

# Here you can insert the title of your seminar paper

First Student

Second Student

Module: Modulename

Course: Coursename

Lecturer: Name of the lecturer

February 4, 2025

## **Abstract**

This template can be used for seminar papers. For more tips and tricks regarding the use of figures, tables, quotations, references, footnotes, enumerations, etc. please download the Masterthesis template.

## Contents

<b>1</b>	<b>No Cloning Theorem</b>	<b>3</b>
1.1	Definition . . . . .	3
1.2	Beweis . . . . .	3
1.3	Folgen . . . . .	4
1.3.1	Quantenkommunikation . . . . .	4
1.3.2	Schutz der Quanteninformation . . . . .	5
1.3.3	Design von Algorithmen . . . . .	5
1.3.4	Speicherung von Quanteninformation . . . . .	5
1.3.5	Messungen und Messgenauigkeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Quantenteleportation</b>	<b>7</b>
2.1	Einführung . . . . .	7
2.2	Aufbau . . . . .	7
2.3	Vorgang . . . . .	7
2.3.1	Alices Bell Zustand Messung . . . . .	8
2.3.2	Klassische Kommunikation . . . . .	8
2.3.3	Bobs Quantenoperation . . . . .	8
2.4	Mathematik . . . . .	8
2.4.1	Verschränkung und Bell-Zustände . . . . .	8
2.4.2	Der zu teleportierende Zustand . . . . .	9
2.4.3	Verschränkung und Messung . . . . .	9
2.5	Herausforderungen . . . . .	10
2.5.1	Verschränkung Erzeugen und Erhalten . . . . .	10
2.5.2	Klassische Kommunikation . . . . .	10
2.5.3	Skalierbarkeit . . . . .	10
2.5.4	Fehlerquellen und Messgenauigkeit . . . . .	11

# 1 No Cloning Theorem

jdiagramm klassisch Klonen vs. quantum klon verboten;

Einer der faszinierendsten Aspekte der Quantenmechanik ist, dass es unmöglich ist einen beliebigen unbekannten Quantenzustand perfekt zu duplizieren. Dieses Konzept ist mit dem No-Cloning-Theorem beschrieben, einem grundlegenden Ergebnis der Quanteninformationstheorie. Das Theorem hat nicht nur tiefgreifende Auswirkungen auf die Quanteninformatik und die Quantenkommunikation, sondern auch für unser Verständnis der Natur der Information in Quantensystemen.

In der klassischen Physik ist die Vervielfältigung von Informationen einfach: Ein Kopiergerät kann ein Dokument vervielfältigen, ohne das Original zu verändern. In der Quantenmechanik wird dieser einfache Vorgang jedoch zu einer nicht trivialen und verbotenen Operation. Das No-Cloning-Theorem besagt, dass es keine universelle Quantenoperation gibt die eine identische Kopie eines beliebigen unbekannten Quantenzustands erzeugen kann.

In diesem Abschnitt werden wir das No-Cloning-Theorem aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten, seinen Beweis diskutieren, seine Konsequenzen untersuchen und verstehen, wie es die Landschaft der Quantentechnologien prägt. Übersetzt mit DeepL.com (kostenlose Version)

## 1.1 Definition

Das No-Cloning-Theorem besagt, dass es unmöglich ist, eine identische Kopie eines unbekannten Quantenzustands zu erzeugen. Mathematisch gesehen gibt es keinen unitären Operator  $U$ , der die folgende Bedingung erfüllt:

$$U(|\psi\rangle \otimes |e\rangle) = |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle \quad (1)$$

wobei  $|\psi\rangle$  ein beliebiger Quantenzustand und  $|e\rangle$  in Hilfszustand ist, der überschrieben werden soll. Diese Gleichung drückt die Idee aus, dass, wenn wir den Operator  $U$  auf den Zustand  $|\psi\rangle$  anwenden (kombiniert mit einem Hilfszustand), zwei Kopien des ursprünglichen Zustands entstehen sollten. Das Theorem sagt uns, dass es für beliebige  $|\psi\rangle$  keinen solchen Operator geben kann, weil sich die Quanteninformation grundlegend von der klassischen Information unterscheidet.

## 1.2 Beweis

Als grundlegende Schlussfolgerung der Quantenmechanik gibt es mehrere Beweise für dieses Theorem. Ein solcher Beweis, ein Widerspruchsbeweis, der der Einfachheit halber gewählt wurde, kann wie folgt definiert werden.

