



STIFTERVERBAND

 Heinz Nixdorf Stiftung

DISCUSSION PAPER 08

QUANTUM SKILLS IN DER LEHRKRÄFTEBILDUNG

11 Empfehlungen an Bildungspolitik,
Hochschulen und Zivilgesellschaft
um Quantentechnologien in die
Allgemeinbildung zu bringen



Oktober 2023

QUANTUM SKILLS IN DER LEHRKRÄFTEBILDUNG

11 Empfehlungen, an Bildungspolitik, Hochschulen und Zivilgesellschaft, um Quantentechnologien in die Allgemeinbildung zu bringen

- **Quantentechnologien sind wichtige Zukunftstechnologien. Deshalb sollten möglichst viele Schülerinnen und Schüler befähigt werden, sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen.**
 - **Durch eine moderne Didaktik und technologiebezogenen Unterricht ist es möglich, dass Schülerinnen und Schüler in der Breite diese physikalischen und informatischen Inhalte in der Schule erlernen.**
 - **Dafür brauchen Lehrkräfte spezifische Kompetenzen, die sie derzeit weder im Studium noch in Fortbildungen zuverlässig erwerben können.**
 - **Um Lehrkräften rechtzeitig den Erwerb der notwendigen Kompetenzen zu ermöglichen, müssen gute Rahmenbedingungen geschaffen, passende Studien- und Fortbildungsangebote entwickelt, und unterstützende Ressourcen bereitgestellt werden.**
- **Autorenschaft:** Die Empfehlungen in diesem Paper wurden von insgesamt 17 interdisziplinären Expertinnen und Experten für Quantenphysik, Quanteninformatik und ihre jeweilige Didaktik formuliert (vollständige Liste siehe Seite 17).

1. Zusammenfassung

Mit seiner Initiative „Quantum Skills“ setzt sich der Stifterverband dafür ein, die Vermittlung von Kompetenzen zu stärken, die in einer Welt wichtig sind, in der Quantentechnologien zunehmend an Bedeutung gewinnen. Quantentechnologien bringen sowohl große zivilgesellschaftliche Chancen als auch Risiken mit sich, die eine informierte öffentliche Debatte verlangen. Gleichzeitig steht dieses Engagement im Kontext eines sich schon jetzt abzeichnenden Fachkräftemangels, welcher Entwicklung vielversprechender Technologien in Bereichen der Quantensensorik, der Quantenkommunikation oder des Quantencomputing im Weg steht. Voraussetzung für eine fundierte Auseinandersetzung mit Quantentechnologien ist ihre Integration in die an den Schulen vermittelte Allgemeinbildung und ihre Entmystifizierung durch die beteiligten Wissenschaften der Quantenphysik und der Quanteninformatik. Denn nur so können Bürgerinnen und Bürger Quantentechnologien zukünftig kompetent nutzen und mit ihnen verbundene Chancen und Risiken bis hin zu falschen Versprechungen einordnen.

Zu diesem Zweck hat eine interdisziplinäre Expertengruppe für Quantenphysik und Quanteninformatik und ihrer jeweiligen Didaktiken unter dem

Dach des Stifterverbandes und der Heinz Nixdorf Stiftung, unter anderem mit Mitgliedern der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Mitgliedern der Gesellschaft für Informatik und Mitgliedern des Deutschen Philologenverbandes das vorliegende Diskussionspapier erarbeitet. Es enthält elf Empfehlungen für eine zeitgemäße Aus- und Fortbildung von Lehrkräften, die den aktuellen Stand der didaktischen Forschung und den interdisziplinären Charakter der Thematik berücksichtigen.

Die Empfehlungen stehen unter folgenden beiden gemeinsam entwickelten Zielvorstellungen:

- Durch einen modernen Schulunterricht werden Quantentechnologien in ihrer Interdisziplinarität Teil der mathematisch-naturwissenschaftlichen und informatischen Grundbildung. Sie werden von Schülerinnen und Schülern als etwas begriffen, das sie verstehen und erlernen können. Schülerinnen und Schüler werden durch den Unterricht befähigt, am Diskurs über Quantentechnologie teilzunehmen. Dies beinhaltet die Interpretation der Quantentheorie, den Umgang mit Quantentechnologien, die Einordnung von Potenzialen und Anwendungen sowie von widersprüchlichen Informationen auf Basis eines fundierten Grundverständnisses.
- Der Kern guten Unterrichts ist die Lehrkraft, die ihn verantwortet und durchführt. Aus diesem Grund müssen die Lehrkräfte optimal auf die Vermittlung der notwendigen Kompetenzen vorbereitet werden. Dies muss sowohl im Studium für zukünftige Lehrkräfte als auch in Fort- und Weiterbildungen für aktive Lehrkräfte gewährleistet werden.

2. Einleitung

In den letzten Jahren sind durch Fortschritte in den Quantentechnologien Anwendungsbereiche eröffnet worden, die als disruptiv angesehen werden.¹ Grundlage für all jene Fortschritte ist die Quantenphysik, die ein zentraler Grundpfeiler der modernen Physik ist. Sie hat unser Verständnis der Natur revolutioniert und prägt das heutige Weltbild der Physik. Durch auf quantenphysikalischen Prozessen aufbauende Informatik ergeben sich neue Möglichkeiten und Herausforderungen.

Um die Potenziale und Anwendungsmöglichkeiten von Quantentechnologien richtig zu verstehen, brauchen wir eine reflektierte Auseinandersetzung mit den Konzepten und Anwendungen der ihnen zugrunde liegenden Wissenschaften. Sie sollte sowohl in der Schule als auch in der breiten Öffentlichkeit kompetent geführt werden. Dafür müssen die Lehrkräfte entsprechend gebildet sein und auch nach ihrer Ausbildung qualifiziert unterstützt werden.

