

Von Bits zu Qubits: Erfahrungen aus einem Seminar zum Thema Quanteninformatik im Lehramt Informatik

Tilman Michaeli ¹ und Stefan Seegerer ²

Abstract: Informatikunterricht ist aufgrund der dynamischen zugrundeliegenden Wissenschaft durch regelmäßige Innovationen und neue Themen geprägt. Während aktuell etwa die Implementierung der Künstlichen Intelligenz in Curricula alle Phasen der Lehrkräftebildung vor entsprechende Herausforderungen stellt, zeichnet sich in der Quanteninformatik bereits die nächste technologische Entwicklung ab. In der universitären Ausbildung sollten solche Innovationen bereits frühzeitig aufgegriffen werden, um Studierende angemessen für ihre zukünftige Berufspraxis zu qualifizieren. Vor dem Hintergrund institutioneller Rahmenbedingungen wie voller Studienpläne und geringer Studierendenzahlen wie der sich erst im Anfang befindlichen fachdidaktischen Erschließung stellt dies allerdings eine große Herausforderung dar. Daher wird in diesem Beitrag ein Seminarkonzept für Studierende im Lehramt Informatik zum Erwerb fachlicher wie fachdidaktischer Kompetenzen für die Quanteninformatik vorgestellt sowie Erfahrungen aus der Durchführung geschildert.

Keywords: Quanteninformatik, Lehramt Informatik, Seminar, Innovationen, Quantencomputing

1 Einleitung

Als dynamische Wissenschaft bringt die Informatik regelmäßig Innovationen hervor, die bzgl. ihrer Relevanz für allgemeinbildenden Informatikunterricht untersucht und ggf. erschlossen sowie in Bildungs- und Lehrpläne integriert werden müssen. Eine aktuelle Innovation stellen die Entwicklungen in der Quanteninformatik dar, denen vielfältige neue Möglichkeiten, aber auch gesellschaftliche Herausforderungen zugeschrieben werden – und für die die Erschließung für informatische Bildung begonnen hat [MSR21]. Voraussetzung für eine gelungene Integration und Umsetzung in der Schulpraxis sind insbesondere fachlich wie fachdidaktisch qualifizierte Lehrkräfte. Die Erfahrungen mit anderen Innovationen der Informatik unterstreichen die Bedeutung einer frühzeitigen Weichenstellung in der universitären Lehrkräftebildung: Betrachtet man etwa das Gebiet der Künstlichen Intelligenz, ist dieses zwar in den letzten Jahren in die Bildungsstandards Informatik [GI25] sowie mehr und mehr Lehrpläne aufgenommen worden, es mangelt aber an der Verankerung in der universitären Ausbildung der Lehrkräfte [MB23], was umfangreiche nachgelagerte Fortbildungen notwendig macht [BJM23]).

Für Hochschulen stellt es wiederum eine große Herausforderung dar, für die oftmals geringen Studierendenzahlen mit begrenzten personellen Ressourcen in den ohnehin schon prall gefüllten Studienplänen geeignete hochwertige Lehrveranstaltungen für solche Innovationen

¹ TU München, School of Social Sciences and Technology, Professur für Didaktik der Informatik, Arcisstraße 21, 80333 München, tilman.michaeli@tum.de,  <https://orcid.org/0000-0002-5453-8581>

² IQM Quantum Computers, stefan.seegerer@meetiqm.com,  <https://orcid.org/0009-0003-8473-9311>

mit (potentiell) zukünftigen Auswirkungen auf die Schulpraxis ins Lehramtsstudium zu integrieren oder eigens zu entwickeln. Gleichzeitig wirkt die erste Phase der Lehrkräftebildung nur sehr langfristig auf die Unterrichtspraxis.

Zwar sind die Auswirkungen der Quanteninformatik auf unsere Gesellschaft noch nicht abzusehen. Dennoch gilt es, aus den Erfahrungen anderer Innovation zu lernen, und frühzeitig entsprechende Angebote zum Erwerb fachlicher wie fachdidaktischer Kompetenzen zu konzipieren, zu evaluieren und weiterzuentwickeln, wie etwa der Stifterverband betont [Fa23].