Zuerst nehmen wir zwei beliebige Quantenzustände,  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$ . Dann werden diese beiden Zustände mit dem Klon operator  $U$  geklont, den wir im vorigen Abschnitt definiert haben und von dem wir für unseren Widerspruchsbeweis nun annehmen, dass er existiert.

$$\begin{aligned} U(|\psi_1\rangle \otimes |e\rangle) &= |\psi_1\rangle \otimes |\psi_1\rangle \\ U(|\psi_2\rangle \otimes |e\rangle) &= |\psi_2\rangle \otimes |\psi_2\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

Mit dieser Information haben wir jetzt zwei Möglichkeiten, das Skalarprodukt von  $\langle U(\psi_1 \otimes e) | U(\psi_2 \otimes e) \rangle$  zu schreiben. Die eine verwendet das Ergebnis der

vorherigen Gleichung, während die andere die Tatsache nutzt, dass Quantenoperationen das Skalarprodukt ihrer Eingaben bewahren?.

$$\begin{aligned}\langle U(\psi_1 \otimes e) | U(\psi_2 \otimes e) \rangle &= \langle \psi_1 \otimes \psi_1 | \psi_2 \otimes \psi_2 \rangle \\ \langle U(\psi_1 \otimes e) | U(\psi_2 \otimes e) \rangle &= \langle \psi_1 \otimes e | \psi_2 \otimes e \rangle\end{aligned}\quad (3)$$

Einfache Ersetzung führt dann zur folgenden Gleichung

$$\langle \psi_1 \otimes \psi_1 | \psi_2 \otimes \psi_2 \rangle = \langle \psi_1 \otimes e | \psi_2 \otimes e \rangle \quad (4)$$

Da Tensor und Skalarprodukte kompatibel sind? simplifiziert das weiter zu:

$$\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle \langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = \langle \psi_1 | \psi_2 \rangle \langle e | e \rangle \quad (5)$$

Und schließlich, weil für jeden Zustand  $|e\rangle$  die Gleichung  $\langle e | e \rangle = 1$  gilt, kommen wir zu dieser Gleichung:

$$\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle^2 = \langle \psi_1 | \psi_2 \rangle \quad (6)$$

Es sollte nun offensichtlich sein, dass diese Gleichung nur zwei Lösungen hat:  $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = 1$  or  $\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = 0$ . Die erste Gleichung impliziert, dass  $\psi_1 = \psi_2$ , was für eine allgemeine Klon-Operation nicht hilfreich ist aber eine Operation zulässt, die Kopien eines bestimmten Zustands erzeugt. Das ist vor allem nützlich um Quantensysteme in einen bekannten Zustand zu initialisieren. Die zweite Lösung erlaubt zwar, dass sich  $\psi_1$  und  $\psi_2$  unterscheiden, und ist damit auf den ersten Blick vielversprechend, verlangt aber immer noch, dass die beiden Zustände orthogonal zueinander sind. Das ist zwar weniger restriktiv als die erste Lösung erlaubt aber immer noch nur eine Operation die eine bestimmte Klasse von Zuständen kopieren kann von der alle Mitglieder zueinander orthogonal sind. Somit ist auch mit dieser Lösung keine allgemeine Klon-Operation möglich.

### 1.3 Folgen

Das No-Cloning-Theorem hat weitreichende Auswirkungen auf eine Reihe von Gebieten der Quantenmechanik und Quanteninformatik.

#### 1.3.1 Quantenkommunikation

In der klassischen Informationstheorie ist das Kopieren von Daten eine zentrale Technik, um Information zu vervielfältigen und zu übertragen. Bei klassischen Bits kann man exakt den gleichen Wert duplizieren, indem man eine Kopie eines Bits erstellt. Im Gegensatz dazu verhindert das No-Cloning-Theorem das Erstellen von exakten Kopien von Quantenbits (Qubits).

Das bedeutet, dass im Bereich der Quantenkommunikation, insbesondere bei der Quantenkryptographie, ein Angreifer, der versucht, die Quanteninformation abzufangen oder zu kopieren, in der Regel Fehler einführen wird, die entdeckt werden können. Dieses Prinzip bildet die Grundlage für Sicherheitsprotokolle wie Quantum Key Distribution (QKD), bei denen ein Abhörversuch die Übertragung zerstören würde und somit leicht zu erkennen ist.

