DE-QOR

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

BMFTR-Verbundprojekt: DE-QOR (FKZ: 16KISQ055)

Teilvorhaben: Kohärenter optischer Detektor für das CV-QKD-Empfängermodul

Sachbericht: Teil II (Eingehende Darstellung)

Zuwendungsempfänger:
Microwave Photonics GmbH (MWP)

MICROWAVE PHOTONICS

17. Oktober 2025

https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/de-qor

Gefördert durch:
Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

BMFTR-Verbundprojekt
FKZ: 16KISQ055

MICROWAVE PHOTONICS

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis 3

1. Einleitung 5
   - 1.1 Motivation 5
   - 1.2 Ziel des Verbundprojektes 5
   - 1.3 Teilvorhabenspezifisches Ziel (MWP) 6

2. Konsortium des Verbundprojektes und Beteiligung des Teilvorhabens an den Arbeitspaketen 7
   - 2.1 Konsortium 7
   - 2.2 Arbeitspakete 7

3. Erzielte Ergebnisse in den Arbeitspaketen 8
   - 3.1 Systemkonzept (AP1.1) 8
   - 3.2 Spezifikation für Subsysteme (AP1.2) 9
   - 3.3 Optisch kohärenter Einkanal-CV-QKD-Empfänger (AP2.2) 11
   - 3.4 Aufbau eines integrierten kohärenten Empfängers (AP5.3) 16
   - 3.5 Systemdemonstrator Labor (AP6.1) 22

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse 23
   - 4.1 Technologie 23
   - 4.2 Komponentenverbesserung und Erweiterung des Produktportfolios 23
   - 4.3 Know-how Transfer 24
   - 4.4 Wissenstransfer 24

5. Zusammenfassung 25

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMFTR-Verbundprojekt
FKZ: 16KISQ055
MICROWAVE PHOTONICS

1. EINLEITUNG

Der Fördergegenstand in der Bekanntmachung „Innovationshub für Quantenkommunikation“ [1] umfasst die Erforschung industrierelevanter Fragestellungen der Quantenkommunikation zur gezielten Unterstützung und Entfaltung des Technologietransfers aus der Wissenschaft in die Wirtschaft.

Im Rahmen der vorliegenden Bekanntmachung wurde auch das im Januar 2022 gestartete Verbundprojekt DE-QOR („Design hochperformanter CV-QKD-Module für den flexiblen Einsatz in quantensicheren optischen Metro- und Weitverkehrsnetzen“, FKZ: 16KISQ055) finanziell von dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unterstützt [2].

1.1 Motivation

Gegenwärtig wird die Sicherheit in der Kommunikation mit Hilfe von kryptographischen Verfahren gewährleistet. Der Einsatz der vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) empfohlenen Verschlüsselungsmethoden ermöglicht zwar in der heutigen Zeit genügende Sicherheit, ist jedoch zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die Entschlüsselung von leistungsstarken Quantencomputern gefährdet. Die Gefährdung durch eine mögliche Speicherung (store now) und Entschlüsselung zu einem späteren Zeitpunkt (decrypt later) trifft besonders Behörden und Firmen. Aus diesem Grund versucht man derzeit die gängigen Verfahren durch quantenkryptographische Ansätze zu bereichern. Hierbei werden Kryptoschlüsselpaare über einen abhörsicheren Quantenkanal verteilt.

Die Übertragung der Schlüssel basierend auf physikalischen Verfahren stellt das Prinzip für die sogenannte Quantum Key Distribution (QKD) dar, welches ein Abhören unmöglich machen soll. Auch wenn die Umsetzung eines zertifizierten Systems aus deutscher Hand an dieser Stelle großes Interesse weckt, müssen aus technischer Sicht momentan immer noch Einschränkungen, wie die begrenzte Reichweite beim Einsatz auf Glasfaserstrecken und die Verfügbarkeit an kompakten und robusten Systemen mit integrierten Komponenten (verbunden mit hohen finanziellen Kosten), bewältigt werden.

1.2 Ziel des Verbundprojektes

Das Verbundprojekt DE-QOR hatte sich zum Ziel gesetzt, die auf physikalischen Prinzipien basierende Quantenschlüsselverteilung (QKD) so weiterzuentwickeln, dass sie als ergänzende Sicherheitsmaßnahme für die fasergebundene Standortvernetzung im Metro- und Weitverkehrsbereich eingesetzt werden kann. Unter Verwendung vertrauenswürdiger kohärenter optischer Übertragungstechnik und digitaler Echtzeit-Signalverarbeitung sollte zu diesem Zweck ein hochperformantes und zertifizierbares Continuous-Variable-QKD-Modul „Made in Germany“ spezifiziert, bis zur Systemdemonstration im Betriebsumfeld [3] entwickelt, sicherheitstechnisch geprüft und im praktischen Feldeinsatz demonstriert werden.

Im Rahmen des Verbundprojektes sollten zentrale Komponenten sowohl auf Sender- als auch Empfängerseite entwickelt und die Integration zu kompakten Systemen vorangetrieben werden. Dabei handelte es sich um optische Module und die dazugehörige Elektronik, deren stetige Aktualisierbarkeit und Optimierung der Firmware durch Fernwartung ermöglicht werden sollten.

Mit einer angestrebten Reichweite von mehr als 80 km im Feldeinsatz sollten bei einer sicheren Schlüsselrate sowohl unverstärkte Metro- als auch verstärkte Weitverkehrsstrecken mit zwischengeschalteten Relay-Knoten adressiert werden. Hierbei strebten die Verbundpartner an, möglichst hohe Übertragungsgeschwindigkeiten zu ermöglichen und die Vorarbeiten zur Erleichterung

einer Standardisierung und Zertifizierung nach Projektende zu leisten, um so die Erschließung eines möglichst großen Anwenderkreises zu gewährleisten.

1.3 Teilvorhabenspezifisches Ziel (MWP)

Üblicherweise lassen sich CV-QKD-Systeme mit erprobten und kostengünstigen Komponenten aus der Telekommunikationsindustrie realisieren. Die meisten der bisher vorgestellten CV-QKD-Systeme sind Laboraufbauten, die mit diskreten photonischen Komponenten und elektronischen Subsystemen realisiert wurden. Für kommerzielle Anwendungen ist dies zu unpraktisch, zu voluminös und zu teuer.

Das Ziel dieses Teilvorhabens des Verbundpartners Microwave Photonics GmbH (MWP) war es, basierend auf den Ergebnissen aus der Grundlagenforschung einen integrierten optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfänger mit hoher Empfindlichkeit und einer Bandbreite im Bereich von bis zu 1 GHz zu entwickeln und in Systemexperimenten einzusetzen. Als Phasenreferenz sollte ein Lokaloszillator hoher Leistung mit geringem Phasenrauschen eingesetzt werden. Um die Anforderung einer periodischen Kalibration des CV-QKD-Systems für eine maximale Schlüsselrate bzw. Entfernung zu gewährleisten, sollte ein hierfür notwendiger optischer Schalter auf der Empfängerseite des CV-QKD-Systems integriert werden.

Der in diesem Teilvorhaben entwickelte kohärente Einkanal-CV-QKD-Empfänger bildet die physikalische Schnittstelle zwischen dem empfangenen optischen Quantensignal und der Elektronik zur weiteren digitalen Verarbeitung der Signale auf der Empfängerseite des CV-QKD-Systems (siehe Abb. 1). Er stellt somit eine der Schlüsselkomponenten des CV-QKD-Empfängermoduls dar.

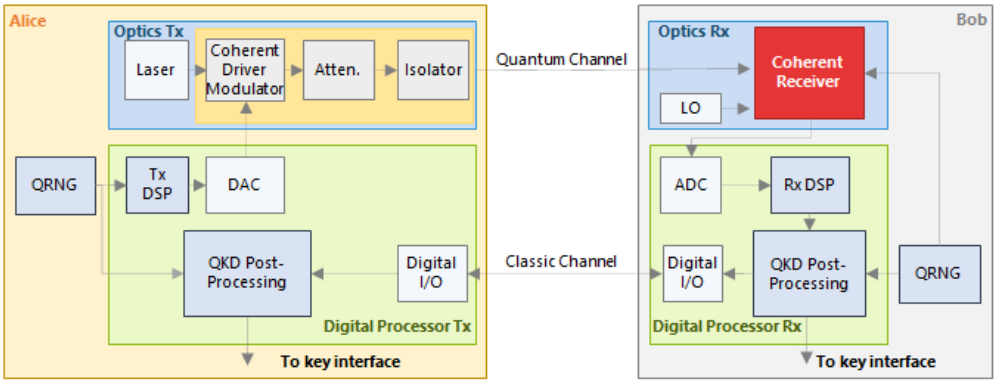

Abb. 1 Vereinfachtes Blockschaltbild der CV-QKD-Modularchitektur des Verbundprojektes DE-QOR. Das im Fokus des Teilvorhabens (MWP) stehende Subsystem „Kohärenter Empfänger“ ist rot hervorgehoben.

Referenzen

[1] https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/foerderung/bekanntmachungen/qkhub

[2] https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/de-qor

[3] h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf (https://european-union.europa.eu)

2. Konsortium des Verbundprojektes und Beteiligung des Teilvorhabens an den Arbeitspaketen

In diesem Kapitel werden das Konsortium des Verbundprojektes DE-QOR und die Projektaktivitäten des Verbundpartners Microwave Photonics GmbH (MWP) in den ausgewählten Arbeitspaketen vorgestellt.

2.1 Konsortium

Die ADVA Network Security GmbH (ADVA) koordinierte das BMFTR-geförderte Verbundprojekt DE-QOR (FKZ: 16KISQ055). Neben dem Verbundkoordinator waren weitere Verbundpartner an dem Verbundprojekt beteiligt:

Rolle des Partners:	***Name der Organisation:***	***Stadt, Land:***
Verbundkoordinator	ADVA Network Security GmbH (ADVA)	Berlin, Deutschland
Verbundpartner	Microwave Photonics GmbH (MWP)	Duisburg, Deutschland
Verbundpartner	Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU)	München, Deutschland
Verbundpartner	Leibniz Universität Hannover (LUH)	Hannover, Deutschland
Verbundpartner	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	Karlsruhe, Deutschland
Verbundpartner	Creonic GmbH (CRE)	Kaiserslautern, Deutschland

Zusätzlich zu den oben aufgeführten Verbundpartnern war das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) als assoziierter Partner an dem Verbundprojekt beteiligt.

