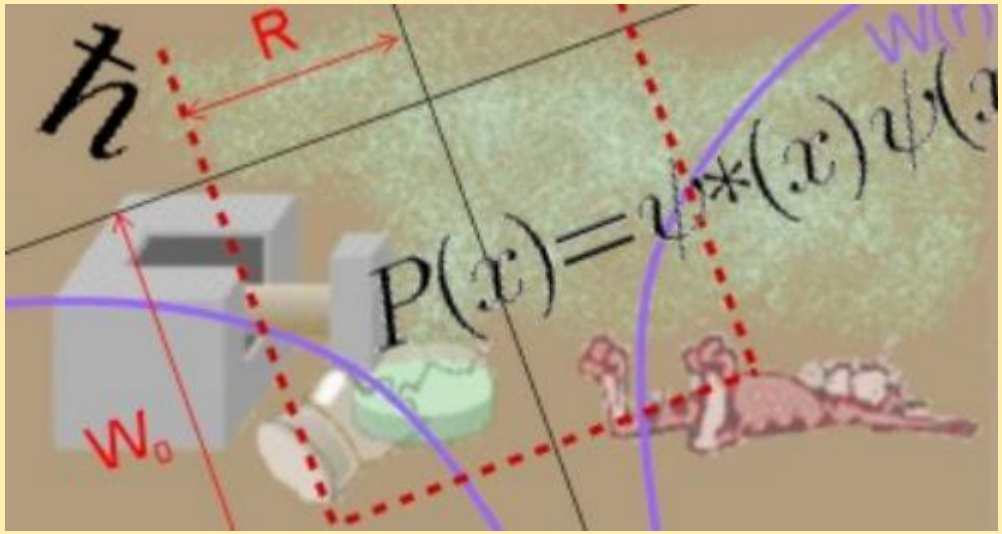
Technische Universität Braunschweig

Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften

Abteilung Physik und Physikdidaktik



Quanteninformation als Inhalt des Physikunterrichts?

Rainer Müller, TU Braunschweig

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Eine zentrale Frage des Physikunterrichts:

Welche Inhalte sollen wir wie unterrichten?

Lehrer/innen schauen in den Lehrplan oder in Schulbücher

→ speziell in der Quantenphysik: Zwänge durch Zentralabitur

Aber wohin schauen Lehrplankommissionen und Schulbuchautoren?

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Mögliche Begründungen für Inhaltsfestlegungen im Physikunterricht:

- Hat sich bewährt
- Dazu gibt es schöne Experimente
- spezielle Sichtweise auf die Welt
- Unser Weltbild verstehen
- Kenntnisse im Alltag anwenden
- bringt mündige Bürger hervor
- Bereitet auf den Beruf vor
- empirisch nachgewiesene Lernerfolge
- vermittelt zentrale Kompetenzen
- Kommt bei den Schülern gut an
- erzeugt Staunen, Faszination
- Methoden der Erkenntnisgewinnung verstehen

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Weiterführende Frage: **Legitimation des Physikunterrichts**

Was kann die Physik gegenüber anderen Disziplinen (wie Medizin, Wirtschaft, Jura) bieten, dass sie – im Gegensatz zu diesen – als Schulfach unterrichtet wird?

Diese Legitimation wirkt zurück auf die oben aufgeworfene Frage.

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Weiterführende Frage: **Legitimation des Physikunterrichts**

Die vermittelten Inhalte und Kompetenzen des Physikunterrichtes stehen nicht per se fest, sondern müssen festgelegt werden, und zwar begründet festgelegt.

Das ist eine didaktische Aufgabe.

In der jüngeren Vergangenheit: Weitgehend ohne fachdidaktische Beteiligung

Bildungsstandards (2004): Basiskonzepte, Kompetenzen

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Eine vernachlässigte fachdidaktische Diskussion. Wichtige Stationen:

MNU-Empfehlungen 2001
„Physikunterricht und naturwissenschaftliche Bildung – aktuelle Anforderungen“

BLK-Expertise 1997
Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“

Jung 1991
z. B. in Bleichroth et al.: Fachdidaktik Physik

noch früher: Wagenschein, Litt

Problem der Letztbegründung: Münchhausen-Trilemma

Viele Ziele haben den Charakter **normativer Setzungen**, die nicht weiter begründet werden.

Schlimm oder nicht schlimm?

Problem der Letztbegründung: Münchhausen-Trilemma

Viele Ziele haben den Charakter **normativer Setzungen**, die nicht weiter begründet werden.

Hans Albert (1968): Problem der Letztbegründung – **Münchhausen-Trilemma**

> „Wenn man für alles eine Begründung verlangt, muss man auch für die Erkenntnisse, auf die man jeweils die zu begründende Auffassung – […] – zurückgeführt hat, wieder eine Begründung verlangen. Das führt zu einer Situation mit drei Alternativen, die alle drei unakzeptabel erscheinen [...]“

(H. Albert, Traktat über kritische Vernunft)

Problem der Letztbegründung: Münchhausen-Trilemma

Viele Ziele haben den Charakter **normativer Setzungen**, die nicht weiter begründet werden.

Hans Albert (1968): Problem der Letztbegründung – **Münchhausen-Trilemma.**

Drei Alternativen:

- **infiniter Regress** (die Begründung kommt nie zu einem Ende)
- **logischer Zirkel** (Henne-Ei-Problem)
- **Abbruch des Verfahrens** (durch willkürliche Setzungen)

→ Normative, willkürliche Setzungen an geeigneter Stelle sind kein Mangel, sondern unvermeidlich

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Zwei Kriterien für Ziele des Physikunterrichts scheinen sinnvoll:

- **Selbstkonsistenz**
  Das Argument darf nicht in Wirklichkeit etwas Anderes viel besser begründen als Physikunterricht

- **Realitäts-Check**
  Sähe der reale Physikunterricht tatsächlich so aus, wenn wir das Argument ernst meinten?

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Was bleibt?

~~Dazu gibt es schöne Experimente~~

spezielle Sichtweise auf die Welt

Hat sich bewährt

~~Kenntnisse im Alltag anwenden~~

Unser Weltbild verstehen

~~Bereitet auf den Beruf vor~~

~~bringt mündige Bürger hervor~~

vermittelt zentrale Kompetenzen

empirisch nachgewiesene Lernerfolge

~~erzeugt Staunen, Faszination~~

~~Kommt bei den Schülern gut an~~

Methoden der Erkenntnisgewinnung verstehen

Vorüberlegung: Legitimation des Physikunterrichts

Wesentliche Legitimationen, die beiden Tests standhalten:

1. Physik ist eine **paradigmatische Grundlagenwissenschaft**, und zwar hinsichtlich ihrer Arbeitsweisen wie hinsichtlich ihrer Ergebnisse. Einen Zugang zu ihr nicht anzubieten, würde bedeuten, menschliche Erfahrungs- und Entfaltungsmöglichkeiten vorzuenthalten (Jung 1991).

