Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil I - Kurzbericht

zum Teilvorhaben Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik (qp-tech.edu.ee)

im Verbundprojekt Quantum Photonic Technology Education – ein Ausbildungsprogramm in der photonischen Quantentechnologie (qp-tech.edu)

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Förderkennzeichen des Teilvorhabens: 13N16223 FAU

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.12.2024; verlängert bis 30.06.2025

Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 30.06.2025

1. Motivation des Teilvorhabens, Einordnung und wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Teilvorhaben der FAU Erlangen-Nürnberg „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik (qp-tech.edu.ee)“ im Rahmen des Verbundprojekts qp-tech.edu zielte darauf ab, die Personalentwicklung der deutschen Photonikindustrie im Bereich der Quantenkommunikation zu unterstützen. Es sollten neue Lehrmodule, Lehrveranstaltungen und Kommunikationsmaßnahmen entwickelt werden, die speziell Themen der Quantenkommunikation im Überlappbereich von Physik und Elektrotechnik in den Fokus rücken. Hierfür verfügte die FAU Erlangen-Nürnberg bereits zum Start des Vorhabens über herausragende Expertise, insofern Quantenkommunikation langjähriger Forschungsschwerpunkt sowohl in der Physik als auch Elektrotechnik ist.

2. Ablauf des Vorhabens

Das Teilprojekt der FAU begann Mitte 2022 mit strukturell-vorbereitenden Maßnahmen. Es entstanden erste thematische Überlegungen für ein mögliches Curriculum sowie für die Gestaltung der Abfrage des industriellen Weiterbildungsbedarfs. Im Laufe des Jahres 2023 wurde das Curriculum für die digitalen Module in inhaltlich-didaktischer Tiefe formuliert und die für die Umsetzung der Module notwendige Ausrüstung (u.a. Quantenkoffer) angeschafft und für den didaktischen Einsatz aufbereitet. Dies geschah in engem Schulterschluss mit den Maßnahmen, die zur Ausweitung der universitären Lehre im Bereich Quantenkommunikation an der FAU umgesetzt wurden (neue Studienschwerpunkte, neue Lehrveranstaltung zu „Quantum Communication“). Ein wichtiger Meilenstein für die nachhaltige Verankerung und Öffnung von Lehre und Forschung im Bereich Quantentechnologien wurde an der FAU 2023 mit der Gründung des FAU Profile Center Light.Matter.QuantumTechnologies erreicht. Weiterhin wurde die Beschäftigung mit dem Weiterbildungsbedarf der Industrie intensiviert, erste Rückmeldungen und Ergebnisse verarbeitet. Im Projektjahr 2024 stand die filmische Umsetzung der digitalen Lehrmodule im Zentrum der Arbeiten. Diese konnte im Laufe der zuwendungsneutralen Verlänge-

rung der Laufzeit bis 30.06.2025 abgeschlossen werden.

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Teilprojekt gliederte sich in vier Arbeitspakete (AP 1–4), die im Projektlauf kontinuierlich und in gegenseitiger Bezugnahme bearbeitet wurden. Die Ziele des Vorhabens konnten vollständig erreicht werden. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere folgende Ergebnisse:

3.1. AP1 qp-tech.analytics: Bedarfsanalyse

Mittels Interviews, durch systematische Auswertung von Ergebnissen der empirischen Bildungsforschung zu Quantum Education (z. B. European Competence Framework for Quantum Technologies) sowie in engem Austausch mit den Projektpartnern und weiteren QT-Bildungsinitiativen wurde der Weiterbildungsbedarf im Bereich Quantenkommunikation ermittelt. Ergebnis: Es besteht eine hohe Heterogenität der Qualifikationsanforderungen. Besonders nachgefragt ist Expertenwissen in der Quantenkommunikation. Die notwendige Interdisziplinarität stellt eine zentrale Herausforderung dar, weshalb zielgerichtete Weiterbildungsangebote hier besonders wirksam sind.

3.2. AP2 qp-tech.study: Stärkung der universitären Lehre

Die universitäre Ausbildung im Bereich Quantentechnologien an der FAU wurde im Verlauf des Teilprojekts deutlich erweitert:

- Systematischer Ausbau der Lehrkapazitäten durch neue Berufungen im QT-Bereich
- Einführung des Studienschwerpunkts „Quantum Technologies“ im M.Sc. Physik (WS 2022/23)
- Einführung der Studienrichtung „Angewandte Quantentechnologien“ im B.Sc./M.Sc. Elektrotechnik (WS 2023/24)
- Gründung des FAU Profile Center Light.Matter.QuantumTechnologies (Juni 2023) zur Sichtbarmachung von Forschung und Lehre

Es wurden zwei neue interdisziplinäre Lehrveranstaltungen entwickelt:

- Seminar „Quantum Communication“ (SS 2023)
- Vorlesung „Quantum Communication“ (SS 2024)

Diese stärken die Zusammenarbeit zwischen Physik und Elektrotechnik im Bereich Quantenkommunikation nachhaltig.

3.3. AP3 qp-tech.pro: Entwicklung digitaler Lernmodule

Kern des Teilprojekts qp-tech.edu.ee war die Erstellung eines digitalen Lehrangebots zur Quantenkommunikation aus elektrotechnischer Perspektive. Hierfür wurden fünf digitale Lernmodule entwickelt:

1. Avalanche Photodiodes
2. High-Speed Quantum State Preparation
3. Single Photon Sources for Applications in Quantum Communications

4. The First QKD Protocol: BB84
5. BB84 with an Attenuated Laser: A Practical Approach

Jedes Modul umfasst zwei ca. 30-minütige Lehrvideos (Theorie + Experiment) und ergänzende schriftliche Materialien zum Selbststudium. Alle Module wurden in die Moodle-Lehrplattform der Universität Jena integriert und stehen nach Registrierung kostenlos und dauerhaft zur Verfügung. Die Inhalte sind didaktisch abgestimmt auf die Lehrmaterialien der Projektpartner und bieten ein modernes, praxisnahes Weiterbildungsangebot für berufstätige Lernende.

