

Inhalt

Einleitung.....	2
Messungen in Quantennetzen.....	3
Einzelphotonenquellen.....	3
Detektor Messtechnik.....	4
Netzqualität.....	4
Dämpfung (Quantenrepeater).....	5
Fidelität (Fidelity F).....	5
Purification Protokolle	5
Kohärenzzeit.....	5
Monitoring in Quantennetzen.....	6
Monitoring von Netzwerkkomponenten.....	6
Memory und Rule Manager	6
Network Manager	7
Monitoring von Dienstgüte	8
Monitoring von Destillation Entanglement	8
Quantendestillation und Entanglement Swapping	10
Monitoring von Anwendungen.....	12
Monitoring von QKD in Quantennetzen	12
Zusammenfassung	12
Literaturverzeichnis	14

Netzwerkparameter in Quantennetzen

Dieses Dokument soll einen Einblick geben, welche Parameter für die Netzwerkgröße in Quantennetzen in Betracht kommen und wie ein geeignetes Monitoring zukünftig umgesetzt bzw. mit Hilfe von Simulationskomponenten vorher schon ergänzt oder nachgestellt werden kann.

Einleitung

Die notwendige Technologie für den produktiven Betrieb von Quantennetzen ist derzeit noch im Aufbau. Hardwarekomponenten wie Quantenspeicher oder Quantenrepeater sind Gegenstand aktueller Forschung und somit ist noch keine Klassifizierung bzw. Standardisierung solcher Komponenten und deren produktivem Einsatz absehbar. Die Entwicklung von Photonenquellen und –Detektoren ist dagegen soweit fortgeschritten, dass das NIST (National Institute of Standards and Technology) bereits Qualitätskriterien für diese Bauteile entwickelte [1]. Forscher des NISTs gehen davon aus, dass die Definition solcher Kriterien einen unterstützenden Beitrag zur Entwicklung weiterer benötigter Bauteile für das Quanteninternet leisten wird [1]. Im Kapitel [#Messungen in Quantennetzen](#) werden die erwähnten Kriterien zur Detektormesstechnik vorgestellt.

Im zweiten Kapitel [#Netzqualität](#) werden Einflussfaktoren auf die Qualität von Quantennetzen vorgestellt, die in „klassischen“ Netzwerken nicht vorkommen oder eine andere Bedeutung haben. Beispiel hierfür sind u.a. die Güte (Fidelität) oder Purifikation.

Konzepte für das Monitoring in Quantennetzen lassen sich im Moment nur an simulierten Quantennetzen demonstrieren, da –wie bereits erwähnt- der Stand der Technik in diesem Bereich noch nicht weit genug fortgeschritten ist. Eine Ausnahme ist der Betrieb von QKD-Netzen, die bereits teils kommerziell eingesetzt werden. Hier sind vor allem Hardware-Defekte für das Monitoring relevant (s. Abschnitt [#Monitoring von QKD in Quantennetzen](#)).

Welche Bedeutung das Monitoring von Quantenzuständen in Abhängigkeit von Zeit hat, wird mit dem ereignisdiskreten Simulator NetSquid anhand eines Beispiels mit Entanglement Swapping unter *Monitoring von Entanglement Destillation* erläutert.

Im Rahmen von Monitoring in Quantennetzen können Simulatoren fehlende Hardwarekomponenten ersetzen und bieten damit die Möglichkeit, schon jetzt Planungen für Gesamtkonzepte zu vervollständigen.

Mit Hilfe des Simulators SeQUeNCe wird im Folgenden erläutert, wie eine mögliche Umsetzung fehlender Bauteile und deren Monitoring in Quantennetzen realisiert werden kann (s. Abschnitt Monitoring von Netzwerkkomponenten). Andere Simulatoren für Quantennetze benutzen verschiedene Konzepte, um Hardware zu simulieren. Welche Methoden dafür am besten geeignet sind, wird sich erst mit der Einführung und dem Betrieb real existierender Quantennetze klären.

Zum Abschluss des dritten Kapitels *Monitoring in Quantennetzen* werden einige Aufgaben und Anforderungen an das Monitoring aus den vorhergehenden Beispielen abgeleitet.