1 Henning Kagermann, et al.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation., Acatech 2020.

Die Voraussetzungen sind günstig: Die neuen Bildungsstandards für die Sekundarstufe II im Fach Physik weisen eine begrüßenswerte Orientierung in Richtung einer modernen Sichtweise der Quantenphysik auf, was sich in der Folge auch in den Lehrplänen der meisten Bundesländer niedergeschlagen hat.² Im Gegensatz dazu gibt es in unserer Lebenswelt aktuell noch kaum Berührungspunkte mit quanteninformatischen Phänomenen. In Anbetracht der perspektivisch zu erwartenden technologischen Fortschritte und der daraus folgenden Anwendungsmöglichkeiten sowie deren gesellschaftlichen Auswirkungen wurde auch im Bereich der Informatikdidaktik bereits mit der Erschließung des Themengebiets Quanteninformatik für die informatische Allgemeinbildung begonnen.³

Damit ist der Weg bereitet, die Grundlagen der Quantentechnologien in einer zeitgemäßen Weise zu unterrichten: mit Bezug zu technologischen Anwendungen und in einer pragmatischen Perspektive, die die Besonderheiten der Quantenphysik und -informatik einordnet, statt sie als unbegreifbar oder mystisch darzustellen.⁴ Dabei ist es wichtig, langfristig bedeutsame Kompetenzen zu identifizieren und nicht kurzfristigen Moden zu folgen. Zudem ermöglicht eine anwendungsbezogene Perspektive interdisziplinäre Bezüge, die einen an konkreten Anwendungskontexten orientierten Unterricht erlauben, der Verbindungen zu Mathematik und Informatik, aber auch zu Chemie, Biologie und Philosophie herstellt.

Gleichzeitig stellt diese inhaltliche Neuausrichtung aktive Lehrkräfte und Lehramtsstudierende vor große Herausforderungen. Nicht nur müssen sie die fachlichen Hintergründe der Quantenphysik und -informatik verstehen, sie müssen zudem in der Lage sein, quantentechnologische Anwendungen zu beurteilen und didaktische Brücken zu schlagen, ohne auf unterkomplexe Sprachbilder zu verfallen und dadurch falsche Vorstellungen zu erzeugen.

Um dies zu gewährleisten, muss das Studium besser an die spezifischen Bedürfnisse angepasst werden, die sich aus der späteren Tätigkeit an den Schulen ergeben. Spezifisch für die Quantenphysik wurde festgestellt, dass sich die Studierenden zwar fachlich, aber nicht fachdidaktisch und schulrelevant auf den Unterricht der Quantenphysik vorbereitet fühlen.⁵ Dies wurde auch durch Befragungen bestätigt, wonach zum Beispiel Physiklehrkräfte retrospektiv berichten, dass sie während ihres Studiums nicht adäquat auf die fachlichen Bezüge der Schulphysik vorbereitet wurden und die Fachdidaktik eine zu geringe Rolle gespielt habe.⁶ Eine kürzlich erschienene Studie der DPG konstatiert erneut: Das Lehramtsstudium ist auch aus der Perspektive Studierender nicht die ideale Vorbereitung auf ihre spätere Lehrtätigkeit.⁷

2 KMK: Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife (2020)

3 Beispielsweise enthält der Lehrplan für das Fach Informatik der sächsischen Gymnasien den Wahlbereich 2: Quanteninformatik. Siehe auch: Tilman Michaeli, Stefan Seegerer, Ralf Romeike: Quanteninformatik als Thema und Aufgabengebiet informatischer Bildung., INFOS 2021 Nr. 1, S. 1-10.

4 Franziska Greinert, Malte Ubben, Rainer Müller, Stefan Heusler: Quantentechnologien im Lehrplan., Physik Journal 20 Nr. 9 (2021), S. 86-89.

5 Matthias Schöne: Die Verbesserung der Lehramtsausbildung in Quantenphysik. Dissertation. TU Dresden 2017.

6 Kim-Alessandro Weber, Gunnar Friege, Rüdiger Scholz: Quantenphysik in der Schule – Was benötigen Lehrkräfte? Ergebnisse einer Delphi-Studie., Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 26 (2020), S. 173-190.

7 Andreas Woitzik, Klaus Mecke, Georg Düchs: Das Lehramtsstudium Physik in Deutschland (Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft), 2023.

Auch aktive Lehrkräfte, deren Studium schon länger zurückliegt, dürfen mit den Herausforderungen der Vermittlung quantentechnologischer Inhalte nicht alleingelassen werden. Wichtige für den Unterricht relevante physikalische und informatische Zusammenhänge wurden in ihrem Studium nicht in für die Schule nutzbaren Erklärungszusammenhängen behandelt. Für quantenphysikalische Inhalte in der Schule gilt zudem, dass diese häufig in einem historischen Kontext gelehrt werden. Themen neuer Quantentechnologien der zweiten Generation werden – wenn überhaupt – nur wenig vermittelt.⁸ Es gilt, diesen Lehrkräften eine adäquate Unterstützung in Form von Fortbildungen und Unterrichtsmaterialien zukommen zu lassen.

Angesichts des schon bestehenden dramatischen Mangels an ausgebildeten MINT-Lehrkräften droht eine gefährliche Abwärtsspirale: Wie beschrieben ist das Studium wenig geeignet, ausreichend viele Studierende auf einen modernen naturwissenschaftlichen Unterricht in der Schule vorzubereiten. Dies führt zu einem für Schülerinnen und Schüler als nicht relevant erlebten Unterricht und so zu geringem Interesse an einem naturwissenschaftlichen Studium. Daraus resultieren noch weniger (Lehramts-)Studierende, die aus der Schule zudem noch schlechte Voraussetzungen mitbringen – eine Dynamik der stetigen Verschlechterung der Versorgungssituation mit naturwissenschaftlich kompetenten Lehrkräften und Fachkräften ist abzusehen.

In diesem Diskussionspapier werden elf Empfehlungen formuliert, um einen zeitgemäßen Unterricht unter Einbeziehung von Quantentechnologien auch mit einer interdisziplinären Perspektive zu ermöglichen. Die Empfehlungen betreffen vier Dimensionen:

Zunächst werden Anpassungen der **Rahmenbedingungen** empfohlen, die insbesondere die Länder gemeinsam mit den zuständigen Ministerien und Hochschulen vornehmen können, um Hochschulen bei einer hochwertigen Lehrkräfteausbildung zu unterstützen.

Im Anschluss werden ausführlich Anpassungen des **angestrebten Kompetenzprofils angehender Lehrkräfte** und die dafür notwendige Anpassung von **Veranstaltungen des Lehramtsstudiums** empfohlen. Diese Empfehlungen richten sich in erster Linie an die Hochschulen, die sie weitgehend selbstständig umsetzen können.

Hierauf aufbauend wird drittens der Bereich der **Lehrkräftefortbildungen** angesprochen, die anschlussfähig und flächendeckend von verschiedenen Akteuren gestaltet werden sollen – besonders werden hier diejenigen angesprochen, die in der Fort- und Weiterbildung der Lehrkräfte aktiv sind, seien es entsprechende Institute der Länder, Universitäten, Forschungsgesellschaften oder Akteure aus der Zivilgesellschaft.