2 Hintergrund

Im Gebiet der Quanteninformatik wurden in den letzten Jahre große Fortschritte erzielt. Dies gilt nicht nur für die kontinuierliche Weiterentwicklung von Hardwareprototypen mit höheren Qubit-Zahlen und stabileren Systemen, sondern auch für entsprechende Algorithmen, etwa hinsichtlich Fehlerkorrekturverfahren [Go24]. Diese technologischen Entwicklungen sind wichtige Schritte auf dem Weg hin zu tatsächlichen Auswirkungen auf unsere Gesellschaft in der Zukunft. Mit diesem wachsenden Potenzial der Quanteninformatik nimmt auch ihre potenzielle Bedeutung für den Bildungsbereich zu. Allerdings befindet sich die Quanteninformatik als Gegenstand informatischer Bildung noch in den Anfängen [MSR21]. Eine besondere Herausforderung ist, dass zugrundeliegenden Konzepte (wie Superposition und Verschränkung), abstrakt und schwer zu visualisieren sind [Re25]. Auch gibt es bislang noch wenige Unterrichtsmaterialien, die diese Konzepte verständlich und anschaulich vermitteln. Dabei stehen meist Superposition und Verschränkung, das Thema Quantenverschlüsselung sowie einfache Algorithmen wie die Quantenteleportation im Mittelpunkt (etwa [Hu22]). Existierende Ansätze setzen beispielsweise auf interaktive Simulationen [Iv23] oder Spiele bzw. Unplugged-Aktivitäten, die quanteninformatische Konzepte in Spielmechaniken verpacken [ASM20; Se22]. Genauso finden sich verschiedene Ansätze, die auf physikalischen Realisierungen aufbauen, etwa auf der Polarisierung von Photonen [SEL22]. Vor diesem Hintergrund steht auch die Aus- und Fortbildung (angehender) Lehrkräfte noch in den Anfängen. Durch den Stifterverband wurden Empfehlungen für die Verankerung von Quantentechnologien in der Lehrkräftebildung erarbeitet, die explizit auch die informatische Perspektive adressieren [Fa23]. Zudem gibt es erste Studien, die zeigen, dass Fortbildungsangebote für Lehrkräfte auf großes Interesse stoßen und einen wichtigen Beitrag zur Vorbereitung auf den Unterricht von Quantenkonzepten leisten können [Ho24]. Erfahrungen aus der Aus- und Fortbildung von Informatiklehrkräften fehlen bisher allerdings.

3 Seminarkonzept

Studierende im Lehramt Informatik an der TU München können bisher im Wahlbereich Veranstaltungen aus der Informatik mit Bezug zur Quanteninformatik belegen. Diese richten

sich jedoch an Studierende im Bachelor/Master Informatik und setzen mathematische und tlw. physikalische Grundlagen voraus, die über die Inhalte im Lehramtsstudium Informatik (außer in entsprechender Fächerkombination) hinausgehen. Ein Angebot spezifisch für Studierende im Lehramt Informatik zum Erwerb fachlicher und fachdidaktischer Kompetenzen im Bereich der Quanteninformatik existiert bisher nicht. Um diese Lücke zu füllen, wird im Folgenden ein Seminar für Lehramtsstudierende Informatik im Umfang von 3 ECTS vorgestellt, das in dieser Form im Wintersemester 24/25 erstmalig durchgeführt wurde.

Organisatorisch wurde das Seminar im **Flipped-Classroom** als etabliertem hochschuldidaktischem Format strukturiert. Die Studierenden erarbeiten sich die entsprechenden Inhalte also weitgehend selbstständig (aber angeleitet). In den etwa alle zwei Wochen stattfindenden Seminarsitzungen werden diese dann gemeinsam besprochen, diskutiert und weiterentwickelt. Neben dem gut belegten Potenzial für den Lernerfolg der Studierenden [AA18] erschien uns dieses Format angesichts der zu erwartenden geringen Teilnehmezahlen und begrenzter Personalressourcen besonders geeignet.