2.2 Arbeitspakete

Das Verbundprojekt war in folgende Arbeitspakete (APs) unterteilt:

- AP1: Konzept und Spezifikation,
- AP2: Komponenten und Subsysteme,
- AP3: Sicherheitsanalysen und -tests,
- AP4: Zertifizierung, Evaluierung und Standardisierung,
- AP5: Demonstrationsentwicklung,
- AP6: Systemdemonstration und Feldtests.

Die im Fokus dieses Teilvorhabens (MWP) stehenden Arbeitspakete waren AP1, AP2, AP5 und AP6.

Aufgrund der langjährigen Erfahrung bei der faseroptischen Verteilung von Quantenschlüsseln leistete MWP einen Beitrag zum CV-QKD-Systemkonzeptdesign und der finalen Spezifizierung der CV-QKD-Module in AP1. In AP2 war MWP verantwortlich für die Entwicklung des optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers bestehend aus einem rauscharmen balancierten Photodetektor (BPD), einem 2x2 Multimode-Interferenzkoppler (MMI-Koppler) für die Einkopplung von Signal und Lokaloszillator (LO) und einem Transimpedanzverstärker (TIA). Der integrierte optisch kohärente Einkanal-CV-QKD-Empfänger für die Demonstratorentwicklung wurde von MWP in AP5 aufgebaut. In AP6 trug MWP zur experimentellen Validierung des CV-QKD-Systems bei.

3. Erzielte Ergebnisse in den Arbeitspaketen

Dieses Kapitel diskutiert die erzielten Ergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen (APs): AP1, AP2, AP5 und AP6.

Zum Zweck der Projektkoordination nahm MWP an den folgend aufgelisteten Projektreffen teil:

- 25. Januar 2022, Kick-off-Meeting, Online-Meeting,
- 12./20. April 2022, Projekttreffen, Online-Meeting,
- 2./3. August 2022, Projekttreffen (LMU), München,
- 17./18. Juli 2023, Projekttreffen (CRE), Kaiserslautern,
- 21. September 2023, Projekttreffen, Online-Meeting,
- 22./23. Februar 2024, Projekttreffen (KIT), Karlsruhe,
- 29./30. Oktober 2024, Tests am kohärenten Empfänger (ADVA), München,
- 26./27. März, finaler Projekt-Demonstrator (LMU), München,
- 14-tägliche Online-Statustreffen und diverse bilaterale Online-Meetings.

Diese trugen unter anderem zum erfolgreichen Erreichen aller Meilensteine:

- Beitrag zu M1.1 (AP1, M6) Erstes Systemkonzept fertiggestellt (ADVA, MWP),
- Beitrag zu M1.2 (AP1, M12) Subsysteme spezifiziert (ADVA, MWP),
- M2.1.1 (AP2, M14) Kohärenter optischer Detektor ohne integrierten optischen Schalter und TIA entwickelt (MWP),
- M2.1.2 (AP2, M19) Kohärenter optischer Detektor integriert mit optischem Schalter und TIA zur Integration im Empfängermodul entwickelt (MWP),
- M5.3.1 (AP5, M30) Aufbau des integrierten kohärenten Empfängers (MWP),
- M5.3.2 (AP5, M30) Aufbau des optimierten kohärenten Empfängers (MWP),
- Beitrag zu M6.2 (AP6, M29) Langzeittests des CV-QKD-Moduls im Labor (ADVA, MWP),

und dem reibungslosen Fortschritt dieses Teilvorhabens bzw. des Verbundprojektes im Zeitraum von Januar 2022 bis März 2025 bei.

In AP1.1 betrachtete MWP (zusammen mit ADVA) die Leistung von CV-QKD-Systemen bei verschiedenen Bandbreiten. Insbesondere wurde eine Rauschanalyse von CV-QKD bei verschiedenen Taktraten durchgeführt und die Bandbreitenabhängigkeit verschiedener Rauschquellen untersucht. In der Literatur wurden zwar verschiedene Rauschquellen in CV-QKD untersucht [4], aber der Einfluss der Systemtaktrate wurde nicht berücksichtigt. In AP1.2 wurde eine Übertragungsrate von bis zu 1 GBaud spezifiziert.

3.1 Systemkonzept (AP1.1)

Bei CV-QKD bereitet Alice kohärente Zustände $|\alpha\rangle = |I_A + iQ_A\rangle$ vor, wobei I_A und Q_A die Quadraturwerte sind. Die kohärenten Zustände werden aus einem diskreten Set (M = 4; QPSK bzw. M = 8; PSK) zufällig gezogen und über den Quantenkanal an Bob gesendet. Bei Bob wird ein balancierter Photodetektor (BPD) verwendet, um zufällig I- oder Q-Quadraturwerte jedes Zustands zu messen. Der Quantenkanal ist durch seinen Transmissionsgrad T und sein Exzessrauschen ξ gekennzeichnet. Unter dem linearen Gaußschen Modell mit additivem Gaußschen Rauschen kann die von Bob gemessene Quadraturvarianz V_B wie folgt geschrieben werden: $V_B = \eta T V_A + Z$. Dabei ist η die Effizienz von Bobs Detektoren und Z ist die zur Messung hinzugefügte Gaußsche Rauschvarianz. Durch Schätzung der Parameter η, T und Z

können Alice und Bob Eves Informationen begrenzen und den endgültigen sicheren Schlüssel extrahieren.

Um die Leistungsfähigkeit von CV-QKD-Systemen mit hoher Bitrate zu bewerten, ist es wichtig, das Verhalten der Rauschvarianz $Z = N_0 + \eta T\xi + V_{ele}$ bei höheren Detektionsgeschwindigkeiten zu untersuchen. Dabei ist N_0 die Varianz des Schrotrauschens, ξ ist das Exzessrauschen bei Alice und V_{ele} ist das elektronische Rauschen des Homodyndetektors. Theoretisch wird angenommen, dass ξ vom Abhören herrührt. In der Praxis kann ξ jedoch Beiträge aus einer Reihe von experimentellen Parametern enthalten.

Die Varianz des Schrotrauschens N_0 ist das grundlegende Vakuumrauschen, das mit den kohärenten Zuständen verbunden ist. Alle Parameter eines CV-QKD-Systems werden auf die Schrotrauschvarianz normiert und in Schrotrauscheinheiten (SNUs) ausgedrückt. Daher ist eine sorgfältige und präzise Kalibrierung von N_0 erforderlich. In der Praxis wird N_0 in Bezug auf die LO-Leistung bei Bob gemessen, indem das Signaltor des Homodyndetektors blockiert wird. Um die Voraussetzungen für das lineare Gauß-Modell zu erfüllen, wird der BPD im linearen Bereich betrieben. Um den Einfluss der Nichtlinearitäten im Empfänger sowie möglicher Mischprodukte der Hilfsträger auf das detektierte Quantensignal zu reduzieren, wird für die Synchronisation von Alice und Bob die Nutzung von Polarisationsmultiplex festgelegt.

In diesem Projekt wurde das Konzept des „Local Local Oscillators“ (LLO) verwendet. Daher wird die Leistung des lokalen Oszillators nicht durch die Kanaldämpfung beeinträchtigt und ist nicht durch Eve manipulierbar. Unter den Ursachen für das Exzessrauschen spielt das Phasenrauschen der verwendeten Laser eine wichtige Rolle für die Varianz der Differenz zwischen der geschätzten und der tatsächlichen Phase des Signals relativ zum LO. Im LLO-Schema werden das Signal und der LO von zwei unabhängigen freilaufenden Lasern erzeugt und das Produkt aus Linienbreite und Symboldauer muss $<10^{-4}$ sein [4]. Dieses Rauschen begrenzt die erreichbare Übertragungsdistanz des LLO-Verfahrens auf einige zehn Kilometer. Mit der höheren Symbolrate von 1 GBaud wird die relative Drift zwischen den Lasern kleiner und verkleinert somit das Exzessrauschen [5].

Gemeinsam mit ADVA hatte MWP ein erstes CV-QKD-Systemkonzept festgelegt, welches den Beitrag zum Meilenstein M1.1 bildete.

3.2 Spezifikation für Subsysteme (AP1.2)

Um in einem Empfänger die maximale Empfindlichkeit zu erzielen, ist die Leistung des LOs so zu wählen, dass die Detektion nur durch das Schrotrauschen des LOs bestimmt wird. Dies wird erreicht, indem der BPD mit ausreichender LO-Leistung typischerweise >1 mW bei einem CW betrieben LO bzw. typischerweise 10^8 Photonen pro LO-Puls ausgesteuert wird. Der Gewinn im Empfänger ist proportional zur Erhöhung der LO-Leistung. Um diesen zu erhöhen, wurde der von MWP entwickelte BPD mit einer gesamten LO-Leistung von bis zu 20 mW betrieben. Das ermöglichte einen Abstand zum elektronischen Rauschen von >10 dB über der gesamten Bandbreite von bis zu 1 GHz.

Eine zwingende Voraussetzung für die Sicherheit des berechneten Schlüsselmaterials ist, dass das lineare Gauß-Modell erfüllt wird. Bei gepulstem LO nimmt unter der Annahme eines festen Tastverhältnisses für die LO-Pulse die LO-Pulsdauer mit steigender Wiederholrate ab. Um das lineare Verhältnis zwischen Ausgang und Eingang des BPDs aufrechtzuerhalten, muss die Spitzenleistung des LO-Pulses entsprechend erhöht werden. In der Praxis kann dies mit zunehmender Wiederholrate nicht

unbegrenzt geschehen, da die maximal verfügbare Leistung des LO-Lasers und die optische Impulsbelastbarkeit der Photodioden begrenzt ist. Daher wird der LO CW betrieben.

Varianz des Schrotrauschens

Wie bereits weiter oben erläutert, wird in der Praxis die Varianz des Schrotrauschens N_0 in Bezug auf die LO-Leistung bei Bob gemessen, indem das Signaltor des Homodyndetektors blockiert wird. Die Signalleistung bei Bob ist typischerweise <1 Photon/Symbol. Daher können optische Schalter aus Telekommunikationsanwendungen mit einer Extinktion von >40 dB für diesen Teil der Kalibration verwendet werden.

