

# Die Grundideen der Münchner Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik für die Mittel- und Oberstufe

Hartmut Wiesner, LMU München Bernadette Schorn, RWTH Aachen



#### Gliederung

- Physikunterricht und Bildung
- milq für Oberstufe und Lehrerfortbildung
- Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe



"Vor einem zu starken Heranbringen von Erkenntnissen der modernen Physik muß wohl gewarnt werden. Die Einsicht selbst in verhältnismäßig einfache Zusammenhänge wie den Bau des Atoms aus Kern und Elektronen erfordert eine so große Kette von Beobachtungen und Schlüssen, daß doch nur wenige daran wirklich die Art physikalischen Denkens erleben können."

Friedrich Hund: *Die naturwissenschaftliche Erziehung in den Naturwissen-schaften Mathematik und Physik*. In: H. Nohl, L. Pallat (Hrsg.), Handbuch der Pädagogik III: Allgemeine Didaktik und Erziehungslehre. Langensalza 1930



- Authentische, reflektierte Ansicht eines an der Ausarbeitung der Quantenmechanik beteiligten Akteurs
- Empirische Ergebnisse der Forschungen über Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten:
  Nach Unterricht über Quantenphysik noch immer weit verbreitete Schülervorstellungen:
  - Laplacescher Determinismus
  - klassische statistische Mechanik
  - > permanente Ortseigenschaft





Konsequenz: Streichen des Unterrichts über Quantenphysik?
Oder stark reduzieren?

#### Nein!

Bildungstheoretisches Argument



Anliegen der Heisenberg-Gesellschaft:

"Die Heisenberg-Gesellschaft widmet sich der Vermittlung des geistigen Erbes von Werner Heisenberg ….

Die Heisenberg-Gesellschaft will das Werk und die Person Werner Heisenbergs lebendig erhalten, ... die Physik und die Naturphilosophie fördern und das naturwissenschaftliche Weltbild als Teil der allgemeinen Kultur zur Geltung bringen."



Werner Heisenberg ist ein herausragendes Beispiel für einen gebildeten Menschen; wie ihn die allgemeine Pädagogik fordert.

Die Beschäftigung mit seinem Leben kann ein Weg sein, die menschenbildende Wirkung der Auseinandersetzung mit Physik im Unterricht zum Tragen zu bringen.



"Der Wanderer Heisenberg befindet sich im Winter 1924/25 sowohl zwischen den beiden Welten, die man als Musik und Mathematik oder als Jugendbewegung und Wissenschaft trennen kann, als auch zwischen den beiden Welten, die er als Kopf und Herz unterscheidet. Man kann nur darüber staunen, dass ihn diese Spannungen nicht zerrissen, sondern erst wahrlich kreativ gemacht haben."



"Wie kaum ein zweiter verkörpert er das Wechselspiel von sachlich abgebrühter Aufgeklärtheit und emotional erlebter Romantik, zu dem alle Menschen befähigt sind. Heisenberg hat in beiden Welten gelebt und in jeder sein Glück gefunden. Er wurde zum Wanderer zwischen diesen Welten, wie es sich für einen romantischen Geist gehört."

E. P. Fischer (2015). Werner Heisenberg – ein Wanderer zwischen zwei Welten. Springer Spektrum, Berlin/Heidelberg



Bildungstheoretische Überlegungen von Theodor Litt zur Bedeutung/Unverzichtbarkeit der Naturwissenschaften (Physik) für die Bildung des Menschen

Th. Litt (1959). *Naturwissenschaft und Menschenbildung*. Quelle & Meyer, Heidelberg



Ergebnis einer anspruchsvollen wissenschaftstheoretischen, philosophischen und pädagogischen Analyse von Th. Litt:

Im Prozess der Anwendung der Methode der Naturwissenschaften verändern sich sowohl der Mensch als auch die Wirklichkeit.

Der Mensch wechselt von "schauender Welthingabe" zu "rechnender Weltbemeisterung" - und zurück.