→ Scientific Literacy, Kompetenzorientierung

2. [... Die ...] naturwissenschaftlichen Fächer [beziehen] ihre Daseinsberechtigung aus dem Umstand, dass sie **unterschiedliche, wechselseitig nicht ersetzbare Wege des Weltverstehens** ermöglichen [...].
   Die Physik hat wie keine andere Naturwissenschaft unsere Vorstellung von der Welt beeinflusst , [...] von dem, was „die Welt zusammenhält“. (BLK 1997)

→ Entmythologisierung, Weltbildprägung, aber auch Neugier, Staunen

milq – ein chronologischer Abriss

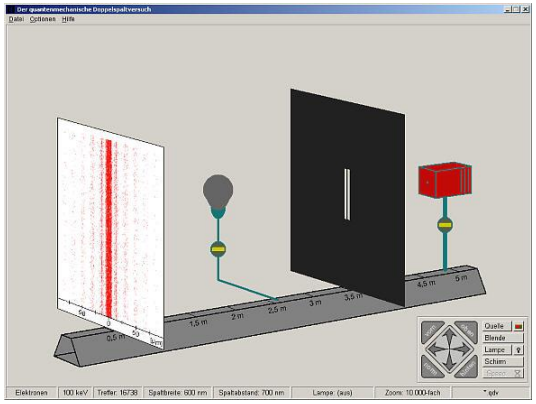
1. Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (ca. 1998–)

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.

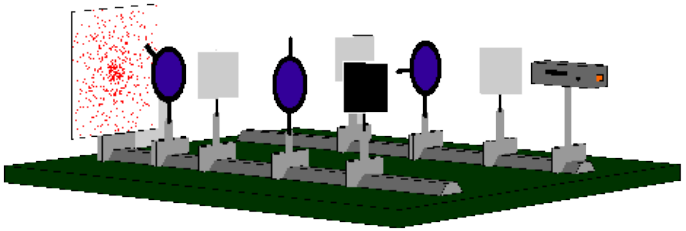


milq – ein chronologischer Abriss

1. Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik (ca. 1998–)

Wie wird das erreicht?

- 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)



Unterrichtsverlauf im milq-Lehrgang

Qualitativer Basiskurs

Erster Teil (Photonen)

1. Photoeffekt
2. Präparation von Eigenschaften

Mach-Zehnder-Interferometer:

3. Wellen- und Teilchen-verhalten
4. Eigenschaft “Ort”?

5. Wahrscheinlichkeits-interpretation

Zweiter Teil (Elektronen)

6. Elektronenbeugung

Doppelspalt:

7. ψ und seine Bedeutung
8. Eigenschaft “Ort”
9. Der Messprozess
10. Schrödingers Katze

11. Unbestimmtheitsrelation

milq – ein chronologischer Abriss

2. Wesenszüge der Quantenphysik (Küblbeck & Müller 2002)

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

Illustration der Wesenszüge anhand von Versuchsanordnungen und deren experimentellen Ergebnissen.

Ein weiterer Schwerpunkt: Modellbildung und Herausstellen des Charakters wissenschaftlicher Theorien

milq – ein chronologischer Abriss

Wesenszüge der Quantenphysik
(Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

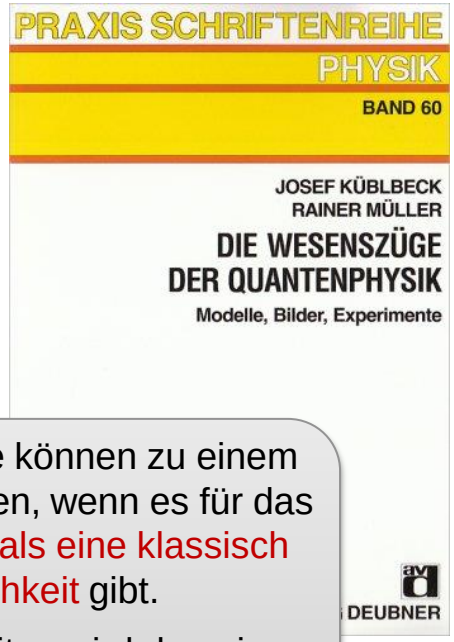
In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur **statistische Vorhersagen** möglich.

milq – ein chronologischer Abriss

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“.

milq – ein chronologischer Abriss

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.

milq – ein chronologischer Abriss

Wesenszüge der Quantenphysik
(Küblbeck & Müller 2002)

Wesenszug 1: Statistisches Verhalten

Wesenszug 2: Fähigkeit zur Interferenz

Wesenszug 3: Eindeutige Messergebnisse

Wesenszug 4: Komplementarität

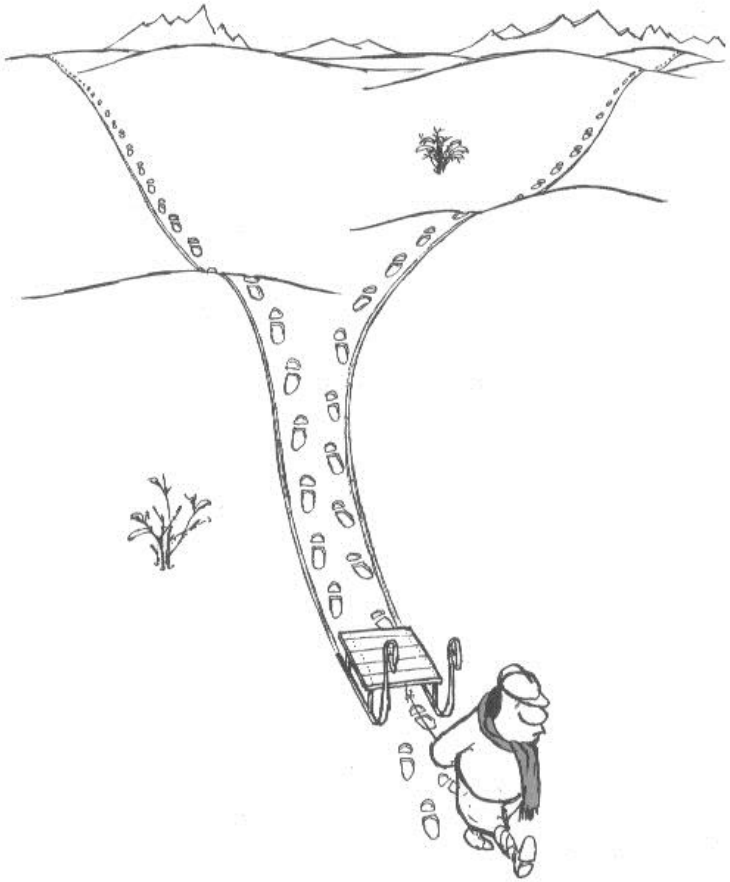
Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster schließen sich aus.

Quantenobjekte können nicht auf Ort und Impuls gleichzeitig präpariert werden.

Aus heutiger Sicht auch: Verschränkung

milq – ein chronologischer Abriss

Verschränkung?



milq – empirische Ergebnisse

Zentrale Frage: Werden die angestrebten Ziele erreicht?