⁸ H.K.E. Stadermann, E. van den Berg, M.J. Goedhart: Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. (2019)

Exkurs: Als Quantentechnologien der zweiten Generationen werden jene Technologien bezeichnet, die einzelne Quantenobjekte (Photonen, Elektronen) manipulieren, während die sogenannte erste Generation der Quantentechnologien auf der Ausnutzung kollektiver Effekte solcher Objekte (also großer Gruppen von Quantenobjekten) basiert, wie zum Beispiel der Laser.

Den Abschluss bilden Empfehlungen, welche **unterstützenden Ressourcen** zur Verfügung gestellt werden sollen, um Lehrkräften einen zeitgemäßen Unterricht in der Quantenphysik und Quanteninformatik sowie Themen aus benachbarten Fächern zu erleichtern. Diese sind insbesondere an außerschulische Lernorte, die Landesregierungen sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung adressiert.

3. Handlungsempfehlungen für die Gestaltung guter Rahmenbedingungen

Empfehlung 1

Die Inhalte der verschiedenen für Quantentechnologien relevanten Bezugsfächer (Physik, Mathematik, Informatik, Philosophie usw.) in den Bildungsstandards aufeinander abstimmen.

Ziel

Durch einen kohärenten Rahmen können Lehrkräfte interdisziplinär zusammenarbeiten.

Warum?

Das Themenfeld der Quantentechnologien ist interdisziplinär, das heißt nicht in einer klassischen Fachdisziplin allein zu verorten, und sollte daher Berücksichtigung in den unterschiedlichen Fachcurricula (zum Beispiel auch in der Informatik) finden. Die kohärente Gestaltung der Bildungsstandards trägt dazu bei, Vernetzungen zwischen den Fächern herzustellen und unerwünschte Redundanzen zu vermeiden. Auch die aktuellen Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife von 2020 stärken bereits konzeptionelle Fragen der Quantenphysik und ebnen den Weg für moderne Quantentechnologien im Unterricht.

Empfehlung 2

Quantentechnologien in die Curricula integrieren und in die schulischen Prüfungsanforderungen aufnehmen.

Ziel

Quantentechnologien und die ihnen zugrundeliegenden Konzepte werden zuverlässig im Schulunterricht vermittelt und sind prüfungsrelevant.

Warum?

Die angestrebte Einführung quantentechnologischer Themen erfordert eine zwischen den Fächern abgestimmte Integration in die bestehenden Curricula. Daher sollen die modernen Inhalte der Quantentechnologie in Anknüpfung an bewährte Inhalte (etwa die historischen Experimente zur Spektroskopie im Physikunterricht oder der Kryptographie im Informatikunterricht) integriert werden. Damit diese Inhalte zuverlässig gelehrt werden, ist Prüfungsrelevanz erforderlich. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Bedeutung der Themen aus der Perspektive der Lernenden und Lehrenden in der engen Taktung des Schulalltags herabgesetzt wird.

• Für wen sind die Empfehlungen relevant?

Kultusministerkonferenz, Schul-/Bildungs- und Wissenschaftsministerien der Länder, Hochschulen

Empfehlung 3

Die Neukonzeption kohärenter Lehramtsvorlesungen im Bereich der Quantentheorie und Quantendidaktik an den Universitäten fördern.

Ziel

Lehramtsstudierende erhalten eine zielgruppengerechte, umfassende Bildung im Bereich der Quantenphysik und ihrer Anwendungen.

Warum?

Aktuell existieren keine auf Lehramtsstudierende zugeschnittenen Vorlesungen im Bereich der Quantentechnologien und kaum auf Lehramtsstudierende zugeschnittene Vorlesungen im Bereich der Quantenphysik. Hierfür gibt es unterschiedliche Gründe, von Kostenaspekten durch die kleine Studierendenzahl im Lehramt hin zu fehlendem Personal. Es gibt nur wenige Professorinnen und Professoren, die zu Quantentechnologien forschen und gleichzeitig einen Bezug zum Lehramt haben; umgekehrt gibt es kaum Didaktikprofessuren mit einem fachlichen Hintergrund in der Quantentechnologie. Aus diesem Grund werden Förderlinien und -projekte benötigt, die die Erarbeitung solcher Veranstaltungen unterstützen und bei der Dissemination helfen.

Empfehlung 4

Die (interdisziplinäre) Didaktik zu Quantentechnologien an den Universitäten durch geeignete Professuren und Personal stärken.

Ziel

Hochschulen werden die Mittel zur Verfügung gestellt, um hochwertige Forschung im Bereich der Didaktik der Quantenphysik und ihrer Anwendungen zu unternehmen. Insbesondere werden die mit öffentlichen Mitteln geförderten Ergebnisse der didaktischen Forschung mit Bezug zu Quantentechnologien nachhaltig genutzt, um einen Transfer in die Schule zu ermöglichen.

Warum?

Es besteht eine begrüßenswert diverse Förderlandschaft zu Outreach-Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien in Deutschland jenseits der Klassenzimmer. Sie wird zum Beispiel von öffentlichen Geldgebern wie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (zum Beispiel Quantum Aktiv) getragen. Diese Aktivitäten betreffen jedoch nicht den schulischen Unterricht. Die weiterhin bestehende Lücke im Bereich der (Hoch-)Schuldidaktik versuchen private Stiftungen und Vereine durch verschiedene Initiativen zu schließen (zum Beispiel Quantencomputing im MINT-Unterricht von Science on Stage, gefördert durch die Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung oder die von derselben Stiftung finanzierten Senior-Professuren). Häufig werden dabei Projekte mit Laufzeiten bis zu fünf

Jahren gefördert. Wichtig ist allerdings eine nachhaltige Stärkung der (schulbezogenen) MINT-Didaktiken an den Hochschulen. Um den hohen fachlichen wie hochschuldidaktischen Ansprüchen dieser Verankerung gerecht zu werden, sind fachnahe, gut ausgestattete Fachdidaktikprofessuren mit Schwerpunkt Quantenphysik und eine nachhaltige Stärkung didaktischer Forschung im Bereich der Quanteninformatik erforderlich. So soll die interdisziplinäre Forschung im Bereich der (Hoch-)Schuldidaktik entsprechend vorangetrieben werden können und gleichzeitig die Entwicklung der unter **Empfehlung 3** genannten Lehrveranstaltungen unterstützt werden.