Phasenrauschen der Laser

Als eine der Ursachen für das Exzessrauschen spielt das Phasenrauschen der verwendeten Laser eine wichtige Rolle für die erreichbare Übertragungsdistanz und die sichere Schlüsselrate. In dem LLO-Schema werden das Signal und der LO von zwei unabhängigen freilaufenden Lasern erzeugt. Das Produkt aus Linienbreite und Symboldauer muss $<10^{-4}$ sein. Bei den bisher üblichen Datenraten im MBaud-Bereich begrenzt dieses Rauschen die erreichbare Übertragungsdistanz des LLO-Verfahrens auf einige zehn Kilometer. Mit der höheren Symbolrate von 1 GBaud wird die relative Drift zwischen den Lasern kleiner und kann somit das Exzessrauschen verkleinern. Dies wiederum erhöht die sichere Schlüsselrate. Aus praktischer Sicht werden normalerweise Laser mit schmaler Linienbreite gewählt, um das Phasenrauschen zu minimieren. In Systemen mit höherer Wiederholrate können jedoch auch Laser mit größerer Linienbreite eingesetzt werden [5].

Gleichtaktunterdrückung des balancierten Photodetektors

Die gemessenen Quadraturen in Bobs Empfänger folgen einer Gaußverteilung $N(0,V_B)$ mit einer Varianz V_B und einem Mittelwert von Null. Dieser Mittelwert der Verteilung wird durch den Abgleich des Homodyndetektors festgelegt. Ein Maß für die Qualität eines BPDs ist Gleichtaktunterdrückung. Der von MWP entwickelte BPD sollte eine Gleichtaktunterdrückung von >35 dB (bei 1 GHz) erreichen. Es wurde untersucht, inwieweit ein Teil der Gleichtaktunterdrückung in der nachfolgenden DSP des ADCs kompensiert werden könnte. In der Praxis weicht der BPD-Ausgang mit der Zeit von seinem Anfangszustand ab, so dass der gemessene Mittelwert jeder Quadratur während der Schlüsselübertragung nicht beibehalten wird. Dies kann mehrere Gründe haben, z.B. Temperaturschwankungen, Drift in der Abtastung der Datenerfassung oder deren Taktoszillatoren und zeitliche Schwankungen der Eigenschaften der Detektorelektronik. Innerhalb des gesamten Datenblocks, der in der Regel $>10^{10}$ Abtastwerte umfasst und damit >10 s dauert, manifestiert sich diese Schwankung im Mittelwert der Verteilung in der Schätzung der Signalvarianz V_B und führt zu einem zusätzlichen Beitrag zum Exzessrauschen. Die Zeitkonstanten für diesen Prozess sind nicht abhängig von der Datenrate und können im Bereich von einigen 10 ms liegen. Sie bestimmen somit die zeitliche Gültigkeit der durchgeführten Kalibration des Schrotrauschens.

Bei einer Übertragungsrate von bis zu 1 GBaud wurden für den optisch kohärenten Empfänger eine Bandbreite im Bereich von 700 MHz, eine Gleichtaktunterdrückung von >35 dB, eine Verstärkung von etwa 40 dB (TIA) und eine Rauschdichte des Eingangsstroms von <11 pA/sqrt(Hz) spezifiziert.

Diese Ergebnisse in Abstimmung mit ADVA bildeten die Beiträge von MWP zum Meilenstein M1.2.

Meilensteine (AP1, 1. Projektphase)

Alle Meilensteine aus AP1, d.h. Beiträge zu M1.1 (M6) und M1.2 (M12), wurden erfolgreich innerhalb der ersten Projektphase erreicht.

Referenzen

[4] F. Laudenbach et al., Continuous-Variable Quantum Key Distribution with Gaussian Modulation, The Theory of Practical Implementations, Adv. Quantum Technol. 1(1) (2018) 1800011.

[5] M. Rückmann, S. Kleis, C. G. Schaeffer:17 GBd Sub-Photon Level Heterodyne Detection for CV-QKD Enabled by Machine Learning, Optical Fiber Conference (OFC), Poster Session II / Th2A.54, San Diego, USA, 8.-12. März 2020.

3.3 Optisch kohärenter Einkanal-CV-QKD-Empfänger (AP2.2)

In AP2.2 entwickelte MWP einen optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfänger für ein integriertes CV-QKD-Empfangsmodul. Bisher wurden einzelne Demonstrationen zur Realisierung von breitbandigen balancierten Photodetektoren (BPDs) mit Baudraten bis zu einigen GBaud für Hochgeschwindigkeits-CV-QKD durchgeführt. Bei diesen BPDs ist die optische Leistung des LO-Signales auf <2 mW begrenzt und damit die Empfindlichkeit des Empfängers eingeschränkt. Ein Ziel des Teilvorhabens ist die Entwicklung eines BPDs, der mit einer LO-Leistung von 10 mW pro Photodiode betrieben werden kann.

Balancierter Photodetektor mit integriertem 2x2 Multimode-Interferenzkoppler

Wesentlicher Bestandteil des entwickelten optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers ist ein leistungsstarker und rauscharmer, InP-basierter BPD mit einem integrierten 2x2 Multimode-Interferenzkoppler (MMI-Koppler) sowie einem integrierten Transimpedanzverstärker (TIA).

In der ersten Phase des Projekts entwickelte MWP ein Design des kohärenten Empfängers (siehe Abb. 2, links). Es wurde sowohl das Konzept mit einem eingangsseitig zur BPD gelegenen, integrierten 2x2 MMI-Koppler für Empfang mittels optischer, fasergebundener Kopplung als auch das Konzept zur Integration des TIAs über planare GCPW-Leitungen auf der Ausgangsseite anhand von optischen als auch HF-Simulationen betrachtet und herausgearbeitet (Abb. 2, mittig). Durch den Ansatz der gepaarten Interferenz beim 2x2 MMI-Koppler konnte ein Excess Loss von etwa 0,7 dB erzielt werden. Dank individueller Ansteuerung der Einzel-Photodioden des BPDs bietet der BPD die Möglichkeit, die individuellen Photoströme zu messen, so dass im nachgeschalteten DSP etwaige Imbalancen digital kompensiert werden können. Basierend auf dem Designkonzept und den Simulationsergebnissen wurde ein kohärenter Empfänger-Chip hergestellt (siehe Abb. 2, rechts). Bei der ersten Herstellung bestand der CV-QKD-Empfänger-Chip im Wesentlichen aus zwei Kernkomponenten. Diese waren ein InP-basierter BPD und ein integrierter optischer 2x2 MMI-Koppler. Am Ausgang des BPDs wurde bereits eine planare GCPW-Leitung für die spätere Integration des TIAs integriert.

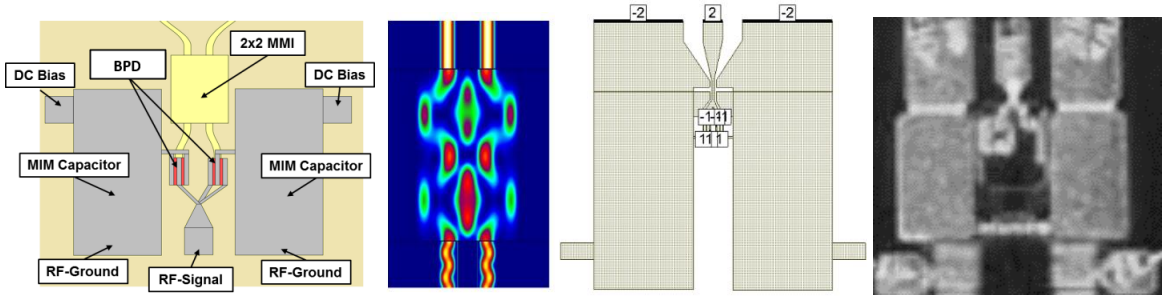

Abb. 2 Konzeptdarstellung (links), Feldsimulation des MMIs und HF-Design (mittig) und InP-BPD-Chip mit 2x2 MMI-Koppler und GCPW-Leitung ohne TIA (rechts) des optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers.

Im Anschluss führte MWP eine erste experimentelle Charakterisierung des BPD-Chips durch. In Abb. 3 sind die Frequenzantwort und das Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR) des vermessenen BPD-Chips zu sehen.

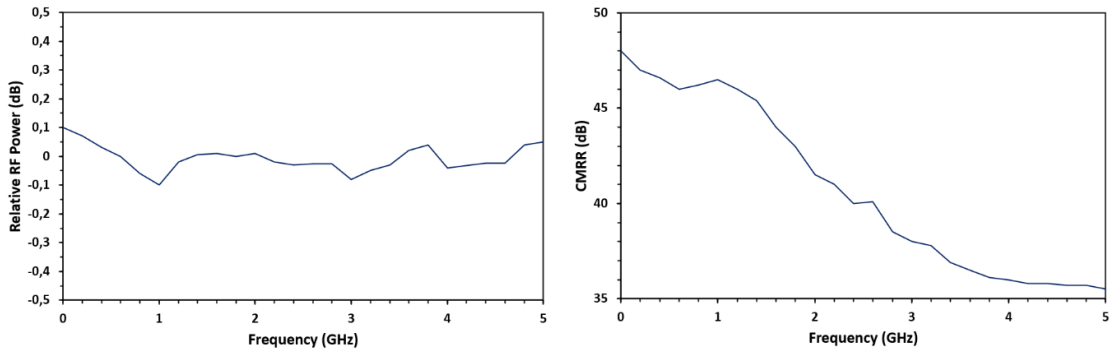

Abb. 3 Relative Frequenzantwort (links) und Gleichtaktunterdrückungsverhältnis (CMRR) des vermessenen BPD-Chips (rechts).

Im Frequenzbereich bis 5 GHz zeigen die Ergebnisse, dass die Erwartungen an den BPD-Chip aus AP1 bereits in dieser frühen Phase des Projektes erfüllt wurden. Im gesamten Frequenzbereich zeigt der BPD-Chip eine flache Frequenzantwort mit einer Fluktuation von +/-0,1 dB und ein Gleichtaktunterdrückungsverhältnis von >35 dB. Die spektrale Effizienz einzelner Photodioden des BPDs lag im Bereich von bis zu 0,64 A/W.

Elektronisches Rauschen des Transimpedanzverstärkers

Die Hauptquelle des elektronischen Rauschens im kohärenten Empfänger ist das thermische Rauschen des TIAs. Um die Quantensignale zu detektieren, muss ein Homodyndetektor empfindlich genug sein, um Schrotrauschen vom elektronischen Rauschen zu unterscheiden. Experimentell wird das Schrotrauschen bestimmt, wenn die Varianz des BPD-Ausgangs linear mit der Leistung des LOs skaliert und das elektronische Rauschen in Bezug auf die Varianz des Schrotrauschens als Funktion der LO-Leistung gemessen wird. Dazu ist das Signaltor im BPD offen. Um die maximale Übertragungsdistanz und Schlüsselrate zu erreichen, sollte das elektronische Rauschen in SNUs so gering wie möglich sein. Das elektronische Rauschen nimmt mit der Bandbreite des TIAs zu.