Problem: Es gab und gibt keine Standards

Standards sollten begründet werden, und bei der Begründung gerät man in das Münchhausen-Trilemma.

milq – empirische Ergebnisse

Zentrale Frage: Werden die angestrebten Ziele erreicht?

Problem: Es gab und gibt keine Standards

Standards sollten begründet werden, und bei der Begründung gerät man in das Münchhausen-Trilemma.

Übliche Lösung: **Normative Setzung**, auf die sich die Beteiligten einigen.
(Beispiel: FCI in der Mechanik)

Eine solche einvernehmliche Setzung von Standards ist in der Quantenphysik nicht erreicht worden – die Zielsetzungen sind zu unterschiedlich.

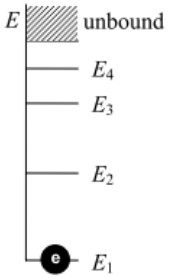
milq – empirische Ergebnisse

Vergleich zweier Tests: Münchener Unterrichtskonzept (2000) – orientiert an Schülervorstellungen) vs. QMCS (McCagan et al. 2010) – relativ traditionelle Themen

3. Kreuzen Sie bitte jeweils die Ziffer an, die für Sie zutrifft.

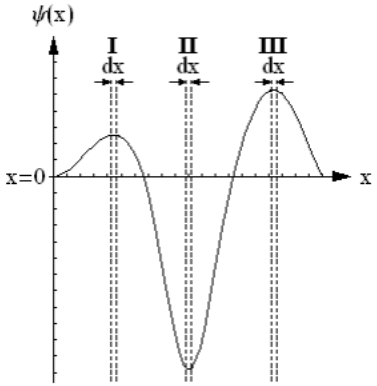
Ein Atom hat eine ähnliche Struktur wie das Sonnensystem (Planeten, die die Sonne umkreisen)	trifft ganz genau zu	1	2
Elektronen im Atom sind verschmierte Ladungswolken, die den Kern umgeben.	trifft ganz genau zu	1	2
Die Elektronen bewegen sich auf bestimmten Bahnen mit hoher Geschwindigkeit um den Kern.	trifft ganz genau zu	1	2
Man kann den Elektronen im Atom im allgemeinen keine Bahn zuordnen.	trifft ganz genau zu	1	2
Atome kann man sich nicht vorstellen	trifft ganz genau zu	1	2
Die Energie eines Atoms kann jeden Wert annehmen.	trifft ganz genau zu	1	2
Man kennt den Ort eines Elektrons im Atom nicht genau, weil es sehr klein ist und sich schnell bewegt.	trifft ganz genau zu	1	2
Wenn das Elektron durch das Doppelspaltexperiment zum Schirm fliegt, nimmt es einen ganz bestimmten Weg, auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann.	trifft ganz genau zu	1	2
Das Elektron läuft einen bestimmten Weg, unabhängig davon, ob ich den Weg beobachte oder nicht.	trifft ganz genau zu	1	2
Über das Verhalten einzelner Elektronen beim Doppelspaltexperiment kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das statistische Verhalten vieler gleichartig präparierter Elektronen machen.	trifft ganz genau zu	1	2
Die augenblickliche Position eines Elektrons zwischen Quelle und Schirm ist prinzipiell unbestimmt.	trifft ganz genau zu	1	2
Die augenblickliche Position eines Elektrons zwischen Quelle und Schirm ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt.	trifft ganz genau zu	1	2

3. An electron in an atom has the energy level diagram at right. The electron is in its lowest energy state, as shown in the diagram. What is the lowest energy photon that it can absorb?



A. It can absorb a photon of any arbitrarily small energy.
B. E_1
C. E_2
D. $E_2 - E_1$
E. $E_4 - E_3$

11. The plot at right shows a snapshot of the spatial part of a one-dimensional wave function for a particle, $\psi(x)$, versus x. $\psi(x)$ is purely real. The labels, I, II, and III, indicate regions in which measurements of the position of the particle can be made. Order the probabilities, P, of finding the particle in regions I, II, and III, from biggest to smallest.

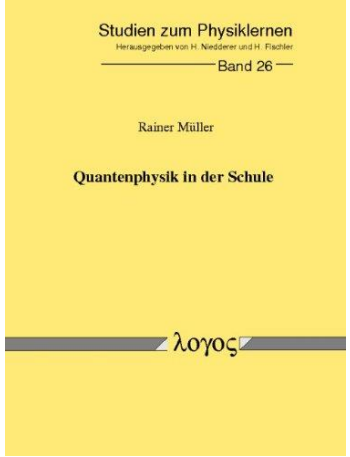


A. P(III) > P(I) > P(II)
B. P(II) > P(I) > P(III)
C. P(III) > P(II) > P(I)
D. P(I) > P(II) > P(III)
E. P(II) > P(III) > P(I)

milq – empirische Ergebnisse

Empirische Untersuchungen (Müller 2002) zum Lernerfolg mit Schüler/inne/n der Jgst. 13 GK/LK aus Bayern, Hessen, Baden-Württemberg:

- Akzeptanzbefragungen (Teaching Experiments; N = 8)
- Interviews zu Vorstellungen über Quantenphysik (N = 23)
- Fragebogen zu Vorstellungen (N = 60)
- zusätzlich Klausurergebnisse, etc.



milq – empirische Ergebnisse

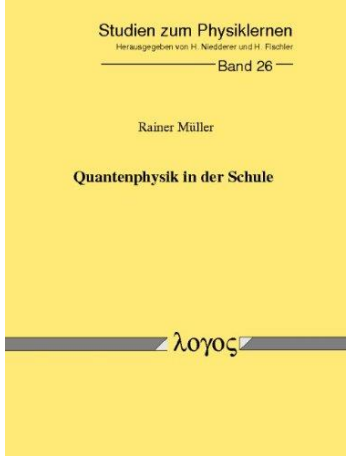
Ergebnisse der Vorstellungs-Fragebogenuntersuchung:

Versuchsgruppe: 2 Grundkurse, 3 Leistungskurse (N=60)

Kontrollgruppe: Studierende aus dem 2. Semester (N=35)

Untersucht wurden die Vorstellungen der Probanden zu verschiedenen Teilaspekten der Quantenmechanik

(Atomvorstellung, Determinismus, Eigenschaftsbegriff, Unbestimmtheitsrelation)



milq – empirische Ergebnisse

Ergebnisse der Vorstellungs-Fragebogenuntersuchung:

Bei allen untersuchten Aspekten hatte die Kontrollgruppe signifikant bis hochsignifikant besser ausgeprägte quantenmechanisch korrekte Vorstellungen mit hohen Effektstärken.

