

Die Wesenszüge der Quantenphysik und die neuen Quantentechnologien

Rainer Müller, TU Braunschweig

Ziele des Quantenphysik-Unterrichts



Orientierungswissen vs. Verfügungswissen

(von Mittelstraß geprägtes Begriffspaar)

- **Verfügungswissen**
beantwortet die Frage nach dem „Wie?“. Eher auf Technik/Naturbeherrschung ausgerichtet.
- **Orientierungswissen**
beantwortet die Frage nach dem „Warum?“ und „Wozu?“. Soll das Zurechtfinden in der Welt ermöglichen.

Muckenfuß 1996:

Das Verfügungswissen spricht nur diejenigen Schüler an, in deren Lebensplanung die Partizipation an der Naturbeherrschung eine wesentliche Rolle spielt. Davon abgehoben wird das der Aufklärung des Mensch/Natur-Verhältnisses dienende Orientierungswissen.

Ziele des Quantenphysikunterrichts

In milq verfolgte These:

Physikalische Bildung besteht im Verständnis der Grundzüge eines naturwissenschaftlichen Weltbilds.

Das bedeutet: Eine Einführung in diejenigen grundlegenden Einsichten der Physik, die unser Bild von der Natur prägen.

„Für junge Menschen, die keinen naturwissenschaftlichen Beruf wählen, ist der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht in der Schule praktisch die einzige Chance zur systematischen Begegnung mit einem zentralen Teil unserer Kultur“
(BLK-Gutachten 1997)

Quantenphysik in den Bildungsstandards

Bildungsstandards für die Oberstufe (2020)

2.6.3 Inhaltsbereich: Quantenphysik und Materie

Quantenobjekte

Inhalte für das grundlegende und das erhöhte Anforderungsniveau	Zusätzliche Inhalte für das erhöhte Anforderungsniveau
<ul style="list-style-type: none">■ Grundlegende Aspekte der Quantentheorie: Stochastische Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung, Komplementarität■ Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Quantenobjekten■ quantenphysikalisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus	<ul style="list-style-type: none">■ stochastische Deutung mittels des Quadrats der quantenmechanischen Wellenfunktion (qualitativ)■ Ort-Impuls-Unbestimmtheit■ Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen



Wesenszüge der Quantenphysik



milq und die Wesenszüge der Quantenphysik

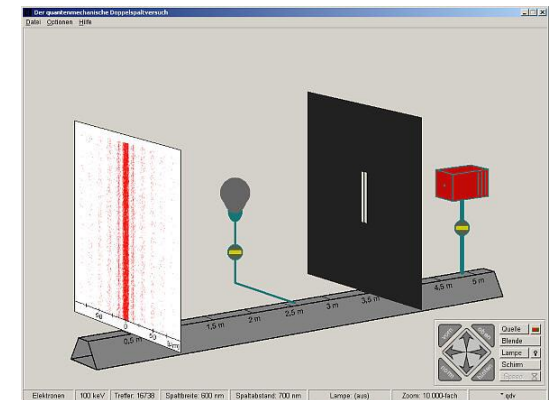
Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (ca. 1998–)

Grundanliegen:

Den Schülerinnen und Schülern soll die Möglichkeit gegeben werden, das **Weltbild der modernen Physik** kennenzulernen.

Daher wird großer Wert darauf gelegt, auch eine klare **Deutung der Quantenphysik** zu vermitteln.

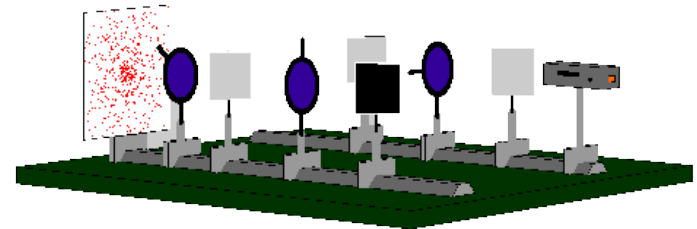
Denn: Gerade weil in der Schule die mathematischen Möglichkeiten begrenzt sind, sollte man sich um so stärker um **begriffliche Klarheit** bemühen.



milq und die Wesenszüge der Quantenphysik

Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (ca. 1998–)

- Es werden diejenigen Aspekte der Quantenphysik herausgestellt, die gegenüber der klassischen Physik das „ganz Neue“ darstellen (z. B. statistisches Verhalten).
- Es wird von bekannten Schülervorstellungen ausgegangen.
- Es werden Begriffe zur Verfügung gestellt werden, die ein qualitatives Verständnis der neuartigen Phänomene ermöglichen (z. B. Präparation, dynamische Eigenschaft).
- Arbeit mit Simulationsprogrammen an prototypischen Experimenten der Quantenphysik (Doppelspalt, Mach-Zehnder-Interferometer)
- Damals: Kein Anschluss an existierende Lehrpläne



milq und die Wesenszüge der Quantenphysik

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Herausdestillieren der Grundideen des milq-Kurses
Formulierung von einprägsamen Merksätzen für Schülerinnen und Schüler

Grundanliegen:

- Wesenszüge sind qualitativ formuliert, aber „vollständig“ (erfassen alles „Wesentliche“ der Quantenphysik)
- Sie sind so formuliert, dass man auch später nichts mehr zurücknehmen muss
- Besser in der englischen Übersetzung: „reasoning tools“