(Litt; vergl. auch Zitat von Fischer)



Diese beiden im Menschen angelegten Möglichkeiten stehen in einem antinomischen Verhältnis.

Eine harmonische Ordnung kann im Menschen nur durch eine Reflexion über die Art, den Wert und die Grenzen des naturwissenschaftlichen Weltzugangs hergestellt werden.



"Die 'bildende' Funktion der exakten Naturwissenschaft ist nicht schon dadurch hinlänglich garantiert, daß sie von dem zu Bildenden sachgemäß angeeignet und sachverständig ausgeübt wird. Er muss auch dahin gelangen, sie zu den anderen um seine Seele werbenden Mächten so ins Verhältnis zu setzen, dass er weder an ihrem Wahrheitswert und ihrem Lebensrecht irre wird noch auch sie auf Kosten und zum Schaden aus anderer Wurzel Wachsenden auswuchern läßt. Dazu aber bedarf es jener Reflexion, die ... sie von höherem Standort aus als Glied des übergreifenden Lebensganzen ins Auge faßt." (Litt; s. Fischer)



- Die bildende Wirkung der Naturwissenschaft kann sich also nur dann entfalten, wenn eine wissenschaftstheoretische Reflexion über Physik erfolgt, die Schülerinnen und Schüler also nicht nur Physik sondern auch **über** Physik lernen.
- Ein Mensch, der nicht über Physik reflektiert hat Voraussetzung dafür ist das Lernen von Physik –, kann nach der Littschen Analyse nicht als gebildet bezeichnet werden.



#### Resümee

Ein Mensch, der sich nicht reflektierend mit Physik auseinandergesetzt hat, ist nicht gebildet!



Heisenberg gehört ohne Zweifel zu den als "gebildet" zu bezeichnenden Personen, weil er sich bewusst und wissenschafts-theoretisch reflektiert zwischen den von Fischer und von Litt beschriebenen Welten hin und her bewegen konnte, ohne dass die von ihnen angeführten Gefahren der Zerrissenheit für ihn von Bedeutung waren.



Welcher Inhaltsbereich der Physik ist am besten geeignet, das Lernen von und **über** Physik als Voraussetzung für eine bildende Wirkung der Physik zu erreichen?

Die Quantenphysik, und hier insbesondere ihre Interpretation! Letztere erzwingt philosophische Betrachtungen und eine wissenschaftstheoretische Reflexion.



Der Quantenphysikunterricht und die Bemühungen zu seiner Verbesserung lassen sich auch fundiert bildungs-theoretisch begründen!





milq10 U-Einheit S·P·Q·R Spezialgebiete Materialien Kontakt

#### Quantenphysik in der Schule

Die Quantenmechanik wird nicht nur von Schülern als schwierig empfunden. Sie ist es wirklich. Den außerordentlich schwierigen begrifflichen Problemen, die sie aufwirft, muss sich jeder Unterrichtende stellen. Das Internetportal **milq** richtet sich an alle, die in der Schule Quantenphysik unterrichten und/oder sich gerne noch etwas ausführlicher damit beschäftigen wollen.

Im Menü können Sie folgende Bereiche auswählen:

Der milq-Lehrgang: Hier findet man an den Unterricht angepasstes begriffliches Hintergrundwissen.

Der milq10-Lehrgang: Hier ensteht eine geänderte Version von milq für die 10 Jahrgangsstufe

<u>Das Schülerprogramm zur Quantenreflexion (S-P-Q-R)</u> bietet ein auf dem milq-Lehrgang basierendes Unterrichtskonzept für die Oberstufe.

<u>Die Spezialgebiete</u> beschäftigen sich mit weiteren spannenden Themen rund um die Quantenphysik.

