



Vorhaben Q3-UP!
Bedarfsorientierte und niederschwellige Qualifikationsbausteine
für Quantencomputing und quantenmaschinelles Lernen
Titel Abschlussbericht
Förderkennzeichen 13 N 15 993
Zuwendungsempfänger Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH
Trippstadter Straße 122, D-67663 Kaiserslautern
Ausführende Stelle DFKI GmbH – FB Robotics Innovation Center
Projektleiter Dr. Gunnar Schönhoff
Bewilligungszeitraum 01.03.2022 – 28.02.2025
Autoren Dr. Gunnar Schönhoff
Erstellungsdatum 25.03.2025

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13 N 15 779 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

**Eingehende Darstellung:
Schlussbericht zum
Teilvorhaben Q3-Industry! im
Rahmen des Projekts Q3-UP!**

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Inhaltsverzeichnis

01 Einleitung.....	1
02 Notwendigkeit der Projektarbeiten.....	2
03 Inhaltlicher Ablauf der Arbeitspakete.....	3
AP1: Management und Kommunikation.....	4
AP2: Kontinuierliche Bedarfsorientierung.....	5
AP3: Festlegung und Gestaltung der Themenschwerpunkte.....	6
AP4: Konzeptionierung niederschwelliger Qualifikationszugänge.....	8
AP5: Pilotierung und Verstetigung.....	10
04 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	12
05 Fortschritt bei anderen Stellen.....	13
06 Veröffentlichungen.....	14

01 Einleitung

Im Rahmen des Projekts Q3-UP! - "Bedarfsorientierte und niederschwellige Qualifikationsbausteine für Quantencomputing und quantenmaschinelles Lernen" wurde seitens des Robotics Innovation Center des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz (DFKI RIC) das Teilvorhaben Q3-Industry! durchgeführt. Projektpartner war die Arbeitsgruppe Robotik der Universität Bremen, die das Teilvorhaben Q3-Education! durchgeführt hat.

Ziel des Vorhabens war es, dem Fachkräftemangel im Technologiefeld der Quanten-Künstlichen Intelligenz (Q-KI), insbesondere dem quantenmaschinellen Lernen (QML), einem Teilgebiet des Quantencomputing (QC), mit mehreren, bedarfsorientierten Qualifikationsansätzen entgegenzuwirken. Diese Ansätze umfassten die Ebenen Hochschullehre, Netzwerkiniciativen, Weiterbildungsmaßnahmen für Software-EntwicklerInnen und mittleres Management in Unternehmen, wie auch direkte Austauschprogramme zwischen Forschung und Industrie. Sie bestehen aus mehreren niederschweligen und kompakten Lehrmodulen.

Das Team Quantum Computing des DFKI RIC und die AG Robotik der Universität Bremen haben bereits vor Projektbeginn erfolgreich das Projekt QINROS - "Quantencomputing und quantenmaschinelles Lernen für intelligente und robotische Systeme" (gefördert durch das BMWK, Fkz: 50RA2032 und 50RA2033) durchgeführt, in dessen Rahmen auch ein praxisorientierter Workshop durchgeführt sowie eine Vorlesung zum Thema QML erstellt wurde. Weiterhin bestand vor Projektbeginn große Erfahrung in der AG Robotik aufgrund der Durchführung von Vorlesungen zu künstlicher Intelligenz und Machine Learning.

Neben Management und Koordination des Gesamtvorhabens war das DFKI RIC im Rahmen des Teilvorhabens Q3-Industry! hauptverantwortlich für Öffentlichkeitsarbeit, Bedarfserhebung sowie Pilotierung und Verstetigung. Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wurden u.a. mehrere allgemeinverständliche Vorträge erarbeitet und gehalten. Die Bedarfserhebung im Rahmen von Workshops mit Mitgliedern des Industrial Advisory Boards lieferte konkret zu erarbeitende Themen und Lehrmodule, insbesondere zu den folgenden Lernzielen: Grundlegende Kenntnisse von Quantenalgorithmien; Chancen von Quantum Computing einschätzen können, besonders im Zusammenspiel mit Machine Learning; Möglichkeiten und Erfordernisse im eigenen Unternehmen beurteilen können. Die Lerninhalte wurden federführend von der AG Robotik der Universität Bremen umgesetzt und im Rahmen der folgenden Workshops durch das DFKI RIC pilotiert und evaluiert: Workshop Grundlagen Quantum Computing; Workshop Grundlagen Quantum Machine Learning; öffentlicher Workshop Unlocking Quantum Computing; spezialisierte Workshops für Unternehmen zu quanteninspiriertem Machine Learning.

Das DFKI hat die im Projektplan vorgesehenen Ziele unter Einhaltung des Zeit- und Kostenplans erreicht. Details entnehmen Sie dem zahlenmäßigen Verwendungsnachweis.

02 Notwendigkeit der Projektarbeiten

Das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) am Standort Bremen erarbeitet seit mehreren Jahren zusammen mit der Universität Bremen, Arbeitsgruppe Robotik, prototypische Anwendungen im Bereich des quantenmaschinellen Lernens auf Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) Technologien. Auch wenn quantenmaschinelles Lernen noch ein junges Forschungsfeld ist, sind potenzielle Anwendungsbereiche bereits breit gefächert. Klassisches Machine Learning (ML) und Deep Learning (DL) als Technologie sind bereits seit einigen Jahren in der Industrie im Einsatz und werden für vielfältige Aufgaben erfolgreich und umfänglich eingesetzt. Die Erfolge in den letzten Jahren sind als einzigartig und weit überdurchschnittlich zu bewerten. Eine Weiterentwicklung von ML-Algorithmen durch den Einsatz von den jetzt und in Zukunft zur Verfügung stehenden Quantencomputern verspricht daher einen potenziellen Nutzen in vielen Anwendungsfeldern – auch direkt bei den potenziellen industriellen Anwendern.

Beide Verbundpartner sahen das Vermeiden eines potenziellen Nachwuchsfachkräftemangels, zielorientierte Forschung im Verbund mit der Industrie, generelle Industrieteilhabe im Feld der Quantentechnologien und die Schaffung einer vor Vorhabensbeginn effektiv nicht vorhandenen Qualifikationslandschaft im Bereich QML als zwingende Motivation für das Vorhaben an, auch um nachhaltig die Positionierung der Verbundpartner in dieser Forschungs- und Technologielandschaft zu stärken und weiterzuentwickeln.