	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe	Effektstärke
Atomvorstellung (6 Items)	+60,9	+40,8	0,65**
Determinismus (9 Items)	+51,6	+37,4	0,47*
Eigenschaftsbegriff (3 Items)	+71,6	+41,9	0,83***
Unbestimmtheitsrelation (10 Items)	+51,5	+30,2	0,92***

(Index aus mehreren Items: +100: quantenmechanische Vorstellung, -100: klassische Vorstellung)

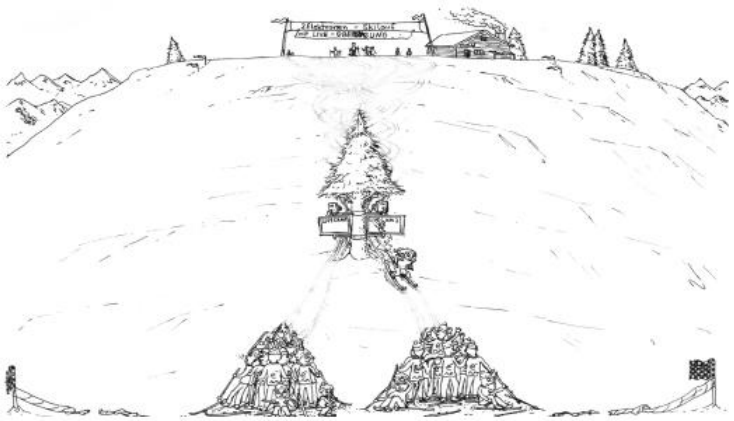
milq – ein chronologischer Abriss

3. milq in der 10. Jahrgangsstufe (Schorn 2007)

Ziel: Erster Einblick in die Unterschiede zwischen klassischer und Quantenphysik für Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I.

Im Mittelpunkt: **Quantenmechanischer Eigenschaftsbegriff**
Quantenobjekten kann man nicht permanent (unabhängig) von einer Messung Eigenschaften wie Ort oder Geschwindigkeit zuordnen.

Unterrichtsgang: Wellen – Doppelspaltexperiment – Messen und Besitzen von Eigenschaften – Unbestimmtheitsrelation



milq – ein chronologischer Abriss

3. milq in der 10. Jahrgangsstufe (Schorn 2007)

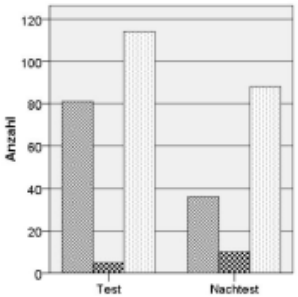
Empirische Untersuchung:

- 14 Klassen an 5 bayerischen Gymnasien (N=351)
- Fragebögen (Multiple Choice und halboffen) zu Lernerfolg und Interessantheit incl. Nachtest nach 5 Monaten
- Interviews an Zufallsstichprobe
- kein Kontrollgruppendesign

Ergebnisse:

Im Durchschnitt: 73% der möglichen Höchstpunktzahl

(56% im Nachtest)



1: Man kann an einem Quantenobjekt prinzipiell jederzeit die Eigenschaft „Ort“ messen

2: Quantenobjekte besitzen jederzeit die Eigenschaft „Ort“

3: Erhält man bei der Messung der Eigenschaft „Ort“ einen Messwert, kann man daraus nicht schließen, dass das Quantenobjekt vor der Messung die Eigenschaft „Ort“ besessen hat

Abb. 4: Unterschied zwischen „Besitzen“ und „Messen“ von Eigenschaften in der Quantenphysik

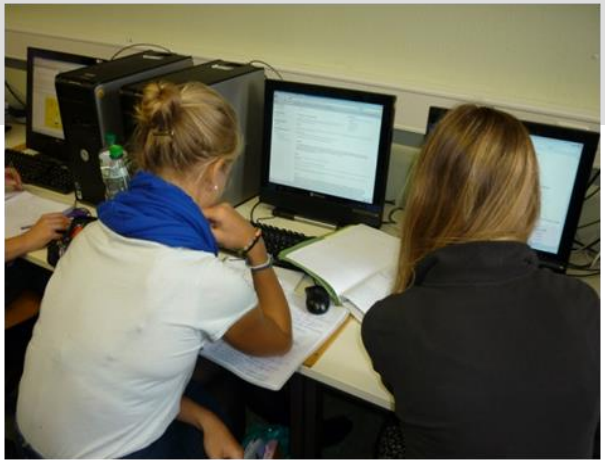
milq – ein chronologischer Abriss

4. Schülerprogramm zur Quantenreflexion SPQR (Dammaschke 2010)

Zwei Zielsetzungen:

- **„Schulpraktische Anpassung“:**
  Anpassen der Inhalte an die Erfordernisse des niedersächsischen Kerncurriculums und der EPA

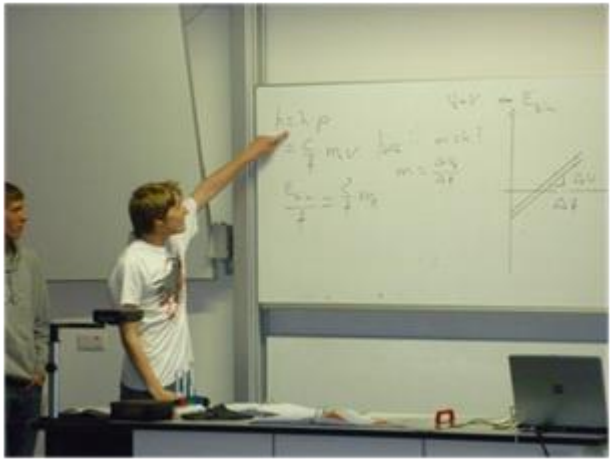
- **Methodische Anreicherung:**
  Blended E-Learning mit Partnerarbeit und Plenumsphasen, Portfolio, Merksätzen, gestuften Hilfen, Anregungen zu Selbstevaluation.



Partnerarbeit am Internetrechner

Arbeit mit dem Quantenportfolio

Plenumsphase
Photoeffekt



a) Realexperiment und Simulation im Vergleich,

b) ein Team stellt eine eigene Herleitungsversion zum Photoeffekt vor

milq – ein chronologischer Abriss

4. Schülerprogramm zur Quantenreflexion SPQR (Dammaschke 2010)

Evaluation von SPQR:

Erprobungsgruppen: 3 Kurse auf erhöhtem Niveau (N=60)
Kontrollgruppen: 3 Kurse, gemischt (N=50)

- Selbstwirksamkeitserwartung (Jerusalem/Schwarzer)
- Intrinsische Motivation (KIM; Wilde et al.)
- milq-Vorstellungsfragebogen

Ergebnis: Keinerlei signifikante Unterschiede feststellbar

Exkurs: Cognitive Load Theory

Befund:

In etlichen Studien ist zu beobachten, dass die Hinzunahme intuitiv hilfreicher und pädagogisch begründeter Maßnahmen den Lernerfolg **nicht** steigert.

Allein in unserer Arbeitsgruppe (alle unveröffentlicht):

- SPQR,
- bestimmte Arten von kontextorientierten Aufgaben,
- unterstützende Zusatzfragen beim Aufgabenlösen.