3.4. AP4 qp-tech.experience: Vernetzung und Öffentlichkeitsarbeit

Das Teilprojekt beteiligte sich aktiv an Vernetzungs- und Outreach-Aktivitäten, u. a. in Kooperation mit dem FAU Profile Center Light.Matter.QuantumTechnologies und dem Sonderforschungsbereich TRR 306 QuCoLiMa. Ein zentrales Highlight ist die Einrichtung einer interaktiven Ausstellung „panOPTICUM“ (Eröffnung: Oktober 2023), die sich an Schülerinnen und Schüler, Studierende und die interessierte Öffentlichkeit richtet und Quanteneffekte anschaulich vermittelt.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis – Teil II

zum Teilvorhaben Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik (qp-tech.edu.ee)

im Verbundprojekt Quantum Photonic Technology Education – ein Ausbildungsprogramm in der photonischen Quantentechnologie (qp-tech.edu)

Zuwendungsempfänger: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Förderkennzeichen des Teilvorhabens: 13N16223 FAU

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2022 – 31.12.2024; verlängert bis 30.06.2025

Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 30.06.2025

1. Motivation des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik (qp-tech.edu.ee)“ war Teil des vom BMBF/BMFTR geförderten Verbundprojekts „qp-tech.edu – Quantum Photonic Technology Education“. Ziel des Verbundprojekts war es, die für die sogenannte zweite Quantenrevolution erforderlichen Kompetenzen in Forschung, Industrie und Gesellschaft zu stärken. Im Mittelpunkt stand der Aufbau nachhaltiger Bildungs- und Weiterbildungsstrukturen im Themenfeld Quantenphotonik – einem zentralen Technologiebereich der Quantentechnologien.

1.1. Einordnung und wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt des Projektstarts (2022) befanden sich die Quantentechnologien in einer Phase des Übergangs von der Grundlagenforschung in erste industrielle Anwendungen. Gerade in der Quantenkommunikation bewegte sich das Feld schnell von Grundlagenforschungsfragen zu Anwendungen und dem konkreten Bedarf nach Produkten (z.B. im Rahmen der europäischen Initiative EuroQCI zur Sicherung der europäischen kritischen Infrastruktur aber auch im privaten Bankensektor). In diesem dynamischen Umfeld war die Notwendigkeit der Aus- und Weiterbildung auch schon in konkreten Forschungs- und Entwicklungsprojekten sichtbar.

Während weltweit intensive Anstrengungen unternommen wurden, Quantenkommunikation, -sensorik und -computing zur Marktreife zu führen, existierten in Deutschland bis dato nur vereinzelte Ausbildungsangebote mit explizitem Fokus auf quantenphotonische Technologien. Der Bedarf an interdisziplinär qualifizierten Fachkräften, die physikalische Grundlagen, ingenieurwissenschaftliche Umsetzung und digitales Können verbinden, wurde von Forschungseinrichtungen und Unternehmen gleichermaßen betont.

Das Teilvorhaben „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik (qp-tech.edu.ee)“ hatte das Ziel, die Personalentwicklung der deutschen Photonikindustrie im Bereich der Quantenkommunikation durch eine zielgerichtete interdisziplinäre Aus- und Weiterbildung im Überlappbereich von Physik und Elektrotechnik zu unterstützen.

Hierfür verfügte die FAU Erlangen-Nürnberg bereits zum Start des Vorhabens über herausragende Expertise. Zwischen diesen Disziplinen besteht an der FAU eine enge und etablierte Zusammenarbeit, insbesondere im Bereich der Photonik. Die Quantenkommunikation bildet dort seit vielen Jahren einen Forschungsschwerpunkt und ist sowohl im Department Physik als auch im Fachbereich Elektrotechnik fest verankert. Die FAU verfügte so bereits zu Projektbeginn über einschlägige spezifische Lehr- und Ausbildungserfahrung in der Photonik, insbesondere auch in der Quantenkommunikation. Im Speziellen waren bereits eine Reihe von Bachelor- sowie Masterstudiengängen etabliert, in dem ein großer Teil des Curriculums zur Quantenoptik wie auch zur Kommunikation in der Elektrotechnik abgebildet wird.

Didaktische Konzepte zur Vermittlung der physikalischen Grundlagen der Quantenoptik und optischen Quantentechnologien ohne besonderes Vorwissen der Inhalte eines Physikstudiums sind seit Langem Forschungsgegenstand der Physikdidaktik, hier vor allem im Rahmen des Quantum Lab (interaktiver Zugang zur Welt der Quantenphysik).

Neben den bestehenden Formaten für die Ausbildung auf Master-Niveau verfügte die FAU bereits zu Projektbeginn über eine Reihe von dedizierten Graduiertenschulen mit Schwerpunkten in der Photonik und grundlegenden Quantenwissenschaften. So werden in den drei Graduiertenschulen Advanced Optical Technologies (SAOT), International Max Planck Research School Physics of Light (IMPRS-PL) und Quantum Cooperativity of Light and Matter (RTG des TRR 306 QuCoLiMa) Promovenden in den Bereichen Optik, Quantenoptik und optische Quantentechnologien ausgebildet. Die FAU ist darüber hinaus einer von drei Ausbildungsknoten der gemeinsam mit sieben weiteren deutschen Standorten betriebenen Graduiertenschule Max Planck School of Photonics (MPSP).