Messungen in Quantennetzen

Messungen in Quantennetzen werden u.a. dazu benötigt, Quantenzustände des Lichts zu identifizieren und (einzelne) Photonen zu detektieren. Das NIST hat eine Auswahl von Parametern erarbeitet [1], die sich zur Charakterisierung von Einzelphotonenquellen bzw. für Detektoren eignen. Im Folgenden werden diese Kenngrößen vorgestellt und erläutert. Im Gegensatz dazu steht die Entwicklung von Quantenspeichern und Transducern (Energiewandler von Energieform A nach Energieform B) für Quantennetze erst am Anfang. Daher gibt es in diesem Bereich noch kaum geeignete Kenngrößen, um diese Bauteile klassifizieren zu können.

Einzelphotonenquellen

Wahrscheinlichkeit der Emission eines Photons: beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in einer bestimmten Mode¹ in einem gewissen Zeitabschnitt ausgesendet wird.

Spektrale / spatiale Modenstruktur: Die spektrale und spatiale Modenstruktur ist für die Auswahl der Photonenquelle für bestimmte Anwendungen entscheidend: Für Übertragungen in Single-Mode Glasfasern muss die Quelle in der Lage sein, Photonen in einer bestimmten Mode (passend zum Glasfasertyp) zu emittieren. Spektrale Moden – auch longitudinale Moden genannt- sind Schwingungen bzw. Wellen, die sich

¹ Als Mode wird eine zeitlich bestimmte stationäre Eigenschaft einer Welle bezeichnet. Moden unterscheiden sich in der räumlichen (spatialen) Verteilung ihrer Intensität.

entlang der Ausbreitungsrichtung der Strahlung (Licht) ausbreiten. Diese unterscheiden sich durch ihre Frequenz. Ein Beispiel von longitudinalen Moden sind Resonatorfrequenzen in Lasern. Die spatiale oder räumliche Struktur gibt an, wie sich die Phasenlage der (elektromagnetischen) Wellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung verhält.

Statistik der Anzahl emittierter Photonen: Für viele Anwendungen ist es notwendig, dass genau ein Photon und nicht mehrere gleichzeitig emittiert werden. Die Statistik gibt an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit eines Detektors ist, dass die gewünschte Anzahl an Photonen erzeugt und ausgesendet wird.

Ununterscheidbarkeit: beschreibt, wie hoch der Grad der Interferenz (Vereinigung) zweier Photonen ist. Je höher der Grad an Interferenz ist, desto größer ist die Ununterscheidbarkeit der beiden Photonen.

Detektor Messtechnik

Detektionseffektivität /Dark-Counts: Die Detektionseffektivität ist ein Maß dafür, wie viele ausgesendete Photonen von einem Detektor gemessen werden. Dark-Counts sind vom Detektor registrierte Photonen in Abwesenheit einer Photonenquelle.

Afterpulsing / Recovery Charakterisierung: Diese Effekte treten nach der Detektion eines Photons auf. Recovery (dead time) beschreibt die Zeitspanne, die der Detektor nach dem Erfassen eines Photons ruhen muss, um ein weiteres zu detektieren. Beim Afterpulsing wird ein weiterer Detektionsimpuls nach dem Auftreffen eines Photons beschrieben, was zu einer fehlerhaften Zählung der Photonen führt.

Verzögerung und Timing Jitter: Verzögerung und Timing Jitter betreffen das Zeitintervall zwischen der Absorption eines Photons am Sensor und der Detektion.

Netzqualität

Parameter, die die Netzwerkqualität von klassischen Netzen beeinflussen, haben auch Auswirkung auf Quantennetze, da diese zur Übermittlung von Nachrichten auch auf herkömmliche Netze zurückgreifen. Für den Teil des Netzes, der mit Quantentechnik arbeitet, kommen weitere Parameter und Störeinflüsse hinzu, die Auswirkungen auf die Netzwerkqualität haben.