Exkurs: Cognitive Load Theory

Befund:

In etlichen Studien ist zu beobachten, dass die Hinzunahme intuitiv hilfreicher und pädagogisch begründeter Maßnahmen den Lernerfolg **nicht** steigert.

Allein in unserer Arbeitsgruppe (alle unveröffentlicht):

- SPQR,
- bestimmte Arten von kontextorientierten Aufgaben,
- unterstützende Zusatzfragen beim Aufgabenlösen.

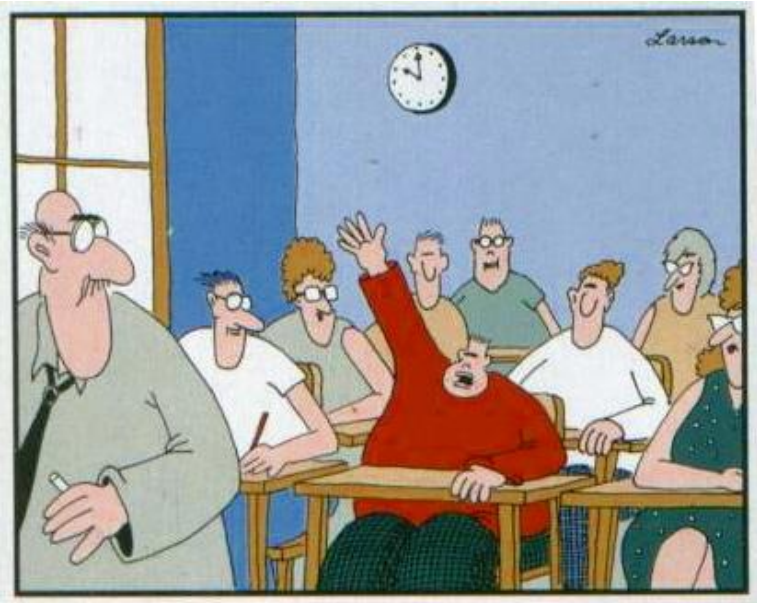
Gemeinsames Merkmal: **„Unterstützende“ Maßnahmen erzeugen cognitive load.**

Exkurs: Cognitive Load Theory

Begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses bekannt geworden durch
G. A. Miller: *The Magical Number Seven, Plus or Minus Two* (1956)

Cognitive Load Theory:

Begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses
bei der Informationsverarbeitung und -speicherung
behindert den Wissenserwerb. (Sweller 1994)



"Mr. Osborne, may I be excused?
My brain is full."

Exkurs: Cognitive Load Theory

Vergleichen Sie die beiden folgenden Aufgaben:

2. Herr Meier fährt mit seinem Auto insgesamt $20\,\mathrm{km}$ auf der Autobahn. Die ersten $10\,\mathrm{km}$ ist die Strecke frei und er kann $100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ fahren. Auf den zweiten $10\,\mathrm{km}$ ist jedoch eine Baustelle, in der er nur $50\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ fahren kann. Berechnen Sie die Durchschnittsgeschwindigkeit seiner Autobahnfahrt. ($Z = 5$)

3. Berechnen Sie die Wurfweite eines Balles, der unter einem Winkel von 20° zur Horizontalen und mit einer Geschwindigkeit von $90\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ abgeworfen wird. Vereinfacht wird angenommen, dass der Wurf direkt vom Erdboden aus durchgeführt wird. ($Z = 9$)

Exkurs: Cognitive Load Theory

Empirische Studie (Stindt, Strahl & Müller 2014) mit Studierenden (N = 16):

Untersuchung der **Anzahl richtiger Lösungen** einer Aufgabe vs. **Komplexität.**

Einfachstes Maß für Komplexität:
„Zahl der Lösungsschritte“ *Z*

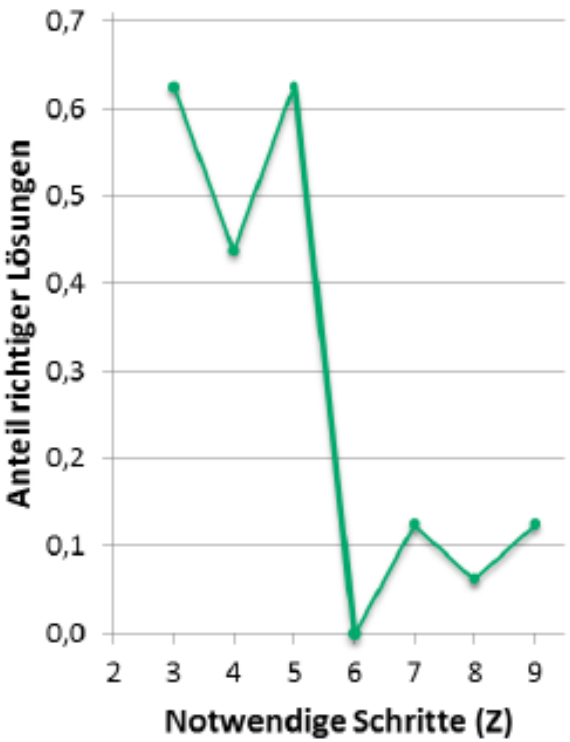
Exkurs: Cognitive Load Theory

Empirische Studie (Stindt, Strahl & Müller 2014) mit Studierenden (N = 16):

Untersuchung der **Anzahl richtiger Lösungen** einer Aufgabe vs. **Komplexität**.

Einfachstes Maß für Komplexität:
„Zahl der Lösungsschritte“ *Z*

in der Chemie: Johnstone & El-Banna (1986)

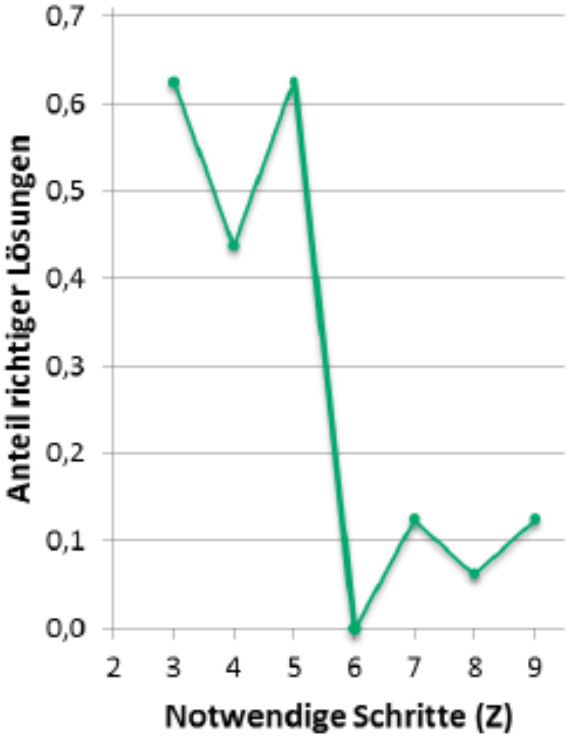


Exkurs: Cognitive Load Theory

Empirische Studie (Stindt, Strahl & Müller 2014) mit Studierenden (N = 16):

Untersuchung der **Anzahl richtiger Lösungen** einer Aufgabe vs. **Komplexität**.