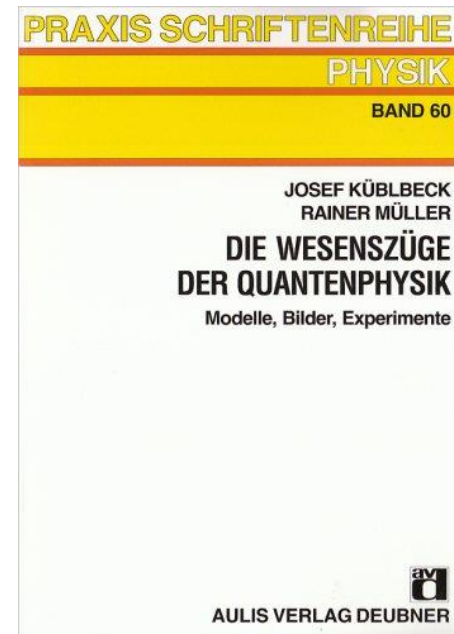
Wesenszüge der Quantenphysik

Bereitstellen klarer Begriffe:

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur **statistische Vorhersagen** möglich.



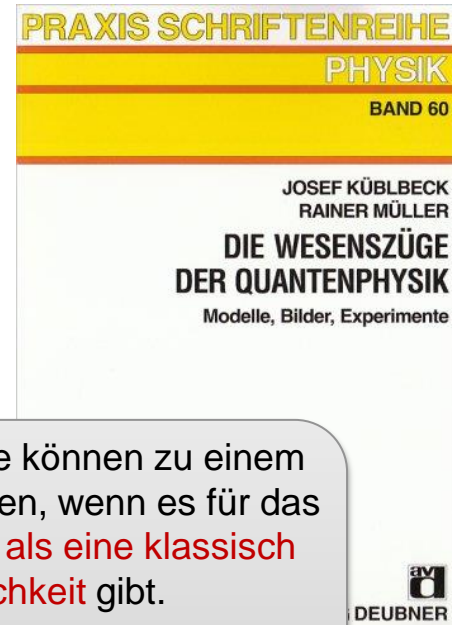
Wesenszüge der Quantenphysik

Bereitstellen klarer Begriffe:

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

Wesenszug 2: **Fähigkeit zur Interferenz**



Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis **mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit** gibt.

Keine dieser Möglichkeiten wird dann im klassischen Sinn „realisiert“.

Wesenszüge der Quantenphysik

Bereitstellen klarer Begriffe:

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse



Messpostulat: Auch wenn ein Quantenobjekt in einem Zustand keinen festen Wert der gemessenen Größe hat, findet man immer ein eindeutiges Messergebnis.

Wesenszüge der Quantenphysik

Bereitstellen klarer Begriffe:

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

Wesenszug 2: **Fähigkeit zur Interferenz**

Wesenszug 3: **Eindeutige Messergebnisse**

Wesenszug 4: **Komplementarität**



Welcher-Weg-Information und
Interferenzmuster schließen sich aus.

Quantenobjekte können nicht auf **Ort** und
Impuls gleichzeitig präpariert werden.

Wesenszüge der Quantenphysik

Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

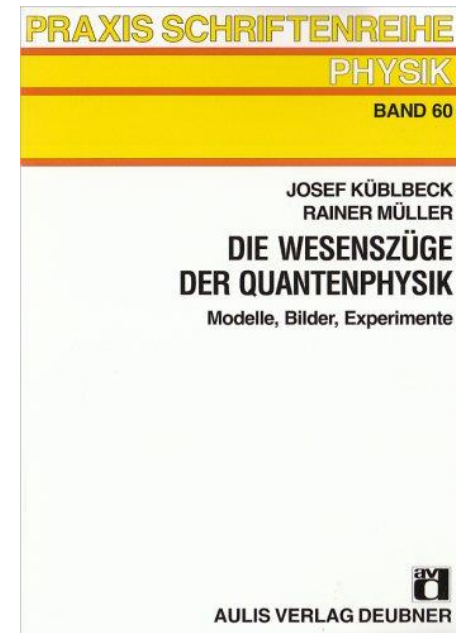
Wesenszug 1: **Statistisches Verhalten**

Wesenszug 2: **Fähigkeit zur Interferenz**

Wesenszug 3: **Eindeutige Messergebnisse**

Wesenszug 4: **Komplementarität**

(Wesenszug 5: **Verschränkung**)
mögliche Ergänzung



Unterrichtsverlauf im milq-Lehrgang

Qualitativer Basiskurs

Erster Teil (Photonen)

1. Photoeffekt
2. Präparation von Eigenschaften
- Mach-Zehnder-Interferometer:**
3. Wellen- und Teilchenverhalten
4. Eigenschaft "Ort"?
5. Wahrscheinlichkeitsinterpretation

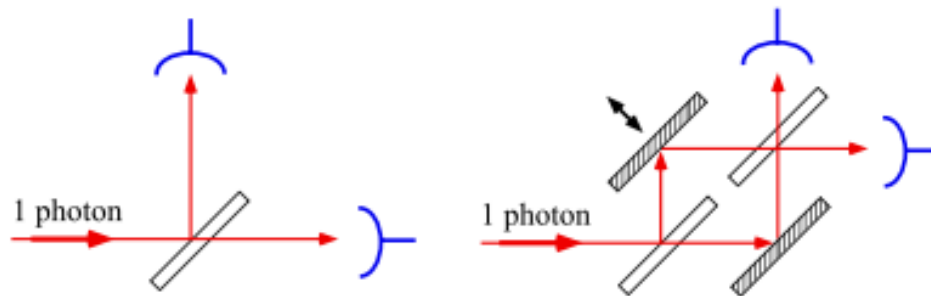
Zweiter Teil (Elektronen)