<u>Die Materialien</u> umfassen Simulationsprogramme, ein pdf-Skript sowie Zusatztexte zum milq-Lehrgang.

www.milq-physik.de



#### Hintergrund

- Quantenmechaniken von Günther Ludwig (Marburg),
   L.E. Ballentine, D. Blochintzew, ...
- M. Jammer: *The Philosophy of Quantum Mechanics*

- Speziell für die Konzeption von milq:
  - L. Eisenbud: The Conceptual Foundation of Quantum Mechanics

20



- Herausstellen des Gegensatzes zur klassischen Physik
- Bereitstellen klarer Begriffe (Δp in der HU?)
- Verwendung der Ensemble-Interpretation als "Basisinterpretation" (klare Trennung von Zustandspräparation und Messung (abgeschlossenes Quantenphänomen bei Bohr), enger Zusammenhang zwischen Theorie und Experiment, …)



- Eigenschaftsbegriff: dynamische Eigenschaften wie Ort, Impuls, kinetische Energie, ... können Quantenobjekten nicht immer als vorhanden zugedacht werden (Beispiel H-Atom)
- Messprozess: Der Unterschied zwischen "eine Eigenschaft haben" und eine "Eigenschaft messen" ist fundamental in der Quantenphysik (Eisenbud).
- Hinführung zum Formalismus (für Leistungskurse und für Lehrkräfte) (R. Müller, 2003)



#### Die Struktur und Themen in milg:

Teil 1 (Photonen)
Photoeffekt
Präparation dynamischer
Eigenschaften
Mach-Zehnder Interferometer
Wellen- und
Teilcheneigenschaften
Eigenschaft "Weg"
Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Teil 2 (Elektronen)
Elektronenbeugung
Doppelspaltexperiment\*
W und seine Interpretation
Eigenschaft "Ort"
Messprozess
Schrödingers Katze
Unbestimmtheitsrelation
(Güte einer Präparation)

<sup>\*</sup> siehe Vortrag M. Arndt



Empirische Ergebnisse zum Lernerfolg:

Die Ziele von *milq* werden in der Oberstufe im Wesentlichen erreicht.

R. Müller (2003). Quantenphysik in der Schule. Logos, Berlin



# Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe



#### Grundlagen

- Ergebnisse empirischer Studien
  - > zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zu mechanischen Wellen und zur Atom- und Quantenphysik
  - zum Physikinteresse
- Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik für die Oberstufe



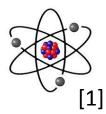
#### Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten

- Mechanische Wellen: stark von der Newtonschen Mechanik geprägt
- Atom- und Quantenphysik: stark von der Klassischen Physik und von Alltagserfahrungen geprägt
- Alternative Konzepte
  - > zum Teil prädominant
  - > können nur sehr schwierig/teilweise nicht überwunden werden



### Schülervorstellungen zur Atom- und Quantenphysik

- Interferenzmuster beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen aufgrund von Wechselwirkungen
- Quantenobjekte besitzen jederzeit die Eigenschaft Ort
- Quantenobjekte bewegen sich entlang einer wohldefinierten Bahnkurve



- Quantenobjekte können im Prinzip gleichzeitig die
   Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit/Impuls besitzen
- lacktriangle  $\Delta x$  und  $\Delta p$  sind Maße für Messungenauigkeiten oder auch Messfehler



#### Unterrichtskonzeption für die 10. Jahrgangsstufe

- Ziel: Einblick in die
  - Unterschiede zwischen Klassischer Physik und Quantenphysik
  - > sich aus den Unterschieden ergebenden Merkwürdigkeiten und Konsequenzen dieser neuartigen Physik
- qualitativer Zugang



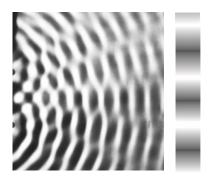
#### Unterrichtskonzeption für die 10. Jahrgangsstufe

- In Analogie zum Münchener Unterrichtskonzept für die Oberstufe:
  - > Interpretationsfragen der Quantenphysik
  - Grundlage: Statistische Interpretation
  - > zentrale Begriffe: Eigenschaft und Präparation
- im Fokus: Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit (Impuls)
- Beispiel für Quantenobjekte: Elektronen
- Einstieg in die Quantenphysik: Doppelspaltexperiment mit Elektronen