Einfachstes Maß für Komplexität:
„Zahl der Lösungsschritte“ *Z*



→ **Schon kleine Veränderungen der Komplexität einer Aufgabe können ihre Lösungswahrscheinlichkeit drastisch verändern.**

In meinen Augen: Cognitive Load ist einer der wichtigsten Einflussfaktoren für die Fachdidaktik.

Ausblick: Quanteninformation

Wie geht es weiter mit der Quantenphysik in der Schule?

Derzeitiger Trend: **Quanteninformation**

(mehrere Arbeitsgruppen in der Physikdidaktik, die hier in Theorie und Experiment arbeiten).

Was ist Quanteninformation

Aktuelles Forschungsfeld der Quantenphysik.

Bild: PTB

Nutzt Eigenschaften von Quantensystemen zur Informationsübertragung und Informationsverarbeitung.

Quantenkryptographie

Quantencomputer

Experimente meist mit wenigen Photonen / Atomen.

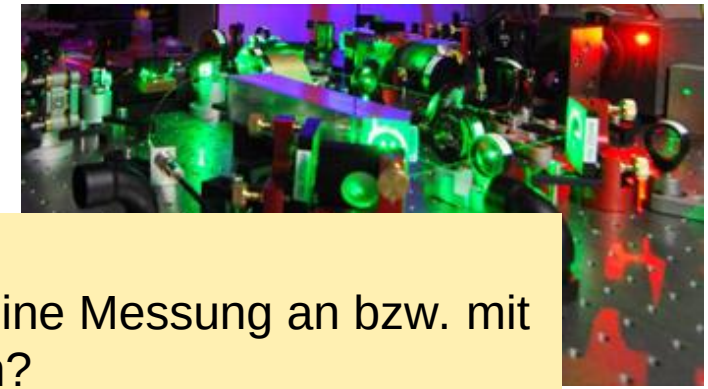


Bild: AEI

Fundamentale Frage: Wie viel kann ich durch eine Messung an bzw. mit einem Quantensystem lernen?

Ausblick: Quanteninformation

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)
  → Quits, Polarisationszustände des Lichts
- teilweise qualitative Argumentationen möglich
- prinzipiell experimentell zugänglich (kein Vakuum, keine tiefen Temperaturen, starke Kostenreduktion in den vergangenen Jahren).

Ausblick: Quanteninformation

Derzeitiges Projekt: www.quanth-physik.de (→ T. Franz)

Ziel:

Erstellung von Online-Lektionen zur Quanteninformation

Zielgruppen:

A. Studierende des Lehramts

B. Fachstudierende

Themen:

1. Quantenphysik von Einzelsystemen
2. Quantenphysik von Mehrteilchensystemen
3. Quantenkryptographie
4. Quantencomputer

Technische Universität Braunschweig

IFdN TU Braunschweig

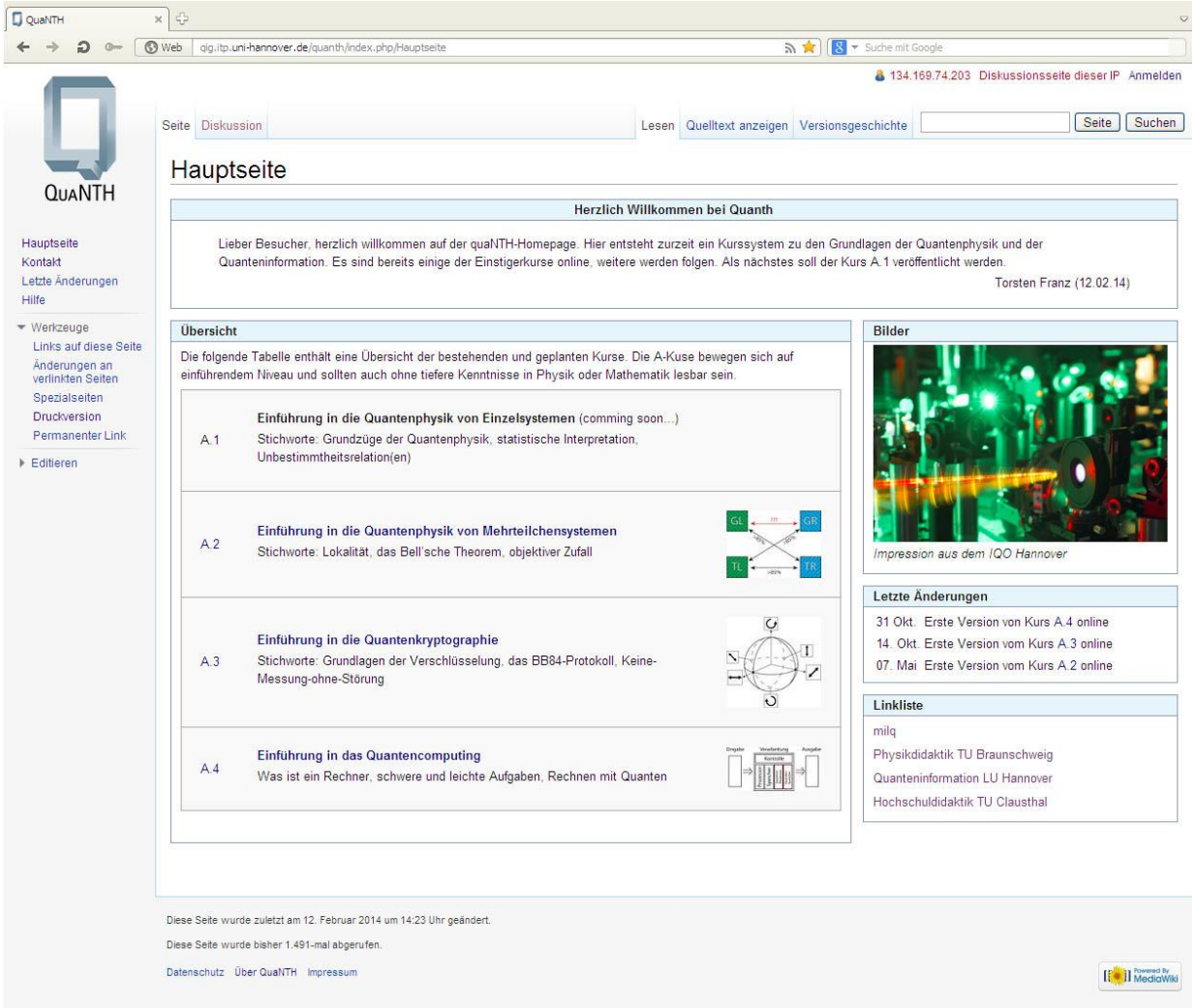
Leibniz Universität Hannover

ITP LU Hannover

TU Clausthal

ZHD TU Clausthal

Ausblick: Quanteninformation



Ausblick: Quanteninformation

Derzeit: In Bezug auf die Schule erste Tendenzen erkennbar, aber noch kein ausgearbeitetes Konzept. Erste empirische Ergebnisse liegen vor.