Empfehlung 5

Den Wissenstransfer im Bereich der Quantenphysik und Quanteninformatik und ihrer Didaktiken zwischen Hochschulen und Schulen durch personelle Schnittstellen unterstützen.

Ziel

Der Unterricht an Schulen greift aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse auf und ermöglicht Schülerinnen und Schülern einen Einblick in die aktuelle Forschung im Bereich der Quantentechnologien. Im Gegenzug gelangen originäre Eindrücke von Schulgeschehen an die Institute der Universitäten.

Warum?

Die Quantentechnologien sind als aktives Forschungsgebiet dazu prädestiniert, den Schülerinnen und Schülern zu zeigen, dass die MINT-Disziplinen sich in ständiger Entwicklung befinden und zahlreiche Betätigungsmöglichkeiten und Berufsfelder bieten. Für die fachdidaktisch fundierte Vermittlung aktueller Ergebnisse in Quantenphysik und Quanteninformatik ist ein nachhaltiger Kontakt zwischen Universitäten und Schulen nötig. Er darf nicht mit dem Hochschulabschluss der Lehramtsstudierenden enden. Aktuell gibt es nur an einigen Universitäten Lehrkräfte, die im Bereich der universitären Lehre oder Forschung beteiligt sind. Solche (teil)abgeordneten Lehrkräfte können als Bindeglied zwischen Universitäten und Schulen fungieren und den Transfer zwischen den Institutionen verstetigen. Umgekehrt könnten auf diesen Transfer spezialisierte und geeignet qualifizierte (zum Beispiel durch ein Referendariat) permanente Stellen geschaffen werden. Deren Inhaber übernehmen ein Lehrdeputat an den Schulen und ermöglichen dadurch nicht nur den Wissenstransfer, sondern mindern auch den Lehrkräftemangel in den MINT-Fächern.

Empfehlung 6

Anreize für hochwertige Lehrkräftefortbildungen setzen.

Ziel

Schülerinnen und Schüler erfahren einen zeitgemäßen MINT-Unterricht, der moderne Quantentechnologien einbezieht und von kompetenten Lehrkräften gestaltet wird.

Warum?

Lehrkräfte der betroffenen Fächer, die aktuell im Schuldienst tätig sind, sind häufig nicht oder kaum mit Quantentechnologien in Berührung gekommen. Um diese neuen Themen fachgerecht unterrichten zu können, müssen sie entsprechend fortgebildet werden. Diese Fortbildungen sollen insbesondere von Universitäten, Forschungseinrichtungen oder anderen Bildungsakteuren durchgeführt werden und sich auf die Vermittlung der zugrundeliegenden Kompetenzen und nicht auf konkrete Produkte konzentrieren. Für Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler ist es immer noch karriereschädlich, sich im Bereich der Lehre oder insbesondere in der Lehrkräftefortbildungen einzusetzen. Es müssen daher neue Anreize geschaffen werden, damit sich Persönlichkeiten aus der Wissenschaft in diesen Bereichen stärker einsetzen und profilieren können.

4 Handlungsempfehlungen für die Gestaltung der Aus- und Fortbildung von Lehrkräften

4.1 Empfehlung zur kompetenzorientierten Qualifizierung

Empfehlung 7

Spezifisch für Lehramtsstudierende konzipierte Veranstaltungen anbieten, die an zeitgemäßen Anforderungen ausgerichtet sind.

• Für wen sind die Empfehlungen relevant?

Studiengangs- und Fakultätsleitungen, Hochschullehrende, Prorektorinnen und -rektoren, Vizepräsidentinnen und -präsidenten für Lehre und Studium

Ziel

Zukünftige Lehrkräfte werden auf die vielseitigen Anforderungen eines modernen Unterrichts zu Quantentechnologien vorbereitet.

Warum?

Lehrkräfte sollen ihren Schülerinnen und Schülern auf verschiedenen Niveaus einen Einblick in die Quantenphysik und Quanteninformatik vermitteln können. Um angehende Lehrkräfte für diese besondere Herausforderung zu qualifizieren, muss sich die Lehramtsausbildung stärker als bisher an den zukünftigen Bedürfnissen der angehenden Lehrerinnen und Lehrer ausrichten. Sie benötigen ein eigenständiges, professionsorientiertes Studium, welches sich von den forschungsorientierten Kenntnissen und Kompetenzen der Fachausbildung unterscheidet. Moderne Themen und Anwendungen wie Quantentechnologien sollen dabei explizit thematisiert werden. Das umfasst Grundlagen aus der theoretischen und experimentellen Physik, aus der Quanteninformationsverarbeitung wie auch fachdidaktische Erkenntnisse sowie fächerverbindende Aspekte mit Disziplinen wie Chemie, Mathematik, oder Philosophie.

Diese Empfehlung beinhaltet konkret:

- eigene Veranstaltungen zur theoretischen Quantenphysik für Lehramtsstudierende der Physik. Der Fokus sollte auf dem Verständnis der Konzepte liegen; grundlegende Beispiele sollten bearbeitet werden, umfangreiche formale Rechnungen jedoch vermieden werden. Dabei ist eine Verknüpfung von experimentellen, theoretischen und fachdidaktischen Veranstaltungen anzustreben.
- eine Integration von Quantenphysik und Quanteninformatik in verpflichtende fachdidaktische Veranstaltungen, in der auch die modernen Anwendungen in der Quantentechnologie thematisiert werden

Untenstehend finden sich Empfehlungen für die Ausgestaltung der verschiedenen Teilbereiche im Lehramtsstudium Physik (1-3) und Informatik (4-5) sowie Anmerkungen für eine mögliche Integration in das Studium der Physiklehrkräfte für die Sekundarstufe I (6).

1 Theoretische Physik⁹

In der Vorlesung der theoretischen Physik sollen traditionelle Konzepte geringer als bisher gewichtet werden. Dazu gehört insbesondere eine Reduzierung der bisherigen fast ausschließlichen Orientierung an Themen wie Wellenfunktionen, Potenzialen, Energieniveaus. Aber auch teilweise überholte Themen aus der Frühzeit der Quantenmechanik (wie zum Beispiel der Welle-Teilchen-Dualismus) sollten zugunsten modernerer Konzepte in den Hintergrund treten.