In der ersten Projektphase wurde eine detaillierte Rauschanalyse für verschiedene Realisierungen des TIAs durchgeführt. Der Messaufbau für die Charakterisierung und Kalibration wurde definiert und in Teilen aufgebaut. Exemplarische Messungen des Schrotrauschens an einem kommerziellen BPD wurden durchgeführt.

Rauschanalyse: Transimpedanzverstärker für CV-QKD Systeme

Der rasche Fortschritt in der Sensorik, z.B. bei optischen Radarsystemen für autonomes Fahren, hat zu der Entwicklung einer neuen Generation von Operationsverstärkern (OPAs) geführt, die ein hohes Gewinn-Bandbreite-Produkt (GBP) von bis zu 8 GHz aufweisen. Sie haben das Potential sehr kostengünstige TIAs mit einer einfachen Aufbautechnik zu verwirklichen. Die Symbolrate des CV-QKD Systems wurde in AP1.1 auf bis zu 1 GBaud festgelegt. Die Bandbreite des TIA sollte daher ca. 1 GHz betragen, so dass die gesamte Verstärkerkette im Empfänger eine Bandbreit im Bereich von 700 MHz aufweist. Die Rauschanalyse aus [6] wurde vergleichend für verschiedene High-Speed OPAs durchgeführt. Die Übertragungsfunktion wies eine Butterworth-Charakteristik auf. Vorgegebene Parameter waren die 3dB-Bandbreite und die Transimpedanz des Verstärkers. Der ausgewählte OPA,

die gewünschte Transimpedanz und die Summe der Kapazitäten am Eingang bestimmten die Bandbreite. Die Gesamtkapazität setzte sich zusammen aus den Beiträgen des Photodetektors, der Gleich- und Gegentaktkapazität des OPAs sowie den Streukapazitäten des Aufbaus.

Für einen stabilen Betrieb ist eine obere Grenze der Kapazität im Datenblatt festgelegt. Bei einer Gesamtkapazität von 4 pF ergaben sich bei einer Transimpedanz von 1 kOhm Bandbreiten von bis zu 600 MHz (TI OPA855, GBP = 8 GHz). Für die Rauschanalyse wurde das vereinfachte Ersatzschaltbild aus [7] verwendet. Alle Rauschterme addieren sich am Ausgang, nachdem sie mit der Übertragungsfunktion gewichtet wurden. Um verschiedene Schaltungsentwürfe zu vergleichen, ist es üblich alle Rauschwerte auf den Eingang zu beziehen und eine äquivalente Rauschstromdichte in pA/sqrt(Hz) zu berechnen. Dieser Wert findet sich auch in den Datenblättern zu integrierten TIAs und erlaubt einen einfachen Vergleich der Komponenten. Die Ergebnisse für die Berechnung der äquivalenten Eingangsrauschstromdichte für verschiedene OPAs unter anderem von TI [7] aus Tab. 1 sind in Abb. 4 gezeigt.

Tab. 1 Operationsverstärker von TI [7].

Device	Type	Minimum Stable Gain (V/V)	Current Noise (pA/sqrt(Hz))	Voltage Noise (nV/√Hz)	Input Cap. (pF)	Gain Bandwidth (GHz)
OPA855	Bipolar	7	2.5	0.98	0.8	8
OPA856	Bipolar	1	2.5	0.9	1.1	1.1
OPA858	CMOS	7	---	2.5	0.8	5.5
OPA859	CMOS	1	---	3.3	0.8	0.9
LMH6629	Bipolar	10	2.6	0.69	5.7	4

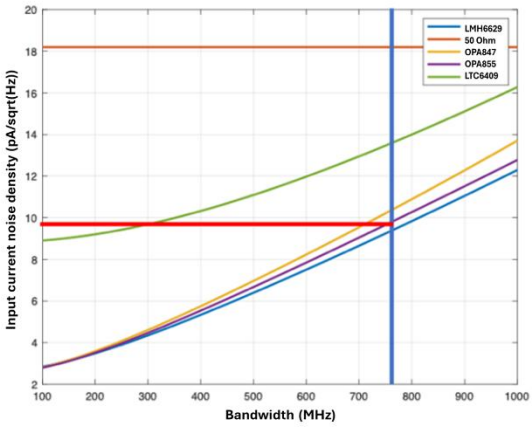

Abb. 4 Berechnete Rauschstromdichte am Eingang des TIAs für verschiedene OPAs.

Die gesamte Kapazität am Eingang beträgt 3 pF. Als Bezug ist die Rauschstromdichte eines 50 Ohm Widerstandes eingezeichnet. Das Rauschen nimmt durch die Gegenkopplung mit der Frequenz stark zu. Bei 750 MHz beträgt die Rauschstromdichte des TIAs etwa 50% der Rauschstromdichte des Bezugswiderstands. Sie ist eindeutig zu hoch für Anwendungen in CV-QKD-Empfängern. Eine zweite Verstärkerstufe (A = 10 dB, NF = 5 dB) mit einem OPA (LTC6409 von Analog Devices [8]) reduziert die Bandbreite auf ca. 630 MHz. Die Rauschspannung am Ausgang beträgt 18 mV (RMS). Der Pol, der durch den Rückführungswiderstand und die entsprechende Kapazität gebildet wird, bestimmt den Beginn

des Anstieges des Rauschens. Die charakteristische Frequenz der Rückkopplungsschleife im obigen Design liegt bei 730 MHz. In zahlreichen Empfängern für Quantenexperimente wurde bisher der TI OPA847 mit GBP = 3,9 GHz eingesetzt. Trotz der Steigerung des GBPs bei dem kürzlich erschienen TI OPA855 auf 8 GHz lassen sich damit TIAs mit einer Bandbreite von >750 MHz nicht realisieren. Ein weiterer wesentlicher Nachteil dieses Schaltungsdesigns ist die starke Frequenzabhängigkeit des Rauschens.

Chip-Level-Transimpedanzverstärker

Eine Alternative zur Realisierung des CV-QKD-Empfängers sind TIAs, die als Chips verfügbar sind. Diese erfordern allerdings eine komplett andere und komplexere Aufbautechnik. Eine Liste von analogen TIAs ohne Begrenzer, die für steckbare Fasermodule mit Anwendungen für GPON, ROSA, GbEthernet etc. entwickelt wurden, findet sich in Tab. 2. Auch bei diesen TIAs ist die Gesamtkapazität am Eingang ein bestimmender Parameter für die Performanz des Verstärkers.

Tab. 2 Ausgewählte analoge Transimpedanzverstärker ohne Begrenzer als Chips.

Device	Data Rate (Gbps)	Gain (kOhm)	BW (GHz)	Noise (integrated)	Input current noise density
NT24L50	1.25	25	0.75	92 nA	---
NT24L55	1.25	46	0.75	74 nA	---
NT25L50	2.5	21	1.4	87 nA	---
MAX3266	1.25	2.8	0.92	192 nA	6.6 pA/sqrt(Hz)
PHY1095	1.25	60	0.94 (C_S = 0.5 pF)	60 nA	2 pA/sqrt(Hz)
PHY1097	2.5	25	1.7 (C_S = 0.5 pF)	150 nA	3.5 pA/sqrt(Hz)
ONET2591	2.5	2.6	1.8	280 nA	6.5 pA/sqrt(Hz)
ADN2880	3.25	4.4	2.5	315 nA	6.3 pA/sqrt(Hz)
ADN2880 (LIDAR)	---	18.3	0.52	45 nA (267 MHz)	2.7 pA/sqrt(Hz)

Aufbau des Hochgeschwindigkeits-Homodyndetektors

Der in der zweiten Phase des Projektes entwickelte und realisierte Homodyndetektor setzte sich aus einer optischen und einer elektrischen Komponente zusammen (siehe Abb. 5). Auf der optischen Seite überlagerten sich LO und Signal im Strahlteiler (50:50-Koppler). Die beiden Ausgangsstrahlen mussten sorgfältig ausbalanciert werden. In den Ausgangspfaden des Faserkopplers wurden dazu ein variabler optischer Abschwächer (VOA2) und eine optische variable Verzögerungsleitung (OVD) platziert. Die Längen der beiden Pfade mussten genau abgeglichen werden. Abschließend wurden die symmetrischen Signale in die zwei Photodioden des BPDs gekoppelt. Um Störungen aus der Umgebung, wie z.B. atmosphärische Störungen, zu vermeiden, wurden die beiden Teile mit einem Gehäuse abgedeckt.

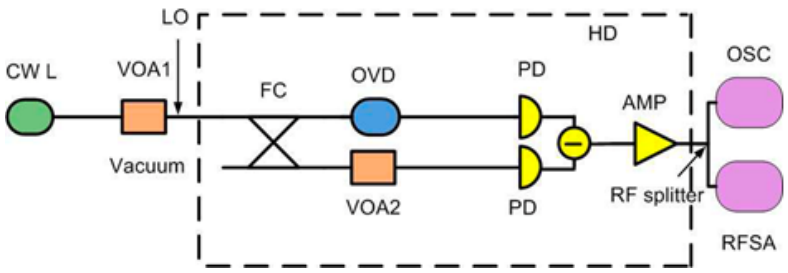

Abb. 5 Aufbau zum Test der Linearität des entwickelten Homodyndetektors (LO: Local Oscillator, OVD: Optical Variable Delay, FC: 50:50 Fiber Coupler, VOA: Variable Optical Attenuator, PD: Photodiode, AMP: Electronic Amplifier).

Linearitätsmessung des balancierten Photodetektors

Für die Linearitätsmessung wurde ein Tor des 50:50-Kopplers über ein einstellbares Dämpfungsglied (VOA1) mit einem stabilen CW-Laser (CW L) verbunden. Damit wurde die einstellbare LO-Leistung realisiert. Das zweite Tor des Kopplers blieb offen, entsprach also der Einkopplung eines Vakuumzustandes. Die Sperrspannung von +/-2,6 V der beiden Photodioden des BPDs wurde von zwei Spannungsversorgungen mit Stromanzeige erzeugt. Hiermit wurden ebenfalls die beiden Photogleichströme gemessen. Die gemessene spektrale Effizienz des Homodyndetektors betrug ca. 0,246 A/W. Durch den Abgleich der beiden optischen Pfade waren die gemessenen Steigungen bis auf die dritte Nachkommastelle gleich (siehe Abb. 6, links). Die gemessene Gleichtaktunterdrückung betrug -50 dB, was einem sehr beachtlichen Wert entspricht. Bis zu einer Leistung von 7 mW pro Photodiode waren die PDs linear. Die Leistung im Aufbau war durch die Laserquelle begrenzt.

