

Einführung in das Konzept der DVD *Quantendimensionen*

Als primäre Zielgruppe sollen Schüler/innen der Sekundarstufe II erreicht werden. Der modulare Aufbau der DVD-ROM dient dazu, den Unterricht je nach Lehrplananforderung der einzelnen Bundesländer, der Leistungsstärke eines Kurses und des vorhandenen Zeitbudgets gestalten zu können.

Es gibt zum einen den Film *Schattenwelten*, der das Interesse für die Thematik wecken und visuelle Anker für den Unterricht setzen soll. Der Kern der Handlung ist das Wechselspiel zwischen sichtbaren Messergebnissen und einer unsichtbaren Quantendimension.

Zum anderen endet der Film mit der Einladung, die Quantendimension genauer zu erkunden. Das geschieht in einzelnen Modulen, die zum Netzwerk der *Subdimension* gehören. Wir bedienen uns dabei der Metapher eines U-Bahn-Netzes, das in der alltäglichen Welt auch nicht sichtbar ist. Jede U-Bahn-Station entspricht einer Lernstation, in der ein einzelnes in sich geschlossenes Thema behandelt wird, das sich auch zum Selbststudium eignet.

Auf der U-Bahn-Linie 1, der *Nonlocality Line*, bauen 14 Stationen aufeinander auf. Je nach Vorkenntnissen der Schüler/innen können Stationen aber auch übersprungen werden. Eine U-Bahn-Station besteht aus einzelnen *Slides*, die Animationssequenzen mit erklärenden Texten enthalten. Auch die *Slides* einer Station bauen aufeinander auf. Zudem beginnt jede U-Bahn-Station mit einem Zitat aus dem Film *Schattenwelten*. Für ein Verständnis ist es aber nicht notwendig, den Film gesehen zu haben.

Eine Besonderheit enthält die Station U1-13. Hier gibt es keine *Slides*, sondern einen Multiple-Choice Test mit Fragen zu den Stationen U1-01 bis U1-12. Werden die Fragen richtig beantwortet, erhält man ein Passwort, mit dem Bonusmaterial zur DVD-ROM bezogen werden kann.

Auf der DVD-ROM *Quantendimensionen* stehen zwei thematische Blöcke im Vordergrund, die für ein grundlegendes Verständnis der Quantenmechanik entscheidend sind.

1. Welle-Teilchen Dualismus
2. Nichtlokalitätsexperimente mit verschränkten Photonen

Dem ersten thematischen Block widmen sich hauptsächlich die ersten sechs Stationen, dem zweiten die Stationen U1-07 bis U1-12.

Wir haben vier Zugänge für die Reise in die Quantendimension konzipiert, die sich graphisch in vier Quadranten wieder spiegeln, die mit vier verschiedenen Grautönen unterlegt sind. In jeder Station sind die einzelnen *Slides* einem der vier Zugänge zugeordnet. Die oberen beiden Quadranten behandeln das Experiment, die unteren beiden die Theorie. Das Thema der Station kann somit aus vier verschiedenen Perspektiven betrachtet.

Experimentelle Zugänge („Teilchenzugänge“)

1. Quadrant: Experiment mit sehr vielen Teilchen
2. Quadrant: Experiment mit einzelnen Teilchen

Theoretische Zugänge („Wellenzugänge“)

3. Quadrant: Beobachtbare Wahrscheinlichkeitsverteilung
4. Quadrant: Nicht direkt beobachtbare Quantendimension (Hilbertraum)

In einzelnen Animationssequenzen der Sildes wiederholen sich folgende Visualisierungsmuster:

- Teilchen werden als Bälle abgebildet.
- Transmission eines Teilchens wird mit einem weißen Quadrat (□), Reflexion mit einem schwarzen Quadrat (■) markiert.
- Die Ergebnisse von vielen Messungen werden als Schwarz-Weiß-Zufallsmuster auf einem „Schachbrett“ dargestellt.
- Die beobachtbare Wahrscheinlichkeitsverteilung für Transmission und Reflexion wird als Betragsquadrat anhand eines *drehenden Rades* wieder gegeben. Diese Darstellung entspricht dem Feynman'schen Zeigerformalismus. Im Rad befindet sich ein Zeiger (Vektorpfeil), der sich im Kreis dreht und dessen Länge dem Radius des Rades und der Amplitude der Welle entspricht. Die Anzahl der Kreisumdrehungen pro Sekunde entspricht der Frequenz der Welle.