Zur Ansprache von Schulen und der interessierten Öffentlichkeit konnte das Projekt qp-tech.edu.ee auf zahlreichen bewährten Formaten für Outreach-Aktivitäten, z.B. im Rahmen von Schülerlaboren oder der Langen Nacht der Wissenschaft aufbauen. An diese Kompetenzen und Netzwerke knüpfte das Teilvorhaben qp-tech.edu.ee dezidiert an, wirkte aktiv auf deren Ausbau und Intensivierung hin.

1.2. Wissenschaftliche oder technische Arbeitsziele des Teilvorhabens

Die Aufgabenstellung des Teilprojekts qp-tech.edu.ee an der FAU Erlangen-Nürnberg bestand darin, auf Basis der bestehenden Lehr- und Forschungsinfrastruktur sowie in enger Kooperation mit den Partnern des Verbundprojekts ein Bildungsangebot für den Bereich Quantenkommunikation auf dem Fundament der

Elektrotechnik aufzubauen. Dazu sollten innerhalb der Laufzeit des Vorhabens die folgenden spezifischen Ziele erreicht werden:

- Entwicklung eines digitalen, industrieorientierten Weiterbildungsangebots für wissenschaftlich-technische Fachkräfte und Führungskräfte im Bereich Quantenkommunikation (zu realisieren als digitale Lehrmodule auf der E-Learning-Plattform Moodle),
- Analyse und kontinuierliche Berücksichtigung der sich verändernden Weiterbildungsbedarfe der Zielgruppe,
- Etablierung von Formaten für niedrigschwellige, kollaborative Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Quantenkommunikation,
- In Zusammenarbeit mit Verbundpartnern, Sensibilisierung einer breiteren Öffentlichkeit für die Möglichkeiten der Quantenkommunikation.

Langfristig sollte sich am Standort Erlangen nach der Erfüllung dieser Ziele und in Kollaboration mit den Verbundpartnern und ähnlichen Initiativen und Netzwerken ein dichtes Ökosystem von Angeboten für den Wissenstransfer von der Forschung im Bereich der Quantenkommunikation in entsprechende Hochtechnologieunternehmen entwickeln. Das Teilvorhaben qp-tech.edu.ee legte dazu die Keimzelle im Bereich der Quantenkommunikation auf der Basis der Elektrotechnik.

1.3. Zielerreichung

Alle vorab formulierten Ziele konnten erreicht werden. Während des Projektverlaufs sind keine für die Durchführung des Vorhabens relevanten oder schädlichen F&E-Ergebnisse Dritter bekannt geworden.

2. Zielsetzung

Das Teilvorhaben qp-tech.edu.ee an der FAU Erlangen-Nürnberg hatte innerhalb des Gesamtverbundes die hauptsächliche Aufgabe, konzeptionelle und inhaltliche Beiträge für ein Aus- und Weiterbildungsangebot im Bereich „Quantenkommunikation auf dem Fundament der Elektrotechnik“ zu entwickeln. Mit der Quantenkommunikation deckte das Teilprojekt dabei einen zentralen Inhaltsbereich der Quantentechnologie ab, ohne den ein Weiterbildungsangebot zu Quantentechnologien nicht marktfähig wäre. Die besondere Einbeziehung der Elektrotechnik integrierte dabei die quantentechnologischen Anwendungen in ihr technisches Umfeld und gestaltete die zu entwickelnden Bildungsinhalte von Beginn an anwendungsnah und attraktiv für Lernende aus der Industrie.

Hierfür wurden vier Arbeitspakete (AP1-AP4) definiert. Konkret wurden durch die Arbeitspakete des Teilvorhabens die folgenden Zielsetzungen adressiert:

- **AP1 qp-tech.analytics** zielte auf die Analyse und Berücksichtigung der Aus- und Weiterbildungsbedürfnisse der Zielgruppe. Die Erkenntnisse des Arbeitspakets sollten dabei unmittelbar in die anderen AP eingehen. qp-tech.edu.ee konzentrierte seine Abfrage auf Weiterbildungsbedarf im Bereich Elektrotechnik und Technologien aus der Quantenkommunikation, nutzte aber ebenso Analyseergebnisse der Projekte der Verbundpartner und stellte diesen die eigenen Ergebnisse zur Verfügung.
- **AP2 qp-tech.study** fokussierte die Stärkung der Integration der Quantentechnologien, insbesondere der Quantenkommunikation, in die Hochschullehre. Schwerpunkt war hier die Zielgruppe der Studierenden und die Ausgestaltung innovativer Lehrveranstaltungen.
- **AP3 qp-tech.pro** war das Kernstück des Teilprojekts qp-tech.edu.ee. Es beinhaltete die Entwicklung von digitalen Lernmodulen für Fach- und Führungskräfte. Diese sollten in die, von der Gesamtprojektleitung an der FSU Jena vorbereitete und gepflegte, Moodle-Plattform integriert und nachhaltig verfügbar gehalten werden. Teilnehmende aus der Industrie sollten die Inhalte auf diese Weise zeit- und inhaltsflexibel bearbeiten können.
- **AP4 qp-tech.experience** zielte auf die Stärkung der Sichtbarkeit und Akzeptanz der Quantentechnologien in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Es sollten insbesondere auch Möglichkeiten für niedrigschwellige, kollaborative Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Quantenkommunikation ausgelotet werden.