Dämpfung (Quantenrepeater)

Bei größeren Entfernungen sind zur Verbreitung von verschränkten Zuständen Quantenrepeater erforderlich, die mit Entanglement-Swapping arbeiten. Kommen Quantenrepeater zum Einsatz, verringert sich u.U. die Netzqualität da in Repeatern Fehler bei der Speicherung der Quanten z.B. Phasenrauschen und Dekohärenzeffekte auftreten können.

Fidelität (Fidelity F)

Die Fidelität F ist ein Maß dafür, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Zustand nach einer gewissen Zeit t noch immer dem Ausgangszustand entspricht. Die Fidelität F kann Werte von 0 bis 1 annehmen. Der Wert 0 bedeutet, dass zwei Zustände zu 100% unterscheidbar sind. Bei dem Wert 1 sind die Zustände zu 100% identisch. Beispielsweise gibt die Fidelität an, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Zustand ρ nach einer gewissen Zeit t sich im Ausgangszustand $|+\rangle$ befindet:

$$F = (\rho(t), |+\rangle)$$

Im Bereich des Monitorings kann die Fidelität dazu verwendet werden, verschränkte Zustände neu erzeugen zu lassen, falls deren Güte unter einen vorgegebenen Schwellwert fällt z.B. $F < 90\%$. Die Fidelität eines Zustands lässt sich durch Entanglement Distillation -auch als Entanglement Purification bezeichnet- steigern.

Purification Protokolle

Purification Protokolle (mehr Details s. Abschnitt [#Monitoring von Destillation Entanglement](#)) dienen im Allgemeinen dazu, die Güte (Fidelity) von Quantenzuständen und damit auch die Netzqualität zu verbessern. Beispiele für diese Art von Protokollen sind [2]: Recurrence Protokolle (BBPSSW, DEJMPS Protokoll), Hashing Protokoll, Breeding Protokoll.

Kohärenzzeit

Die Kohärenzzeit von Quantenzuständen legt fest, in welchem Zeitraum ein Quantenzustand nutzbar ist, bevor er durch Dekohärenz zerstört wird. Die Wechselwirkung eines quantenmechanischen Systems (z.B. verschränkte Qubits) mit der Umgebung führen zur irreversiblen Zerstörung des Systems. Zu den Umgebungseinflüssen zählen u.a. die kosmische Hintergrundstrahlung und Wärmestrahlung. Diese Wechselwirkung hebt die Kohärenz quantenmechanischer

Zustände mit fortschreitender Zeit (vollständig) auf. Dies wird als Dekohärenz bezeichnet.

Monitoring in Quantennetzen

Das Monitoring ist wichtig, um die **Dekohärenz von QuBits** bzw. deren Zustände zu überwachen (Tracking von Quantenzuständen), da bei Zerfall des Zustandes diese erneut erzeugt werden müssen. Dies ist einer der Gründe, warum die präzise Erfassung der Zeit (-abläufe) in Quantennetzen erforderlich ist, da erzeugte Quantenzustände wie Verschränkung mit fortschreitender Zeit immer instabiler werden. Ereignisdiskrete Simulatoren (wie NetSquid, SeQUeNCe) sind in der Lage, unterschiedliche Ereignisse in Quantennetzen in Abhängigkeit von der Zeit über ein eigenes Managementsystem einzuordnen, die in der Simulation erzeugten Quantenzustände zu überwachen und bei Bedarf geeignete Maßnahmen einzuplanen.

Monitoring von Netzwerkkomponenten

Neben der Überwachung von Quantenzuständen ist es innerhalb von Netzwerkkomponenten erforderlich, den Status von Quantenspeichern zu prüfen und spezielle Zugriffsregeln für diese Speicher zu definieren. Für die Umsetzung solcher Konzepte gibt es bisher noch kein standardisiertes Regelwerk. Im Folgenden wird die Implementierung von Modulen des Simulators SeQUeNCe vorgestellt, die Aufgaben wie das Monitoring von Quantenspeichern in der Simulation übernehmen.