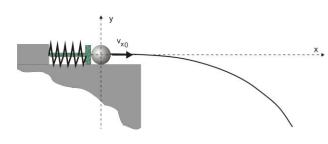


# Inhalte zur Klassischen Physik

- Wellen
  - wesentliche Grundlagen
  - Interferenz und Beugung



- Bahnkurve in der Klassischen Physik
  - Besitzen der Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit in der Klassischen Physik

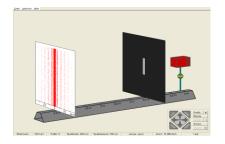




### **Inhalte zur Quantenphysik**

- Doppelspaltexperiment
  - Besitzen bzw. Nichtbesitzen der EigenschaftOrt in der Spaltebene
  - Unterschied zwischen Messen und Besitzen einer Eigenschaft
  - notwendiger Übergang von Aussagen über Einzelereignis zu Wahrscheinlichkeitsaussagen
  - Komplementarität von Ortseigenschaft und Interferenzmuster



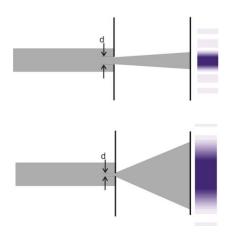




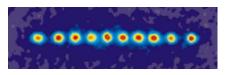


### **Inhalte zur Quantenphysik**

- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
  - Präparation
  - Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation und Konsequenz für den Bahnbegriff in der Quantenphysik



- Anwendungen der Quantenphysik
  - Quantencomputer



[2]



#### Doppelspaltexperiment

Film über Realexperiment des Doppelspaltversuchs mit Elektronen





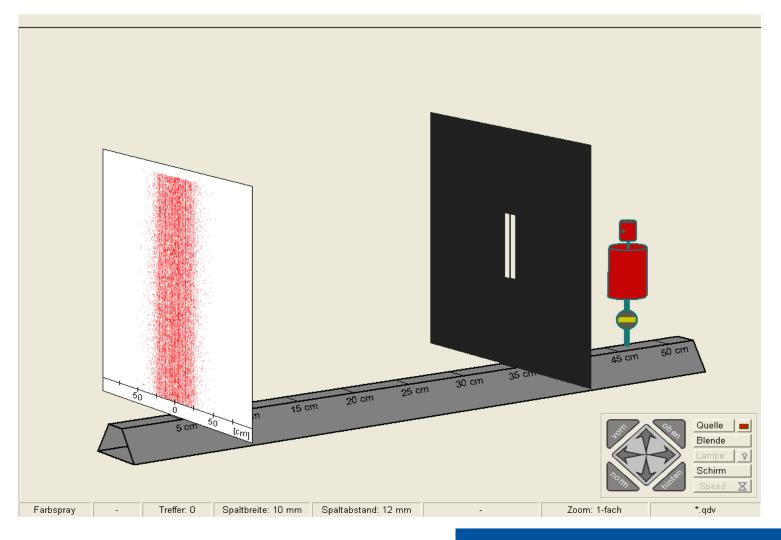


Beobachtung: Interferenzmuster auf Schirm

Entspricht dies den Erwartungen?

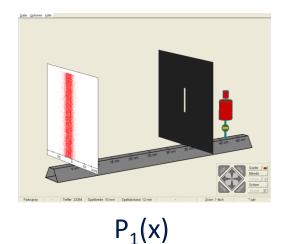


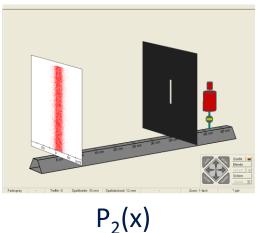
# Doppelspaltexperiment

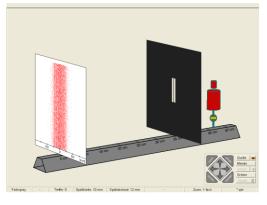




#### Doppelspaltexperiment





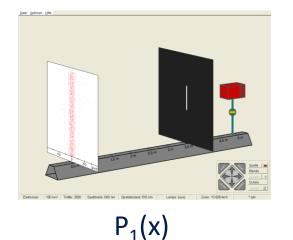


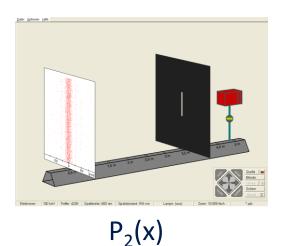
) 
$$P(x) = P_1(x) + P_2(x)$$

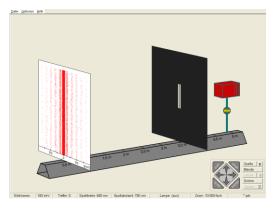
Die Farbpartikel gehen entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2