Um einen möglichst hohen **Praxisbezug** der Lehrveranstaltung zu ermöglichen, entwickeln die Studierenden ein Lernangebot für Schüler:innen in Kooperation mit einer Schule. In Bayern gibt es in der 11. Jahrgangsstufe das Format der Wissenschaftswoche. In diesem Rahmen setzen sich Schüler:innen innerhalb eines Leitfachs mit einer selbst gewählten oder vorgegebenen Problemstellung zu einem interdisziplinären Rahmenthema auseinander [St]. Für die praktische Umsetzung im Rahmen des Seminars stellt die Wissenschaftswoche ein besonders geeignetes Format dar, da es Raum für extracurriculare Themen bietet und die Schüler:innen über eine umfangreiche informatische Vorbildung verfügen – insbs. zu Anknüpfungspunkten wie Codierung und Verschlüsselung.

Im Rahmen des Seminars sollen die Studierenden...

- grundlegende fachliche Kompetenzen im Bereich der Quanteninformatik erwerben,
- sich fachdidaktisch fundiert mit existierenden Vermittlungsansätzen in der Schule auseinandersetzen,
- und ein eigenes Lernangebot für Schüler:innen entwickeln, welches sie in der Schulpraxis durchführen und evaluieren.

Um dies zu erreichen wurde das Seminar in vier Phasen mit jeweils unterschiedlicher Schwerpunktsetzung gegliedert³:

1. Fachliche Qualifizierung (~ 4 Wochen): Nach einer kurzen Einführung in das Themengebiet durch den Dozierenden erarbeiteten sich die Studierenden im Flipped-Classroom grundlegende fachliche Kompetenzen im Bereich der Quanteninformatik. Die Inhalte orientieren sich am Empfehlungspapier des Stifterverbands [Fa23], d.h. es wurden „zentrale Konzepte wie das Qubit, Verschränkung, Messung und Quantenkryptographie überblickswei-

³ Der Moodlekurs mit Struktur der Durchführung und allen verwendeten Materialien ist hier veröffentlicht: <https://computingeducation.de/proj-wissenschaftswoche-quanten/>

se aus informationstheoretischer Sicht betrachtet, der klassischen Informationsverarbeitung gegenübergestellt und praktische Möglichkeiten zur Formulierung und Ausführung von Quantenalgorithmen geschaffen“. Im Sinne des didaktischen Doppeldeckers wurde zur Einführung existierendes deutschsprachiges Unterrichtsmaterial genutzt [Se21]. Zur Vertiefung haben die Studierenden anschließend verschiedene Selbstlernkurse wie die IQM Academy⁴ sowie ein MOOC der UChicago [LF23] (ausschnittsweise) bearbeitet. Weiterhin wurde umfangreiche Fachliteratur zur Verfügung gestellt. Zum Festhalten der Ergebnisse wurde gemeinsam eine iterative *Gegenstandsanalyse* in einem kollaborativen Dokument durchgeführt. In diesem zentralen Arbeitsdokument wurden etwa relevante Begriffe in Form einer Mindmap inkl. Definition, Bezüge zu Anknüpfungspunkten zu „traditionellen“ Inhalten der Informatik, Phänomene die als Beispiele herausgegriffen werden sowie offene Fragen und Unklarheiten gesammelt. Zum Abschluss dieser Phase wurde ein Experte aus dem Bereich des Quantencomputing eingeladen, um sowohl aktuelle Entwicklungen aus der Sicht von Forschung und Industrie vorzustellen, als auch offene fachliche Fragen der Studierenden zu klären.

2. Analyse existierender Vermittlungsansätze (~ 4 Wochen): In der nächste Phase analysierten die Studierenden existierende Vermittlungsansätze und Materialien zur Vermittlung von Konzepten der Quanteninformatik in der Schule und darüber hinaus. Dazu wurde zunächst gemeinsam mit den Studierenden ein Steckbrief als Grundlage der Analyse entwickelt. Zentrale Bestandteile waren die intendierten Lernziele, verwendete Fachbegriffe, Beispiele und Phänomene, sowie Struktur des Angebots, nötige Vorkenntnisse und genutzte Erkläransätze. Den Studierenden wurden dazu verschiedene (insbs. aus dem internationalen Raum stammende) Materialien zur Verfügung gestellt, genauso hatten sie aber den Auftrag, weitere Beispiele zu recherchieren und analysieren. Die Steckbriefe als Ergebnisse dieser Phase wurden ebenfalls in einem kollaborativen Dokument gesammelt und im Seminar diskutiert.