6. Elektronenbeugung
- Doppelspalt:**
7. ψ und seine Bedeutung
8. Eigenschaft "Ort"
9. Der Messprozess
10. Schrödingers Katze
11. Unbestimmtheitsrelation

Unterrichtsverlauf im milq-Lehrgang

Zwei Schlüsselexperimente:

- Doppelspaltexperiment (vgl. Feynman)
- Antikorrelationsexperiment von Grangier, Roger & Aspect (1986): Wellen- und Teilchenverhalten im gleichen Experiment



Qualitativer Basiskurs

Erster Teil (Photonen)

1. Photoeffekt
2. Präparation von Eigenschaften

Mach-Zehnder-Interferometer:

3. Wellen- und Teilchenverhalten
4. Eigenschaft "Ort"?
5. Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Zweiter Teil (Elektronen)

6. Elektronenbeugung

Doppelspalt:

7. ψ und seine Bedeutung
8. Eigenschaft "Ort"
9. Der Messprozess
10. Schrödingers Katze
11. Unbestimmtheitsrelation

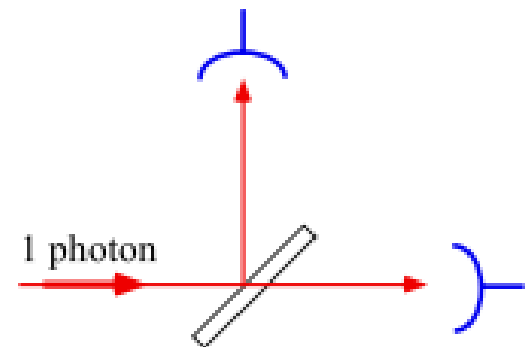
Wesenszüge im Mach-Zehnder-Interferometer

Wesenszug 3: (Eindeutige Messergebnisse)

Am einzelnen Strahlteiler führen die beiden Detektoren eine Orts- bzw. „Weg“-Messung durch.

→ Jede Messung hat ein eindeutiges Ergebnis.

Antikoinzidenz: Genau einer der beiden Detektoren spricht an, niemals beide. Ein einzelnes Photon wird immer nur an einem einzelnen Ort gefunden, niemals an zwei Orten gleichzeitig



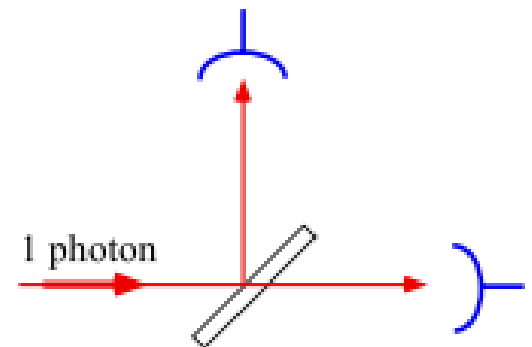
Wesenszüge im Mach-Zehnder-Interferometer

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Es ist nicht vorhersagbar, an welchem der beiden Detektoren das Photon nachgewiesen wird.

Es gibt kein physikalisches Merkmal, das festlegt, ob ein Photon am Strahlteiler durchgelassen oder reflektiert wird.

Statistische Gesetzmäßigkeit: Von sehr vielen Photonen wird etwa die Hälfte in Detektor 1 und die andere Hälfte in Detektor 2 gefunden.



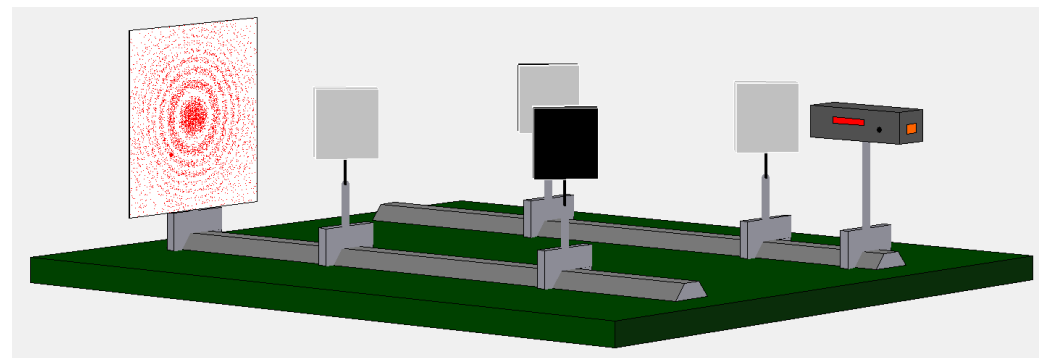
Wesenszüge im Mach-Zehnder-Interferometer

Wesenszug 1 (Statistisches Verhalten):

Beim Auftreffen auf dem Schirm gibt jedes Photon seine Energie lokalisiert an einem ganz bestimmten Fleck ab.

Wo genau der nächste Fleck nachgewiesen wird, lässt sich nicht vorhersagen.