### 1.3.2 Schutz der Quanteninformation

Da das No-Cloning-Theorem das exakte Kopieren eines unbekannten Zustands verbietet, wird auch die Quanteninformation von Natur aus gegen bestimmte Arten von Angriffen geschützt. In klassischen Computersystemen kann ein Angreifer beliebig viele Kopien von Information erstellen, um sie zu analysieren und gegebenenfalls zu entschlüsseln. In einem quantenmechanischen System jedoch kann ein Datenextraktionsversuch oder das Kopieren eines Zustands nicht ohne weiteres erfolgen, ohne dass der Versuch des Kopierens den Zustand verändert und die Quanteninformation damit entwertet wird.

Ein gutes Beispiel für diese Art von Sicherheit ist das BB84-Protokoll für Quantenkryptographie. Bei der Quantenverschlüsselung wird eine Nachricht durch verschränkte Quantenbits übertragen. Jeder Versuch, die Nachricht zu kopieren oder abzufangen, verändert den Zustand der Qubits und wird vom Empfänger erkannt.

### 1.3.3 Design von Algorithmen

Das No-Cloning-Theorem hat auch tiefgehende Auswirkungen auf das Quantencomputing. In klassischen Computern ist das Kopieren von Informationen eine grundlegende Technik, die in vielen Algorithmen und Protokollen verwendet wird. Quantencomputer hingegen können keine exakten Kopien eines Zustands herstellen, was bedeutet, dass traditionelle Techniken wie fehlerkorrigierende Codes, die in klassischen Computern üblich sind, in der Quantenwelt nicht direkt anwendbar sind.

Allerdings existieren spezielle Quantenfehlerkorrekturcodes, die darauf ausgelegt sind, Fehler zu korrigieren, die durch das Fehlen einer exakten Kopierbarkeit von Quanteninformation entstehen. Diese Codes erfordern jedoch eine zusätzliche Anzahl von Qubits und eine komplexe Fehlerkorrekturstrategie, was das Quantencomputing technisch anspruchsvoll macht. Trotzdem sind Quantenfehlerkorrekturmethoden von entscheidender Bedeutung für die zukünftige Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit von Quantencomputern und werden später in diesem Artikel genauer beschrieben??.

### 1.3.4 Speicherung von Quanteninformation

Das No-Cloning-Theorem hat weitreichende Konsequenzen für die Quanteninformationstheorie, insbesondere für die Konzepte der Informationsspeicherung und -übertragung. Die Unmöglichkeit des Klonens ist eng mit den grundlegenden Prinzipien der Quantenmechanik wie Überlagerung und Verschränkung verknüpft. Sie hindert die Schaffung von perfekten Kopien von Quanteninformation und erfordert, dass Information auf neue, kreative Weise verarbeitet und gespeichert wird.

Ein interessantes Beispiel ist die Quantenlogikgatter, die in Quantencomputern verwendet werden. Diese Gatter müssen mit den Einschränkungen des No-Cloning-Theorems arbeiten und können keine klassischen, deterministischen Kopien erzeugen, sondern müssen die Quanteninformation in verschränkten oder überlagerten Zuständen manipulieren.

### **1.3.5 Messungen und Messgenauigkeit**

In der Quantenmetrologie, die sich mit der präzisen Messung von quantenmechanischen Systemen beschäftigt, beeinflusst das No-Cloning-Theorem ebenfalls die Art und Weise, wie Messungen durchgeführt werden können. Da das exakte Kopieren von Zuständen nicht möglich ist, kann das Präzisionsmaß für Messungen nicht durch das Vervielfachen von Messinstrumenten oder durch das Erstellen von Kopien von Quantenobjekten verbessert werden. Stattdessen wird die Quantenmessung durch andere Techniken wie Quanteninterferometrie und den Einsatz von verschränkten Zuständen optimiert.