Das Wissen über Quantenmechanik und Quantencomputing wurde vor Projektbeginn hauptsächlich an Universitäten unterrichtet. QML und quantenbasierte Ansätze zur KI fanden aber selbst im universitären Lehrplan in Deutschland nur selten Berücksichtigung. Angesichts der komplexen Kombination aus den Wissenschaftsbereichen der Physik, Informatik und Mathematik, erschien es geboten, das notwendige Wissen in den Bereichen QC und QML zu konsolidieren und anhand des aktuellen Forschungsstand zielgruppengerecht aufzubereiten. Die Zielstellung war es, Fachkräften bereits jetzt ein besseres Verständnis der involvierten Wissenschaftsfelder zu vermitteln, um auf die zukünftigen Quantentechnologien vorbereitet zu sein.

Die Projektarbeiten waren hier dringend notwendig, da sie die Grundlage lieferten, um regional und überregional den verschiedenen Zielgruppen ein besseres Verständnis für die Möglichkeiten und Herausforderungen von Quantentechnologien, insbesondere im Bereich Quantum Computing und Quantum Machine Learning, zu vermitteln. Hierfür musste zuerst seitens der Projektpartner eine solide Basis an Wissen zu den verschiedenen notwendigen Themenschwerpunkten aufgebaut und in inhaltlichen Modulen erarbeitet werden, bevor diese zu konkreten, niederschweligen Qualifikationszugängen definiert und mit Teilnehmenden aus den verschiedenen Zielgruppen pilotiert werden konnten.

03 Inhaltlicher Ablauf der Arbeitspakete

Das Vorhaben Q3UP! gliederte sich in fünf Arbeitspakete:

- AP1: Management und Kommunikation
- AP2: Bedarfserhebung
- AP3: Festlegung der Themenschwerpunkte
- AP4: Konzeption der Qualifikationszugänge
- AP5: Pilotierung und Verstetigung.

Als Konsortialführer war das DFKI RIC mit dem Arbeitspaket 1 beauftragt. Weiterhin war das DFKI RIC federführend in den Arbeitspaketen 2 und 5, während die Arbeitspakete 3 und 4 federführend durch die AG Robotik der Universität Bremen bearbeitet wurden.

Im Projekt gab es vier Meilensteine, die allesamt erfolgreich erreicht wurden:

- MS1: Projektbeginn;
- MS2: Abschluss der Bedarfsermittlung
- MS3: Themenschwerpunkte & Zugänge
- MS4: Pilotierung, Verstetigung & Anpassung

Die Arbeitspakete und Meilensteine sind auch in der folgenden Abbildung dargestellt.

Arbeitsplan				Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
Arbeitspaket	Beginn	Ende	PM	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 1: Management und Koordination	1	36	12												
AP 2: Bedarfsorientierung	1	30	18												
AP 3: Festlegung und Gestaltung der Themenschwerpunkte	1	30	54												
AP 4: Konzeptionierung niederschwelliger Qualifikationszugänge	13	36	30												
AP 5: Pilotierung und Verstetigung	19	36	30												
Meilenstein															
MS 1: Projektbeginn	1														
MS 2: Abschluss der Bedarfsermittlung	13														
MS 3: Fertigstellung der Themenschwerpunkte und Qualifikationszugänge	25														
MS 4: Durchgeführte Pilotierung, Verstetigung und Anpassung	36														
AP-Verantwortlicher: DFKI															
AP-Verantwortlicher: Universität Bremen															

Abbildung 1: Darstellung des Plans der Arbeitspakete und Meilensteine.

Im Folgenden werden Ablauf, Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete erläutert.

AP1: Management und Kommunikation

Das DFKI RIC war als Konsortialführer verantwortlich für die Organisation der internen Projektmeetings sowie der regelmäßigen Termine mit dem Fördermittelgeber. Weiterhin wurden die beiden Unteraufträge zur Bedarfserhebung und Workshopevaluation koordiniert. Ebenso wurde die Zusammenarbeit mit den Firmen des Industrial Advisory Boards koordiniert und die Bedarfserhebungsworkshops sowie die inhaltlichen Pilotworkshops geplant, organisiert und durchgeführt.

Die öffentliche Kommunikation im Rahmen des AP1 fand u.a. im Rahmen der jährlichen Tage der offenen Tür des DFKI RIC statt. Hier wurden mehrere Poster präsentiert, die einen Überblick über das Thema Quantum Computing gaben sowie einen Einblick in die aktuelle Forschungsarbeit am DFKI RIC und der Universität Bremen lieferten.

Weiterhin wurde im Rahmen der Reihe "Science goes Public" in Bremen ein Vortrag zum Thema Quantencomputing für die Öffentlichkeit gehalten. Dieser fand in der Kneipe Fehrfeld in Bremen statt und war komplett belegt. Der Vortrag lieferte in Analogie zum klassischen Computing einen allgemeinverständlichen Einstieg in das Thema.

Weiterhin wurden seitens des DFKI RIC mehrere Vorträge bei von Dritten organisierten Veranstaltungen gehalten. Diese Vorträge lieferten im Sinne der Öffentlichkeitsarbeit ebenfalls einen allgemeinverständlichen Einstieg zu QC und QML. Insbesondere ging es dabei um die Themen "Quantum Computing", "Quantum Software" sowie "Quantum-Inspired Machine Learning".

Neben Vorträgen und Postern wurden im Rahmen der öffentlichen Kommunikation zum Projekt gehörige Websites erstellt, s. <https://robotik.dfki-bremen.de/de/forschung/projekte/q3up>. Weiterhin war der Workshop "Unlocking Quantum Computing" für die Öffentlichkeit zugänglich (s. AP5).

AP2: Kontinuierliche Bedarfsorientierung

Im Rahmen der kontinuierlichen Bedarfsorientierung wurde koordiniert durch das DFKI RIC eine anfängliche Bedarfserhebung durch die Firma YOUSE durchgeführt. Diese fand nach vorbereitenden Terminen im Rahmen von vier einzelnen Workshops online oder in Person mit Mitarbeitenden der vier Unternehmen des Industrial Advisory Boards statt. Die Teilnehmenden kamen vor allem aus der Softwareentwicklung, dem mittleren Management und dem IT-Consulting.