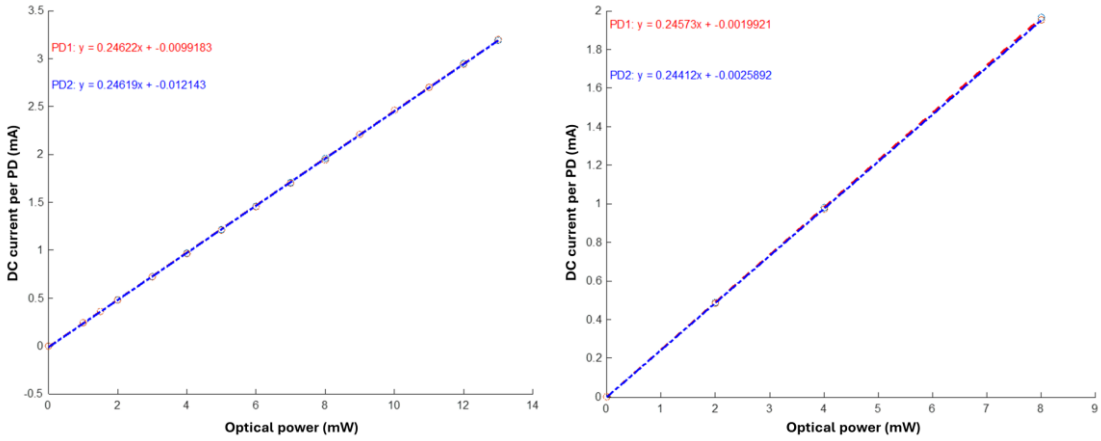

Abb. 6 Gemessene Linearität (Aufbau 1: links; Aufbau 2: rechts) des entwickelten BPDs aus Projektphase 2.

Der sorgfältige Abgleich der beiden optischen Pfade zwischen dem 50:50-Koppler und den PDs erwies sich als sehr aufwendig, in einem Produkt schwer realisierbar und eventuell nicht langzeitstabil. In einem zweiten Aufbau wurden für die beiden optischen Pfade 0,5 m lange Faserkabel mit FC/(A)PC-Verbindern verwendet. Die Längenabweichung der Kabel war <1 mm. Das Resultat der entsprechenden Messung der Linearität ist in Abb. 6 (rechts) gezeigt. Die Längenabweichung in den beiden Pfaden führte zu einer Frequenzabhängigkeit der Gleichtaktunterdrückung und des Skews. Die Gleichtaktunterdrückung betrug -36 dB. Für die Anwendung in einem CV-QKD-Empfänger ist dieser Wert ausreichend. Die Linearität wurde erwartungsgemäß nicht beeinflusst und war bis zu einer Leistung von 7 mW pro PD gegeben. Die entwickelten BPDs aus Projektphase 2 erfüllten alle

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMFTR-Verbundprojekt
FKZ: 16KISQ055
MICROWAVE PHOTONICS

Spezifikationen, insbesondere hinsichtlich der gewünschten Linearität und der gewünschten Gleichtaktunterdrückung.

Charakterisierung des Verstärkers

Die S-Parameter des ausgewählten Verstärkers wurden mit einem Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) im Frequenzbereich 1-2000 MHz gemessen. Der Verstärker hatte zwei Ausgänge, daher wurde eine Drei-Tor-Messung mit Port 1: Eingang, Port 2: Ausgang 1 und Port 3: Ausgang 2 durchgeführt. Die Genauigkeit der Amplitudenmessung betrug 0,2 dB. Die gemessenen S-Parameter des Verstärkers sind in Abb. 7 (links) dargestellt. Die Frequenzabhängigkeit der Verstärkungen S_{21} und S_{31} war identisch. Die Grenzfrequenz lag jeweils bei >1 GHz. Der Eingangsreflexionsfaktor S_{11} war kleiner als -15 dB im gesamten Frequenzbereich. Zum Vergleich wurde die Frequenzabhängigkeit des Amplitudenganges von zwei unterschiedlichen Verstärkern vom gleichen Typ gemessen und ist in Abb. 7 (rechts) mit hoher Auflösung dargestellt. Die Verstärkung unterschied sich um <0,7 dB im Frequenzbereich bis 800 MHz. Die Grenzfrequenz lag für beide Verstärker bei >1 GHz. Beide Verstärker eignen sich für die Anwendung als I- und Q-Kanal in dem kohärenten 1 GBaud CV-QKD-System.

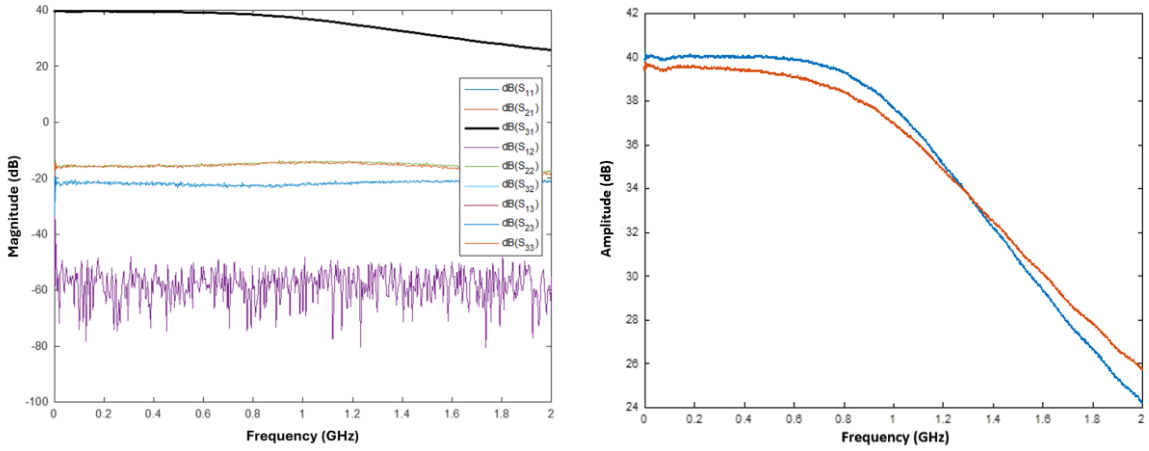

Abb. 7 Gemessene S-Parameter des Verstärkers (links) und Frequenzabhängigkeit des Amplitudenganges von zwei ausgewählten Verstärkern vom gleichen Typ (rechts).

Für die Empfindlichkeit des optischen Empfängers ist das elektronische Rauschen des Verstärkers eine wichtige Kenngröße. Das Rauschen des Verstärkers wurde im Frequenzbereich von 30 kHz bis 1,2 GHz vermessen. Das elektronische Rauschen der beiden Kanäle unterschied sich bei tiefen Frequenzen. Für den Kanal mit dem geringeren Rauschen ergab sich eine äquivalente Rauschstromdichte bezogen auf den Eingang von 7 pA/sqrt(Hz) im Frequenzbereich bis 700 MHz.

Referenzen

[6] E. Säckinger: Analysis and Design of Transimpedance Amplifiers for Optical Receivers, Wiley 2018.

[7] www.ti.comhttps://www.ti.com

[8] https://www.analog.com

3.4 Aufbau eines integrierten kohärenten Empfängers (AP5.3)

In AP5.3 baute MWP in der zweiten Phase des Projektes einen integrierten kohärenten Empfänger für das CV-QKD-System auf. Hierfür wurde der BPD zusammen mit einem Verstärker in einem kohärenten

Empfängermodul integriert, um die homodyne Detektion einer Quadratur zu erzielen. Die Charakterisierung des kohärenten Empfängers erfolgte im Frequenz- und im Zeitbereich. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 8 gezeigt. Das Rauschen am Ausgang des Verstärkers wurde mit dem elektrischen Spektrumanalysator gemessen. Als Referenz wurde das Eigenrauschen des Spektrumanalysators gemessen. Nach der Messung des Rauschens des optischen Empfängers bei abgeschaltetem LO erfolgte eine Messung des Rauschens für verschiedene Leistungen des LOs.

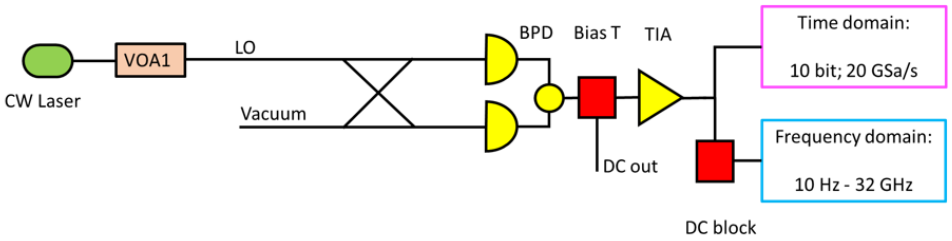

Abb. 8 Versuchsaufbau zur Charakterisierung des kohärenten Empfängers im Zeit- und Frequenzbereich.

In Abb. 9 ist eine exemplarische Messung für einen ausgewählten BPD mit einem TIA gezeigt. Die LO-Leistung wurde so gewählt, dass sich 1 mA Photostrom pro Photodiode ergab. Damit erzielte man im Frequenzbereich von bis zu 1 GHz einen ausreichenden Abstand des Schrotrauschens zum elektronischen Rauschen des Empfängers für den Betrieb im CV-QKD-System.