3. Wesentliche Ergebnisse und Arbeiten der einzelnen Arbeitspakete

Die Arbeiten im Projekt qp-tech.edu.ee an der FAU organisierten sich in vier Arbeitspaketen mit jeweils spezifischer Zielsetzung und Aufgaben. Aufgrund der arbeitsmarktbedingten Verzögerungen bei der Einstellung von passendem hochqualifiziertem Personal wurden die konkreten Projektarbeiten Mitte 2022 begonnen.

3.1. AP1 qp-tech.analytics: Bedarfsanalyse und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen

Im AP1 qp-tech.analytics stand die kontinuierliche Beschäftigung mit dem Aus- und Weiterbildungsbedarf der Industrie im Bereich „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik“ im Zentrum. Ziel war, inhaltliche Schwerpunkte und Rahmenbedingungen zu erfassen, die ein Weiterbildungsangebot in diesem Themenfeld für die Zielgruppe *Professionals* berücksichtigen muss, um erfolgreich zu sein.
Die Bedarfsermittlung erfolgte mittels Interviews, durch die Erstellung eines Fragebogens sowie im engen Austausch mit den beteiligten Partnern des Projekts qp-tech.edu und anderen QT-Bildungsinitiativen (insb. im Rahmen von Treffen der Koordinatoren der Projekte aus der BMBF-Förderlinie „Quantum Futur Education“). Weiterhin flossen in die Analyse von Aus- und Weiterbildungsbedarfen im Bereich Quantentechnologien die Ergebnisse einer intensiven Auseinandersetzung mit aktuellen Erkenntnissen der empirischen Bildungsforschung zu „Quantum Education“ (z.B. Studie zu Weiterbildungsbedürfnissen der „Future Quantum Workforce“ von Greinert/Müller/Bitzenbauer/et al. 2022) und mit dem *European Competence Framework for Quantum Technologies* ein, an dessen Initialstudie maßgeblich die Physik-Didaktik der FAU beteiligt war.

Da es sich als herausfordernd herausstellte, Industrievertreter im großen Stil zu befragen (Gründe: Zeitmangel aufgrund des akuten Fachkräftemangels in der Industrie, Vertraulichkeit von Industriekontakten, fehlende Identifikation mit dem Thema „Quantentechnologien“), wurde für die im Projekt geführten Interviews vorrangig auf interne Expertise zurückgegriffen. Auf Basis von insgesamt 15 Rückmeldungen von Forschenden aus dem Bereich Quantentechnologien an der FAU und aus der Industrie wurde ein „*white paper“* für den internen Gebrauch erstellt, das die Ergebnisse der Bedarfsabfrage übersichtlich zusammenfasst. Dieses wird in zukünftige Planungen und konzeptionelle Diskussionen zur weiteren Stärkung und dem Ausbau von Forschung und Lehre in den Quantentechnologien an der FAU Eingang finden.
Weiterhin wurde durch die Veröffentlichung des Konzepts für das Curriculum der digitalen Lernmodule (s. AP 3) zum Thema „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik“ auf der Webseite des Verbundprojekts qp-tech.edu eine Möglichkeit für alle Interessierten geschaffen, zu den Lehrinhalten Feedback zu geben.

Insgesamt zeichnete sich ab, dass der Bildungsbedarf der Industrie sehr heterogen ist – von allgemeinen Überblicksvorträgen zum Thema „Quantentechnologien“ bis

hin zu tiefgehenden und fachlich auf hohem Niveau stattfindenden Workshops für Experten. Dieser Eindruck deckte sich auch mit den Erfahrungen der Verbundpartner des Projekts. Insbesondere der Bildungsbedarf im Bereich der Quantenkommunikation scheint sich dabei vorrangig auf den Bereich der Expertinnen und Experten zu konzentrieren. Dabei ist eine breite Öffnung von Kenntnissen und Aktivitäten der aktuellen Forschung aufgrund der im Bereich der Quantenkommunikation relevanten Sicherheits- und Vertraulichkeitsfragen (Stichwort: kritische Infrastruktur) nicht ohne weiteres möglich. Bildungsangebote in diesem Bereich müssen dementsprechend gut vorbereitet und ggf. geschützt sein. Aus diesem Grund erfolgt der Wissenstransfer zwischen Industrie und universitärer Forschung im Bereich Quantenkommunikation in der Regel im Rahmen gemeinsamer, eng abgesteckter Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Konsequenzen für die in AP3 zu entwickelnden, breit zugänglichen, digitalen Lehrmodule war daher, dass sich diese auf die Grundlagen der Quantenkommunikation beschränken mussten.
Für das Themenfeld „Quantenkommunikationstechnologie auf dem Fundament der Elektrotechnik“ zeigte die Bedarfsabfrage weiterhin, dass das Schnittfeld zwischen Physik und Elektrotechnik präzise die Arbeitsrealitäten in der Industrie spiegelt, insofern dort in der Regel interdisziplinäre Teams an der Entwicklung und Umsetzung von quantentechnologischen Anwendungen zusammenarbeiten. Gleichzeitig stellte sich heraus, dass diese Interdisziplinarität auch besondere Herausforderungen bringt (unterschiedliche Fachkulturen und -sprachen, heterogene Wahrnehmung von in der Praxis bestehenden Anforderungen). Weiterbildungsangebote, die an diesem Punkt ansetzen und für einen intensiveren interdisziplinären Austausch sorgen bzw. „Übersetzungsarbeit“ leisten, versprechen daher grundlegend einen besonders hohen Mehrwert.

3.2. AP2 qp-tech.study: Entwicklung von Lehr- und Studienformaten

Im AP2 qp-tech.study stand die Stärkung der Hochschullehre an der FAU im Bereich Quantentechnologien, insbesondere Quantenkommunikation, im Fokus.