Die wichtigsten Anforderungen der Teilnehmenden umfassten eine Betreuung durch Fachexpert:innen, Fortschrittskontrolle, erlebnisbasiertes Lernen und flexible Selbstlernphasen. Eine enge Betreuung durch hochqualifizierte Fachkräfte wurde als essenziell gewertet, insbesondere für Feedback und die Diskussion alternativer Lösungswege. Fortschrittskontrollen durch Milestones, Tests und ein gewisser Grad an Gamification wurden als motivierend empfunden.

Praxisnahe Übungen und ein schneller Einstieg in praktische Anwendungen wurden von den Teilnehmenden als entscheidend für nachhaltiges Lernen identifiziert. Die Mehrheit bevorzugt kurze Lerneinheiten im Selbststudium (30 Minuten bis 3 Stunden), kombiniert mit optionalen Vor-Ort-Terminen oder virtuellen Austauschmeetings.

Orts- und zeitunabhängiges Lernen wurde gewünscht, ergänzt durch flexible Austauschmöglichkeiten mit Fachleuten und anderen Lernenden. Hochwertige, durchsuchbare digitale Materialien mit aktuellen Inhalten sind essenziell. Ein Mix aus Selbstlernen und Gruppenaustausch ist gefragt, um Theorie, Praxis und Reflexion optimal zu verbinden.

Auch nach den Workshops wünschen sich Teilnehmende weiterhin Zugang zu Materialien und Fachexpert:innen. Die Fortbildungen sollten eine klare Agenda haben und sich an die Bedürfnisse der Gruppe anpassen. IT-Consultants haben teils andere Bedürfnisse als Entwickler:innen geäußert, sie bevorzugten strategische Dialoge statt technischer Schulungen.

Vier Fortbildungsstufen wurden definiert: von Grundlagenwissen (Level 1) bis zum Expert:innenaustausch auf höchstem Niveau (Level 4). Level 1 vermittelt hierbei grundlegende Begriffe und Konzepte, Level 2 fokussiert auf Anwendungsmöglichkeiten und Problemlösungen. Level 3 vertieft das Wissen zu Software- und Hardwarekomponenten, während Level 4 auf den wissenschaftlichen Austausch abzielt.

Insbesondere vom mittleren Management wurde geäußert, dass Unternehmen von Fortbildungen Vorteile wie Marktpositionierung, Innovationsförderung und Mitarbeiterentwicklung erwarten. Wissenszuwachs, praxisnahe Übungen und flexible Lernformate sind starke Motivatoren für Fortbildungen. Blockaden entstehen durch unpassende Didaktik (z. B. reine Vorträge), mangelnde zeitliche Ressourcen oder unklare Relevanz. Die Workshops sollten auf individuelle Unternehmens- und Mitarbeiterbedarfe zugeschnitten sein. Die Ergebnisse der Bedarfsermittlung sollen in ein flexibles, praxisnahes Fortbildungsangebot einfließen.

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Bedarfserhebung wurden Themenschwerpunkte erarbeitet (s. AP3), Workshopmodule definiert (s. AP4) und letztere pilotiert (s. AP5). Bei und nach der ersten Pilotierung stellte sich heraus, dass unternehmensübergreifende Workshops zu grundlegenden Themen nur teilweise Zuspruch fanden und trotz der Berücksichtigung der didaktischen Wünsche nicht in den Arbeitsalltag vieler Mitarbeitender passten. Deshalb fand im Rahmen des Projekts und im Sinne der kontinuierlichen Bedarfsorientierung eine Anpassung der Pilotierungsplanung und der Workshopmodule statt. Letztere wurden nun auf unternehmensspezifische Workshops zu praxisnäheren Themen fokussiert. Hier ergab sich insbesondere das tensornetzwerkbasierte quanteninspirierte Machine Learning als Thema, das auch heute schon für Unternehmen und ihre Mitarbeitenden von Relevanz ist.

AP3: Festlegung und Gestaltung der Themenschwerpunkte

Im Rahmen des AP3 wurden federführend seitens der Universität Bremen in Zusammenarbeit mit dem DFKI RIC die Themenschwerpunkte ausgewählt und die entsprechenden Lehr- und Wissensbausteine gestaltet. Die Universität Bremen war hier hauptverantwortlich für die Aufbereitung der Themenschwerpunkte, während das DFKI RIC insbesondere das maßgeschneiderte Lehrangebot für die Industriepartner sowie die Ausrichtung der Lehrinhalte auf die Qualifikationsmerkmale der Teilnehmer der Industriepartner im Blick hatte. Dies basierte auf dem konsolidierten Wissen, das für unterschiedliche Qualifikationsmerkmale der Teilnehmer der Industriepartner zur Verfügung stand.

Die Arbeit im AP3 beinhaltete seitens des DFKI RIC insbesondere die folgenden Tätigkeiten: Verfolgung der Ergebnisse der Universität Bremen und weitere Gespräche zu Anforderungen der industriellen Partner; Formulierung von Vorschlägen zur Überarbeitung der Lehrinhalte in Bezug auf den industriellen Bedarf; Auswahl und Integration didaktischer Konzepte; Erstellung der Qualifikationsmaßnahmen gemäß den erhobenen Rahmenbedingungen; Evaluierung der unterschiedlichen Qualifikationsmerkmale; Auswahl von unterschiedlichen thematischen Schwerpunktthemen gemäß der Qualifikationsmerkmale und Definition von möglichen Lernpfaden.

Als grundlegendes Thema und Lernziel wurde die Fähigkeit definiert, als Teilnehmender für sich persönlich und/oder die eigene Organisation/das eigene Unternehmen entscheiden zu können, wie mit dem Thema Quantum Computing umgegangen werden soll. Dieses Gesamtlernziel ließ sich für die industrielle Zielgruppe in die folgenden Lernziele aufteilen: Grundlegende Kenntnisse von Quantenalgorithmen; Chancen von Quantum Computing einschätzen können, besonders im Zusammenspiel mit Machine Learning; Möglichkeiten und Erfordernisse im eigenen Unternehmen beurteilen können. Als Grundlage dafür wurden je nach Funktion und Rolle verschiedene Themenblöcke und Module identifiziert, die nach Bedarf für die verschiedenen Workshopangebote sowie die Vorlesungen und Vorträge kombiniert werden können.