Die Verteilung beim Nachweis vieler Flecke ist jedoch reproduzierbar: das klassische Interferenzmuster

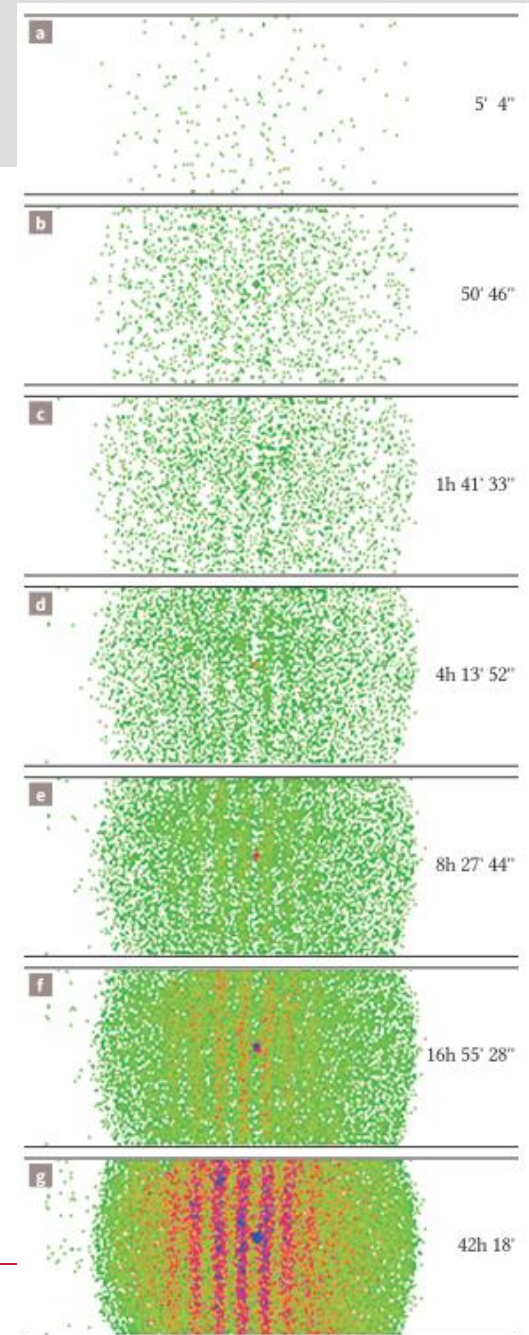


Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Wesenszug 2: „Fähigkeit zur Interferenz“:

„Fundamentalprinzip“ (Brachner & Fichtner 1980)
Auch einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen. Voraussetzung ist, dass es für das Eintreten des gleichen Versuchsergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt.

NB: Qualitative Formulierung von Dekohärenz

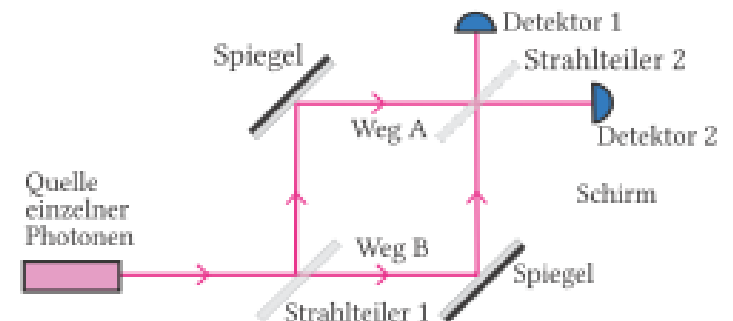
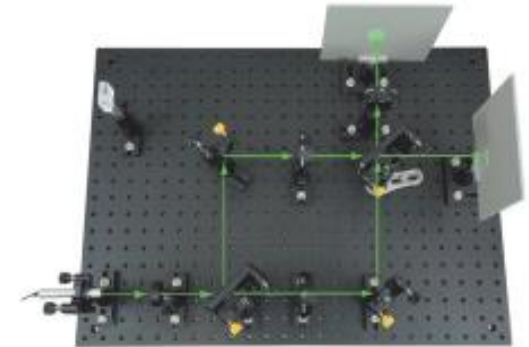


Wesenszüge im Mach-Zehnder-Interferometer

Wesenszug 2 (Fähigkeit zur Interferenz):

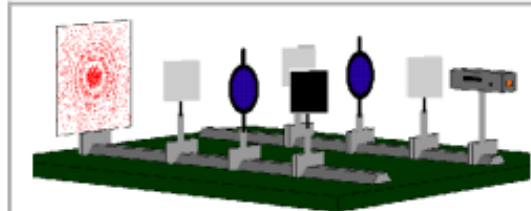
Mach-Zehnder-Interferometer mit eingesetztem Strahlteiler 2:

Für das Ansprechen von Detektor 1 gibt es **zwei klassisch denkbare Möglichkeiten**. Ein Photon kann entweder auf Weg A oder auf Weg B zum Detektor gelangt sein. Interferenz ist zu erwarten (bei Variation der Weglänge).