Bereits seit 2019 hat die FAU mit gezielten Berufungen die Forschungs- und Lehrkapazität im Bereich Quantentechnologien massiv und strategisch ausgebaut.
2019 wurde Prof. Michael J. Hartmann auf den Lehrstuhl für Theoretische Physik (Quantum Theory) berufen. Es folgte 2020 die Berufung von Prof. Maria Chekhova an das Institut für Optik, Information und Photonik. Im Mai 2022 wurde Prof. Christoph Marquardt auf den Lehrstuhl für Optische Quantentechnologien berufen. Seit April 2023 hat Prof. Christopher Eichler den Lehrstuhl für Experimentalphysik mit Schwerpunkt „Quantum Computing“ inne. Im Juni 2023 wurde Prof. Roland Nagy auf den neu etablierten Lehrstuhl für Angewandte Quantentechnologien (AQuT) am Department Elektrontechnik-Elektronik-Informationstechnik berufen.

Nicht zuletzt aufgrund eigener langjähriger Industrieerfahrungen dieser Lehrenden und zahlreicher Forschungsprojekte mit Industriebeteiligung ist die Perspektive der Industrie in der Lehre im Bereich Quantentechnologien an der FAU stets berücksichtigt.

Um Studierenden eine zielgerichtete und gegenüber potenziellen Arbeitgebern verifizierbare Qualifikation (Zeugnis) im Bereich Quantentechnologien zu ermöglichen, wurden neue Schwerpunkte im Rahmen des Master-Studiengangs Physik und der Bachelor- und Master-Studiengänge Elektrotechnik etabliert:

- Der neue Studienschwerpunkt „Quantum Technologies“ im M.Sc. Physik startete zum WS 2022/23.
- Die neue Studienrichtung „Angewandte Quantentechnologien“ im B.Sc./M.Sc. Elektrotechnik wurde zum WS 2023/24 eingerichtet.

Der Studienschwerpunkt „Quantum Technologies“ im M.Sc. Physik kombiniert Vorlesungen aus dem Bereich Optik und Photonik mit Spezialvorlesungen wie „Quantum Computing“ oder „Superconducting Circuits and Qubits“. Weiterhin können Studierende im Rahmen des Studienschwerpunkts auch entsprechende Lehrveranstaltungen der Elektrotechnik belegen (siehe nächster Abschnitt).

Die Studienrichtung „Angewandte Quantentechnologien“ im B.Sc./M.Sc. Elektrotechnik integriert physikalische Grundlagenvorlesungen wie „Quantenmechanik“ und Spezialvorlesungen der Elektrotechnik z.B. „Quantenelektronik“, „Quanten-Interface-Elektronik“ oder „Quanteninformationstechnologie“. Die Studierenden werden so befähigt, Quantenanwendungen zu verstehen, einzusetzen, andererseits aber auch diese zu realisieren. Hierfür wird den Studierenden im Bereich Hochfrequenztechnik (Qubit-Manipulation), Interface-Elektronik (Qubit-Ansteuerung/Auslesen) und Bauelementetechnologie (Erzeugung von Qubits) Wissen vermittelt.

Es wurden weiterhin zwei neuartige, interdisziplinäre Lehrveranstaltungen zur Quantenkommunikation entwickelt und durchgeführt (Physik: Prof. C. Marquardt, Elektrotechnik: Prof. B. Schmauss), die Perspektiven der Physik und der Elektrotechnik verbinden. Diese legen an der FAU den Grundstein für innovative Lehre im Bereich „Quantenkommunikation im Schnittfeld von Elektrotechnik und Physik“. Ein Großteil der Lehrinhalte wurde dabei komplett neu entwickelt, da, aufgrund der Neuartigkeit und hohen Entwicklungsdynamik dieses Lehr- und Forschungsgebiets, nicht auf etablierte Inhalte und Lehrmaterialien zurückgegriffen werden konnte. In ihrer konsequent interdisziplinären Perspektive antworteten die Lehrveranstaltungen dabei auch auf einen der wichtigsten Aspekte des industriellen Bildungsbedarfs in diesem Themenfeld.

- Seminar „Quantum Communication“ wurde neu entwickelt und erstmalig im SS 2023 durchgeführt.
- Vorlesung „Quantum Communication“ wurde neu entwickelt und erstmalig im SS 2024 gehalten.

Ein weiterer Meilenstein für die Erhöhung der Sichtbarkeit und Zugänglichkeit des bestehenden und zukünftig geplanten Lehr- und Studienangebots an der FAU im Bereich Quantentechnologien wurde durch die Gründung des FAU Profile Centers Light.Matter.QuantumTechnologies im Juni 2023 gelegt.
Das FAU LMQ bündelt alle Aktivitäten in Forschung, Lehre und Outreach im Bereich Quantentechnologien an der FAU. Interessierte aus der Industrie, Studierende, For-

schende und auch die breite Öffentlichkeit können sich mithilfe des Centers schnell einen Überblick über aktuelle Themen, Ansprechpersonen, Lernangebote und Möglichkeiten zum aktiven Mitwirken im Bereich Quantentechnologien verschaffen.

Abbildung 1: Website des LMQ

Abbildung 2: Erster LMQ Workshop am 26.04.2024

Perspektivisch sollen die im Rahmen des Teilvorhabens qp-tech.edu.ee neu entwickelten Lehrveranstaltungen ebenso wie die aus der Projektarbeit gewonnene Expertise im Bereich Quantum Education in die Gründung eines interdisziplinären Masterstudiengangs „Quantum Engineering and Technologies“ einfließen. Dieser soll künftig das Fachwissen der Fakultät für Naturwissenschaften und der Fakultät für Ingenieurwissenschaften miteinander verbinden. Die Zielgruppe umfasst Studierende aus den Fachbereichen Physik, Elektrotechnik, Informatik und Chemie.