⇒ Farbpartikel besitzen die Eigenschaft *Ort* 









 $P(x) \neq P_1(x) + P_2(x)$ 

Man kann nicht mehr sagen, dass die Elektronen entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2 gehen

⇒ Elektronen besitzen <u>nicht</u> die Eigenschaft *Ort* 



 Die Auftrefforte auf dem Schirm lassen sich für einzelne Elektronen nicht vorher sagen

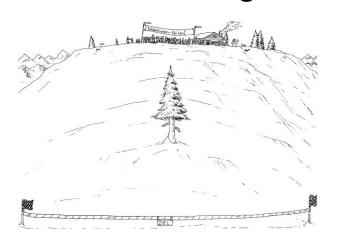


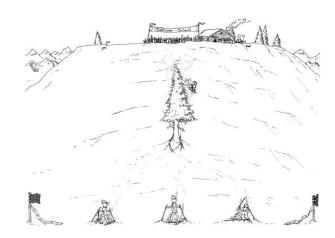


⇒ Übergang zur Wahrscheinlichkeitsaussage!



#### Zusammenfassung der Ergebnisse am Cartoon Skifahrer

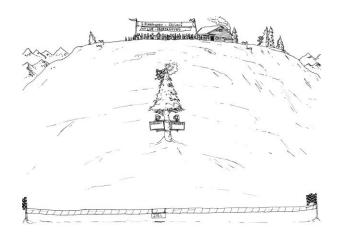


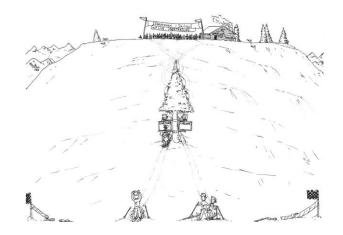


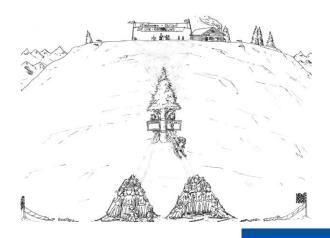




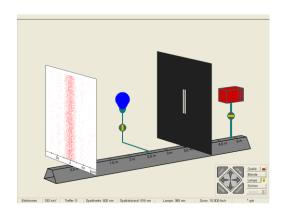
#### ... und Hinführung zum Doppelspaltversuch mit Lampe











- Unterschied zwischen
  - dem Messen von Eigenschaften und
  - dem "Besitzen von Eigenschaften"
- Exkurs "Schrödingers Katze"



## Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

- Begriff der Präparation:
  - Verfahren, mit dem Objekte in einen bestimmten Zustand gebracht werden
    - ⇒ physikalischen Systeme mit bestimmten Eigenschaften
- Wann besitzt ein Objekt eine Eigenschaft? Messreihe für Eigenschaft:
  - > ein und derselbe Messwert
    - ⇒ Objekt besitzt die Eigenschaft
  - unterschiedliche Messwerte
    - ⇒ Objekt besitzt nicht die Eigenschaft



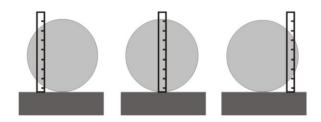
## Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

Eigenschaften Seitenlänge und Durchmesser





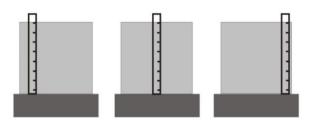
Messwerte streuen nicht
⇒ besitzen die Eigenschaft *Durchmesser* 