Memory und Rule Manager

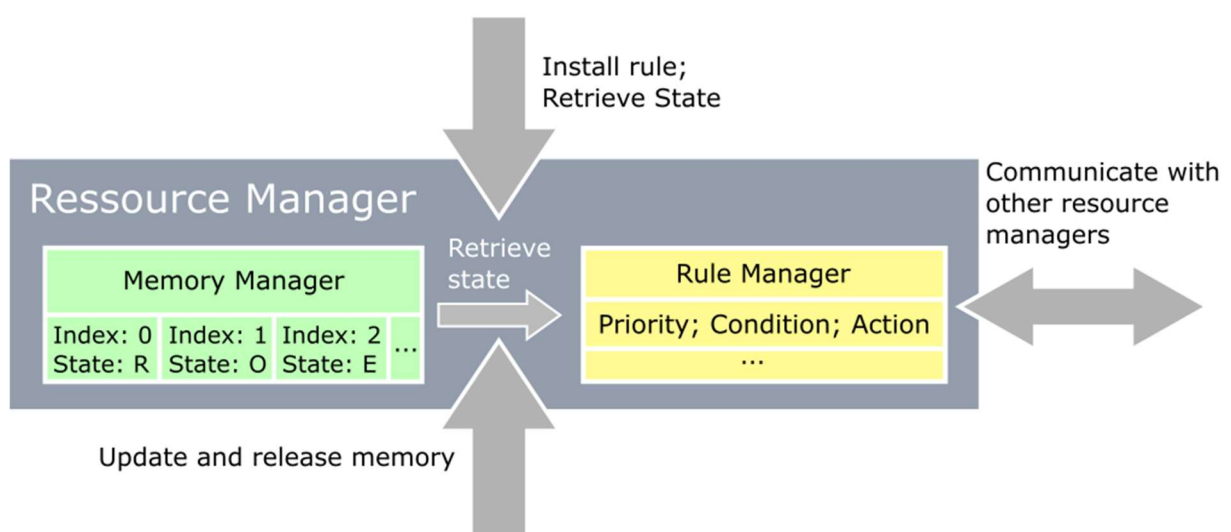


Abbildung 1: Rule und Memory Manager in SeQUeNCe [3]

Memory Manager: Innerhalb eines Hardwaremoduls wie z.B. eines Routers ist es erforderlich, den Status der Quantenspeicher abzufragen. Dabei wird u.a. erfasst, ob es sich um einen verschränkten Zustand handelt und welche Fidelity dieser besitzt. Dies ist Aufgabe des Memory Managers.

- **Rule Manager:** Regelt den Zugriff auf die Speichereinheiten und übernimmt Anfragen von anderen Modulen. Eine Rule ist zum Beispiel die Anfrage an den Ressourcenmanager, um die frei verfügbaren Quantenspeicher in einem bestimmten Indexbereich (vgl. Abbildung 2) zu ermitteln.