## 2 Quantenteleportation

### 2.1 Einführung

Quantenteleportation ist ein bahnbrechendes Phänomen, das die Übertragung von Quanteninformationen zwischen zwei entfernten Orten ermöglicht, ohne dass das Teilchen oder Objekt, das die Information trägt, physisch bewegt wird. Im Gegensatz zur theoretischen klassischen Teleportation, bei der es um den Transport von Materie oder Energie geht, konzentriert sich die Quantenteleportation auf die Übertragung von Quantenzuständen. Dieser Prozess nutzt die Prinzipien der Quantenmechanik, einschließlich Verschränkung, Superposition, und das No-Cloning-Theorem, das wir im vorherigen Abschnitt erläutert haben, um den Zustand eines Quantenobjekts (z. B. eines Photons oder eines Elektrons) von einem Ort zum anderen zu übertragen, ohne Rücksicht auf die Entfernung.

Der Begriff “Quantenteleportation” kann etwas irreführend sein, da bei diesem Prozess keine eigentliche Materie teleportiert wird. Was stattdessen “teleportiert” wird, ist die Information über den Quantenzustand eines Teilchens. Der Schlüssel zur Quantenteleportation ist die Quantenverschränkung, ein Phänomen, bei dem zwei oder mehr Teilchen so miteinander korrelieren, dass der Zustand des einen Teilchens den Zustand des anderen augenblicklich den Zustand des anderen Teilchens beeinflusst, unabhängig davon, wie weit sie voneinander entfernt sind. Diese “gespenstische Fernwirkung”, wie Albert Einstein sie nannte, ermöglicht die Übertragung von Quanteninformation zwischen weit entfernten Parteien, ohne dass die oft fragilen Quantenzustände selbst transportiert werden müssen.

### 2.2 Aufbau

Es muss ein Quanten-Verschränkungspaar vorhanden sein. Dieses Paar muss sich im Bell-Zustand befinden, um sicherzustellen, dass die Messung des einen den Zustand des anderen beeinflusst. Dieses Paar wird in der Regel durch einen Prozess wie Spontane parametrische Abwärtsumwandlung erzeugt und derzeit werden in der Regel einfache Photonen oder Ionen verwendet.

Außerdem müssen sich an den Endpunkten der Teleportation zwei Parteien befinden, im Folgenden Alice und Bob genannt, die beide in der Lage sind, mit Quantensystemen zu interagieren und Messungen vorzunehmen, was normalerweise einen Quantencomputer mit begrenzter Funktionalität bedeutet. Schließlich muss ein klassischer Kommunikationskanal zwischen Alice und Bob bestehen. Der Schlüssel für die Quantenteleportation ist hier, dass dieser Kanal nicht in der Lage sein muss, Quantenzustände zu transportieren - dafür ist die Teleportation gedacht -, sondern nur herkömmliche Bits.

Diagramm Aufbau

### 2.3 Vorgang

Nachdem der Aufbau abgeschlossen ist, stellt sich nun die Frage, was tatsächlich getan werden muss, um die Quantenteleportation durchzuführen. Dies kann in mehrere Schritte aufgeteilt werden.

### 2.3.1 Alices Bell Zustand Messung

Der erste Schritt, den Alice durchführt, ist die Bell-State-Messung, die zwei wichtige Teilschritte umfasst.

Zunächst kombiniert Alice das Teilchen, das sie teleportieren möchte, mit ihrer Hälfte des verschränkten Paares. Dies geschieht in der Regel mithilfe eines Strahlenteilers oder eines Interferometers, um die beiden Teilchen in einen Superpositionszustand zu versetzen.

Zweitens misst Alice die beiden kombinierten Teilchen in der Bell-Basis, die die Teilchen aus ihren vier möglichen Zuständen in einen einzigen zusammenfallen lässt. Diese Messung ist entscheidend, denn sie bestimmt, wie Bob sein Teilchen anpassen muss, um den Zustand wiederherzustellen, den Alice teleportiert.

### 2.3.2 Klassische Kommunikation

Als Nächstes verwendet Alice ihren klassischen Kommunikationskanal, um ihre Messung an Bob zu senden. Dies erfordert die Übertragung von nur zwei Bits (den beobachteten Zustand des zu teleportierenden Qubits und den beobachteten Zustand des verschränkten Paares), was für keinen Kommunikationskanal ein Problem darstellen sollte. Diese geringe Bandbreitenanforderung in der klassischen Kommunikation macht in der Tat mehrere Kommunikationskanäle verfügbar, die normalerweise wegen ihrer geringen Bandbreite nicht infrage kämen, insbesondere wenn die Teleportation über große Entfernungen stattfinden soll. Diese Information reicht jedoch aus, um Bob zu instruieren, wie er sein eigenes System einstellen muss.