Der thematische Block zum Wellen- und Teilchencharakter von Licht gehört seit geraumer Zeit zum Schulunterricht. Noch nicht etabliert hat sich eine Auseinandersetzung mit der Nichtlokalität von verschränkten Photonen. Doch viele moderne Experimente mit verschränkten Photonen führen zu technologischen Anwendungen und werden in den kommenden Jahren die Forschungsabteilungen in Instituten und Unternehmen zunehmend beschäftigen. Daher ist eine Vermittlung quantenmechanischer Grundlagen anhand von verschränkten Photonen wichtig.

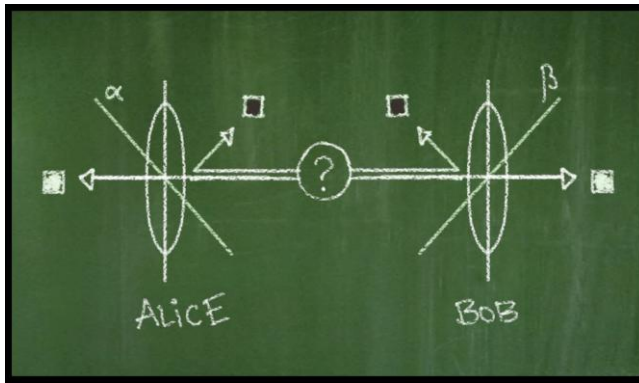
Darüber hinaus sind verschränkte Zustände faszinierend, wenn man sich vorstellt, dass sich *ein* Objekt (eine Wellenfunktion) gleichzeitig an *zwei verschiedenen* Orten aufhält. Die Messung an einem Ort hat unmittelbar Einfluss auf die Messung an einem anderen Ort, da bei beiden Messungen Projektionen eines einzigen Objekts ausgewertet werden. Wir nennen dieses Objekt die Schwingung *Omega*.

Da *Omega* sich an zwei Orten gleichzeitig aufhält, ist es nicht möglich, nur durch eine Messung *Omega* vollständig zu beschreiben. Wir brauchen also zwei Beobachter an zwei verschiedenen Orten. Die beiden Beobachter von *Omega* bezeichnen wir als *Alice und Bob*. *Alice* und *Bob* sind beides Detektoren, die in der Lage sind, *einzelne Photonen* nachzuweisen. Einstein hat die Möglichkeit, dass die Messung von *Alice* sofort und ohne Zeitverlust die Messung von *Bob* an einem beliebig weit entfernten Ort beeinflusst, als spukhafte Fernwirkung bezeichnet und ins Reich der Phantasie verbannt – das EPR-Paradoxon.

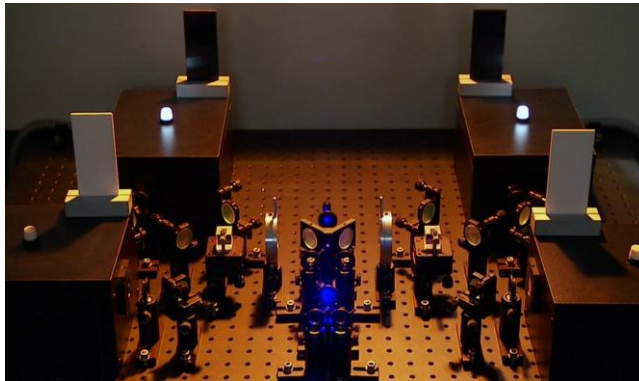
Ein großer Fortschritt beim Nachweis der Nichtlokalität wurde 1995 von Zeilinger erreicht, der eine sehr starke und effiziente Quelle von verschränkten Photonen gefunden hat. Das Institut für Didaktik der Physik Erlangen hat im Internet Experimente mit verschränkten Photonen als Bildschirmexperiment für die Schule aufbereitet (www.quantumlab.de), so dass zumindest am Bildschirm das Experiment nachvollziehbar wird. In diesem Experiment ist *Omega* die Wellenfunktion eines polarisationsverschränkten Paares von Photonen mit Gesamtdrehimpuls Null:

$$|\Omega\rangle = 1/\sqrt{2}(|H_1H_2\rangle + |V_1V_2\rangle)$$

Wir bezeichnen mit Index 1 ein Messergebnis beim Detektor *Alice* und mit Index 2 eines beim Detektor *Bob*. $|H\rangle$ (Horizontal) entspricht der linearen Polarisation parallel zur Filterebene. Das Photon wird am Filter abgelenkt. Das Ergebnis visualisieren wir mit ■. $|V\rangle$ (Vertikal) entspricht der Polarisation vertikal zur Filterebene. Das Photon passiert den Filter, dargestellt mit □.



Alice und Bob messen die Polarisation in Filterstellung α bzw. β . Kommt das Photon durch, bezeichnen wir das Ergebnis mit \square . Wird es reflektiert mit \blacksquare . Pro Messung an einem verschränkten Paar von Photonen ergibt sich eine der vier Kombinationen: $\blacksquare\blacksquare$, $\square\square$, $\blacksquare\square$, $\square\blacksquare$



Aufnahmen aus dem Quantenoptiklabor in Erlangen. Auf der linken Seite befindet sich die Messstation „Alice“ auf der rechten die Messstation „Bob“, jeweils mit den beiden Möglichkeiten Schwarz und Weiß. Die Lämpchen geben an, welche der vier Kombinationen für diese Messung von Omega realisiert wurde.

Die Wellenfunktion ist nicht direkt beobachtbar. Alice und Bob sehen pro Messung lediglich eine der vier Kombinationen $\blacksquare\blacksquare$, $\square\square$, $\blacksquare\square$, $\square\blacksquare$. Alice und Bob sehen von Omega sozusagen nur ein Schwarz-Weiß-Bild.

Es ergeben sich zwei Fragen:

1. Wie kann man *experimentell herausfinden*, ob die Messung von Alice die von Bob nichtlokal beeinflusst?
2. Wie kann man *theoretisch verstehen*, warum die Messung von Alice die von Bob beeinflusst?

Die beiden Fragen lassen sich nach dem Durchlauf der Stationen U1-07 bis U1-12 beantworten.

Mögliche Ziele einer Unterrichtsreihe zur Quantenmechanik

- Verständnis entwickeln, dass mit wenigen, einfachen Grundprinzipien viele Beobachtungen und Experimente aus der Perspektive der Quantenmechanik erklärt werden können.
- Erkenntnis vermitteln, dass Modelle in der Physik nicht endgültig sind, sondern aufgrund neuer Erkenntnisse modifiziert werden müssen.
- Bedeutung erfassen, dass verschränkte Zustände in der Quantenmechanik allgegenwärtig sind und die Grundlage für gegenwärtige und potentielle technische Anwendungen bilden.
- Fähigkeit entwickeln, klassische, reelle Wahrscheinlichkeiten zu komplexen Amplituden zu erweitern.
- Anwendung des Superpositionsprinzips in Kombination mit der Wahrscheinlichkeitsrechnung durch Analogiebildung über das Doppelspaltexperiment hinaus.
- Vergleich von Theorie und Experiment am Beispiel von verschränkten Photonenpaaren.
- Modellbildung zu klassischem Computer und Quantencomputer.