Network Manager

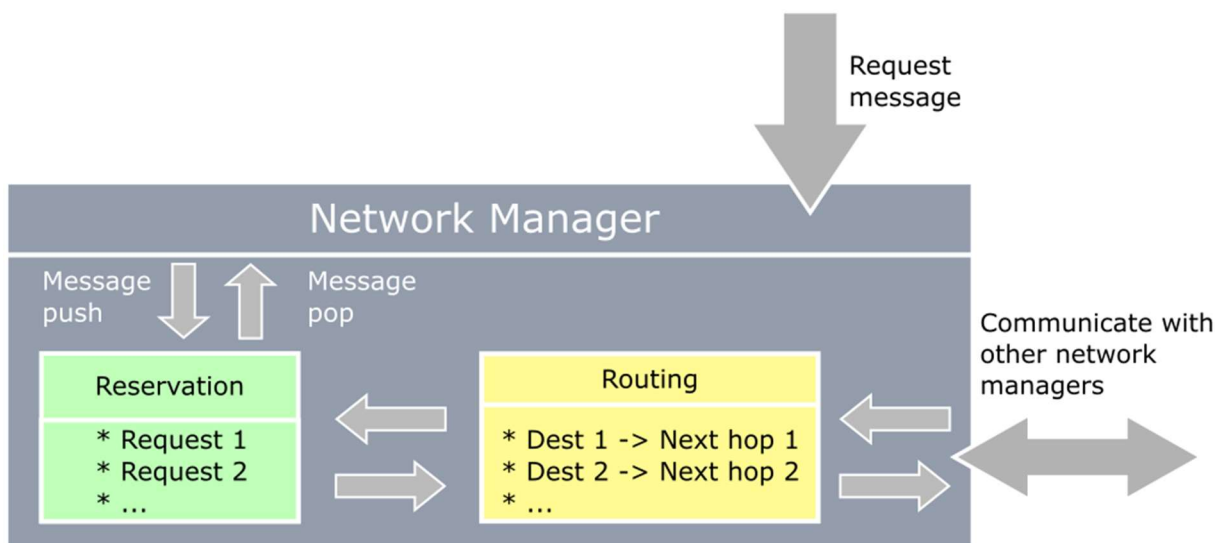


Abbildung 2: Schema des Network Moduls in SeQUeNCe [4]

Aufgaben des Networkmanagers/Orchestrators:

- Koordiniert die Protokolle bzw. Anfragen an Netzwerkknoten
- Sorgt für eine korrekte Abarbeitung von Anfragen durch Applikationen
- Reihenfolge beim Ausführen einer Anfrage:
 - Anfrage wird an Reservation Protocol weitergeleitet, welches prüft, ob die Anfrage lokal auf dem Netzwerkknoten ausgeführt werden kann
 - In diesem Fall werden Hardwareressourcen reserviert und die Anfrage weiter an das Routing Protocol übergeben. Dieses wählt einen passenden Router zwischen den angefragten Ressourcen aus, welcher die kürzeste Distanz zu angefragten Ressourcen aufweist

- Die Ressourcen werden entsprechend im jeweiligen Knoten reserviert oder die Anfrage wird abgewiesen. In beiden Fällen wird eine Antwort an Netzknoten gesendet, der die entsprechende Anfrage initiierte.

Monitoring von Dienstgüte

Monitoring von Destillation Entanglement

Die Güte und Fidelity von verschränkten QuBits muss überwacht werden, weil über lange Zeiträume und lange Strecken verschränkte Zustände nicht aufrecht erhalten werden können. Sobald der verschränkte Zustand ungenügend stark ist, können manche Anwendungen nicht mehr damit durchgeführt werden.

Dazu gibt es das Verfahren der **Destillation von verschränkten QuBits** (Distillation Entanglement) [5], wobei nur sehr stark verschränkte Zustände herausgefiltert werden.

In einem gängigen Verfahren werden dabei zwei verschränkte QuBit-Paare ausgewählt: Ein Quellpaar und ein Zielpaar. Um sowohl Quellpaar als auch Zielpaar zu verknüpfen und damit miteinander zu korrelieren, wird das CNOT-Gatter eingesetzt, siehe Abbildung 3. Durch diese Korrelation wird die Information des Quellpaares auf das Zielpaar übertragen, sodass das Zielpaar gemessen werden kann.

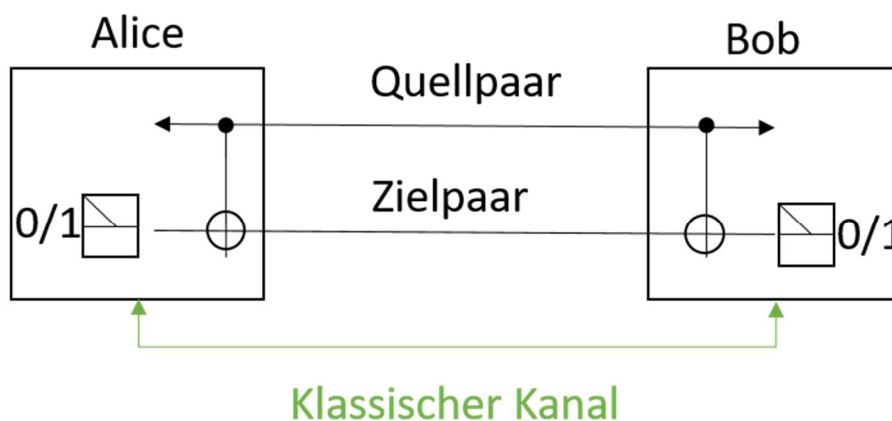


Abbildung 3: Schaltung für Quantendestillation

Wenn Bob und Alice nun lokal auf ihrer Seite das Zielpaar messen und die Ergebnisse über einen klassischen Kanal vergleichen, können sie genau das Quellpaar behalten, bei dem die Zustände eine starke Verschränkung aufweisen und es werden genau die Quellpaare verworfen, welche eine schlechtere Verschränkung aufzeigen. D.h. mit anderen Worten:

Was passiert, wenn Alice und Bob beim Zielpaar unterschiedliche Werte messen?

D.h. dass der ideale Bell-Paar Zustand $|00\rangle$ oder $|11\rangle$ auf beiden Seiten nicht mehr erreicht werden kann. Das Quellpaar kann in diesem Fall verworfen werden. Die Verschränkung des Quellpaares gilt als ideal, wenn Alice und Bob immer den gleichen Zustand des korrelierten Zielpaares haben. Diese idealen Quellpaare werden durch den Destillationsprozess herausgefiltert.

Tabelle 1 zeigt das Beispiel und mögliche Messergebnisse und die daraus folgende Konsequenz: Die unterschiedlichen Messungen (Messung 1-6) beziehen sich auf Wiederholung der Quantendestillation mit unterschiedlichen Ausgangszuständen des Quell- bzw. Zielpaares.

Tabelle 1: Mögliche Messzustände der Quantendestillation

Seite (Alice/Bob)	Zielpaar	Quellpaar	Resultat	✓ / ✗
Messung 1				
Alice	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 00\rangle$	✓
Bob	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 00\rangle$	✓
Messung 2				
Alice	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 00\rangle$	✓
Bob	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 00\rangle$	✓
Messung 3				
Alice	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 11\rangle$	✓
Bob	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 11\rangle$	✓
Messung 4				
Alice	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 11\rangle$	✓
Bob	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 11\rangle$	✓
Messung 5				
Alice	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 00\rangle$	✗
Bob	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$	$ 10\rangle$	✗
Messung 6				
Alice	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 01\rangle$	✗
Bob	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 10\rangle$	✗

Nur wenn das Ergebnis übereinstimmt (00 oder 11), kann der Zustand 00 oder 11 mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% gemäß Φ_{AB}

$$\Phi_{AB} = |+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

angenommen werden. Durch Einfügen des CNOT-Gatters wird eine Korrelation zwischen den beiden Paaren hergestellt, d.h. ist das Messergebnis des Zielpaares

identisch, so erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die QuBit Werte des Quellpaares auf beiden Seiten (Alice & Bob) identisch sind.