Die folgenden Themenschwerpunkte wurden im grundlegenden Teil zu Quantum Computing erarbeitet: Was ist klassisches Computing?; Definition: Was ist Quantencomputing?; Was ist ein Quantencomputer?; Grundlagen der Quantenphysik; Übersicht über Quantencomputer-Hardware; Gate- und Schaltkreis-Modell des Quantencomputings; Quantengatter und Beispiele; Einführung Quantenalgorithmen; Überblick: wichtige Quantenalgorithmen; Noisy Intermediate-Scale Quantum Computing (NISQ); Aktuelle Software für Quantencomputing; Erster Nutzen und erste Anwendungen von Quantencomputing.

Die folgenden Themenschwerpunkte wurden im grundlegenden Teil zu Quantum Machine Learning erarbeitet: Was ist klassisches Machine Learning?; Was ist Quantum Machine Learning?; Die vier Bereiche des Quantum Machine Learning; Überblick: wichtige QML-Algorithmen; Einführung: Kernel-Methoden; Parametrisierte Quantengatter; Parametrisierte Quantenschaltkreise (Parametrized Quantum Circuits, PQC); Nutzung von PQC für QML; QML als Anwendung im NISQ-Zeitalter.

Die folgenden Themenschwerpunkte wurden im grundlegenden Teil zu Quantum-inspired Machine Learning (QiML) und Quantum-inspired Computing erarbeitet: Mehrere Qubits und Dirac-Notation; Matrix Product State (MPS); Was sind Tensornetzwerke?; MPS Decomposition; Area Law; Normalization and Canonicalization; Projected entangled-pair states (PEPS); Tree Tensor Networks; Einführung Density Matrix Renormalization Group; Wie funktioniert ein Lernalgorithmus mit Tensornetzwerken?.

Weiterhin wurden die folgenden Anwendungsthemen erarbeitet: Deep Dive Simons Algorithmus; Deep Dive Grovers Algorithmus; Deep Dive PQC; Nutzung von PQC für supervised learning; Learning Capability von PQC; Verbindung PQC und Fourierfunktionen; Lernen von MNIST mit PQC; Unsupervised Learning mit Tensornetzwerken; Anomalieerkennung mit QiML; Möglichkeiten, Risiken und Hindernisse beim Einsatz von Quantum Computing im Unternehmen; Was bedeutet ein praktischer Quantenvorteil?; Case Studies: Industriekooperationen zwischen Quantum-Computing-Unternehmen und Anwendern.

Als technische Schwerpunkte wurden erarbeitet: Arbeit mit Softwareframeworks, insbesondere Qiskit (IBM),

Pennylane (Xanadu) und Braket (Amazon/AWS); Arbeit mit Quantenlösungen in der Cloud, insbesondere IBMQ Runtime Service und AWS Braket; Verteiltes Quantum Computing; Übersicht Hardware und Software Roadmaps; Grundlagen und Perspektiven der Quantenfehlerkorrektur.

Federführend seitens der Uni Bremen wurden die folgenden Schwerpunkte und Module erarbeitet, die insbesondere für die Vorlesung genutzt werden, aber auch für die Industrieworkshops zur Verfügung stehen: Mathematik I; QC Grundlagen I; QC Grundlagen II; QC Grundlagen III; QC Grundlagen IV; Quantenalgorithmen I; Quantenalgorithmen II; Quantenalgorithmen III; Quantenalgorithmen IV; Berechenbarkeit & Komplexität I; Mathematik II; NISQ; Noise & Fehlerminderung; Quantenhardware I; Quantenhardware II; Quantum Optimal Control; Hardwareprogrammierung; Quantenfehlerkorrektur I; Quantenfehlerkorrektur II; Tensornetzwerke & QiML; Quantum ML I; Quantum ML II; Verteiltes QC.

AP4: Konzeptionierung niederschwelliger Qualifikationszugänge

Im Rahmen des AP4 ging es um die Konzeption, Umsetzung und Adaption von Qualifikationszugängen für die identifizierten und erarbeiteten Schwerpunkte. Dieses Arbeitspaket wurde federführend durch die Universität Bremen unter Mitarbeit des DFKI RIC durchgeführt. Basierend auf der Bedarfsanalyse und den Teil-Ergebnissen aus AP2 wurden konkrete Rahmenoberpunkte für alle identifizierten Themenschwerpunkte definiert. Für alle Rahmenoberpunkte wurden weiterhin notwendige Bedingungen definiert, um möglichst eine bestmögliche Niederschwelligkeit zu erreichen.

Das DFKI fokussierte sich sodann im Rahmen der Zielsetzung der Ausrichtung der Lehrinhalte auf die Qualifikationszugänge der Teilnehmer der Industriepartner insbesondere auf die folgenden Tätigkeiten: Konsolidierung der thematischen Anforderungen der Anwendungsebene auf grundlegende algorithmische und mathematische Fragestellungen; Konsolidierung der Ergebnisse in einem didaktischen und inhaltlichen Konzept zur Umsetzung der Qualifikationszugänge für jeden der aufbereiteten Inhalte; Ermittlung der passenden Kombinationen von Qualifikationszugängen und Lerninhalten; Notwendige interne wie auch externe Absprachen bzgl. der Umsetzung; Integration von neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen, der geplanten Vermarktung und Öffentlichkeitsarbeit wie auch der Bedarfe; Nutzung von einheitlichem Schulungsdesign; Durchführen der Evaluation und Aufbereitung der Evaluationsergebnisse; Prüfung und Bewertung der Auswirkungen auf die Qualifikationszugänge; Durchführung von Anpassungen nach Bedarf.

Als konkrete niederschwellige Qualifikationszugänge wurden seitens des DFKI RIC dann die folgenden Workshops definiert: Workshop Grundlagen Quantum Computing; Workshop Grundlagen Quantum Machine Learning; Workshop Unlocking Quantum Computing; spezialisierte Workshops für Unternehmen zu quanteninspiriertem Machine Learning. Im Folgenden werden die Details der einzelnen Workshops beschrieben.