3. Didaktische Konzeption eines eigenen Lernangebots (~ 4 Wochen): Aufbauend auf der intensiven Auseinandersetzung mit existierenden Materialien entwickelten die Studierenden ein eigenes Lernangebot für die Durchführung mit Schüler:innen in der Schulpraxis. Hierzu wurde (für die durch die Wissenschaftswoche bereits feststehende Zielgruppe) eine didaktische Analyse durchgeführt. Dabei wurden gemäß Lehrplan zu erwartende Vorkenntnisse im Bereich „traditioneller“ Inhalte mit Bezug zu Quantentechnologien (etwa Kryptographie oder Gatter) analysiert, mögliche Lernendenvorstellungen aus der Literatur herausgearbeitet (etwa [Me22; WP23]) sowie relevante Lernziele aus dem fachdidaktischen Diskurs (etwa [A120; MSR21]) abgeleitet. Anschließend erfolgte die Feinplanung in Absprache mit der Kooperationsschule passend zum dort verfolgten Ablauf der Wissenschaftswoche. Iterativ und in mehreren Feedbackschleifen mit dem Dozierenden wurden die Arbeitsmaterialien für die Schüler:innen entwickelt, wobei insbesondere existierende Vermittlungsansätze aufgegriffen und adaptiert wurden.

⁴ <https://www.iqmacademy.com/>

4. Umsetzung des Lernangebots in der Schulpraxis: Abschließend wurde das konzipierte Lernangebot in der Schulpraxis durchgeführt, mittels Beobachtungsaufträgen begleitet und gemeinsam reflektiert. Die Prüfungsleistung stellte ein Portfolio aus der im Seminar iterativ erarbeiteten Gegenstandsanalyse und didaktischen Analyse sowie der konkreten Planung der Wissenschaftswoche samt Arbeitsmaterialien und abschließender Reflexion dar.

4 Erfahrungen aus der Durchführung

Am Seminar haben zwei Studierende (1xm, 1xw) aus dem Bachelor bzw. Master Lehramt Informatik teilgenommen (einmal in Kombination Informatik-Mathematik, einmal Informatik-Wirtschaftswissenschaften). Angesichts der geringen Studierendenzahlen im Lehramt Informatik an der TUM und da das Seminar zum ersten Mal angeboten wurde, lag diese niedrige Zahl an Teilnehmer:innen im Bereich der Erwartungen. Keiner der Studierenden hatte Vorerfahrungen im Bereich Quantencomputing. Bevor die Erfahrungen aus der Durchführung des Seminars aus Perspektive der Studierenden und des Dozierenden berichtet werden, folgen zunächst Erläuterungen zum Ablauf und Format der durch die Studierenden ausgestalteten Wissenschaftswoche.

Gestaltung der Wissenschaftswoche Im Rahmen der Wissenschaftswoche arbeiten die Schüler:innen eine ganze Schulwoche (statt des regulären Unterrichts) eigenständig an einem Thema. An unserer Kooperationschule besuchen sie dazu zunächst mehrere fachübergreifende Workshops zum wissenschaftlichen Arbeiten. Anschließend beginnt die Arbeit am selbstgewählten Thema. Den Abschluss der Woche bildet ein Gallerywalk mit Posterpräsentation aller Schüler:innen. Für das Thema Quanteninformatik hatten sich zwei Gruppen je 3 Schüler:innen (das Maximum der Schule pro Thema) angemeldet. Zur ersten Einarbeitung und Motivation wurden durch die Studierenden erste Arbeitsaufträge vorbereitet, die am Montag nach den Workshops durch die Schüler:innen selbstgesteuert bearbeitet wurden. Am Dienstag folgte eine Exkursion an die TUM. Dort wurden in einem von den Studierenden geplanten und durchgeführten unterrichtsnahen Format die Grundlagen der Quanteninformatik gemeinsam erarbeitet. Im Anschluss konnten die Schüler:innen zwischen zwei (je von einem Studierenden vorbereiteten und betreuten) Vertiefungsrichtungen wählen: „Wie verschlüsseln wir im Quantenzeitalter?“ und „Wie programmiert man einen Quantencomputer?“. Für jede Richtung wurden Leitfragen sowie unterstützendes Material zu Verfügung gestellt. Die Schüler:innen bearbeiteten diese Leitfragen anschließend eigenständig und bereiteten ihr Poster vor. Während dieser Phase waren die Studierenden jeden Tag für eine oder zwei Schulstunden vor Ort, um ggf. zu unterstützen und bei offenen Fragen zu helfen.⁵