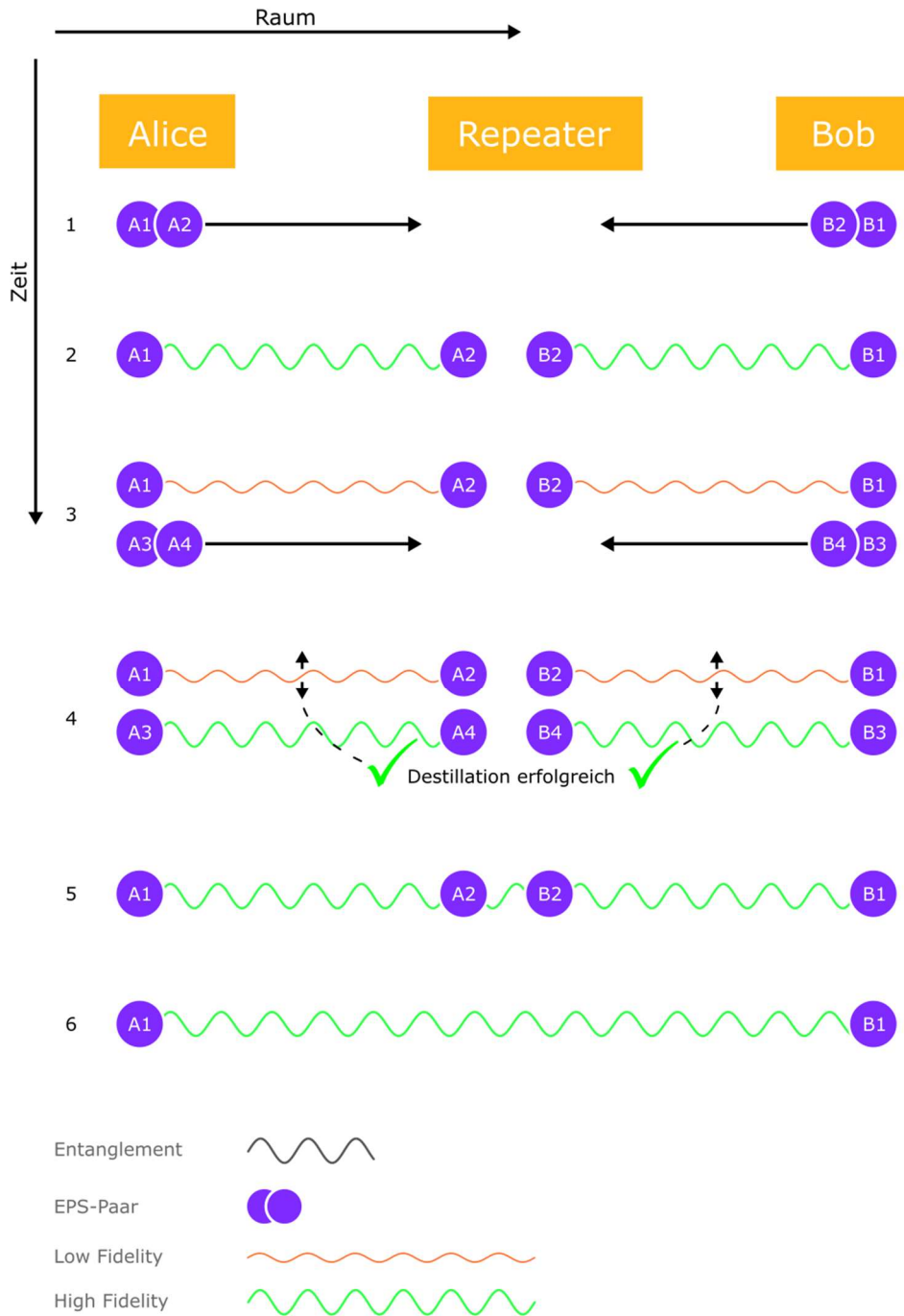
Zusammenfassung des Ablaufs der Quantendestillation:

1. Alice und Bob tauschen zwei verschränkte Quantenpaare aus
2. Die Paare werden über CNOT-Gatter auf beiden Seiten (Alice & Bob) miteinander verbunden und somit korreliert. D.h. die Information des Quellpaares wird auf das Zielpaar übertragen.
3. Das Ziel-Quantenpaar wird auf der jeweiligen Seite gemessen.
4. Alice und Bob tauschen ihr Messergebnis für das Ziel-Quantenpaar über einen klassischen Kanal aus und vergleichen es.
5. Nur die Quellpaare werden herausgefiltert, wo die Ergebnisse identisch waren und somit die Verschränkungsgüte hoch war.

Quantendestillation und Entanglement Swapping

Das Monitoring von verschränkten Zuständen mit Einbindung der Fidelität soll Anhand der Erzeugung von zwei verschränkten Zuständen für das Entanglement Swapping gezeigt werden. Entanglement Swapping spielt insbesondere bei der Verschränkung von QuBit-Zuständen eine Rolle, bei der Quantenrepeater auf der Übertragungsstrecke zwischen zwei Kommunikationspartnern (Alice & Bob) eingesetzt werden. Durch die Verwendung von Quantenrepeatern ist es möglich, Quanten über längere Distanzen miteinander zu verschränken. Das Verbinden von verschränkten Zuständen über ein oder mehrere Quantenrepeater hinweg, wird als Entanglement Swapping bezeichnet.