### 2.3.3 Bobs Quantenoperation

Nun, da Bob die klassische Messung erhalten hat, muss er eine oder beide (je nach Messung) der folgenden Methoden anwenden: Das Pauli-X-Gatter für einen Bit-Flip oder das Pauli-Z-Gatter für einen Phasen-Flip. Durch diese Operation wird sein Quantenzustand in denselben Zustand versetzt, den Alices Quantenteilchen hatten, bevor ihre Messung die Superposition kollabierte. Hier ist auch noch einmal darauf hinzuweisen, dass Bob den Zustand erst erstellt, nachdem Alice ihn mit der Messung bereits zerstört hat - wie das No-Cloning-Theorem besagt<sup>1</sup> wird der Zustand nie kopiert, sondern nur übertragen.

Sobald Bob dies getan hat, ist die Quantenteleportation abgeschlossen.

## 2.4 Mathematik

### 2.4.1 Verschränkung und Bell-Zustände

Zu Beginn des Prozesses haben wir zwei Teilchen (Teilchen 2 und 3), die sich an den Orten A und B befinden. Diese Teilchen werden in einem verschränkten Zustand (Bell-Zustand) erzeugt. Ein Bell-Zustand ist eine der vier möglichen maximal verschränkten Zustände, die ein Paar von Quantenobjekten haben kann. Ein Beispiel für einen solchen Zustand ist:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \quad (7)$$



Dieser Zustand wird zwischen den beiden Teilchen 2 und 3 geteilt, wobei Teilchen 2 bei A und Teilchen 3 bei B ist.

#### 2.4.2 Der zu teleportierende Zustand

Nun nehmen wir an, dass wir den Zustand eines dritten Teilchens (Teilchen 1) teleportieren möchten, das sich am Ort A befindet. Der Zustand des Teilchens 1 kann allgemein als:

$$|\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

ausgedrückt werden, wobei  $\alpha$  und  $\beta$  komplexe Zahlen sind, die den Zustand beschreiben.

#### 2.4.3 Verschränkung und Messung

Der gesamte Zustand des Systems (Teilchen 1, 2 und 3) kann als Produktzustand von Teilchen 1 und dem verschränkten Zustand von Teilchen 2 und 3 beschrieben werden:

$$|\Psi\rangle_{123} = |\psi\rangle_1 \otimes |\Phi^+\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1) \otimes (|00\rangle_{23} + |11\rangle_{23})$$

Durch Anwenden der Distributivität ergibt sich:

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle_{123} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha|0\rangle_1 \otimes (|00\rangle_{23} + |11\rangle_{23}) + \beta|1\rangle_1 \otimes (|00\rangle_{23} + |11\rangle_{23})) \\ |\Psi\rangle_{123} &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\alpha|000\rangle_{123} + \alpha|011\rangle_{123} + \beta|100\rangle_{123} + \beta|111\rangle_{123}) \end{aligned}$$

Nun wird eine Bell-Zustandsmessung auf den Teilchen 1 und 2 durchgeführt, die den Zustand des Systems in einen der vier Bell-Zustände projiziert. Die Messung ist zufällig, und die Ergebnisse können durch die folgenden Zustände beschrieben werden:

$$|\Phi^+\rangle_{12}, |\Phi^-\rangle_{12}, |\Psi^+\rangle_{12}, |\Psi^-\rangle_{12}$$

#### Klassische Kommunikation und Zustandserstellung

Nachdem die Messung durchgeführt wurde, sendet der Ort A das Messresultat an Ort B über einen klassischen Kanal. Anhand der Nachricht kann Ort B den Zustand des Teilchens 3 (das ursprünglich am Ort B war) in den gewünschten Zustand  $|\psi\rangle_1$  transformieren. Dazu wird eine der folgenden Operationen durchgeführt, abhängig von der Messung, die an Ort A durchgeführt wurde:

$$\begin{aligned}
|0\rangle_3 & \text{ (falls Messung das Ergebnis } |\Phi^+\rangle \text{ ergibt)} \\
X|0\rangle_3 & \text{ (falls Messung das Ergebnis } |\Phi^-\rangle \text{ ergibt)} \\
Z|0\rangle_3 & \text{ (falls Messung das Ergebnis } |\Psi^+\rangle \text{ ergibt)} \\
XZ|0\rangle_3 & \text{ (falls Messung das Ergebnis } |\Psi^-\rangle \text{ ergibt)}
\end{aligned}$$

Durch diese Operationen wird der Zustand des Teilchens 3 in den ursprünglichen Zustand von Teilchen 1 ( $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ ) überführt.