An ihre Stelle treten aktuellere Themen stärker in den Vordergrund: Zwei-Zustandssysteme, Wesenszüge der Quantenphysik, Effekte einzelner Quantenobjekte, Messprozess, Verschränkung, Dichtematrix und Quantenkorrelationen. Zum reflektierten Verständnis der Quantenphysik gehört es auch, verschiedene Interpretationsansätze gegeneinander zu stellen und zu vergleichen.

Die Rolle der Mathematik sollte sich weiterentwickeln: von einem Werkzeug zur Problemlösung hin zu einem Mittel zur Konzeptualisierung der Quantenphysik. Dazu sollten die mathematischen Grundlagen eher an Zwei-Zustands-Systemen erläutert werden als an kontinuierlichen Systemen.

2 Experimentalphysik

Auch in den Lehrveranstaltungen der Experimentalphysik sollten die modernen Aspekte der Quantenphysik im Vergleich zu den traditionellen Themen einen größeren Raum einnehmen, wie zum Beispiel der Begriff des Photons, Grundlagen der Licht-Materie-Wechselwirkung, Grundlagen der Halbleiterphysik, Bändermodell, Laser sowie Realisierungen von Zwei-Zustandssystemen (Qubits). Es sollten zudem die für den Physikunterricht relevanten Doppelspaltexperimente mit verschiedenen Quantenobjekten (wie zum Beispiel großen Molekülen) besprochen werden.

Die Demonstrationspraktika sollten um moderne Experimente erweitert werden, mit denen man zu den Anwendungen der Quantentechnologie hinführen kann (zum Beispiel Interferenz mit einzelnen Photonen, BB84, Knallertest, Quantenradierer usw.). Möglichkeiten zur eigenständigen Nutzung von Quantencomputern, wie sie von einigen Herstellern angeboten werden, sollten wahrgenommen werden.

3 Fachdidaktik Physik

Die Fachdidaktik kann auf eine lange Tradition in der Forschung zum Lehren und Lernen von Quantenphysik zurückgreifen. Diese Erkenntnisse der fachdidaktischen Forschung sollten in die Lehrkräfteausbildung einfließen.

Wichtige Aspekte sind dabei die Diagnose von Schülervorstellungen und ein Verständnis der Lehr-Lernprozesse in der Quantenphysik, die Auseinandersetzung mit aktuellen Unterrichtsgängen in inhaltlicher und

⁹ Eine beispielhafte Umsetzung einer Vorlesung „Theoretische Quantenmechanik für Lehramtsstudierende“ findet sich im Anhang.

methodischer Hinsicht und neue experimentelle Möglichkeiten. Mit den Quantentechnologien erschließt sich ein neues Feld, in dem Anwendungskontexte der modernen Quantenphysik als Potential für einen zeitgemäßen Quantenphysikunterricht nutzbar gemacht werden können.

Zu einer modernen fachdidaktischen Ausbildung in der Quantenphysik gehören:

- Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten
- Unterschiedliche Unterrichtskonzeptionen (traditionelle und moderne fachdidaktische Zugänge)
- Experimente, Simulationen und andere Werkzeuge zum Unterricht über Quantenphysik
- Klare Begriffsbildung, Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion
- Einsatz multipler Präsentationsformen (einschl. Spiele, Metaphern und Analogien)
- Einordnung in erkenntnistheoretische und wissenschaftstheoretische Zusammenhänge

4. Quanteninformatik

Die Integration der Quanteninformatik in das Lehramtsstudium Informatik bietet den Studierenden die Möglichkeit, ein tieferes Verständnis für Konzepte wie Information, Informationsverarbeitung oder Berechnungsmodelle zu entwickeln. Aus inhaltlicher Sicht sollten im Studium dazu die zentralen Konzepte wie das Qubit, Verschränkung, Messung und Quantenkryptographie überblicksweise aus informationstheoretischer Sicht betrachtet, der klassischen Informationsverarbeitung gegenübergestellt und praktische Möglichkeiten zur Formulierung und Ausführung von Quantenalgorithmen geschaffen werden.

5. Fachdidaktik Informatik

Im Bereich der Fachdidaktik Informatik ist die Quanteninformatik ein Thema, das exemplarisch im Rahmen vertiefender fachdidaktischer Veranstaltungen aufgegriffen werden sollte. Die Quanteninformatik stellt dabei ein prominentes Beispiel für den Umgang des allgemeinbildenden Schulfachs Informatik mit Innovationen der dynamischen Wissenschaft Informatik dar. So bietet das Thema einen relevanten Kontext zur Erarbeitung und Vertiefung informatikdidaktischer Ansätze, wie etwa in Bezug auf die Auswahl von Unterrichtsinhalten (Fundamentale Ideen, Great Principles) oder Unterrichtsmethoden (etwa CS Unplugged, Simulationen) und Unterrichtswerkzeuge. Genauso lassen sich daran der Umgang mit Vorstellungen, Analogien und präziser Fachsprache oder die Analyse der gesellschaftlich-kulturellen Auswirkungen von Informatik als zentralen Bestandteil von Informatikunterricht verdeutlichen und erarbeiten.

6. Ausbildung von Lehrkräften für die Sekundarstufe I

Auch wenn die Quantenphysik derzeit noch in kaum einem Bundesland Unterrichtsstoff in der Sekundarstufe I ist, ist sie doch aus mehreren

Gründen als Hintergrundwissen für Lehrkräfte der Sekundarstufe I wichtig:

- für ein vertieftes Verständnis der Atommodelle, die in der Sekundarstufe I Bestandteil des Unterrichts im Fach Chemie sind,
- für die Vorstellungen vom inneren Aufbau elektrischer Leiter, die im Physikunterricht in der Elektrizitätslehre vermittelt werden,
- für die weltbildprägende Funktion der Quantenphysik, insbesondere im Hinblick auf Determinismus, Zufall und die Kausalität von Naturvorgängen und
- für die Quantentechnologien als wichtige Zukunftstechnologien, die künftig eine immer wichtigere Rolle einnehmen werden.

In mehreren Bundesländern gibt es bereits Bestrebungen, die Grundzüge des quantenphysikalischen Weltbildes in der Sekundarstufe I auch an diejenigen Schülerinnen und Schüler zu vermitteln, die das Fach Physik in der Oberstufe nicht belegen.