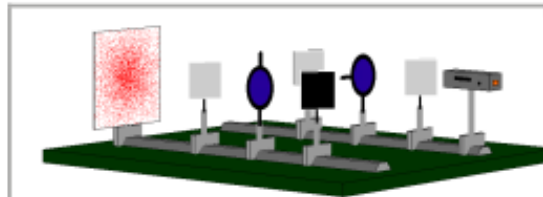
Mach-Zehnder-Interferometer

Fundamentalprinzip:



V1: Interferenz mit Polarisationsfiltern

Durch Aktivieren der Kontrollkästchen „Polfilter 1“ und „Polfilter 2“ werden im Simulationsprogramm zwei Polarisationsfilter in die jeweiligen Strahlengänge gebracht. Beide Polarisationsfilter werden zunächst in senkrechte Stellung gebracht. Nach Einschalten der Quelle baut sich wie vorher aus den „Einschlägen“ vieler einzelner Photonen nach und nach das Interferenzmuster auf.



V2: Wegmarkierung durch Polarisation

Das Polarisationsfilter in Weg B wird in waagerechte Stellung gebracht, das in Weg A bleibt senkrecht eingestellt. Nach Einschalten der Quelle reist wieder jedes einzelne Photon nur einen ein-

Beispielaufgabe: Erklären Sie die unterschiedlichen Ergebnisse der Versuche V1 und V2 mit dem Fundamentalprinzip.

Lösung: In Versuch V1 haben die nachgewiesenen Photonen alle die gleiche Polarisation. Dann gibt es für das Eintreten des Versuchsergebnis zwei klassisch denkbare Möglichkeiten: Ein nachgewiesenes Photon kann auf Weg A oder auf Weg B zum Schirm gelangt sein. Es ist Interferenz zu erwarten.

In Versuch V2 kann ein waagrecht polarisiertes Photon nur auf Weg B zum Schirm gelangt sein, ein senkrecht polarisiertes auf Weg A. Es gibt also jeweils nur eine klassisch denkbare Möglichkeit. Interferenz ist nicht zu erwarten.

Lösen Sie selbst:

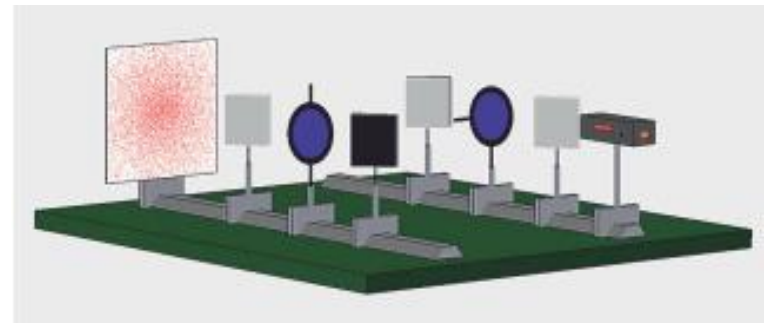
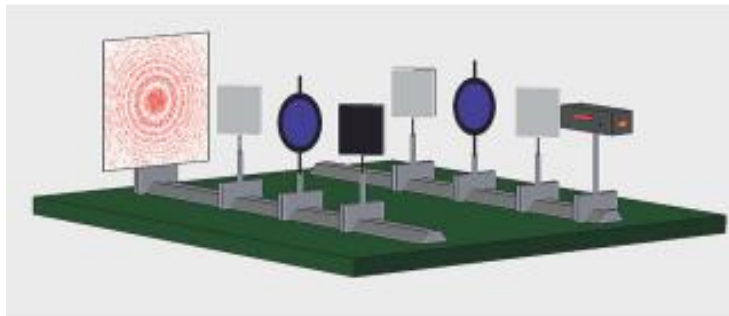
- 1 Vollziehen Sie in Bild B1 gezeigte Experiment ist mit dem Interferometer-Simulationsprogramm nach. Nutzen Sie dazu die Möglichkeit, Detektoren in den Strahlengang zu stellen.
- 2 Im Jahr 1987 wurde der in Bild B1 gezeigte Aufbau zu einem „Experiment mit verzögerter Entscheidung“ erweitert. Die Festlegung, ob ein Photon eine Anordnung mit oder ohne Strahlteiler 2 durchläuft, wurde mit

Wesenszüge im Mach-Zehnder-Interferometer

Wesenszug 4 (Komplementarität):

Zwei Polarisationsfilter prägen den durchgehenden Photonen Weginformation auf.

Kein Interferenzmuster bei senkrecht zueinander eingestellten Polarisationsfiltern: „Welcher-Weg“-Information und Interferenzmuster schließen sich gegenseitig aus



Aktuelle Entwicklung: Quantentechnologien

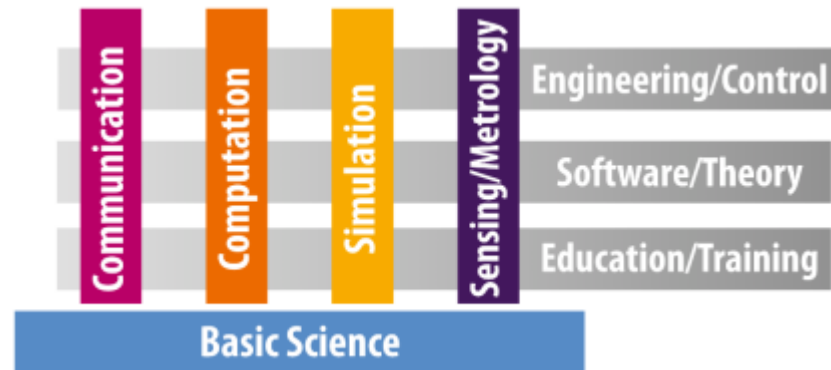


Aktuelle Entwicklung: Quantentechnologien

EU-Flagship-Projekt Quantum Technologies seit 2018:
mit Fokus auf Anwendungen und Produkte