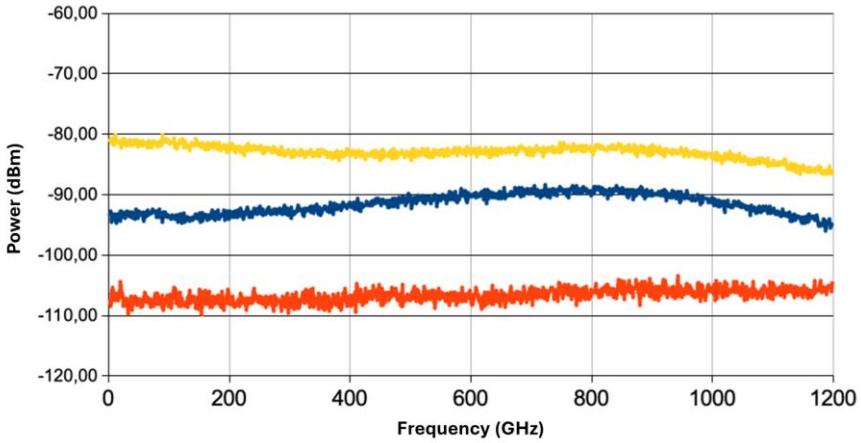

Abb. 9 Gemessenes Rauschspektrum des kohärenten Empfängers. Eigenrauschen des elektrischen Spektrumanalysators: rot, elektronisches Rauschen: blau, Schrotrauschen: gelb (RBW = 30 kHz, Gaussfilter).

Die Empfindlichkeit optischer Empfänger ist durch die äquivalente Rauschleistung (NEP: noise equivalent power) gegeben. NEP ist definiert als die minimale optische Leistung bezogen auf die Bandbreite, um ein SNR von eins zu erzielen. Bei den meisten kommerziellen kohärenten Empfängern wird diese nur im Frequenzbereich 0-100 MHz angegeben. Die gemessene äquivalente Rauschstromdichte (CND: current noise density) für den kohärenten Empfänger im Frequenzbereich von bis zu 1 GHz ist in Abb. 10 gezeigt.

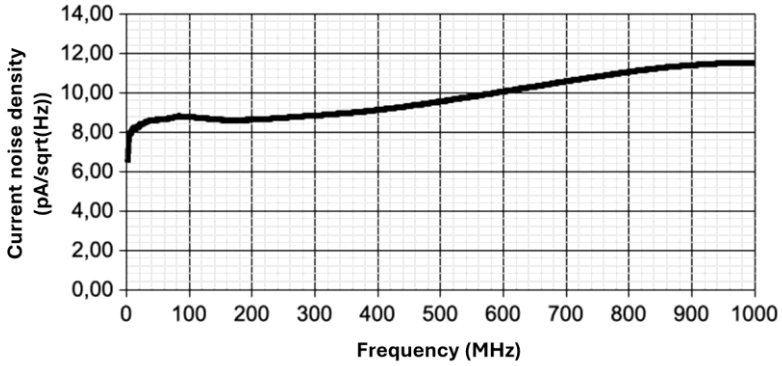

Abb. 10 Gemessene äquivalente Rauschstromdichte eines kohärenten Empfängers aus Projektphase 2.

In Tab. 1 sind die Ergebnisse für verschiedene Grenzfrequenzen gegeben. Die Grenzfrequenz von 700 MHz entspricht in etwa der Nyquist-Frequenz des 1 GBaud CV-QKD-Systems. Die Grenzfrequenz der Verstärker lag bei etwa 1 GHz. Die äquivalente Rauschstromdichte ist für zwei kohärente Empfänger vom gleichen Typ (aus der zweiten Projektphase) angegeben. Die beiden Empfänger wiesen vergleichbare Rauschstromdichte auf. Die Rauschstromdichte lag bereits im Bereich des erwarteten Werts von <11 pA/sqrt(Hz) im Frequenzbereich von 700 MHz.

Tab. 3 Bandbreite, Leistung und Rauschstromdichte des kohärenten Empfängers aus Projektphase 2.

	0…100 MHz	0…f_c	Overall	Unit
Bandwidth	100	700	1000	MHz
Power	1,39E-09	1,496E-08	2,542E-08	W
CND (BPD1)	8.52	10.5	11.5	pA/sqrt(Hz)
CND (BPD2)	10.4	11.2	11.9	pA/sqrt(Hz)

Meilensteine (AP2/AP5, 2. Projektphase)

Alle Meilensteine aus AP2/AP5, d.h. M2.1.1 (M14), M2.1.2 (M19) und M5.3.1 (M22), wurden erfolgreich innerhalb der zweiten Projektphase erreicht.

Anschaffungen (2. Projektphase)

Zu den wichtigsten Anschaffungen in der zweiten Projektphase gehörten: Photodioden, TIAs, Gehäuse, und optische Fasern.

Aufbau des optimierten Hochgeschwindigkeits-Homodyndetektors

In der dritten Phase des Projektes wurde der realisierte balancierte Homodyndetektor optimiert. Die spektrale Effizienz der verwendeten Photodioden des BPDs bestimmt direkt die erzielbare Schlüsselrate des CV-QKD-Systems. Somit wurden neue BPDs mit deutlich höherer spektraler Effizienz einzelner Photodioden, 0,87 A/W anstatt 0,64 A/W, aufgebaut. Um die Stabilität der Homodyndetektion zu erfassen, wurde das Photostromdifferenzsignal mit einem zweiten Verstärker (26 dB) im Frequenzbereich von DC bis 260 kHz verstärkt. Da die spektrale Effizienz der Photodetektoren Fertigungstoleranzen unterliegt, konnte mit diesem Ausgangsignal das Photostromdifferenzsignal auf ein Minimum abgeglichen werden. Dazu wurde die Sperrspannung der beiden PDs etwas variiert. Das änderte folglich die Kapazität der Photodioden und beeinflusste damit

den Frequenzgang des kohärenten Empfängers. Eine Variation der Sperrspannungen um maximal 10% hatte noch keinen Einfluss auf den Frequenzgang. Mit diesem Ausgangssignal konnte auch die Langzeitstabilität der Homodyndetektion und der Leistung des LO erfasst werden.

Linearitätsmessung des optimierten balancierten Photodetektors

Zum Testen der Linearität des optimierten Homodyndetektors wurde ebenfalls der Aufbau aus Abb. 5 eingesetzt. Für diese Messung war ein Tor des 50:50-Kopplers über ein einstellbares Dämpfungsglied (VOA1) mit einem stabilen CW-Laser verbunden. Damit war die einstellbare LO-Leistung realisiert. Das zweite Tor des Kopplers blieb offen, entsprach also der Einkopplung eines Vakuumzustandes, d.h. einer gleichverteilten Zufallsgröße. Die Sperrspannung der beiden Photodioden des BPDs betrug +/-4,6 V. Die beiden Photogleichströme wurden mit zwei DVMs (5 digit) gemessen.

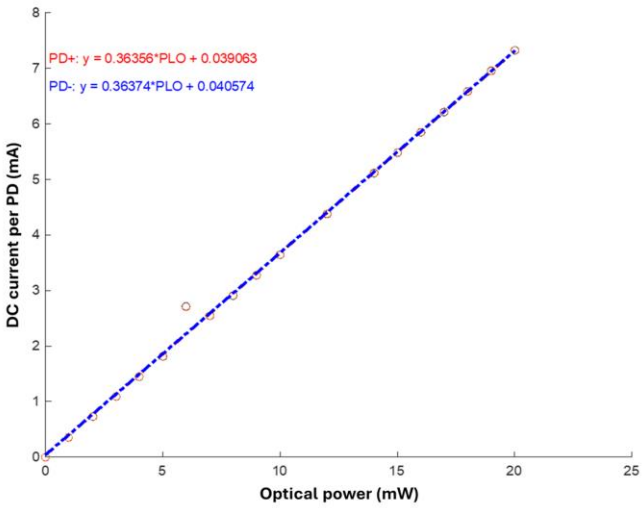

Abb. 11 Gemessene Linearität des optimierten BPDs aus Projektphase 3.

Die gemessene spektrale Effizienz des Homodyndetektors betrug 0,36 A/W. Somit war eine deutliche Steigerung im Vergleich zum zuvor entwickelten Detektor aus Projektphase 2 mit 0,246 A/W zu verzeichnen. Durch den Abgleich der beiden optischen Pfade war die gemessene Steigung bis auf die dritte Nachkommastelle gleich (siehe Abb. 11). Die gemessene Gleichtaktunterdrückung betrug beachtlich -50 dB. Bis zu einer Leistung von jeweils 8 mW waren die PDs linear und wiesen somit eine außerordentliche Linearität auf. Der sorgfältige Abgleich der beiden optischen Pfaden zwischen dem 50:50-Koppler und den PDs war jedoch auch hier sehr aufwendig, in einem Produkt schwer realisierbar und eventuell nicht langzeitstabil. In einem zweiten Aufbau wurden für die beiden Pfade 0,5 m lange Faserkabel mit FC/(A)PC-Verbindern verwendet. Die Längenabweichung der Kabel war <1 mm. In einem Pfad wurde ein abgleichbarer Stecker verwendet. Die gemessene Gleichtaktunterdrückung betrug -38 dB. Die optimierten BPDs aus Projektphase 3 erfüllten alle Spezifikationen insbesondere hinsichtlich der guten Linearität und der guten Gleichtaktunterdrückung.

Charakterisierung des Verstärkers

Der Verstärker wurde mit einem VNA im Frequenzbereich 1-2000 MHz vermessen. Die Genauigkeit der Amplitudenmessung betrug 0,2 dB. Die Amplitudenmessung des Verstärkers ist in Abb. 12 dargestellt. Die Grenzfrequenz liegt bei >1 GHz. Der Eingangsreflexionsfaktor S_{11} ist kleiner als -15 dB im gesamten Frequenzbereich.

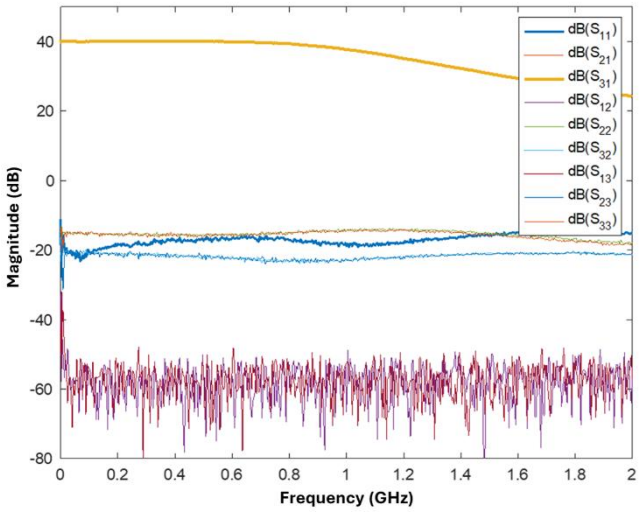

Abb. 12 Gemessene S-Parameter des Verstärkers.