⁵ Die Materialien der Studierenden für die Wissenschaftswoche wurden als OER veröffentlicht, stehen in diesem Erfahrungsbericht zum zugrundeliegenden universitären Seminar aber nicht direkt im Fokus.

4.1 Erfahrungen aus Perspektive der Studierenden

Die Auswertung und Beschreibung der Erfahrungen erfolgt zunächst aus der Perspektive der Studierenden. Grundlage hierfür sind (1) die schriftliche Reflexion des Seminars als Teil der Prüfungsleistung und (2) eine gemeinsame Reflexion mit den Studierenden, die aufgezeichnet wurde. Mit Zustimmung der Studierenden durfte beides für diesen Beitrag ausgewertet werden. Eine (grundsätzlich zu bevorzugende) anonyme Evaluation war aufgrund der Anzahl der Teilnehmer:innen nicht möglich. Im Folgenden werden die Rückmeldungen zu den einzelnen Phasen sowie der organisatorischen Gestaltung dargestellt.

In der ersten Phase sollten die Studierenden im Sinne einer **fachlichen Qualifizierung** grundlegende fachliche Kompetenzen im Bereich Quanteninformatik erwerben. Aufgrund der hohen Komplexität dieses Gegenstandsbereichs stellt dies eine durchaus große Herausforderung dar. Die Studierenden schätzen ihren Wissensstand nach dem Seminar dabei „sowohl als auch“ ein: Einerseits haben sie „ein sehr gutes Bild [...] wie das alles funktioniert, was so das Grundlegende ist, was so die Vorteile sind“, auch für die Ausgestaltung von einer Unterrichtssequenz zu diesem Thema. Andererseits fühlen sie sich nicht auf dem selben Verständnislevel wie bei anderen Unterrichtsinhalten. Ihrer Einschätzung nach liegt das an der Komplexität: „Das könnte ich aber auch in einem oder zwei Jahren noch nicht, weil das einfach so komplex ist, nicht nur die informatische Ebene sondern man müsste auch die physikalische Ebene theoretisch noch dazu nehmen [...]. Das [Niveau zu erreichen] sind aber auch nicht meine Erwartungen an das Seminar gewesen.“ Als gelungen bewerten sie die selbstständige Erarbeitung im *Flipped Classroom*: „Ich fand das ziemlich gut, es wurde nichts vorgekaut [...] wo man nur drinsitzt“, wobei gleichzeitig immer „etwas an die Hand gegeben [wurde], wo wir starten“. So empfanden die Studierenden die Erarbeitung als „angenehm“ und mit dem richtigen Maß an Unterstützung – auch aufgrund des guten Betreuungsverhältnisses. Gerade die Gegenstandsanalyse bewerten sie positiv: „Ich [...] habe es aber als eine sehr bereichernde Erfahrung gefunden. Es hat mir geholfen, mich intensiver mit dem Thema auseinanderzusetzen und analytisch zu arbeiten.“ Als enorm wichtig schätzen beide die *Rolle des Experten* ein, sowohl um konkrete fachliche Fragen zu klären als auch die aktuelle Perspektive in Fach und Industrie kennen zu lernen, und damit das eigene Verständnis deutlich zu weiten.

Bzgl. der **Analyse existierender Vermittlungsansätze** stellen beide Studierenden heraus, dass sie das (zumindest so ausführlich) zuvor noch nicht gemacht haben, insbs. auch nicht in den Schulpraktika. Gerade den gemeinsam erarbeiteten Steckbrief betonen sie als „sehr hilfreich um zu sehen, worauf ich achte“. Da zu diesem Zeitpunkt das Format und Details zur Durchführung der Wissenschaftswoche an der Schule jedoch noch nicht feststanden, erfolgte die Analyse aber noch mit wenig Bezug zur Planung der eigenen Wissenschaftswoche, wodurch sie später nur selektiv auf die analysierten Materialien zurückgegriffen haben.