Der Workshop Grundlagen des Quantencomputing wurde wie folgt definiert:

- Lernziel: Verständnis der Grundlagen des Quantencomputing bis zur ersten eigenen Implementierung eines Algorithmus
- Sprache: Englisch (Fragen können auch auf Deutsch gestellt werden)
- Dauer: 2 Wochen
- Arbeitsaufwand: ca. 10h pro Woche (3 virtuelle Termine pro Woche von max. 90 Minuten, ansonsten Selbststudium)
- Vermittlungsformat: Inputvorträge, Diskussionstermine, Selbststudium mit Online-Ressourcen und Jupyter Notebooks
- Voraussetzungen: Anwenderkenntnisse in Python
- Ablauf:
 - o Woche 1: Einführung in Quantum Computing
 - o Tutorial in Woche 1 zu Quantenschaltkreisen und Quantenalgorithmen inkl. Lösung von Simon's Problem
 - o Woche 2: Deep Dive Grovers Algorithmus
 - o Tutorial in Woche 2 zu Grovers Algorithmus für ein einfaches Sudoku

Der Workshop Grundlagen Quantum Machine Learning wurde wie folgt definiert:

- Lernziel: Implementierung eines QML-Algorithmus für einen einfachen Datensatz
- Sprache: Englisch (Fragen können auch auf Deutsch gestellt werden)
- Dauer: 2 Wochen
- Arbeitsaufwand: ca. 10h pro Woche (3 virtuelle Termine pro Woche von max. 90 Minuten, ansonsten Selbststudium)
- Vermittlungsformat: Inputvorträge, Diskussionstermine, Selbststudium mit Online-Ressourcen und Jupyter Notebooks
- Voraussetzungen: Anwenderkenntnisse in Python und idealerweise ein Besuch des Workshops Grundlagen des Quantum Computing
- Ablauf:
 - o Woche 1: Einführung in Quantum Machine Learning

- o Tutorial zu Woche 1 zu Kernel Methods
- o Woche 2: Deep Dive: Parametrized Quantum Circuits und ihre Anwendungen in der NISQ-Ära
- o Tutorial zu Woche 1 zu PQC für einen MNIST-Datensatz

Die unternehmensspezifischen Workshops wurden und werden individuell nach den Bedarfen des jeweiligen Unternehmens definiert. Für die Bedarfe des Unternehmens aus dem Industrial Advisory Board, mit dem die Pilotierung durchgeführt wurde (s. AP5), wurde folgende Definition zugrundegelegt:

- Lernziel: Verständnis der Möglichkeiten von QiML und Grundlagen zur eigenen Implementierung
- Sprache: Englisch
- Dauer: 2 Monate
- Arbeitsaufwand: ca. 3h pro Woche (1 virtueller Termine pro Woche von max. 60 Minuten, ansonsten Selbststudium)
- Vermittlungsformat: Inputvorträge, Diskussionsrunde, Selbststudium mit Jupyter Notebooks
- Voraussetzungen: Anwenderkenntnisse in Python und Grundlagenkenntnisse Machine Learning
- Inhalt: Einführung zu Tensornetzen bis hin zur konkreten Anwendung von quanteninspirierten, tensornetzwerkbasierenden Algorithmen im Bereich Anomalieerkennung sowie gemeinsame Entwicklung eines ersten Demonstrators.

Der Workshop Unlocking Quantum Computing wurde als eintägiger, öffentlicher Workshop konzipiert. Er ist für alle Interessierten offen, richtet sich aber besonders an Fachleute aus der Industrie. Themen sind die grundlegende Einführung in Quantencomputing, Quantenhardware und quanteninspiriertes Machine Learning. Um die besondere Anwendungsnähe herzustellen, wurden neben internen Referenten auch externe Sprecher als notwendig identifiziert. Als Workshopsprache wurde Englisch definiert. Die Agenda des Workshops wurde für die erste Durchführung (s. AP5) wie folgt festgelegt:

- 09:00: Start
- 09:15: Introduction to quantum computing
- 10:20: Short break
- 10:30: Introduction to quantum hardware
- 11:15: External Speaker: Quantum-Powered IT - unlocking a new dimension
- 12:00: Lunch break
- 13:00: Introduction to quantum-inspired computing and tensor networks
- 13:45: External Speaker: Quantum-inspired computing. Bringing value today
- 14:30: Short break
- 14:45: External Speaker: Our Approach to Quantum Computing: Balancing potential, progress and pragmatism
- 15:30: Overview of the work of our QC team at the DFKI RIC
- 16:00: End of the workshop

Weiterhin wurde seitens der Universität Bremen ein Seminar zum Thema Quantum Machine Learning erstellt und unter Mitarbeit des DFKI RIC pilotiert. Es beinhaltete nach einer Einführung in das Thema eine Veranstaltung zu den notwendigen theoretischen Grundlagen des Quantencomputings, eine Wiederholung zu klassischem Machine Learning, eine Einführung in Quantum Machine Learning sowie ein praktisches Tutorial zum Thema QML. Abschließend wurden durch die Studierenden Vorträge zu ausgewählten Themen des QML gehalten. Die Prüfungsleistung war neben dem Vortrag ein Report zu einem Fachartikel aus dem Bereich QML.

Schließlich wurde seitens der Universität Bremen unter Mitarbeit des DFKI RIC eine Vorlesung "Quantum Computing for Computer Scientists" erstellt und wird geplanterweise im Wintersemester 2025/2026 pilotiert und dann verstetigt. Sie deckt basierend auf den in AP3 erstellten Themenschwerpunkten die Bereiche QC Grundlagen, Quantumcomputing, Quantenalgorithmen, Quantum-ML sowie Berechenbarkeit & Komplexität ab. Zielgruppe der Vorlesung sollen Masterstudierende sein, vor allem aus dem Fachbereich Informatik. Lernziel ist ein tiefes Verständnis der Grundlagen des Quantencomputing sowie ein Ein- und Überblick zu aktuell relevanten Themenschwerpunkten für Forschung und Industrie. Die Studierenden sollen durch die Vorlesung in die Lage versetzt werden, im Bereich Quantencomputing eine Masterarbeit zu erstellen. Die Vorlesung wird mit 6 ECTS-Punkten angesetzt. Aktuell gehen wir von einer Teilnehmerzahl von 30 bis 50 Studierenden aus.

AP5: Pilotierung und Verstetigung

Basierend auf den Themenschwerpunkten aus AP3 wurden im Rahmen des AP5 die in AP4 erstellten niederschweligen Qualifikationszugänge federführend durch das DFKI RIC und insbesondere mit den Mitgliedsunternehmen des Industrial Advisory Boards pilotiert. Alle pilotierten Workshops wurden hierzu kostenfrei durchgeführt. Das DFKI RIC war hierbei verantwortlich für die Planung, Organisation und Durchführung der ausgewählten Qualifikationsmaßnahmen. Weiterhin wurde durch das DFKI eine Evaluation des öffentlichen Workshops Unlocking Quantum Computing durch die Firma YOUSE beauftragt und Verbesserungsmaßnahmen identifiziert.