Für die Empfindlichkeit des optischen Empfängers ist bekannt, dass das elektronische Rauschen des Verstärkers eine wichtige Kenngröße spielt. Das Rauschen der beiden Verstärkerzüge in einem Homodynempfänger wurde diesmal im Frequenzbereich von 1 MHz bis 1,5 GHz vermessen. Das Eigenrauschen des Spektrumanalysators lag bei -150 dB/Hz. Das elektronische Rauschen der beiden Kanäle unterschied sich erneut bei tiefen Frequenzen. Für den Kanal mit dem geringeren Rauschen ergab sich auch hier eine äquivalente Eingangsrauschstromdichte von 7 pA/sqrt(Hz) im Frequenzbereich bis 700 MHz.

Integration der kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängermodule

Die Integration des BPD zusammen mit dem Verstärker zu einem kohärenten Empfänger für die Homodyndetektion einer Quadratur erfolgte vergleichbar zur Projektphase 2. Die Charakterisierung erfolgte ebenfalls im Frequenz- und im Zeitbereich. Der Versuchsaufbau wurde bereits in Abb. 8 vorgestellt. Mit einem elektrischen Spektrumanalysator wurde das Rauschen am Ausgang des Verstärkers gemessen. Als Referenz wurde das Eigenrauschen des Spektrumanalysators gemessen. Nach der Messung des Rauschens des optischen Empfängers bei abgeschaltetem LO erfolgte eine Messung des Rauschens für verschiedene Leistungen des LOs. Am zweiten Tor des Kopplers lag Vakuum an. Die gemessene äquivalenten Rauschstromdichte für den optimierten kohärenten Empfänger aus Projektphase 3 im Frequenzbereich von bis zu 1 GHz ist in Abbildung 5 (blau) gezeigt. Zum Vergleich ist die gemessene Rauschstromdichte für den kohärenten Empfänger aus Projektphase 2 ebenfalls im entsprechenden Frequenzbereich in Rot gezeigt. Die verbesserte Empfindlichkeit ist deutlich zu erkennen. Bei 1 GHz verringert sich die Rauschstromdichte von 11,9 pA/sqrt(Hz) auf <9,8 pA/sqrt(Hz).

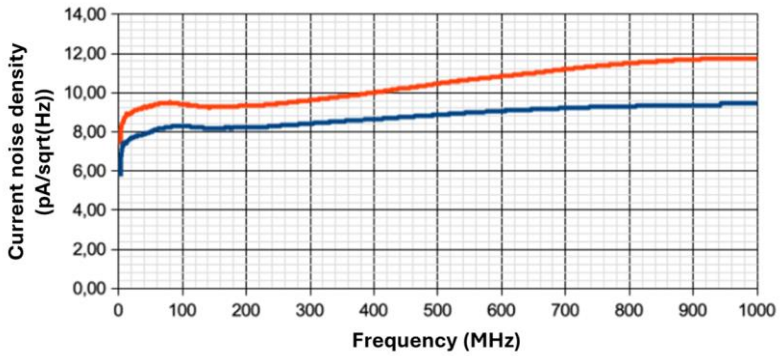

Abb. 13 Gemessene Rauschstromdichte des optimierten kohärenten Empfängers aus Projektphase 3 (blau) im Vergleich zum kohärenten Empfänger aus Projektphase 2 (rot).

Die resultierenden integrierten Rauschleistungen für die zwei untersuchten kohärenten Empfänger bei einer Frequenz von bis zu 700 MHz lagen bei 299,013 nW und 286,1 nW, die Rauschspannungen bei 1,316 mVrms und 1,23 mVrms bei 50 Ohm bzw. 2,63 mVrms und 2,46 mVrms bei hochohmigem Abschluss. Die Frequenz von 700 MHz entspricht in etwa der Nyquist-Frequenz des 1 GBaud CV-QKD-Systems. Die Grenzfrequenz der TIAs limitierte das Frequenzverhalten bei etwa 1 GHz. Die beiden optimierten kohärenten Empfänger wiesen in etwa die gleiche Rauschstromdichte auf: 9,2 pA/sqrt(Hz) und 8,88 pA/sqrt(Hz). Die Rauschstromdichte lag somit weit unter dem erwarteten Wert von <11 pA/sqrt(Hz) im Frequenzbereich von 700 MHz und erfüllte die in AP1 definierte Spezifikation. Zwei der in DE-QOR entwickelten integrierten optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängermodule wurden in einer Tabletop-Variante (Tischgerät, siehe Abb. 14) aufgebaut und an ADVA für Tests und die Demonstratorentwicklung verschickt.

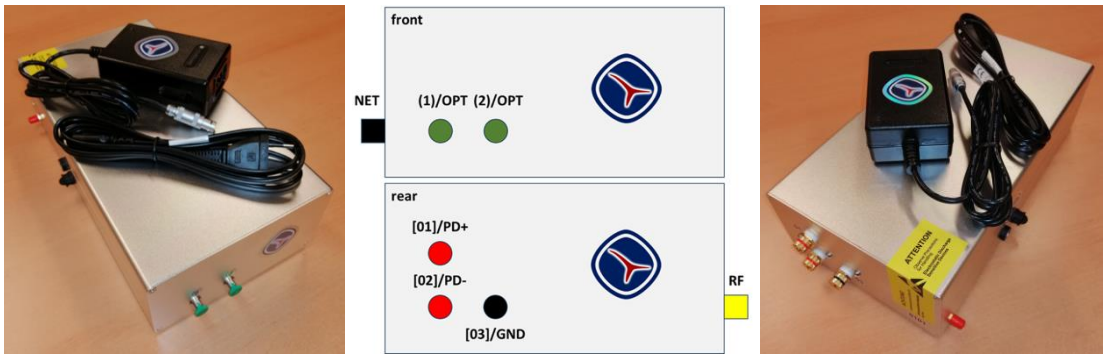

Abb. 14 Integrierter optisch kohärenter Einkanal-CV-QKD-Empfänger in einer Tabletop-Variante (links und rechts) und schematische Ansicht der Vorder- und Rückseite des Empfängermoduls (mittig).

Die optischen Eingänge für Signal und LO sind dabei mit FC/PC-Steckern versehen, um eine Ankopplung zu einer optischen C-Band SMF zu ermöglichen. Die DC-Ansteuerung für den Betrieb des BPDs und des TIAs erfolgt über drei Bananenstecker-Eingänge und einen S1-Stecker. Der HF-Single-Ended-Ausgang ist mittels SMA-Stecker realisiert. Zudem stellt das Aluminium-Gehäuse mit integriertem Kühlkörper eine ideale Signalabschirmung sicher. Zwei Muster des optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers in der Tabletop-Variante (siehe Abb. 15, rechts) wurden beim Abschlusstreffen zum CV-QKD-Demonstrator (siehe Abb. 15, links und mittig) im März 2025 in München vorgestellt [9]. Die gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Teilvorhaben trugen zum erfolgreichen Aufbau auf der Empfängerseite (Bob) des CV-QKD-Systems und dem Gelingen der CV-QKD-Systemdemonstration bei.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMFTR-Verbundprojekt
FKZ: 16KISQ055

Abb. 15 DE-QOR CV-QKD-Demonstrator (links und mittig) und zwei Muster des optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängermoduls (rechts) beim Abschlusstreffen im März 2025 in München.

Referenzen

[9] https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/service/aktuelles/de-qor

3.5 Systemdemonstrator Labor (AP6.1)

In AP6.1 trug MWP in Zusammenarbeit mit ADVA zur experimentellen Validierung des CV-QKD-Systems bei.

Stabilitätstests des CV-QKD-Systems durch Temperaturänderungen oder mechanischen Stress

Durch Einsatz spezieller phasenstabilisierter Glasfasern konnten niedrigere temperaturinduzierte Phasenschwankungen demonstriert werden. Quantitativ konnte eine Verbesserung der thermisch induzierten Längenänderung (TCD) der Verbindungen um den Faktor >10 gegenüber Standard-Glasfasern demonstriert werden. Die phasenstabilisierten Glasfasern zeigten somit klar das beste Temperaturverhalten mit einem TCD von nur 8 ps/K/km gegenüber den Standard-Glasfasern mit einem TCD von bis zu 100 ps/K/km.

Zur Ermittlung von stationären Beanspruchungen durch mechanischen Stress, wie z.B. Verbiegung, wurden mehrere experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Bei stärkster Biegung lag die maximale frequenzabhängige Phasenabweichung der phasenstabilisierten Glasfasern bei knapp 18° und die der Standard-Glasfasern bei bis zu 29° Phasenänderung.

Zur Langzeituntersuchung der Phasenstabilität wurden Messungen über 24 Stunden durchgeführt. Die phasenstabilisierten Glasfasern lagen bei etwa 2°. Hierbei war zu berücksichtigen, dass bei den Tests nicht nur die Fasern, sondern die komplette Verbindung inklusive der o/e- und e/o-Wandler vermessen wurde. Letztere wurden nicht gesondert stabilisiert.

Meilensteine (AP5/AP6, 3. Projektphase)

Alle Meilensteine aus AP5/AP6, d.h. M5.3.2 (M30) und Beitrag zu M6.2 (M29), wurden erfolgreich innerhalb der dritten Projektphase erreicht.

Anschaffungen (3. Projektphase)

Zu den wichtigsten Anschaffungen in der dritten Projektphase gehörten: Photodioden, TIAs, Gehäuse, Platinenmaterial, Fasern, optische Freiraumkomponenten, PCBs, Kabel und DC/HF-Stecker.

4. VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

In diesem Kapitel wird die Verwertbarkeit innerhalb dieses Teilvorhabens des Verbundprojektes DE-QOR erzielten Ergebnisse diskutiert.

4.1 Technologie

In DE-QOR wurde ein kohärenter Einkanal-CV-QKD-Empfänger in einer Tabletop-Variante (Tischgerät) entwickelt. Das Tischgerät bietet einen single-ended HF-Ausgang. In Vorbereitung auf zukünftige mehrkanalige Varianten (siehe Abb. 16) wurden innovative elektronische Interposer entwickelt (parallel zu DE-QOR), die eine kompakte On-Board-Montage der optischen Module auf einem PCB ermöglichen. Die derzeitigen Interposer unterstützen eine elektrische Bandbreite von bis zu 32 GHz. Die Interposer-Technik wurde bereits in den mehrkanaligen RFoF-Produkten erfolgreich eingesetzt.