Aus diesen Gründen ist es notwendig, an den Hochschulen auch den zukünftigen Lehrkräften für die Sekundarstufe I quantenphysikalische Grundkenntnisse zu vermitteln. Da die Bildungssysteme in den Bundesländern sehr unterschiedlich sind (stufenspezifische versus schulformspezifische Lehramtsausbildung), lassen sich hier nur Aussagen allgemeiner Natur treffen. Um Studierende des Lehramts für die Sekundarstufe I auf den Unterricht, der sich an den Bildungsstandards für den mittlere Schulabschluss orientiert vorzubereiten, eignet sich teilweise eine Untermenge der in **Anhang A** angeführten Inhalte. Zumindest ist eine Lehrveranstaltung wünschenswert, in der die physikalischen Inhalte zusammen mit schulgerechten Simulationen, Visualisierungen und einfachen Mathematisierungen erarbeitet werden. Kooperationen zwischen Fachphysik und Fachdidaktik sind in beiden Fällen erstrebenswert.

4.2 Empfehlungen zur Durchführung und Gestaltung geeigneter Quantenphysik- und Quanteninformatikfortbildungen.¹⁰

Empfehlung 8

Regionale Lehrkräftefortbildungen für einen modernen Unterricht zu Quantenphysik und -informatik niederschwellig anbieten.

Ziel

Eine flächendeckende und hochwertige Fortbildungslandschaft ermöglicht es Lehrkräften, sich mit angemessenem Aufwand und in einer schulentzienten Perspektive über wichtige Entwicklungen der Quantentechnologien zu informieren.

Warum?

• Für wen sind die Empfehlungen relevant?

Landesinstitute für Lehrkräfte(fort)bildung, Hochschulen und Forschungseinrichtungen

¹⁰ Beispielfhaft ist im Appendix B ein Konzept einer zweitägigen Präsenzfortbildung enthalten.

Lehrkräfte aus den betreffenden Fachbereichen, die momentan im Schuldienst arbeiten, verfügen oft über wenig oder keine Erfahrung mit Quantentechnologien. Um diese aktuellen Themen angemessen lehren zu können, ist eine gezielte Fortbildung erforderlich. Solche Fortbildungen könnten insbesondere von landeseigenen Instituten für Lehrkräfte(fort)bildung, Universitäten und Forschungsorganisationen unter Einbeziehung fachdidaktischer Expertise und aktueller Forschungsergebnisse bereitgestellt werden. In vielen Fällen kann dies bereits mit geringem zusätzlichem Ressourceneinsatz geschehen.

Empfehlung 9

Fortbildungen fächerübergreifend und praxisnah ausgestalten und adressatengerecht kommunizieren.

Ziel:

Fortbildungen für Lehrkräfte vermitteln die Bedeutsamkeit des Themenfeldes der Quantentechnologie und befähigen die Teilnehmenden über die Disziplingrenzen hinweg zu deren Vermittlung. Dabei berücksichtigen sie ein breites Spektrum an Vorerfahrungen und an Vermittlungsmöglichkeiten.

Warum?

Der Unterricht der Quantenphysik und Quanteninformatik wird durch Bezüge zu Inhalten beispielsweise der Fächer Mathematik, Biologie, Chemie, Technik sowie Philosophie/Ethik bereichert. Praxisnähe soll durch eine Einführung in die Funktionsweisen und Anwendungen moderner Quantentechnologien erfolgen. Die Ausrichtung der Fortbildung an den divergierenden Erfahrungshintergründen der angesprochenen Lehrkräfte berücksichtigt die verschiedenen Studiengänge und die unterschiedlichen Fachkulturen der MINT-Fächer. Gegebenenfalls sollten seit dem Studium bestehende Vorbehalte gegenüber der Quantenphysik und der Quanteninformatik durch eine sensible Begriffsbildung und eine zurückhaltende Darstellung der Komplexität des Themas abgemildert werden. Dies sollte auch schon bei der Ausschreibung und Kommunikation der Fortbildungen berücksichtigt werden.

5 Handlungsempfehlungen für Unterstützungsmaßnahmen für den Unterricht

Empfehlung 10

Relevante Ressourcen für eine zeitgemäße Unterrichtsgestaltung und zur selbstständigen Fortbildung in Repositorien für Open Educational Resources strukturiert zur Verfügung stellen.

• Für wen sind die Empfehlungen relevant?

Wissenschaftler:innen, Bildungs- und Wissenschaftsministerien der Länder und des Bundes, Schulbuchverlage, private Förderer

Ziel

Der Schulunterricht wird mit hochwertigen Ressourcen gestaltet und Lehrkräfte werden gleichzeitig entlastet.

Warum?

Bisher liegen die für die Unterrichtsplanung und -gestaltung nutzbaren Materialien oftmals verstreut über verschiedene Online-Medien (Webseiten, Videoplattformen, Clouds, usw.) vor. Lehrkräfte stehen vor der Herausforderung, das Angebot zu sichten, zu klassifizieren und daraus eine geeignete Auswahl zu treffen oder selbst Materialien zu erstellen. Um diesen Prozess effizienter zu gestalten, empfehlen wir die Stärkung übergreifender Repositorien für Open Educational Resources (OER) mit bearbeitbaren Unterrichtsmaterialien und Prüfungsinhalten. Diese sollten ferner Aufstellungen mit geeigneten Experimenten für die Veranschaulichung sowie Aufstellung von (öffentlichen) Einrichtungen enthalten, die für Hospitationen und Besuche zur Verfügung stehen.

Es bietet sich an, diese Repositorien als Plattformen zu gestalten, auf denen die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ein Forum zur Fachdiskussion und zum Erfahrungsaustausch angeboten wird. Administrierte und moderierte Plattformen können die Wirkung und Reichweite durch die Verbreitung eigener Materialien, Vorschläge und Beiträge erhöhen.

Maßnahmen und Beispiele

- Stärkung von OER-Repositorien als Plattformen für Unterrichtsmaterialien und Prüfungsinhalten, ggfs. durch Vernetzung bestehender Angebote.
- Sammlungen mit bewährten Schulexperimenten für die Veranschaulichung von Lehrinhalten zu Quantenphysik und Quanteninformatik.
- Aufstellungen von öffentlichen Einrichtungen, in denen Hospitationen und Besuche angeboten werden.

Empfehlung 11

Erfahrungsräume durch Kooperationen zwischen Schulen und Einrichtungen wie Hochschulen, Schülerlaboren, Forschungsinstituten und Unternehmen systematisch erschließen.

Ziel

Schülerinnen und Schüler erfahren die Relevanz der Lerninhalte und erhalten Einblicke in technische Möglichkeiten und Berufsbilder.