Im folgenden Beispiel sollen zwei verschränkte Quantenpaare (A1 und A2 sowie B1 und B2) mittels Entanglement Swapping miteinander verbunden werden, sodass A1 und B1 miteinander verschränkt sind.



Schritt 1:
Alice und Bob erzeugen jeweils ein verschränktes Quantenpaar als Quellpaare.

Schritt 2:
Alice und Bob senden jeweils ein Quant an den Repeater in der Mitte

Schritt 3:
Alice und Bob erzeugen jeweils ein neues Quantenpaar als Zielpaare und senden ein QuBit an den Repeater

Schritt 4:
Durch erfolgreiche Destillation wird die Güte der Verschränkung des ersten Paares bestätigt.

Schritt 5:
Die Ursprungsquanten am Repeater werden verschränkt

Schritt 6:
Es ergibt sich eine Verschränkung zwischen Alice und Bob.

Abbildung 4: Entanglement Swapping und Quantendestillation

Monitoring von Anwendungen

Monitoring von QKD in Quantennetzen

Die QKD-Technologie ist die am weitesten fortgeschrittene Technologie im Bereich Quantentechnik. Jedoch setzt das BB84 Protokoll voraus, dass sämtliche Prozesse ideal ablaufen und Hardwarekomponenten fehlerfrei arbeiten. Der Einfluss dieser Störgrößen und deren Auswirkungen auf Nutzer, Hersteller und Zertifizierungsstellen ist derzeit wenig erforscht. Folgende Punkte werden als ideal für QKD angenommen:

- Photonenquellen emittieren exakt die geforderte Anzahl an Photonen
- Ideale Detektion der Photonen
- Verlustfreier Quantenkanal
- Perfekte Ausrichtung der Basen bzw. Filter zwischen Sender- und Empfängerseite

Teil des Monitorings von QKD ist es, passend auf oben genannten Störfaktoren zu reagieren und ggf. einen neuen QKD- Austausch zu initiieren. Das Framework [6] bietet die Möglichkeit, den Einfluss von nicht idealen Bedingungen auf QKD zu modellieren und daraus mögliche Folgen u.a. für die Sicherheit des Verfahrens abzuleiten.

Zusammenfassung

Aus den Anforderungen an die Aufrechterhaltung von verschränkten Zuständen mittels Purification und reibungslosen Betrieb von QKD lassen sich folgende Kriterien für das Monitoring von Quantennetzen ableiten:

- Steigerung der Fidelität durch Purification Protokolle
- Entfernen von Zuständen und Freigabe der beteiligten QuBits
- Einplanung der Generierung von neuen Zuständen in den zeitlichen Ablauf (zeitdiskret).
- Überwachung und Prüfung des Outputs von Komponenten wie Photonenquellen und Detektoren
- Bei QKD: Ausrichtung der Filter

Mit den derzeit zu Verfügung stehenden Simulatoren kann meist ein Großteil der Auswirkung von Störeinflüssen studiert werden. Jedoch ist es erforderlich vor Einsatz eines Simulators zu prüfen, welche Granularität bzw. bis zu welcher Tiefe sich diese

Einflüsse simulieren lassen um möglichst nahe an „Real World“ Bedingungen zu gelangen. Daneben ist noch völlig offen, mit welchem Konzept sich Bauteile wie Quantenspeicher und –Repeater in Simulationen umsetzen lässt. Hier folgt jeder bei der Implementierung der Komponenten im Simulator seiner eigenen Idee, solange eine abschließende Standardisierung und Marktreife nicht erreicht ist.

Literaturverzeichnis

- [1] [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/quantum-networks-nist/quantum-network-metrology>.
- [2] W. Dür und J. Briegel, Entanglement purification and quantum error correction, 2007.
- [3] [Online]. Available: https://sequence-toolbox.github.io/tutorial/chapter4/resource_management.html.
- [4] [Online]. Available: https://sequence-toolbox.github.io/tutorial/chapter5/network_manager.html.
- [5] [Online]. Available: <https://www.quantum-network.com/knowledge-base/entanglement-distillation/>.
- [6] L. O. Mailoux, A Modeling Framework for Studying Quantum Key Distribution System Implementation Nonidealities.