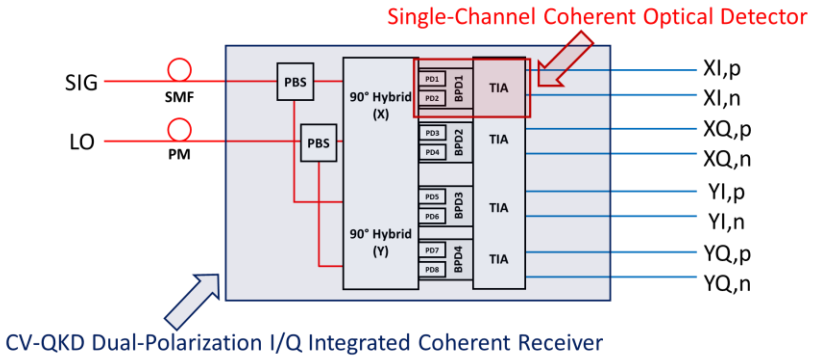

Abb. 16 Blockschaltbild eines im Fokus des Teilvorhabens (MWP) stehenden kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers als Teil eines mehrkanaligen kohärenten Empfängers.

Es ist geplant, einen optisch kohärenten Vierkanal-Empfänger als OSA (optical sub-assembly) zu entwickeln. Das OSA-CV-QKD-Modul soll vier differentielle HF-Ausgänge bereitstellen. Zudem soll das OSA zusätzliche Monitoring-Ausgänge bereitstellen, um Seitenangriffe und Fehlfunktionen erkennen zu können.

Im DE-QOR-Demonstrator war der optische Switch kein Bestandteil des kohärenten Empfängers. In Vorbereitung auf eine zukünftige verbesserte Variante wurden photonisch integrierte Chips (PICs) hergestellt (parallel zu DE-QOR), die als Optical Switch verwendet werden können.

4.2 Komponentenverbesserung und Erweiterung des Produktportfolios

Das Produktportfolio von MWP konnte mit Hilfe von DE-QOR um ein neues Produkt „optisch kohärenter Einkanal-CV-QKD-Empfänger“ erweitert werden. Basierend auf den Erkenntnissen aus DE-QOR plant MWP, einen kompakten vierkanaltauglichen (Polarisationsmultiplex) optisch kohärenten CV-QKD-Empfänger zu entwickeln. Der Vierkanal-Empfänger soll zusätzliche Überwachungs-Schnittstellen bieten (Monitoring-Zugänge).

Erkenntnisse aus DE-QOR zur Integration von Photodioden mit Verstärkern und zum Aufbau von Mehrkanal-Modulen sind in die Entwicklung von Radio-Frequency-over-Fiber (RFoF) Produkten eingeflossen. Es konnten verbesserte RFoF-Produkte entwickelt werden: Vierkanal-RFoF-Module mit integrierten TIAs im RFoF-Empfänger. Es ist geplant, phasenstabile RFoF-Module geeignet für die Verteilung von analogen LO-Signalen oder digitalen Clock-/Timing-Signalen zu entwickeln.

4.3 Know-how Transfer

Es ist bereits gelungen, mit SEQUIN (FKZ: 16KIS2133) ein Nachfolgeprojekt zur Entwicklung von mehrkanaligen optisch kohärenten CV-QKD-Empfängern zu starten. SEQUIN wird von ADVA koordiniert und erhält finanzielle Unterstützung durch das BMFTR.

Es ist ebenfalls bereits gelungen, mit PATTERN (Grant Agreement No.: 101070506) ein Projekt zur Entwicklung von PICs für QKD-Empfänger zu starten. PATTERN wird von THALES, Frankreich, koordiniert und erhält finanzielle Unterstützung durch die Europäische Union.

Des Weiteren ist eine Beteiligung von MWP an einem INTERREG-Konsortium geplant. Ziel der Aktivitäten ist der Aufbau einer sicheren QKD-Verbindung zwischen Deutschland und Holland.

4.4 Wissenstransfer

Die in DE-QOR gewonnen spezifischen Erkenntnisse zum Aufbau optisch kohärenter CV-QKD-Empfänger und deren Einsatz in QKD-Übertragungssystemen wurde gemeinsam mit ADVA veröffentlicht und auf der international renommierten Fachkonferenz Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2025 in San Francisco, USA vorgestellt [10]. Zuvor hatte MWP Ergebnisse zum kohärenten CV-QKD-Empfänger auf der European Microwave Week (EuMW) 2024 in Paris, Frankreich vorgestellt.

Prof. Christian G. Schäffer (MWP) hatte im Sommersemester 2022 den Promovierenden am Lehrstuhl Optoelektronik der Universität Duisburg-Essen (UDE) zum Thema optisch kohärente Empfänger für QKD referiert. Teile dieses Referats wurden im Nachgang in die regelmäßige Vorlesung Systemtechnik für Master-Studierende der Elektrotechnik aufgenommen.

Die in DE-QOR gewonnene Expertise ist in die Lehre der Universität Duisburg-Essen zur Verbesserung der Forschung und Lehre eingeflossen. Das Thema QKD wird nun regelmäßig im Sommersemester im Rahmen der Vorlesung „Systemtechnik“ den Studierenden der Elektrotechnik vermittelt.

Über die gesamten Projektdauer wurden die einschlägige, internationale Literatur (OSA Optics Letters, IEEE Photonics Technology Letters, IEEE Journal of Lightwave Technology, IEEE Electronics Letters, OSA Journal of Optical Networking, OSA Optics Express) und die Vorträge auf den einschlägigen, internationalen Fachkonferenzen (OFC, ECOC, EuMW, IEEE Photonic Conference) verfolgt. Für die Durchführung des Vorhabens gab es keine relevanten Ergebnisse Dritter.

Referenzen

[10] U. Akin, J. Berl, S. W. Ahamed, C. G. Schaeffer, V. Rymanov, A. Stöhr, T. Fehenberger, and N. Hanik, "Impact of Pilot-aided Signal Schemes on Practical CV-QKD Security," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2025, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2025), paper W4I.7.
https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2025-W4I.7

5. ZUSAMMENFASSUNG

Im Bereich der Quantentechnologien ist QKD das Feld mit dem kurzfristigsten Anwendungspotential. Das Verbundprojekt DE-QOR hatte sich zum Ziel gesetzt, ein praxistaugliches CV-QKD-Modul zur Marktreife zu entwickeln, das zur Absicherung von verschlüsseltem Datenverkehr in faseroptischen Metro- und Weitverkehrsnetzen eingesetzt werden kann. Ziel dieses Teilvorhabens war es, basierend auf den Ergebnissen aus der Grundlagenforschung einen integrierten, optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfänger mit hoher Empfindlichkeit und einer Bandbreite von bis zu 1 GHz zu entwickeln, der die physikalische Schnittstelle zwischen dem empfangenen optischen Quantensignal und der Elektronik zur weiteren digitalen Verarbeitung der Signale auf der Empfängerseite des CV-QKD-Moduls bildet, und in Systemexperimenten einzusetzen.

Das Teilvorhaben (MWP) des DE-QOR-Projektes verzeichnete reibungslose und planmäßige Fortschritte in allen beteiligten Arbeitspaketen (AP1, AP2, AP5 und AP6) über die gesamte Projektdauer von 3 Jahren und 3 Monaten (Januar 2022 - März 2025) und konnte erfolgreich zusammen mit dem Verbundprojekt DE-QOR im März 2025 abgeschlossen werden.

Aufgrund der langjährigen Erfahrung bei der faseroptischen Verteilung von Quantenschlüsseln leistete MWP einen Beitrag zum CV-QKD-Systemkonzeptdesign und der finalen Spezifizierung der CV-QKD-Module in AP1. Bei einer Übertragungsrate von bis zu 1 GBaud wurden für den kohärenten Empfänger unter anderem eine Bandbreite im Bereich von 700 MHz, eine Verstärkung von etwa 40 dB (Transimpedanzverstärker, TIA) und eine Rauschstromdichte von <11 pA/sqrt(Hz) spezifiziert. In AP2 entwickelte und untersuchte MWP den optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfänger mit und ohne TIA. Der balancierte Detektor (ohne TIA) wies eine Bandbreite von bis zu 5 GHz, einen flachen Frequenzgang von +/- 0,1 dB und eine Gleichtaktunterdrückung von >35 dB (>45 dB bis zu 1 GHz) auf. Der ausgewählte TIA mit einer Verstärkung von etwa 40 dB bei einer Grenzfrequenz von etwa 1 GHz stellte die frequenzlimitierende Komponente des integrierten optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers dar. Der integrierte optisch kohärente Einkanal-CV-QKD-Empfänger für die Demonstratorentwicklung wurde von MWP in AP5 in einer Tabletop-Variante (Tischgerät) aufgebaut und auf Rauschen untersucht. In AP6 trug MWP zur experimentellen Validierung des CV-QKD-Systems bei. Alle Meilensteine dieses Teilvorhabens wurden erfolgreich erreicht. Zwei Muster des optisch kohärenten Einkanal-CV-QKD-Empfängers in der Tabletop-Variante wurden beim Abschlusstreffen zum CV-QKD-Demonstrator im März 2025 in München vorgestellt. Die gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem Teilvorhaben trugen zum erfolgreichen Aufbau auf der Empfängerseite (Bob) des CV-QKD-Systems und dem Gelingen der CV-QKD-Systemdemonstration bei.

ADVA und MWP hatten im Oktober 2024 zum Abschluss des DE-QOR-Projektes ein gemeinsames Konferenzpaper zu den gewonnenen spezifischen Erkenntnissen zum Aufbau optisch kohärenter CV-QKD-Empfänger und deren Einsatz in CV-QKD-Übertragungssystemen bei der OFC 2025 in San Francisco, USA eingereicht. Der Beitrag wurde für eine mündliche Präsentation auf der OFC 2025 ausgewählt und veröffentlicht. Zuvor hatte MWP Ergebnisse zum kohärenten CV-QKD-Empfänger auf der EuMW 2024 in Paris, Frankreich vorgestellt.

Das DE-QOR-Projekt führte zu neuen und nachhaltigen Kooperationen mit Partnern wie ADVA und LUH auf nationaler Ebene. Die Ergebnisse des DE-QOR-Teilvorhabens bilden die Grundlage für weitere zukünftige Aktivitäten. Es ist unter anderem gelungen, mit SEQUIN (FKZ: 16KIS2133) ein Nachfolgeprojekt zur Entwicklung von mehrkanaligen optisch kohärenten CV-QKD-Empfängern zu starten. SEQUIN wird ebenfalls von ADVA koordiniert und erhält finanzielle Unterstützung durch das BMFTR.