Analog dazu hätten sie sich auch für die **Konzeption der Wissenschaftswoche** bereits früher entsprechende Informationen gewünscht. Die eigentliche didaktische Analyse und Konzeption bewerten sie aber als gelungen, inklusive der finalen Ergebnisse. Als wichtige

Elemente betonen sie, dass die Planung der Grundlagen gemeinsam und kollaborativ vorgenommen wurde, aber auch jede:r für die Vertiefung einen eigenen Schwerpunkt legen konnte. Die drei Feedbackrunden mit dem Dozierenden bzgl. des konkreten Materials empfanden sie als sehr hilfreich und wichtig. Aufgrund des ihnen unbekannt offenen Formats der Wissenschaftswoche würden sie für die Zukunft auch die Bereitstellung von Beispielen (bspw. aus vergangenen Semestern) empfehlen.

Für die **Umsetzung des Lernangebots in der Unterrichtspraxis** betonen beide Studierende (trotz des damit einhergehenden Aufwands) die Bedeutung des *Praxisbezugs* für ihre Motivation: „echte Schüler, raus aus der Uni, rein in die Realität“. Für einen Studierenden war dieses Element entscheidend, sich überhaupt zum Seminar anzumelden. Beide geben an, dass es „ein wichtiger Teil [des Seminars ist], dass man das irgendwie durchführen kann oder [...] mit den Schülern interagiert“. Auch die Durchführung der Wissenschaftswoche hat in ihrer Einschätzung die intendierten Ziele erfüllt. Mit den finalen Postern der „interessierten und begeisterten“ Schüler:innen sind sie im Rahmen dessen, was in einer Woche in diesem komplexen Thema möglich ist, „ziemlich zufrieden“ und haben die „Erwartungen erfüllt“, auch wenn „einige Aussagen Ungenauigkeiten [enthalten]“. Dabei geholfen hat, dass die Schüler:innen sehr leistungsstark waren. Dennoch haben sie in der Evaluation einige Punkte in ihrer Gestaltung identifiziert, die sie für das nächste Mal anpassen würden (etwa bzgl. der Formulierung mancher Arbeitsaufträge oder Strukturierung des Workshops) und sie damit auch in der „persönlichen Entwicklung [als Lehrkraft] weitergebracht“ haben – gerade aufgrund „anfänglicher Unsicherheit“.

Bezüglich des **organisatorischen Ablaufs** waren die Studierenden sehr zufrieden. Die zweiwöchigen Treffen wurden als genau richtig eingeschätzt „weil man immer Zeit hat zum erarbeiten“, eine höhere Frequenz wäre „zu viel“. Für die Organisation des Flipped Classroom heben sie die klare Strukturierung (insbs. durch die Arbeitsaufträge) hervor. Das kollaborative Arbeiten hat sie hingegen vor Herausforderungen gestellt und „am Anfang gestresst [...], das hatte ich ehrlich gesagt im Studium noch nie [...] aktiv mal gemacht“. Ein Studierender beschreibt, „das Lehrer zusammenarbeiten sollten habe ich in diesem Semester gelernt, damit sie das beste herauskriegen“, und sie sind sich einig, dass es „dann schön war, das aktiv zu machen“.

Als Gesamtfazit berichten beide Studierende, dass ihnen das Seminar gut gefallen und viel Spaß gemacht hat und sie sowohl fachlich als auch bzgl. der Planung und Ausgestaltung von Unterricht „viel gelernt und wertvolle Erkenntnisse gewonnen“ haben.