3.3. AP3 qp-tech.pro: Weiterbildung für die Industrie

Das AP3 qp-tech.pro zielte auf die Entwicklung von Weiterbildungsangeboten im Bereich Quantenkommunikation für die Zielgruppe aus der Industrie. Hierfür hat das Teilprojekt qp-tech.edu.ee seine Expertise kontinuierlich sowohl in den fachlichen Austausch mit den Verbundpartnern wie auch in die im Projektverlauf am Standort Jena organisierten Workshops für Industrievertreterinnen und -vertreter aktiv eingebracht. Insbesondere sind die Fachvorträge von Prof. C. Marquardt und Prof. R. Nagy bei den qp-tech.edu-Online-Workshops im Oktober 2022 und im Januar 2023 hervorzuheben.

Am Standort Erlangen erfolgte zudem ein stetiger Wissenstransfer von der Forschung im Bereich Quantenkommunikation in die Industrie im Rahmen der Aktivitäten des Leuchtturmprojekts QuKomIn des Munich Quantum Valley (MQV). Das QuKomIn-Projekt entwickelt ein hybrides Glasfaser-Testnetzwerk für die Quantenkommunikation, das Satellitenverbindungen und Anwendungslabore in den Regionen Erlangen/Nürnberg und München/Oberpfaffenhofen miteinander verbindet. In enger Zusammenarbeit mit Initiativen in Sachsen, Thüringen und dem QuNET-Programm des BMBF bringt das Projekt die FAU mit Partnern wie Fraunhofer IIS, DLR und LMU zusammen. Nicht zuletzt war die FAU (Prof. C. Marquardt und Team) aktiv am Aufbau des Deutschen Industrieverbunds für Quantensicherheit (DIVQSec) beteiligt. Dieser arbeitet, in engstem Austausch mit Industriepartnern wie KEEQuant, Deutsche Telekom, Rohde & Schwarz, TESAT oder Airbus, daran, eine gemeinsame nationale und europäische Wertschöpfungskette für Technologien aus dem Bereich der Quantensicherheit zu etablieren.

Das konkrete Kernstück der Arbeiten im AP3 qp-tech.pro im Teilprojekt qp-tech.edu.ee war, ein digitales Lehrangebot im Bereich Quantenkommunikation auf Basis der Elektrotechnik für die Zielgruppe der *Professionals* aus der Industrie zu erarbeiten und auf der Lehrplattform (Moodle) des Verbundprojekts zu veröffentlichen.

Es handelte sich um fachlich äußerst anspruchsvolle und weitgehend neuartige Lehrinhalte, für die es keine Blaupause gab. Es wurde ein umfassendes Curriculum inklusive inhaltlich-didaktischer Konzeption und Zeitplan erstellt. Das Curriculum umfasste fünf Module, deren Inhalte mittels Videos und begleitender Dokumentation anschaulich vermittelt werden sollten. Je nach thematischer Konturierung der einzelnen Module konnte die konkret realisierte Darstellungsform variieren.

Inhaltlicher Fokus der interdisziplinären Lehrmodule sollte die Darstellung der quantentheoretischen Grundlagen im Kontext elektrotechnischer Systeme sein. Leitend war dabei stets der Anspruch, das für das Verstehen und Entwickeln von Technologien der Quantenkommunikation notwendige Grundlagenverständnis der Quantenphotonik und das ingenieurswissenschaftliche, anwendungsorientierte Wissen zur Verknüpfung und Einbindung von Quantentechnologien in bestehende technische Systeme zu integrieren.

Für die Umsetzung der Lehrmodule wurde hochwertige Ausrüstung (Quantenkoffer von qutools, finanziert aus Landesmitteln) angeschafft und für den didaktischen Einsatz vorbereitet.

Es wurden fünf Module realisiert:

- Avalanche Photodiodes
- High-Speed Quantum State Preparation
- Single Photon Sources for Applications in Quantum Communications
- The First QKD Protocol: BB84
- BB84 with an Attenuated Laser: A Practical Approach