Warum?

Die Effizienz der schulischen Bildung im MINT-Bereich wird gestärkt, wenn Lehrinhalte in Verbindung mit der persönlichen Lebenswirklichkeit empfunden werden. Daher besteht auch im Bereich der Quantenphysik und -technologie der Bedarf, Erfahrungen mit Mathematik, Informatik und Physik des Schulkontexts zu ermöglichen.

Durch Kooperationen zwischen Schulen einerseits und Hochschulen, Forschungsinstituten sowie Unternehmen andererseits können Erfahrungsräume geschaffen werden, von denen letztlich beide Seiten profitieren. Je nach lokaler Gegebenheit ist eine Vielfalt von Aktivitäten denkbar. Insbesondere können Schulen und außerschulische Lernorte wie Schülerlabore gemeinsame Lernarrangements gestalten, um schulische und außerschulische Phasen zusammenzuführen. Darüber hinaus besteht viel Potenzial in Schülerpraktika, Tagen der Physik, langen Nächten der Wissenschaften, Kinder-Unis sowie Sommerschulen. Durch diese Maßnahmen tragen die beteiligten Einrichtungen zum gesellschaftlichen Diskurs über Quantenphysik und -informatik bei. Informationen über das bestehende Angebot, der beitragenden Einrichtungen und Kooperationsmöglichkeiten mit Bezug zur Quantenphysik und -informatik sollte für entsprechend **Empfehlung 10** für Schulen verfügbar gemacht werden.

Maßnahmen und Beispiele

- Regionale Partnerschaften zwischen Schulen und Hochschulen für den Zugang zu experimentellen und computergestützten Methoden.
- Anreize zur Bildung neuer Partnerschaften durch wettbewerbliche Förderformate.
- Unternehmen, die öffentliche Gelder für den Bereich der Quantentechnologien erhalten, bieten Kooperationsmöglichkeiten für Schulen an, beispielsweise durch Schulpartnerschaften.
- Kooperation zur Entwicklung und Evaluation von Unterrichtsszenarien.
- Strukturierte Programme, um Praxiserfahrung für Lehrkräfte in Unternehmen zu ermöglichen.

6. Autorinnen und Autoren

- **Priv. Doz. Dr. Konstantin Fackeldey**
Institute for Mathematics, TU Berlin
- **Prof. Dr. Saskia Fischer**
Institut für Physik, HU zu Berlin
- **Prof. Dr. Thomas Filk**
Physikalisches Institut, Universität Freiburg;
Deutsche Physikalische Gesellschaft
- **Dr. Jörg Gutschank**
Physik- Mathe und Informatiklehrer, Leibniz Gymnasium | Dortmund International School, NRW;
Deutsche Physikalische Gesellschaft,
Vorsitzender Science on Stage Deutschland
- **Markus Gretzschel**
Physik- und Informatiklehrer, Gymnasium Coswig, Sachsen
Deutscher Philologenverband
- **Dr. Franz-Josef Heiszler**
Physik- und Biologielehrer, Jacob-Fugger-Gymnasium Augsburg, Bayern
- **Prof. Dr. Gerhard Hellstern**
Center of Finance, DHBW, Stuttgart;
Gesellschaft für Informatik
- **Prof. Dr. Tilman Michaeli**
School of Computation, Information and Technology,
TU München;
Gesellschaft für Informatik
- **Prof. Dr. Rainer Müller**
Abt. Physik und Physikdidaktik, TU Braunschweig;
Deutsche Physikalische Gesellschaft
- **Prof. Dr. Reinhard Oldenburg**
Institut für Mathematik, Universität Augsburg
- **Priv. Doz. Dr. Oliver Passon**
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, Universität Wuppertal
- **Prof. Dr. Gesche Pospiech**
Fakultät Physik, TU Dresden
- **Dr. Jochen Scheid**
AG Physikdidaktik, RPTU Kaiserslautern-Landau
- **Dr. Stefan Seegerer**
Educational Lead, IQM Quantum Computers;
Gesellschaft für Informatik
- **Prof. Dr. Leo van Waveren**
Fachbereich Informatik, RPTU Kaiserslautern-Landau
- **Andreas Woitzik**
Physikalisches Institut, Universität Freiburg;
Deutsche Physikalische Gesellschaft
Gesellschaft für Informatik

7. Appendix

7.1 Appendix A: Exemplarischer Aufbau einer spezifisch für Lehramtsstudierende angebotenen Vorlesung Quantenmechanik

Die folgende Zusammenstellung beschreibt in Stichworten die Inhalte einer Quantenmechanikvorlesung speziell für Studierende im Lehramt der Physik, die in den letzten Jahren mehrfach an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg gehalten wurde. Durchschnittlich umfasste diese Vorlesung 22 Doppelstunden, ist also in einem Sommersemester als Vorlesung mit 4 SWS (plus 2 SWS Übungen) durchführbar, wobei zusätzlich noch einige Doppelstunden für weitere Themen, die von dem/der Dozenten/Dozentin nach seinen/ihren Vorlieben gewählt werden können, zur Verfügung stehen. Die Inhalte dieser Vorlesung sind in einem Lehrbuch zu finden¹¹ (Filk, 2020), das aber in seiner Ausführlichkeit über den Rahmen der Vorlesung hinausgeht und nicht nur als Begleittext, sondern auch als Vertiefung gedacht ist. Diese Liste ist lediglich als ein realisierbares Beispiel anzusehen, ebenso wie die möglichen Ergänzungen, die in der Vorlesung nicht behandelt wurden, aber ohne Probleme eingefügt werden können.