4.2 Reflexion des Dozierenden

Aus Perspektive des Dozierenden bestätigen sich viele Eindrücke der Studierenden. Das erste Ziel des Seminars bezog sich auf die *fachliche Qualifizierung*. Auch für den Dozierenden aus der Didaktik der Informatik mit einem Grundverständnis des Gegenstandsbereichs (aber weit entfernt von echter Expertise) stellt das komplexe Fachgebiet eine Herausforderung

dar. Ähnlich zur Einschätzung der Studierenden ist hier die Rolle des Experten enorm hilfreich, um diese Lücke zu füllen und offene Fragen zu klären. Genauso hilfreich war die selbstständige Erarbeitung durch die Studierenden im Flipped Classroom. So konnten offene Fragen gesammelt, diskutiert und ggf. gemeinsam geklärt werden. Bezüglich des Kompetenzerwerbs der Studierenden wurde keine formale Überprüfung vorgenommen. Der Eindruck aus dem Seminar bestätigt aber die Einschätzung der Studierenden: Die Grundlagen und zentralen Konzepte dieses komplexen Gebiets wurden erfolgreich erschlossen, mit zunehmender fachlicher Tiefe offenbarten sich aber durchaus Lücken, die sich etwa in fehlender Präzision in der Fachsprache zeigten. Weiterhin zielte das Seminar auf die *fachdidaktische Erschließung* des Gegenstandsbereichs samt *Konzeption und Durchführung eines konkreten Lernangebots* in der Unterrichtspraxis. Aus Sicht des Dozierenden bot dieses Seminar über das Thema Quanteninformatik hinaus eine enorm wertvolle Lerngelegenheit für diese Bestandteile professioneller Kompetenz von Lehrkräften. So konnte deutlich intensiver an der Gegenstandsanalyse und didaktischer Analyse gearbeitet werden, als dies im Rahmen der Pflichtveranstaltung zumeist möglich ist (und sich häufig in den Problemen der Studierenden mit diesen Schritten in den Unterrichtsentwürfen und Praktika zeigt). Dazu gehört explizit auch die kollaborative Arbeitsweise, die die Studierenden zunächst vor überraschende Probleme stellte.

5 Fazit

Insgesamt ist das hier vorgestellte Seminar sowohl aus Perspektive der Studierenden als auch des Dozierenden gut gelungen. Zentral war die Gliederung in drei Phasen. So haben sich die Studierenden im Flipped Classroom selbstgesteuert die Grundlagen der Quanteninformatik erarbeitet und existierende Vermittlungsansätze analysiert. Die Unterstützung durch einen Experten war hierbei von besonderer Bedeutung. Die Wissenschaftswoche stellte ein optimales Format dar, um den Praxisbezug herzustellen. Genauso sind aber andere Formate wie Projekttag oder die Kooperation mit außerschulischen Lernorten denkbar. Neben der fachlichen Erschließung der Quanteninformatik wurden so gleichzeitig wichtige Kompetenzen im Bereich der Unterrichtsplanung und Durchführung vertieft. Die Konzeption sowie Erfahrungen aus der Durchführung können damit als Grundlage für die Ausgestaltung ähnlicher Angebote für die Quanteninformatik dienen. Aber auch für andere Innovationen oder extracurriculare Themen kann das Format adaptiert werden, insbesondere vor dem Hintergrund geringer Studierendenzahlen und begrenzter Personalressourcen. Gerade im Wahlbereich können so sowohl die Studierenden als auch Dozierenden frühzeitig Erfahrung für solche Themen sammeln, lange bevor sie (möglicherweise) an Bedeutung für die Lehramtsausbildung gewinnen.

Acknowledgements

Die Entwicklung und Durchführung des Seminars wurde durch den Stifterverband im Rahmen der QuBit-Fellowships für einen zeitgemäßen Quantenunterricht gefördert.