Der Workshop Grundlagen Quantum Computing wurde im Juni 2023 mit Mitarbeitenden von Unternehmen des Industrial Advisory Board pilotiert. 15 Teilnehmende von drei Partnern des Industrial Advisory Boards nahmen am Workshop teil, der über zwei Wochen hinweg aus je zwei Onlineveranstaltungen pro Woche bestand. Inhalte waren wie in AP4 beschrieben die Grundlagen des Quantencomputings, das Programmieren mit PennyLane, sowie erste einfache Quantenalgorithmien. Das Feedback der Teilnehmenden war grundsätzlich positiv, insgesamt wurde die Schulung als sehr anspruchsvoll bewertet, insbesondere im Hinblick auf mathematische Inhalte.

Das Seminar Quantum Machine Learning wurde im Sommersemester 2023 unter Zusammenarbeit von Universität Bremen und DFKI RIC für Masterstudierende insbesondere des Studiengangs Informatik pilotiert. Am Seminar nahmen zehn Studierende aktiv teil; von drei Studierenden wurde die Prüfungsleistung erfüllt. Mehrere Studierende interessierten sich nach dem Seminar für eine Abschlussarbeit im Bereich QML; zwei Masterarbeiten wurden gestartet und werden durch das Team Quantum Computing des DFKI RIC aktuell betreut. Die Rückmeldung der Studierenden zum Seminar war insgesamt sehr positiv. Ein größerer und früherer praktischer Anteil im Seminar wurde von den Studierenden vorgeschlagen. Im Hinblick auf die geplante Vorlesung Quantum Computing for Computer Scientists war es insbesondere wertvoll zu sehen, dass an den Themen Quantencomputing und Quantum Machine Learning relevantes Interesse seitens der Studierenden besteht.

Aufgrund der Rückmeldungen der Unternehmen des Industrial Advisory Boards im Rahmen der erneuten Bedarfsorientierung wurden, wie in AP2 und AP4 beschrieben, unternehmensspezifische Workshops zum Thema quanteninspiriertes Machine Learning mit Mitarbeitenden eines Unternehmens des Industrial Advisory Boards durchgeführt. Das Unternehmen hat einen Anwendungsfall im Bereich Anomalieerkennung, in dem Erklärbarkeit wichtig ist, aber bisher nicht gegeben ist. Mithilfe von Tensornetzwerk-basierten Methoden lässt sich hier jedoch eine Lösung finden. Die entsprechende prototypische Implementierung wurde durch kurze Vorträge zur Einführung in quanteninspiriertes Machine Learning mit Tensornetzwerken begleitet.

Der öffentliche Workshop Unlocking Quantum Computing wurde am 14.02.2025 mit über 50 Teilnehmenden wie in AP4 beschrieben pilotiert. In Zusammenarbeit mit der Firma YOUSE wurde zur Evaluation unter den Teilnehmenden eindurchgeführt. Das Ziel der Evaluation war, die Zufriedenheit der Teilnehmenden mit dem Status-quo des Workshops sowie mögliche Potentiale für Folgeformate zu identifizieren. Die Evaluation wurde im Rahmen des Workshops angekündigt und der Zugang zur Teilnahme vor dem letzten Slot bereitgestellt sowie ein entsprechendes Zeitfenster zur Bearbeitung (5-7 Minuten) eingeräumt. Da die Workshopsprache Englisch war, war der Fragebogen ebenfalls auf Englisch. Es nahmen 21 Personen an der Befragung teil. Die Teilnehmenden kamen zu knapp einem Drittel aus der Industrie (28,6 %) bzw. Forschungseinrichtungen (33,3 %), wobei eine Mehrheit (61,9 %) aus persönlichem Interesse teilnahm. Das Vorwissen zum Thema variierte: 20 % verfügten über keinerlei Vorkenntnisse, während 15 % sich selbst als Expert*innen einstufen. Der Rest verteilte sich gleichmäßig auf Basis-, Mittel- und Fortgeschrittenen-Niveau.

Die Erwartungen der Teilnehmenden im Vorfeld an den Workshop konzentrierten sich auf vier Schwerpunkte: thematische Einführung, ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik, Anwendungsfälle aus der Industrie sowie vertiefte technische Inhalte. Die Veranstaltung konnte diese Erwartungen größtenteils erfüllen: 50 % der Befragten gaben an, dass ihre Erwartungen vollumfänglich erfüllt wurden, 45 % teilweise. Nur eine Person äußerte, dass ihre Erwartungen nicht erfüllt wurden.

Die Gesamtzufriedenheit mit dem Workshop lag bei 4,3 von 5 Sternen, ebenso wie die Empfehlungsrate des

Workshops an andere (M = 4,3) – ein klar positives Signal. Besonders gut bewertet wurden die Präsentationen „A Perspective on Quantum Hardware“ (M = 4,63) und „Foundations of Quantum Computing“ (M = 4,45). Durchschnittlich wurden alle Vorträge jeweils mit 4 und mehr Sternen bewertet. Auch der Wissensgewinn wurde mehrheitlich als moderat bis deutlich eingeschätzt, mit Durchschnittswerten zwischen 3,44 und 3,95 (Skala 1 ‚not‘ –5 ‚extremely‘). Hervorgehoben wurden insbesondere die klare Struktur und Organisation, die hohe Qualität der Vorträge und Materialien, die Expertise der Referierenden, die Vielfalt der Themen und die Verständlichkeit der Inhalte. Auch die Mischung aus wissenschaftlichen und industriellen Perspektiven und die verständliche Präsentation der Inhalte wurde positiv bewertet. Verbesserungspotenzial wurde vor allem in der Länge und Gliederung des Workshops (z.B. kürzere Vorträge, mehr Interaktion) gesehen, ebenso wie in der fehlenden Möglichkeit zum Networking, dem noch ausbaufähigen Interaktivitätsgrad mit praktischen Anteilen und dem Wunsch nach stärker differenzierten Inhalten für unterschiedliche Wissensstände.

Für zukünftige Formate bevorzugen 50 % der Befragten ein Remote-Setting, 45 % eine hybride Lösung. Inhaltlich besteht großes Interesse an industriellen Anwendungsfällen (75 %), gefolgt von praxisnahen Formaten wie Demonstrationen, Hands-on Coding, Networking und vertiefenden technischen Inhalten (jeweils 50 % oder mehr). Zudem signalisierten 63 % der Teilnehmenden Interesse an einem vertieften Austausch bzw. einer Kollaboration mit dem DFKI im Bereich Quantencomputing.

