mit der Pilotrunde ermittelten Aspekte in Form von Items zu bewerten und ggf. zu ergänzen sein.

5. Literatur

- [1] QFlag – Quantum Flagship Coordination and Support Action: Quantum Flagship <https://qt.eu/> und Technologiebereiche <https://qt.eu/discover/technology/> (Stand: 5/2020)
- [2] Häder, M. (2009): Delphi-Befragungen: Ein Arbeitsbuch. VS Verlag für Sozialwissenschaften, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, DOI: [10.1007/978-3-531-91926-3](https://doi.org/10.1007/978-3-531-91926-3)
- [3] Clayton, M. J. (1997): Delphi: a technique to harness expert opinion for critical decision-making tasks in education. In *Educational Psychology*, 17 (4), 373-386, DOI: [10.1080/0144341970170401](https://doi.org/10.1080/0144341970170401)
- [4] Robbins, N. und Heiberger, R. (2011): Plotting Likert and other rating scales. In *Proceedings of the 2011 Joint Statistical Meeting*, 1058-1066
- [5] Knime: Software der Knime AG, Schweiz: <https://www.knime.com/> (Stand: 5/2020)
- [6] Mayring, P. (2015): Qualitative Inhaltsanalyse. Beltz Verlagsgruppe, 69 469 Weinheim, ISBN: 9783407293930