QUANTUM
FLAGSHIP



Aktuelle Entwicklung: Quantentechnologien

EU-Flagship-Projekt Quantum Technologies seit 2018:
mit Fokus auf Anwendungen und Produkte



In diesem Rahmen: Quantum Education Initiative QTedu

Ziel: Masterstudiengänge, Schulungen für die Industrie,
aber auch Quantenphysik in den Schulen (bisher nur in wenigen Ländern Europas)

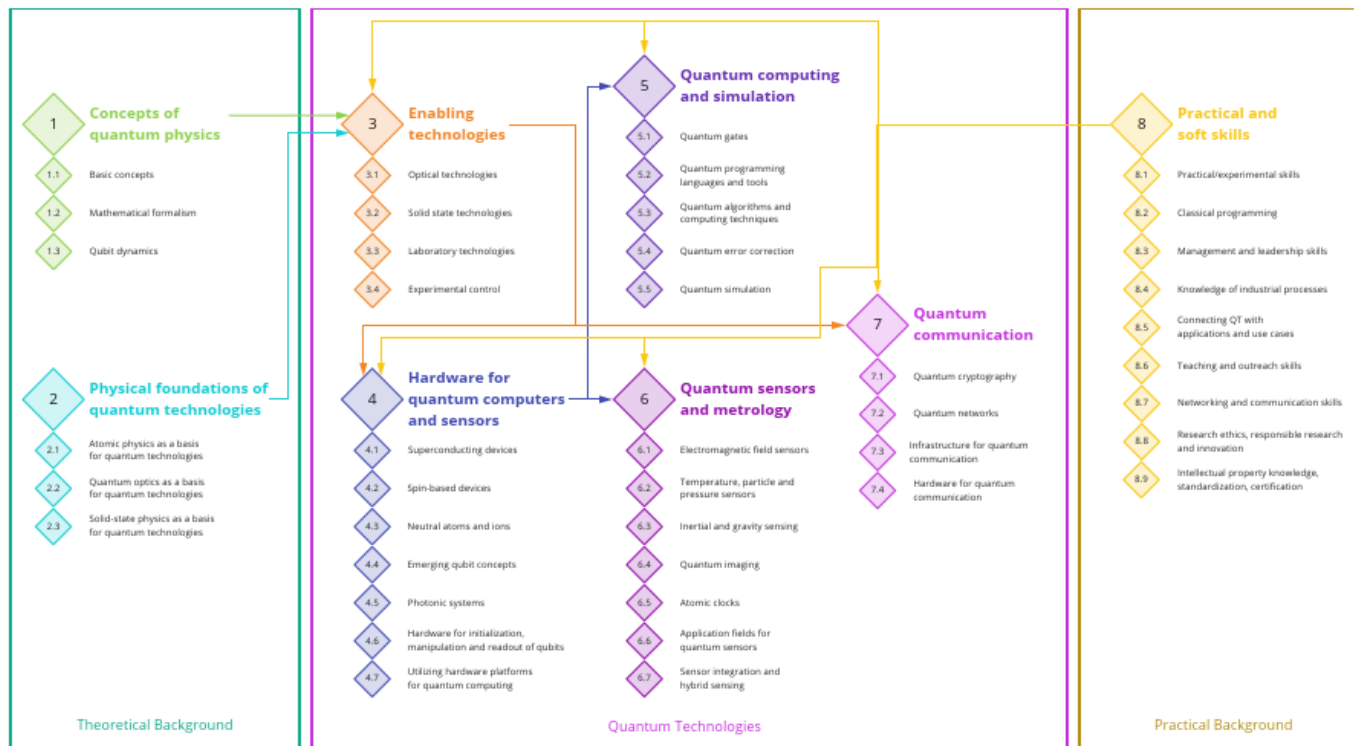
Competence Framework für Quantum Technologies

Competence Framework for Quantum Technologies
Version 1.0 (May 2021)

compiled by Franziska Greinert and Rainer Müller
QTEdu: Coordination and support action for Quantum Technology Education of the European Quantum Technology Flagship



Overview and General Structure



<https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/education-coordination-support-actions/>



Quantentechnologien zum Lernen der Quantenphysik?

Pluspunkte der Quanteninformation:

- setzt direkt an den nichtklassischen Merkmalen der Quantenmechanik an.
- fördert begrifflich saubere Formulierungen, z. B. zu Präparation, Messung, Unbestimmtheitsrelation
- prinzipiell einfache Systeme (nur wenige Zustände)
→ Qubits, Polarisationszustände des Lichts
- teilweise qualitative Argumentationen möglich
- prinzipiell experimentell zugänglich (kein Vakuum, keine tiefen Temperaturen, starke Kostenreduktion in den vergangenen Jahren).