Der Workshop wurde insgesamt als wertvoll, informativ und anschlussfähig bewertet. Für zukünftige Veranstaltungen empfiehlt sich eine stärkere Differenzierung nach Vorkenntnissen, eine interaktivere Gestaltung sowie Angebote zur Vernetzung der Teilnehmenden.

Der Workshop Unlocking Quantum Computing mit den vorgeschlagenen Anpassungen je nach Möglichkeit auch in Zukunft regelmäßig, z.B. jährlich durchgeführt werden. Hierzu arbeitet das DFKI mit Unternehmen und Institutionen aus seinem Netzwerk zusammen, um jeweils geeignete Gastvortragende zu gewinnen, die die entsprechenden relevanten Anwendungsfälle darstellen können.

Die unternehmensspezifischen Workshops sollen nachfragebasiert verstetigt werden. Hier ist das DFKI RIC aktuell bereits in der Durchführung mit einem weiteren Unternehmen des Industrial Advisory Boards sowie einem dritten, nicht am Projekt beteiligten Unternehmen.

Die Vorlesung Quantum Computing for Computer Scientists soll im Wintersemester 2025/2026 durch die Universität Bremen unter Mitarbeit des DFKI RIC erstmals durchgeführt und danach jährlich wiederholt werden.

04 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die im Vorhaben erreichten Ergebnisse lassen sich in mehrfacher Hinsicht verwerten.

Das im Rahmen der Workshops erlangte Wissen und die Fähigkeiten können als Grundlagen für die weitere Arbeit im Bereich Quantum Computing bei den Unternehmen des Industrial Advisory Boards dienen. Hierbei sind insbesondere die unternehmensspezifischen Schulungen zu nennen, durch die die Teilnehmenden in die Lage versetzt werden, den gemeinsam erstellten Prototypen weiterzuentwickeln und bei Bedarf produktiv auch auf internen Datensätzen einzusetzen. Weiterhin liefern die Grundlagenworkshops sowie der Workshop Unlocking Quantum Computing den Teilnehmenden eine Basis, um für sich zu entscheiden, inwiefern sie sich weiterhin mit dem Thema Quantum Computing beschäftigen wollen oder müssen, sowie mögliche Ansatzpunkte für diese weitere Beschäftigung.

Für die Konsortialpartner DFKI RIC und Universität Bremen liegt eine wichtige Verwertung der Vorhabensergebnisse in der Durchführung weiterer Workshops und Schulungen sowie in der Durchführung der Vorlesung Quantum Computing for Computer Scientists. Hierfür liefern die im Vorhaben erarbeiteten Themenschwerpunkte und Module die Grundlage und können je nach konkret vorhandenem Bedarf kombiniert und eingesetzt werden. In der in Kapitel 3 beschriebenen Verstetigungsplanung kommt dies zum Ausdruck.

Die Vorhabensergebnisse bilden weiterhin wertvolle mögliche Ansatzpunkte für die Entwicklung von Schulungen für angrenzende Bereiche neuer Technologien, wie etwa Machine Learning, Cybersecurity oder Blockchain. Insbesondere Vorhabenserkenntnisse aus der Bedarfserhebung lassen sich potenziell auf Schulungen in diesen Bereichen übertragen und führen so dazu, dass dortige Schulungen und Workshops effektiver geplant und durchgeführt werden können.

Der im Rahmen des Vorhabens verfasste Artikel "Fitting Fourier Series with parametrized quantum circuits" (s. Kapitel 06) fasst einen Teil der Ergebnisse des Vorhabens insbesondere für den Bereich Quantum Machine Learning zusammen. Der Artikel kann insbesondere auch anderen Forschungseinrichtungen zur weiteren Arbeit im Bereich QML nützlich sein.

Abschließend bilden die Vorhabensergebnisse eine gute Grundlage für die weitere Zusammenarbeit zwischen Unternehmen innerhalb und außerhalb des Industrial Advisory Boards sowie den Konsortialpartnern DFKI RIC und Universität Bremen, da insbesondere die Workshops im Bereich quanteninspiriertes Machine Learning Grundlagenwissen vermitteln, welches sehr relevant für die gemeinsame Projektarbeit ist.

05 Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurden auch von anderen Stellen Fortbildungsangebote im Bereich Quantum Computing und Quantum Machine Learning erstellt. Weiterhin wurden wichtige Online-Tutorials erstellt oder weiterentwickelt.

Im Bereich der Workshops sind u.a. die folgenden zu nennen:

- Certified Data Scientist Specialized in Quantum Machine Learning. Diese hybride Schulung, angeboten von der Fraunhofer-Gesellschaft, umfasst fünf Unterrichtseinheiten plus einen Prüfungstag. Die Schulung richtet sich an Fachleute aus den Bereichen Data Science und Maschinelles Lernen sowie an Mitarbeitende von Technologieunternehmen und Forschungseinrichtungen. Voraussetzung ist ein Studium oder eine vergleichbare Qualifikation.
- Quantencomputing – First Steps. Diese Präsenzsulung des Fraunhofer IWU in Dresden bietet einen Einstieg in die Welt des Quantencomputings. Der genaue Termin kann individuell vereinbart werden. Die Schulung richtet sich an Interessierte aus Industrie und Forschung mit naturwissenschaftlich-technischem Hintergrund.
- Quantum Computing Industry Training. Vom 5. bis 7. November 2025 bietet Quantum BW in Stuttgart eine Schulung an, die umfassendes Wissen im Bereich des Quantencomputings vermittelt. Die Schulung richtet sich an Unternehmensvertreter:innen aus der Industrie, Technolog:innenscouts und Innovationsmanager:innen.
- Quantum Machine Learning Weiterbildung. Diese Weiterbildung der Fraunhofer Academy kombiniert Online- und Präsenzphasen und richtet sich an Fachleute aus den Bereichen Data Science und Maschinelles Lernen. Voraussetzung sind Vorerfahrungen im Bereich Data Science, Machine Learning oder Quantum Computing

Im Bereich der Online-Tutorials wurden insbesondere die Angebote der großen Software-Frameworks wie PennyLane und Qiskit stetig erweitert und weiterentwickelt. Diese eignen sich sowohl für Studierende als Vertiefung der geplanten Vorlesung Quantum Computing for Computer Scientists, als auch für Mitarbeitende von Unternehmen, die nach ersten Workshops genauer ins Thema einsteigen wollen.