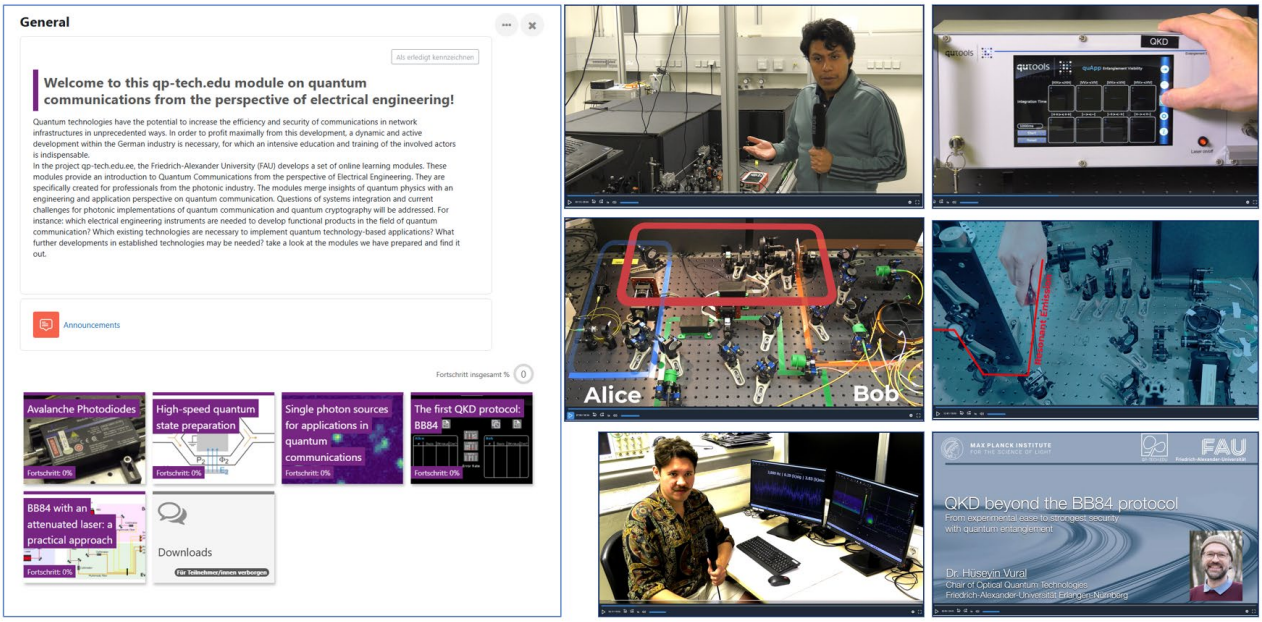

Abbildung 3-9: Screenshot der Lehreinheit „Quantum Communication“ auf der Moodle-Plattform der FSU Jena (Website), Screenshots aus den im Projekt qp-tech.edu.ee erstellten Lehrvideos

Die folgenden Modulbeschreibungen werden auf Englisch wiedergegeben, da die Module selbst englischsprachig sind und Englisch im Bereich der Physik und Quantentechnologien die etablierte Fach- und Arbeitssprache darstellt.

- **Avalanche Photodiodes**: *Avalanche photodiodes (APDs) amplify optical signals by converting photons into cascades of electron-hole pairs, enabling detection of weak light. They are key to high-speed optical communications and have advanced single-photon detection for quantum technologies. Thus, in the single-photon regime, single-photon avalanche diodes (SPADs) support Quantum Key Distribution (QKD) deployment. This module introduces the fundamental principles of SPADs and their operation challenges when integrated into a quantum optics experimental setting.*

  Das Modul wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts erstellt. Es entstanden 24 min. Theorievideo, 28 min. Anwendungsvideo und eine PDF-Dokumentation.

- **High-Speed Quantum State Preparation**: *Quantum Key Distribution (QKD) faces challenges like loss, noise, cost, and complexity while needing compatibility with existing networks. Integrating QKD into classical communication systems can make deployment more practical. This module dwells on the usage of Mach-Zehnder Modulators (MZMs) for high-speed optical quantum state preparation, a step toward chip-scale photonic integration between classical and future quantum communications networks.*

  Das Modul wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik erstellt. Es entstanden 27 min. Theorievideo und eine PDF-Dokumentation.

- **Single Photon Sources for Applications in Quantum Communications:** *This module introduces key concepts within the broader domain of single-photon sources, essential to quantum communication technologies and research. In particular, this module is built around the demonstration of an efficient single-photon source based on color centers where cross-polarisation detection is performed. The module shows how innovative single-photon sources combined with progress in superconducting detection, are paving the way for the practical implementation of secure quantum communication systems at the interface of physics and electrical engineering.*

Das Modul wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Angewandte Quantentechnologien erstellt. Es entstanden 8 min. Theorievideo, 20 min. Anwendungsvideo und eine PDF-Dokumentation.

- **The First QKD Protocol: BB84:** *Using quantum mechanics, Quantum Key Distribution (QKD) enables secure key exchange between distant parties, forming a core part of quantum communications. This module introduces QKD through the first protocol, BB84 (1984), by Bennett and Brassard, which encodes information in the polarisation state of light. The module discusses the foundational ideas behind the BB84 protocol and explains why it still serves as a robust method for QKD. In addition, it presents an experimental implementation using an educational kit.*

  Das Modul wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Optische Quantentechnologien und der FSU Jena erstellt. Es entstanden 20 min. Theorievideo und 18 min. Anwendungsvideo.

- **BB84 with an Attenuated Laser: A Practical Approach:** *Quantum key distribution (QKD) aims to generate a shared secret key securely between distant parties. While quantum mechanics ensures theoretical security, this alone is not sufficient in practice. In addition, cost and implementation ease are also important considerations. This module addresses both issues. Notably, the BB84 protocol using coherent pulses remains widely deployed due to its experimental simplicity and relatively low cost. The module begins by discussing practical implementations and extensions of this protocol through concrete examples and also covers the use of quantum entanglement. It then examines the implications of choosing an attenuated laser as a source instead of true single photons, highlighting associated speed and security considerations. Finally, the module explores a range of quantum-hacking attacks and their signatures, which must be managed to prevent information leakage.*

  Das Modul wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Optische Quantentechnologien und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts erstellt. Es entstanden 29 min. Theorievideo, 30 min. Anwendungsvideo und eine PDF-Dokumentation.

Die Lehrmodule wurden auf der digitalen Moodle-Lernplattform, die durch die FSU Jena betreut wird, hochgeladen. Dort fügen sich die Module dynamisch in das im Gesamtprojekt qp-tech.edu erstellte Lehrangebot zu Quantentechnologien ein. Dem Lernenden steht damit ein thematisch umfassendes Angebot an Modulen zur Verfügung, die im Selbststudium zeitlich flexibel und – je nach persönlichen Interessen – unabhängig voneinander bearbeitet werden können. Damit erfüllt das Lehrangebot die wichtige Forderung der Zielgruppe der *Professionals* nach zeitlicher und örtlicher Flexibilität.