Quantenkryptographie

Nach den derzeitigen Erfahrungen mit Studierenden und Schülern:

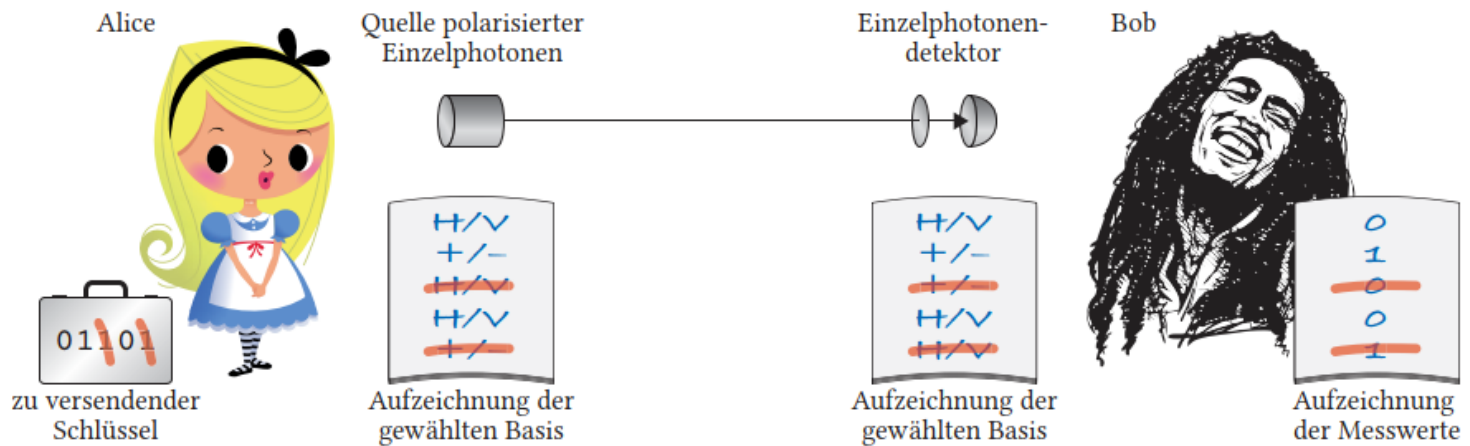
Quantenkryptographie als erfolgversprechendster Inhaltsbereich

→ Verbindung zu neuen Themen aus Informatik, Mathematik, aktuellen Schlagzeilen

Quantenkryptographie

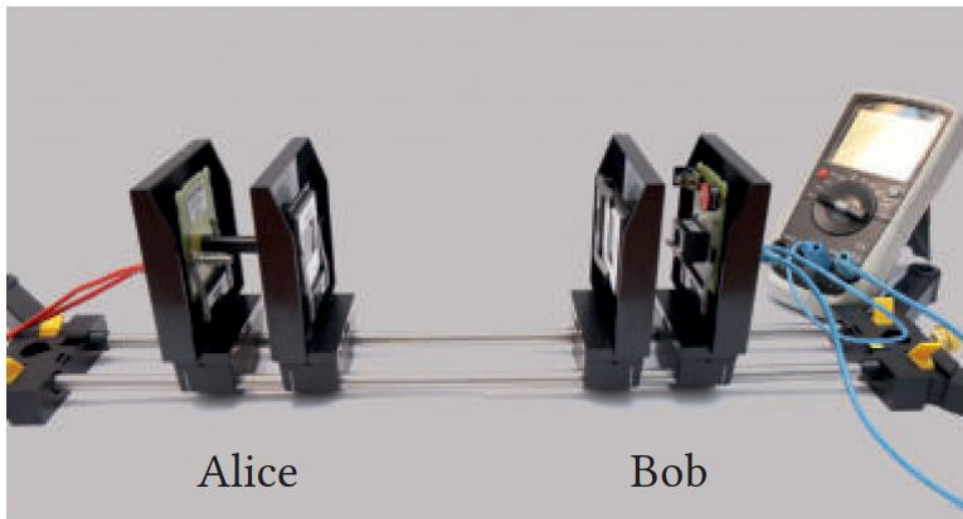
Wesenszüge als Leitlinie auch hier geeignet:

Prinzip der statistischen Vorhersagbarkeit und Fähigkeit zur Interferenz führen bis zum **BB84-Protokoll** der Quantenkryptographie



Quantenkryptographie

Beispiel: Analogversuch zur Schlüsselverteilung nach dem BB84-Protokoll mit Materialien aus der Schulsammlung (Reisch & Franz, PdN 2016)



* Beispielaufgabe: Bits rekonstruieren

Erläutern Sie, wie Bob aus seinen Messergebnissen ein von Alice gesendetes Bit rekonstruieren kann.

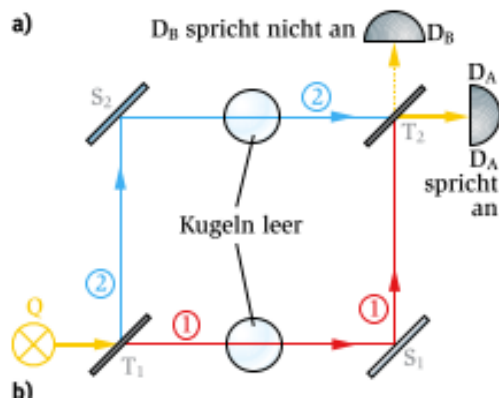
Lösung: Nehmen wir an, Alice will eine 0 versenden und sendet daher ein horizontal polarisiertes Photon. Versuch **V1** zeigt, dass ein Photon bei Bob immer dann nachgewiesen wird, wenn beide Polarisationsfilter gleich eingestellt sind (maximale Intensität im Versuch). Falls Bob seinen Polarisationsfilter auf H eingestellt hat, spricht der Detektor an. Er weiß nun, dass Alice ein H-Photon gesendet hat. Hat er dagegen seinen Polarisationsfilter auf V eingestellt hat, kann er aus dem Nicht-Ansprechen des Detektors ebenfalls schließen, dass Alice ein H-Photon gesendet hat.