Weiterhin wurden u.a. die folgenden Angebote entwickelt:

- Quantum Computing in Practice (IBM Quantum Learning). Dieser Kurs konzentriert sich auf aktuelle Quantencomputer und deren praktische Anwendung. Er behandelt realistische Anwendungsfälle und bewährte Methoden für den Umgang mit Quantenprozessoren mit 100 oder mehr Qubits. Ein grundlegendes Verständnis von Quanteninformation und Quantenkreisen wird empfohlen.
- Quantum Computing (Udemy). Ein Einführungskurs für Anfänger, der die Unterschiede zwischen klassischem und Quantencomputing erläutert. Themen wie Quantenmechanik, Superposition, Verschränkung und Quanten-Gatter werden behandelt. Vorkenntnisse in Mathematik, insbesondere in Matrizenmultiplikation, sind von Vorteil.
- Introduction to Quantum Computing with Qiskit (openHPI). Dieser Kurs vermittelt den Umgang mit Qiskit, einem SDK für Quantencomputer. In der ersten Woche werden die verfügbaren Tools vorgestellt und die Grundlagen des Quantencomputings wiederholt. In der zweiten Woche werden zwei der ersten Quantenalgorithmien implementiert. Englische Sprachkenntnisse sind erforderlich.
- Quantum Computing & Intro to Quantum Machine Learning (Udemy). Dieser Kurs bietet eine mathematisch fundierte Einführung in Quantum Computing, Kryptographie und Quantum Machine Learning. Es werden praktische Übungen mit Python, Q# und Qiskit durchgeführt. Vorausgesetzt werden Kenntnisse in Mathematik und Physik auf Abiturniveau.

Da sich die Workshopangebote in der Regel öffentlich in mehreren Tagen an bereits Interessierte aus Unternehmen richten und die Tutorials insbesondere für Selbstlernende geeignet sind, sind die genannten Angebot als komplementär zu den im Rahmen des Vorhabens entwickelten Angeboten zu betrachten. Insbesondere können Tutorials gut als Nachbereitung des Workshops Unlocking Quantum Computing dienen, während die allgemeinen Workshops anderer Anbieter gut geeignet sind, Mitarbeitende in das Thema einzuführen und diese dann mit einem Grundlagenwissen an den im Vorhaben entwickelten

unternehmensspezifischen Workshops teilnehmen können.

06 Veröffentlichungen

Neben der Veröffentlichung von Arbeitsergebnissen im Rahmen von Workshops und Vorträgen wurde im Rahmen des Projekts die Arbeit "Fitting Fourier Series with parametrized quantum circuits" in Zusammenarbeit zwischen DFKI RIC und der AG Robotik der Universität Bremen erstellt und beim Journal Physical Review Research eingereicht (D. Heimann et al. 2024). Das Paper untersucht den Einsatz parametrisierbarer Quantenschaltkreise (PQCs) in variationalen Quantenalgorithmen (VQAs) für das Lernen von Fourier-Reihen. Die Autoren Heimann et al. vergleichen verschiedene PQC-Architekturen hinsichtlich ihrer Fähigkeit, eindimensionale, abgeschnittene Fourier-Reihen zu approximieren. Sie erweitern frühere Arbeiten, indem sie auch dissipative Quantenneuronale Netze (dQNNs) analysieren und eine neue Daten-Reupload-Struktur für diese Netze vorschlagen, um deren Leistungsfähigkeit für Regressionsaufgaben zu verbessern. Ziel ist es, Richtlinien für das Design effizienter PQCs abzuleiten.

Ein zentrales Ergebnis ist die Definition der "Lernfähigkeit" eines PQCs als Maß für seine Eignung, eine Menge zufällig gewählter Fourier-Funktionen zu approximieren. Dieses Maß kombiniert sowohl die Expressivität als auch die Trainierbarkeit eines PQCs und bietet eine genauere Bewertung der Architektur als bisherige Methoden. Die Autoren zeigen, dass PQCs mit ähnlichen Fourier-Koeffizienten dennoch stark unterschiedliche Lernfähigkeiten aufweisen können, was durch bestehende Metriken wie die Expressivität nach dem Haar-Maß oder die Berechnung von Fourier-Koeffizienten allein nicht erfasst wird.

Für die Untersuchung vergleichen die Autoren verschiedene PQC-Architekturen mit unterschiedlicher Anzahl von Qubits, Schichten, Einzelquanten-Gattern und Verschränkungsstrukturen. Dabei stellen sie fest, dass PQCs mit einer ausgewogenen Anzahl an Schichten und Qubits bessere Ergebnisse liefern. Zudem zeigen sie, dass bestimmte Verschränkungsarten wie zyklische oder starke Verschränkungen kaum Einfluss auf die Lernfähigkeit haben. Stattdessen ist die Anzahl der Verschränkungsschichten ein entscheidender Faktor für eine erfolgreiche Modellierung von Fourier-Reihen.

Bei der Untersuchung von dQNNs zeigen die Autoren, dass diese Architekturen ohne Daten-Reupload auf den versteckten Qubits nur eine geringe Lernfähigkeit aufweisen. Durch die Einführung eines strukturierten Daten-Reuploads kann die Leistung jedoch erheblich verbessert werden. Zudem zeigt sich, dass für dQNNs eine moderate Anzahl von versteckten Qubits vorteilhafter ist als zu viele oder zu wenige. Die Wahl der Einzelquanten-Gatter hat ebenfalls einen Einfluss, wobei RY- und RYZ-Gatter sich als besonders effektiv erweisen.

Insgesamt bietet die Studie wertvolle Einblicke in das Design effizienter PQCs für Quantum Machine Learning. Die Autoren schlagen vor, dass ihre Ergebnisse über das Lernen von Fourier-Reihen hinaus für allgemeine Lernaufgaben relevant sein könnten. Zudem diskutieren sie mögliche Anwendungen, etwa in der Quanten-basierten Strömungsmechanik, wo Fourier-Reihen häufig zur Beschreibung von physikalischen Prozessen verwendet werden. Die vorgestellten Methoden könnten dazu beitragen, PQCs gezielt für spezifische Anwendungsfälle zu optimieren und den Weg für zukünftige Quanten-Algorithmen in der Praxis zu ebnen.