Messwerte streuen
⇒ besitzen nicht die Eigenschaft Seitenlänge



Messwerte streuen
⇒ besitzen nicht die Eigenschaft *Durchmesser* 

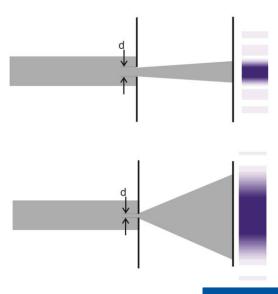


Messwerte streuen nicht ⇒ besitzen die Eigenschaft Seitenlänge



## Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation

- Was passiert, wenn ich versuche, zwei Eigenschaften zu präparieren?
  - Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit
  - ⇒ Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation





# Empirische Untersuchung und Ergebnisse der Haupterprobung



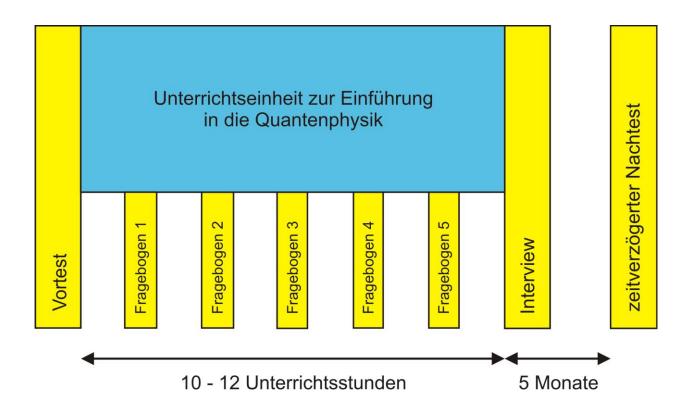
## **Empirische Untersuchung: Haupterprobung**

- Stichprobe
  - $\geq$  14 Klassen an 5 bayerischen Gymnasien (N = 351)
  - naturwissenschaftlich-technologischer, sprachlicher, wirtschaftsund sozialwissenschaftlicher Zweig
- Erhebungsinstrumente
  - > teilstandardisierte Fragebögen
  - teilstandardisierte Interviews



## Untersuchungsdesign

One-Group Pretest-Posttest-FollowUpTest-Design

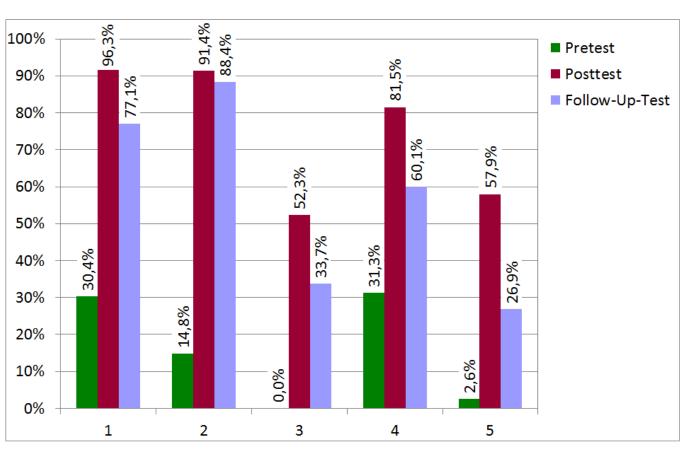




- Vortest
  - durchschnittlich 13% der Höchstpunktzahl (17 Punkte)
- Posttests
  - durchschnittlich 73% der Höchstpunktzahl (58 Punkte)
- Zeitverzögerter Nachtest
  - durchschnittlich 56% der Höchstpunktzahl (20 Punkte)



Lernerfolg



- 1: Eigenschaften Ort und Geschwindigkeit in der Klassischen Physik
- 3: Aussagen über Einzelereignisse in der Quantenphysik
- 5: Aussage der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation

- 2: Eigenschaft Ort in der Quantenphysik
- 4: Unterschied Besitzen/Messen von Eigenschaften in der Quantenphysik