Die Nachhaltigkeit der im Rahmen von qp-tech.edu.ee erfolgten Entwicklungsarbeiten ist durch die Verstetigung des Angebots auf der Moodle-Plattform der FSU Jena gesichert. Weiterhin sollen die Module auch in an der FAU angebotenen Lehrveranstaltungen Verwendung finden, sodass die Inhalte eine möglichst große Zahl Studierender und Interessierter erreichen.

3.4. AP4: qp-tech.experience: Öffentlichkeitsarbeit und Vernetzung

Das AP4 qp-tech.experience zielte auf die Stärkung der Sichtbarkeit und Akzeptanz der Quantentechnologien in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Es sollten insbesondere auch Möglichkeiten für niedrigschwellige, kollaborative Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Quantenkommunikation ausgelotet werden.

Die großflächige Umsetzung von bidirektionalen Sabbaticals hat sich dabei als problematisch und nicht passgenau zum veränderten Bedarf der Industrie erwiesen. Neben vielfältigen rechtlichen Herausforderungen sah sich die Industrie angesichts des akuten Fachkräftemangels kaum mehr in der Lage, Personal langfristig zu Fortbildungszwecken in Forschungseinrichtungen zu entsenden. Auf dem Milestone Meeting des Verbundprojekts (23. August 2023) wurde dementsprechend mit dem Projektträger vereinbart, das Format „Sabbaticals“ flexibler auszulegen und nach alternativen Möglichkeiten zu suchen (z. B. Industriepromotionen, individuelle, hybride Postdoc- und Industriebeschäftigung). So wurde innerhalb der Laufzeit des Teilprojekts eine Industriepromotion in der Gruppe von Prof. C. Marquardt begonnen.

Die Outreach-Aktivitäten am Standort Erlangen konnten zielgenau an bereits etablierte Formate anknüpfen (z. B. 2022: Outreach-Vortrag zu „Quantum Computing“ von Prof. C. Eichler am Zukunftsmuseum Nürnberg, 2023: Quantenradar-Podcast mit Prof. C. Marquardt zum Thema Quantenkommunikation, Lange Nacht der Wissenschaften an der FAU) und bestehende Netzwerke nutzen (insb. Vernetzung mit Outreach-Aktivitäten des FAU Profile Center Light.Matter.QuantumTechnologies und des TRR 306 QuCoLiMa). Weiterhin wurden neue Formate und Angebote entwickelt. So wurde im Oktober 2023 die interaktive Ausstellung panOPTICUM eröffnet, die sich an Schülerinnen und Schüler, Studierende und die interessierte Öffentlichkeit wendet. Mithilfe zahlreicher interaktiver Experimente lässt die Ausstellung Prinzipien der Photonik und der Quantenoptik nachvollziehbar und direkt erlebbar werden. Damit leistet die Ausstellung einen wertvollen Beitrag zur Stärkung des Verständnisses und der Akzeptanz von technologischen Neuerungen auch im Bereich Quantentechnologien. Das panOPTICUM wird durch die Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT) dauerhaft betrieben.

Abb. 10-12: Impressionen aus dem panOPTICUM (Fotos: SAOT/Max Gmelch)

Zur Verstetigung und weiteren Zuspitzung der Öffentlichkeitsarbeit auf den Bereich der Quantenkommunikation sollen die im Projektzusammenhang geleisteten Arbeiten in die Konzeption und Umsetzung eines Quantum Communications Application Centers Eingang finden. Dieses Center soll sowohl für gemeinsame Entwicklungsarbeiten mit der Industrie als auch als Showroom und Veranstaltungsort für die breitere Öffentlichkeit genutzt werden. Das Quantum Communications Application Center wird im Rahmen des Leuchtturmprojekts QuKomIn des Munich Quantum Valley (MQV) umgesetzt.

4. Ausblick: Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit, Verwertung der Ergebnisse nach Projektende

Die Nachhaltigkeit der Ergebnisse des Teilvorhabens qp-tech.edu.ee beruht wesentlich auf der im Bereich der Weiterbildung von *Professionals* neu gewonnenen Expertise. Die enge Kooperation mit Industriepartnern erfolgte bisher vorrangig im Rahmen von thematisch fokussierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten und in der fachlichen Vernetzungsarbeit. Die Erkenntnisse aus der im Rahmen des Teilprojekts qp-tech.edu.ee erfolgten Auslotung der spezifischen Anforderungen an dezidiert für Industrievertreter entwickelte Bildungsangebote haben insbesondere den Blick für die universitären Voraussetzungen, geeignete Formate und die inhaltliche Orientierung erfolgreicher Weiterbildungsangebote, die sich an Industrievertreterinnen und -vertreter richten, geschärft. Dieses Wissen wird maßgeblich dazu beitragen, zukünftige Initiativen im Bereich Quantum Education – z. B. auch im Rahmen der FAUAcademy – an der FAU zielgenau auszurichten und erfolgreich umzusetzen.

Die in qp-tech.edu.ee neu entwickelten digitalen Lehrmodule zur Quantenkommunikation werden als Teil des umfassenden Weiterbildungsangebots zu Quantentechnologien für Selbstlernende aus der Industrie auf der Moodle-Plattform der FSU Jena dauerhaft und kostenlos zur Verfügung stehen. Weiterhin werden die Module aktiv in Lehrveranstaltungen an der FAU integriert und so weitreichende Verbreitung erfahren.