## 2.5 Herausforderungen

Obwohl die Quantenteleportation ein vielversprechender Forschungszweig ist, gibt es noch einige Herausforderungen zu bewältigen

### 2.5.1 Verschränkung Erzeugen und Erhalten

Eine der größten Herausforderung ist die Erzeugung und Erhaltung eines verschränkten Systems zwischen dem Start- und Zielpunkt der Teleportation. Die Teleportation ist zwar theoretisch nicht durch Entfernung begrenzt, aber je größer die Entfernung zwischen den Orten desto schwieriger ist es die verschränkten Teilchen aufzuteilen, ohne die Verschränkung zu beschädigen.

Ein Lösungsansatz sind hier Quantenrepeater: Spezialisierte Geräte die die Entfernung zwischen direkt verschränkten Teilchen reduzieren, indem sie diese nur zwischen Repeater Stationen aufteilen müssen. In der Station werden dann mithilfe von Entanglement Swapping zwei Verbindungen des Repeaters verschränkt.

### 2.5.2 Klassische Kommunikation

Auch wenn die benötigte Bandbreite der klassischen Kommunikation minimal ist, muss trotzdem ein Kommunikationskanal existieren. Das hat zwei signifikante Nachteile: Zum einen ist die klassische Kommunikation auf die Lichtgeschwindigkeit begrenzt, was ein Geschwindigkeitslimit für die Teleportation erzeugt, auch wenn die "spukhafte Fernwirkung" der Quantenmechanik schneller passieren könnte. Zum anderen sind klassische Kommunikationskanäle anfällig für Observation - ein Angreifer kann zwar ohne das verschränkte Teilchen den Quantenzustand nicht reproduzieren ist aber in der Lage festzustellen, dass die Kommunikation stattgefunden hat. Ebenfalls könnte der Angreifer auch die Kommunikation stören, was zwar bei geeigneten Protokollen den Teilnehmern offensichtlich ist aber trotzdem eine Schwachstelle darstellt.

Die einzige bekannte Lösung ist hier ein robustes klassisches Kommunikationssystem, was für andere Kommunikationszwecke bereits aufgebaut ist oder wird aber leider die Lichtgeschwindigkeitslimitation nicht umgehen kann.

### 2.5.3 Skalierbarkeit

Ein weiteres bedeutendes Problem der Quantenteleportation ist die Skalierbarkeit. Während die Quantenteleportation in kleinen, kontrollierten Systemen

von einigen wenigen Qubits relativ einfach durchgeführt werden kann, stellt die Skalierung auf größere Netzwerke und damit nützliche Datenmengen und die Integration in reale Kommunikationssysteme eine enorme Herausforderung dar. Um Quantenteleportation praktisch nutzen zu können würde es ein großflächiges System von Kommunikationskomponenten benötigen. Die Erstellung dieser bräuchte Quantentechnologien in einer Menge in der diese momentan einfach weder technisch möglich noch finanziell tragbar, wenn man bestehende Preise hochrechnet.

Hier ist allerdings die Erwartung, dass weitere Forschung dieses Problem beheben wird. Es wird sowohl an günstigeren Methoden zur Erstellung von verschränkten Systemen und der Stabilisierung dieser als auch an der Erstellung von Quantenkomponenten rege geforscht. Auch an Forschungsbudget fehlt es hier nicht, da alle große Technologiefirmen an Quantentechnologie forschen.

#### **2.5.4 Fehlerquellen und Messgenauigkeit**

Die Messgenauigkeit ist entscheidend für die erfolgreiche Durchführung der Quantenteleportation. Eine fehlerhafte Messung der Bell-Zustände kann dazu führen, dass der teleportierte Zustand nicht korrekt wiederhergestellt werden kann. Fehlerquellen können in den Messinstrumenten, in der Kommunikation oder auch in der Quantenverschränkung selbst liegen.

Auch hier wird rege geforscht da alle drei Aspekte nicht eigen zur Quantenteleportation sind, sondern nahezu alle Quantenoperationen betreffen.