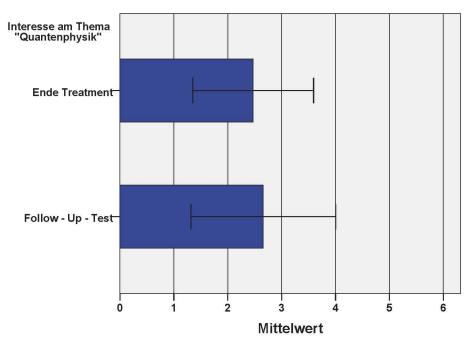


Ergebnisse univariate vierfaktorielle Kovarianzanalyse

		unmittelbarer Lernerfolg	überdauerndes Wissen
Kovariaten	Physiknote	höchst signifikant	sehr signifikant
	Fachinteresse	nicht signifikant	nicht signifikant
	unmittelbarer Lernerfolg	-	sehr signifikant
Faktoren	Geschlecht	nicht signifikant	nicht signifikant
	Ausbildungsrichtung	nicht signifikant	nicht signifikant
	Interesse am Thema QP	nicht signifikant	nicht signifikant
	Interessantheit U-Einheit	nicht signifikant	nicht signifikant



Interesse am Thema Quantenphysik



Fehlerbalken: +/- 1 SD

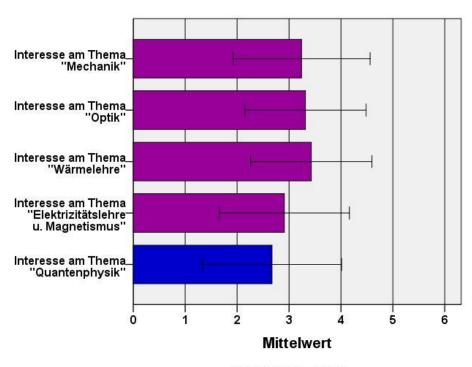


Interesse am Thema Quantenphysik
 Ergebnisse univariate dreifaktorielle Kovarianzanalyse

		<b>Ende Treatment</b>	Follow-Up-Test
Kovariaten	Fachinteresse	sehr signifikant	sehr signifikant
	Physiknote	nicht signifikant	nicht signifikant
Faktoren	Geschlecht	nicht signifikant	nicht signifikant
	Zweige	nicht signifikant	nicht signifikant
	Interessantheit U-Einheit	höchst signifikant	höchst signifikant



#### Vergleich Sachinteresse



Fehlerbalken: +/- 1 SD



- Vergleich Sachinteresse
  - Vergleich der Mittelwerte zeigt: jeweils statistisch höchst signifikante Mittelwertunterschiede zwischen
    - > Sachinteresse an Quantenphysik bzw. E-Lehre und Magnetismus
    - > Sachinteresse an Mechanik, Optik und Wärmelehre



## Zusammenfassung

- Erfolgreicher Einstieg in die Quantenphysik bereits in der 10.
   Jahrgangsstufe möglich
  - auf qualitativem Niveau grundlegendes Verständnis zu zentralen Inhalten
  - hoher Lernerfolg
  - Inhalte interessant und verständlich
- SchülerInnen der 10. Jahrgangsstufe interessieren sich für das Thema Quantenphysik



- ",...Wer sagt, er hat die Quantenmechanik verstanden, der lügt!"
  - ⇒ es ist jedoch anzumerken, dass der Unterricht interessant und verständlich gestaltet wurde. Sehr gut!"
- "Mit der Quantenphysik lernt man die Physik mit ganz anderen Augen kennen."
- "Die Quantenphysik ist in einigen Punkten sehr verwirrend. Aber auch irgendwie spannend und interessanter als die 'normale' Physik."

#### Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt: schorn@physik.rwth-aachen.de



#### Bildnachweise

- [1] <a href="http://www.stupidedia.org/images/5/59/Atommodell.svg">http://www.stupidedia.org/images/5/59/Atommodell.svg</a>
- [2] Nägerl et al. (1998): Ion strings for quantum gates.

Applied Physics B: Laser and Optics, 66, S. 606