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/)

Ausblick: Quanteninformation

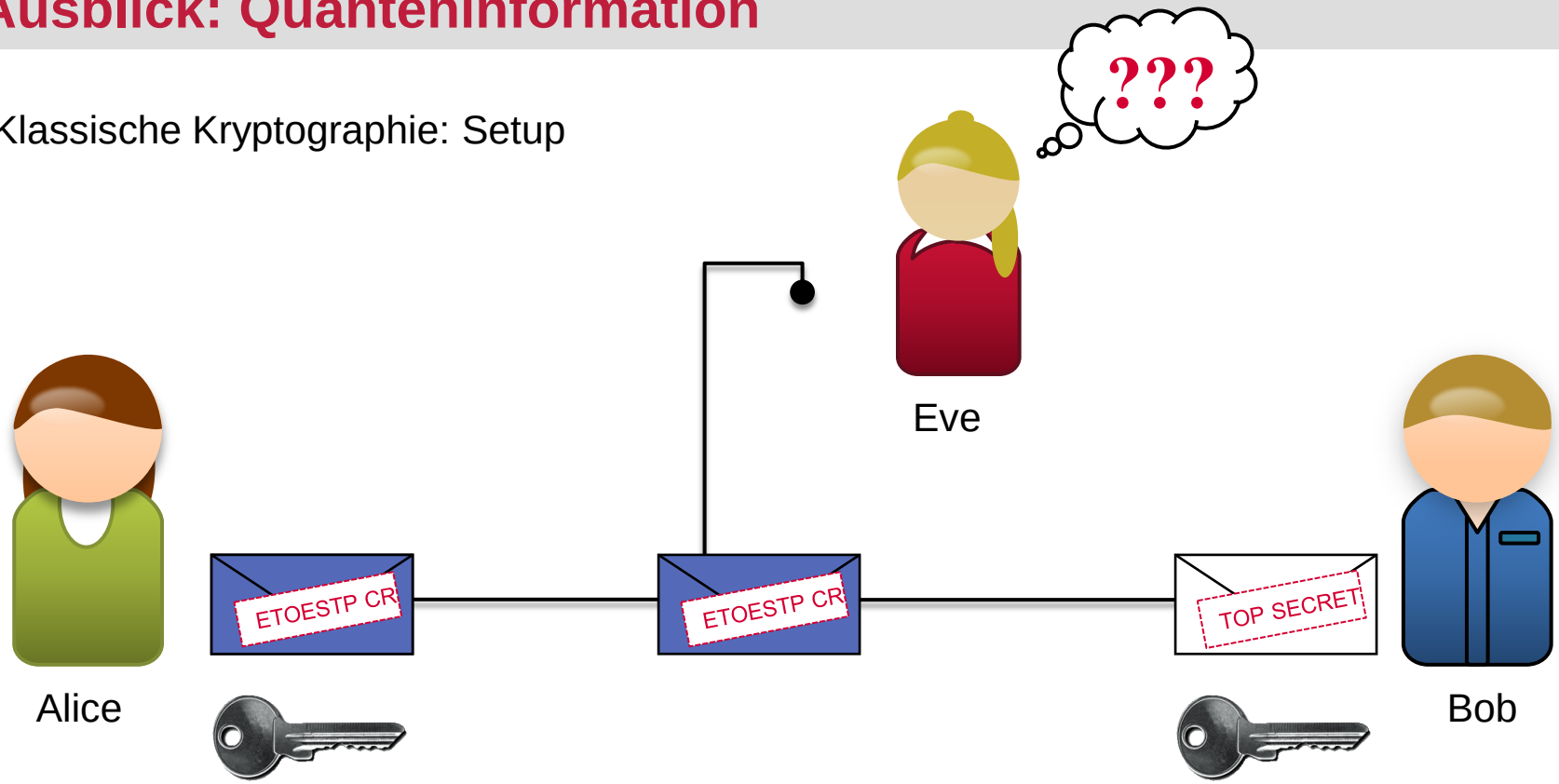
Nach den derzeitigen Erfahrungen mit Studierenden:

Quantenkryptographie als erfolgversprechendster Inhaltsbereich

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

Ausblick: Quanteninformation

Klassische Kryptographie: Setup



In der Quantenkryptographie geht es nicht um die Entwicklung neuer Verschlüsselungsmethoden, sondern um den sicheren Austausch von Schlüsseln.

Klassische Kryptographie: Caesar-Verschlüsselung

Austauschregel:

Verschiebe jeden Buchstaben um einen festen Wert, z.B. 1:

```
a -> b
b -> c
c -> d etc.
```