Literaturverzeichnis

- [AA18] Akçayır, G.; Akçayır, M.: The flipped classroom: A review of its advantages and challenges. *Computers & Education* 126, S. 334–345, 2018.
- [AI20] Alpert, C. L.; Edwards, E.; Franklin, D.; Freericks, J.: Key Concepts for Future QIS Learners, Online: <https://qis-learners.research.illinois.edu/>, 2020.
- [ASM20] Angara, P. P.; Stege, U.; MacLean, A.: Quantum computing for high-school students an experience report. In: 2020 IEEE international conference on quantum computing and engineering (QCE). IEEE, S. 323–329, 2020.
- [BJM23] Baumer, S.; Jetzinger, F.; Michaeli, T.: Künstliche Intelligenz im verpflichtenden Informatikunterricht: Ein skalierbares Fortbildungsangebot für Informatikkräfte. In: *INFORMATIK 2023*. GI e.V., Bonn, S. 399–402, 2023.
- [Fa23] Fackeldey, K.; Fischer, S.; Filk, T.; Gutschank, J.; Gretzschel, M.; Heiszler, F.; Hellstern, G.; Michaeli, T.; Müller, R.; Oldenburg, R. et al.: Quantum Skills in der Lehrkräftebildung: 11 Empfehlungen an Bildungspolitik, Hochschulen und Zivilgesellschaft um Quantentechnologien in die Allgemeinbildung zu bringen. 2023.
- [GI25] GI: Bildungsstandards Informatik für die Sekundarstufe I – Empfehlungen der Gesellschaft für Informatik e.V, 2025.
- [Go24] Google Quantum AI and collaborators: Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature* 638 (8052), S. 920, 2024.
- [Ho24] Holincheck, N.; Rosenberg, J. L.; Zhang, X.; Butler, T. N.; Colandene, M.; Dreyfus, B. W.: Quantum science and technologies in K-12: Supporting teachers to integrate quantum in STEM classrooms. *Education Sciences* 14(3), S. 219, 2024.
- [Hu22] Hughes, C.; Isaacson, J.; Turner, J.; Perry, A.; Sun, R.: Teaching quantum computing to high school students. *The Physics Teacher* 60(3), S. 187–189, 2022.
- [Iv23] Ivory, M.; Bettale, A.; Boren, R.; Burch, A. D.; Douglass, J.; Hackett, L.; Kiefer, B.; Kononov, A.; Long, M.; Metcalf, M. et al.: Quantum computing, math, and physics (QCaMP): Introducing quantum computing in high schools. In: 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Bd. 3, IEEE, S. 1–9, 2023.
- [LF23] Liu, J.; Franklin, D.: Introduction to quantum computing for everyone: experience report. In: *Proceedings of SIGCSE'23*. S. 1157–1163, 2023.
- [MB23] Marx, E.; Bergner, N.: Seminarkonzept zur fachlichen und fachdidaktischen Qualifizierung von Informatiklehramtsstudierenden zum Maschinellen Lernen. *HDI-Hochschuldidaktik Informatik*, S. 65, 2023.
- [Me22] Meyer, J. C.; Passante, G.; Pollock, S. J.; Wilcox, B. R.: Investigating student interpretations of the differences between classical and quantum computers: Are quantum computers just analog classical computers? *arXiv preprint arXiv:2208.13734*, 2022.
- [MSR21] Michaeli, T.; Seegerer, S.; Romeike, R.: Quanteninformatik als Thema und Aufgabengebiet informatischer Bildung. In: *INFOS 2021–19*. GI-Fachtagung Informatik und Schule. Gesellschaft für Informatik, Bonn, S. 123–132, 2021.
- [Re25] Rexigel, E.; Bley, J.; Arias, A.; Qerimi, L.; Küchemann, S.; Kuhn, J.; Widera, A.: Investigating the use of multiple representations in university courses on quantum technologies. *EPJ Quantum Technology* 12(1), S. 1–20, 2025.
- [Se21] Seegerer, S.; Romeike, R.; Woitzek, A.; Michaeli, T.: QBTS NEWS – REISE IN DIE QUANTENZEIT, 2021, URL: <https://computingeducation.de/proj-quanteninformatik/>.

- [Se22] Seskir, Z. C.; Migdał, P.; Weidner, C.; Anupam, A.; Case, N.; Davis, N.; Decaroli, C.; Ercan, İ.; Foti, C.; Gora, P. et al.: Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education. *Optical Engineering* 61 (8), S. 081809–081809, 2022.
- [SEL22] Satanassi, S.; Ercolessi, E.; Levrini, O.: Designing and implementing materials on quantum computing for secondary school students: The case of teleportation. *Physical Review Physics Education Research* 18 (1), S. 010122, 2022.
- [St] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, URL: <https://www.isb.bayern.de/schularten/gymnasium/oberstufe/wissenschaftswoche/>.
- [WP23] Woitzik, A. J.; Passon, O.: Fehlvorstellungen zur Superposition in der Quantenphysik. arXiv preprint arXiv:2301.06299, 2023.