1. Drei Einführungen

- 1.1 Polarisation von Licht als Eigenschaft; Interferenzexperiment mit Polfiltern; Extrapolation zu Einzelphotonen; Intensität -> relative Häufigkeit -> Wahrscheinlichkeit
- 1.2 Doppelspaltexperiment für Teilchen; deBroglie-Beziehungen, Wellenfunktion, Schrödinger-Gleichung
- 1.3 Historischer Einstieg: Photoelektrischer Effekt, Franck-Hertz-Versuch, Compton-Streuung; Planck'sche Strahlungsformel

2. Mathematische Grundlagen der QM

- 2.1 Vektorraum, Skalarprodukt, Hilbert-Raum; bra-ket-Notation
- 2.2 Lineare Abbildungen: Eigenwerte, Eigenräume, selbstadjungierte Operatoren, Projektionsoperatoren, unitäre Operatoren; Beispiel: Pauli-Matrizen
- 2.3 Fourier-Transformation; Vertauschungsrelationen für x und d/dx

3. Axiomatische Formulierung der QM

- 3.1 Observable und Zustände. Reduktionspostulat, Born'sche Regel, kanonische Vertauschungsrelationen
- 3.2 Schrödinger-Gleichung – zeitabhängig und zeitunabhängig
- 3.3 Bezug zu den „Wesenszügen der QM“: Superposition, eindeutige Einzelergebnisse, stochastische Verteilung von Ergebnissen, Unschärferelationen

4. Potentialprobleme

- 4.1 Unendliches Kastenpotential
- 4.2 Endliches Kastenpotential; Anschlussbedingungen, Tunnel-effekt und eindimensionale Streutheorie

¹¹ Thomas Filk: Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende., Springer 2019.

- 4.3 Harmonischer Oszillator; Auf- und Absteigeoperatoren
- 4.4 Wasserstoffatom (Grundzüge)

5. Zeitentwicklung

- 5.1 Zeitentwicklungsoperator
- 5.2 Darstellung (skizziert) durch „Summation über alle Wege“ (Bezug zum „Zeigermodell“)
- 5.3 Heisenberg-Bild und Schrödinger-Bild

6. Mehrteilchensysteme

- 6.1 Tensorprodukt von Vektorräumen
- 6.2 Begriff der Verschränkung
- 6.3 Beschreibung identischer Bosonen bzw. Fermionen im total symmetrisierten bzw. antisymmetrisierten Unterraum, Pauli'sches Ausschließungsprinzip
- 6.4 EPR, Bell'sche Ungleichungen, CHSH-Ungleichungen und das Experiment von Aspect

7. Zweizustandssysteme

- 7.1 Allgemeines Zweizustandssystem (Polarisation, Spin, Zwei-Niveau-Systeme)
- 7.2 Dichtematrizen; Blochkugel
- 7.3 Mach-Zehnder-Interferometer, Michelson-Interferometer; „Knallerexperiment“
- 7.4 Quantenkryptographie, Quantenteleportation, Quantenradierer

8. Interpretationen und Probleme der QM

- 8.1 Das Messproblem; das Zeigerbasis-Problem; Schrödingers Katze; Dekohärenz
- 8.2 Interpretationen: Kopenhagen, Ensembledeutung, Many-Worlds, Q-Bism
- 8.3 Bohm'sche Mechanik

Mögliche Ergänzungen:

- Grundlagen der Quantentechnologie, Quantengatter
- Fermis Goldene Regel
- Quantensensorik, Quantenmetrologie als Beispiel für Anwendungen
- Anwendungen wie Laser und NMR
- Quantentheorie des Festkörpers, Bändermodell, n- und p-dotierte Halbleiter, Dioden und Photovoltaik
- Rolle der komplexen Zahlen

7.2 Appendix B: Exemplarischer Aufbau einer Fortbildung für Physiklehrkräfte

Fortbildungen sollen die in den Schulcurricula vorgesehenen Inhalte prioritär behandeln. Dabei können curriculare Anknüpfungspunkte zu allen für Quantentechnologien relevanten Bezugsfächern für den

Quantenphysikunterricht gezielt genutzt werden.

Mögliche Inhalte sind:

- Grundlegendes Verständnis der Quanten:
Wesentliche Eigenschaften von Quantenobjekten wie stochastische Vorhersagbarkeit, komplementäres Verhalten, Fähigkeit zur Interferenz, Superposition und Verschränkung.
- Um die Interdisziplinarität der Teilnehmenden zu berücksichtigen, werden auch bildliche Darstellungsformen als Lernanlässe gewählt. In Ergänzung zur dadurch zum Teil reduzierbaren Mathematik, lassen sich über diesen Zugang auch Lehrkräfte motivieren, beispielsweise Anknüpfungen zu Biologie oder Chemie in den Quantenunterricht zu integrieren und auch Lehrkräfte der Sekundarstufe I ansprechen.

Über direkt curricular vorgesehene Inhalte hinaus kann die didaktische Einbindung der quantentechnologischen Kontexte einen entsprechenden Gegenstand der Fortbildungen darstellen. In diesem Sinne bieten sich folgende Inhalte an:

- Quanten im Alltag, vom Laserpointer bis zu LED. Hier werden die quantenphysikalischen Ansätze vor allem für die Umsetzung im Unterricht der Sekundarstufe I thematisiert
- Quantencomputing: Quantengatter, Spezialanwendungen Logistikplanung u.a., abhörsichere Kommunikation mit Quantenkryptographie
- Quantensensorik: Grundverständnis zur Verbesserung der Messgenauigkeit. Beispielsweise im Bereich von Magnetfeldern, Beschleunigung, Stoffdetektion oder Druck.
- Quantenesoterik: kritische Auseinandersetzung mit Mythen um die Quanten.

Dem Fortbildungsvorhaben liegt ein modulares Konzept eines Basiskurses in einer zweitägigen Präsenz zugrunde. Zum einen wird damit den Lehrkräften die nötige Distanz zu Alltagsaufgaben gewährt, zum anderen ermöglicht ihnen diese Form die drei Dimensionen Kompetenzerleben, (soziale) Eingebundenheit und Autonomieerleben zu erfahren.

Der erste Tag dient der Erfassung von Erwartungshaltungen und dem Abgleich der Vorkenntnisse in den Arbeitsgruppen. Davon ausgehend wird im Laufe des Tages eine gemeinsame Grundlagenbasis über Quanten und ihre Eigenschaften geschaffen. Der zweite Tag dient der Erarbeitung von Quantentechnologien und passender Vermittlungskontexte sowie der Vertiefungen von allfälligen Detailfragen. Das Lernangebot der Präsenzfortbildung endet aber nicht mit Abschluss des zweiten Tages, sondern es werden später nutzbare Vertiefungs- und Ergänzungsmöglichkeiten als Videokonferenzen und/oder als Videotutorials angeboten. Je nach Fortbildungsbedarf und Vorkenntnissen soll es auch möglich sein, einzelne Tage der Fortbildung zu besuchen.

Impressum

Herausgeber

Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.
Baedekerstraße 1 · 45128 Essen
T 0201 8401-0 · mail@stifterverband.de
www.stifterverband.org

Redaktion und Projektverantwortung

Andreas Wormland
Johannes Föhles