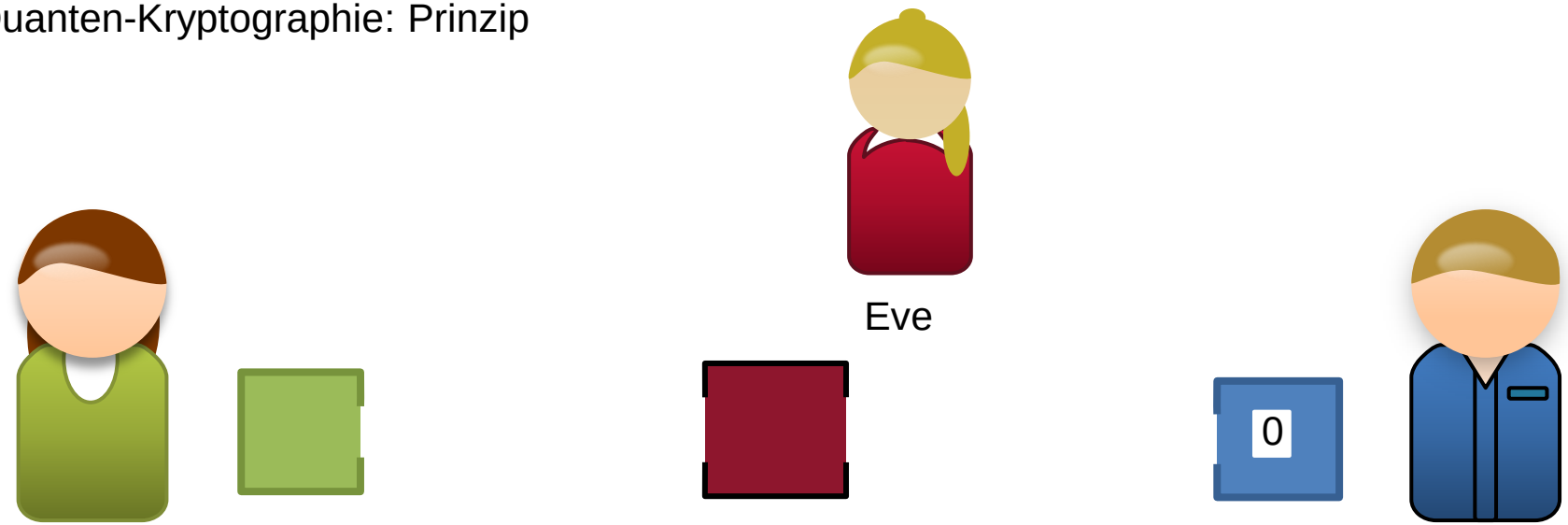
```
dies ist ein geheimer text
```

↓

```
ejft jtu fjo hfifjnfs ufyu
```

Ausblick: Quanteninformation

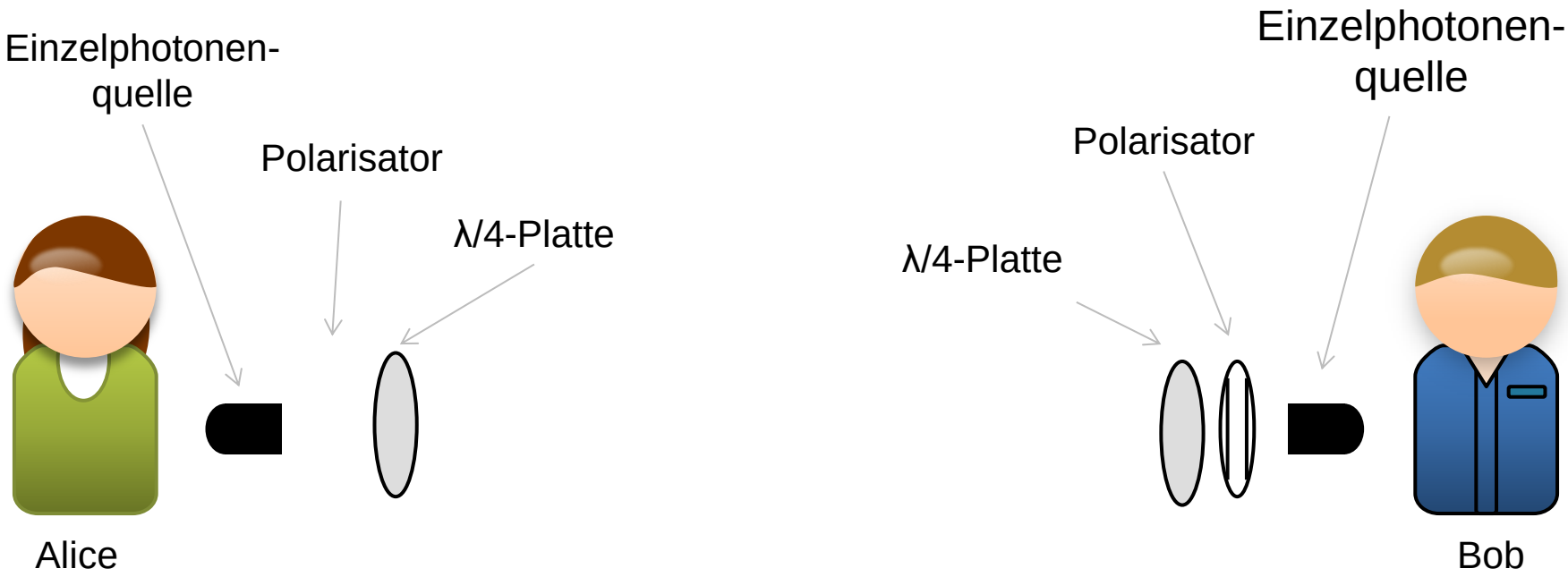
Quanten-Kryptographie: Prinzip



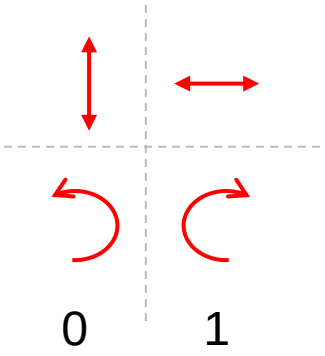
Wenn Eve abhört, verändert sie den Zustand bei Bob.

Je mehr Information Eve abgreift, desto größer ist die Störung.

Ausblick: Quanteninformation – BB84-Protokoll



Vier Zustände:



Zwei Basen:

Ausblick: Quanteninformation – BB84-Protokoll

BB84-Protokoll mit Materialien aus der Schulsammlung (Franz 2015)

Lichtquelle

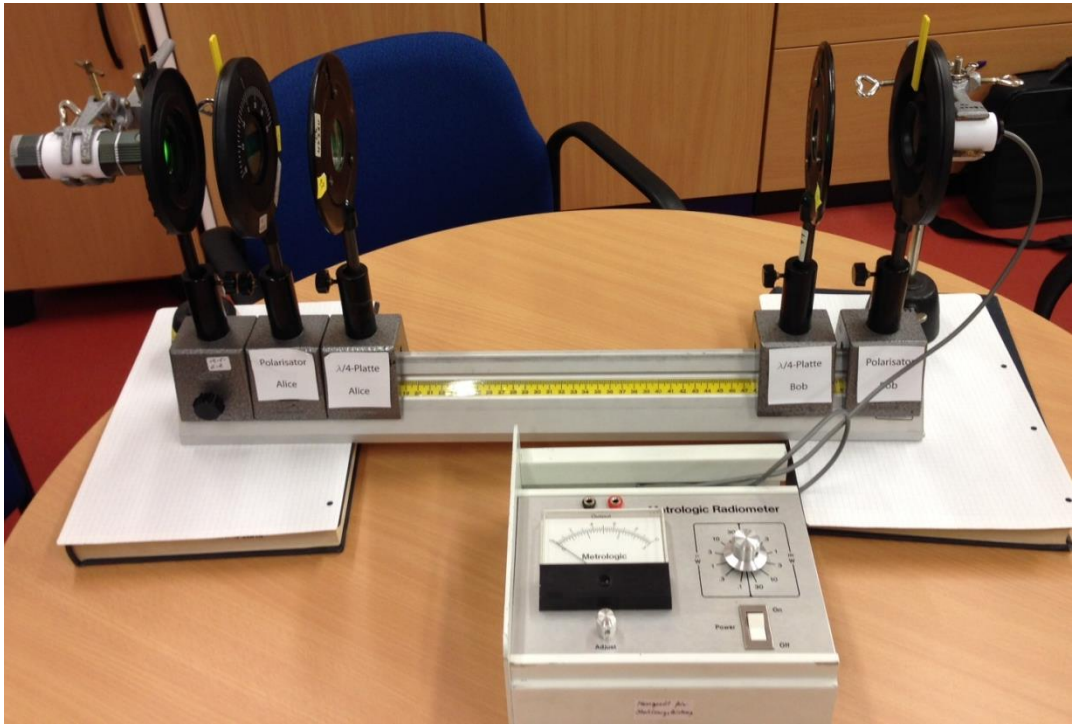
Polarisator

λ/4-Platte

λ/4-Platte

Polarisator

Radiometer



Ausblick: Quanteninformation

Reale Experimente mit einzelnen Photonen rücken in den Bereich des Möglichen