Quelle: Dorn/Bader Niedersachsen Oberstufe (2019)

Quantensensorik

Das Nutzen genuin quantenmechanischer Effekte erlaubt Messungen mit höherer Empfindlichkeit.

Musterbeispiel: Bombentest (Elitzur & Vaidman 1993)
„Wechselwirkungsfreie Quantenmessung“



7. Der Knallertest: Sehen, was nicht gesehen wird →

Die Brisanz der Quantenwelt verdeutlichen wir an einem Gedankenexperiment: Ein Fabrikant für Scherzartikel füllte Glaskugeln mit einem Gas, das von bereits *einem* Photon zur Explosion gebracht wird. Leider vermischte er diese sensiblen Knaller mit leeren Kugeln. Kann man funktionierende Knaller erkennen, ohne dass sie ein einziges Photon trifft, ohne dass sie „zerstört“ werden? Anders gesagt: Kann ein Photon den Knaller umfliegen, ihn meiden und trotzdem aus der Ferne „erkennen“? Ein solches *nicht-lokales* Verhalten ist nach klassischer Physik unvorstellbar!

Quelle: Dorn/Bader BaWü SII (2010)

Quantencomputer

- Quantencomputer werden als eine disruptive Technologien angesehen (Acatech 2020)
- großes wirtschaftliches Potential
- öffentlichkeitswirksame deutschland- und europaweite Initiativen zum Bau von Quantencomputern
- gilt als „cooles Nerd-Thema“ (Status: rocket science)

Potential für die Schule?

Quantencomputer

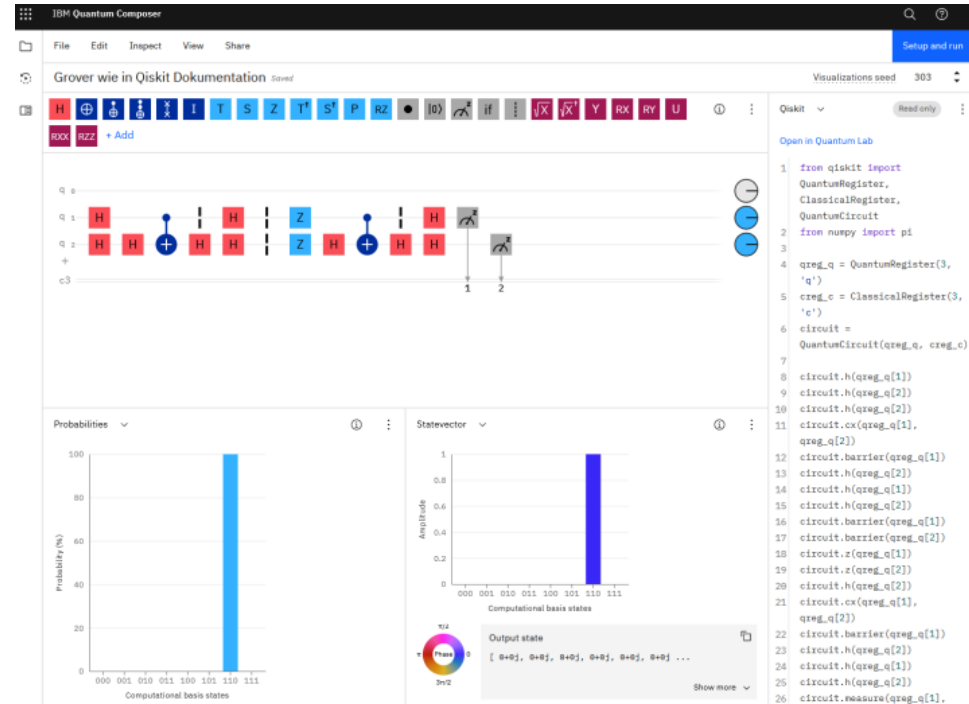
Echte Quantencomputer sind leicht zugänglich:

- Freie Accounts nach Registrierung
- einfach zu bedienende grafische Benutzeroberfläche

Aber Quantenalgorithmen mit Quantenvorteil sind nicht wirklich einfach zu verstehen:

- Faktorisierung großer Zahlen (Shor)
- Datenbanksuche (Grover)
- Lineare Algebra (HHL)

→ Fachdidaktische Herausforderung



Quantentechnologien zum Lernen der Quantenphysik?

Tendenzen:

- „die alte Quantenmechanik, aber unter neuer Perspektive gesehen“
- Gegenüber heute: Polarisation des Lichts wird wichtiger werden.
→ experimentelle Möglichkeiten
- Quantenkryptographie als vielversprechende Anwendung
→ „kommt gut an“
- Verbindung zu Informatik und Mathematik (Stochastik) statt Chemie (Atomphysik)
- Neue Inhalte für Aufgabenstellungen werden erkennbar (bisher in der Quantenphysik begrenzt).
- Gute Simulationen verfügbar (A. Kohnle, www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/de/)