RWTH AACHEN UNIVERSITY

Quantenphysik in der Jahrgangsstufe 10

Workshop der Heisenberg-Gesellschaft
Schloss Waldthausen 8. – 10.07.2016

Dr. Bernadette Schorn
I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen

Inhalt

- Unterrichtskonzeption zur ***Einführung in die Quantenphysik*** für die 10. Jahrgangsstufe

- Empirische Untersuchung und Ergebnisse der Haupterprobung

- Diskussion

Unterrichtskonzeption

Grundlagen

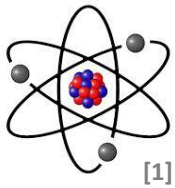
- Ergebnisse empirischer Studien
  - zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten zu mechanischen Wellen und zur Atom- und Quantenphysik
  - zum Physikinteresse
- Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenphysik für die Oberstufe

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

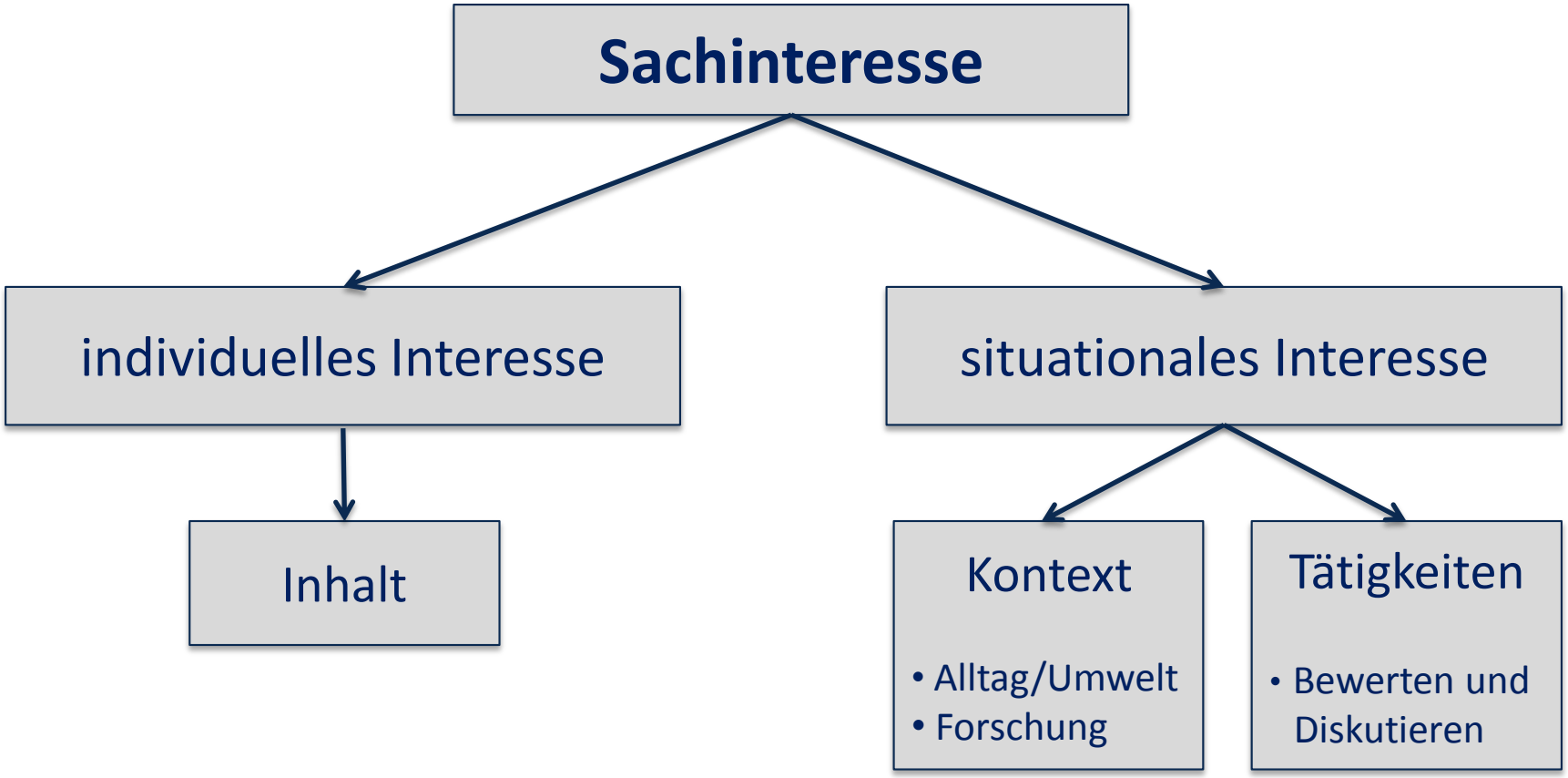
Schülervorstellungen zur Atom- und Quantenphysik

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


[1]

- Quantenobjekte können im Prinzip gleichzeitig die Eigenschaften *Ort* und *Geschwindigkeit*/*Impuls* besitzen
- Δx und Δp sind Maße für Messungenauigkeiten oder auch Messfehler

Ergebnisse Studien zum Physikinteresse



Münchener Unterrichtskonzept für die Oberstufe

- Interpretationsfragen der Quantenphysik, z.B.
  - Unter welchen Umständen besitzt ein Quantenobjekt eine bestimmte Eigenschaft?
  - Was bedeutet die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation?
- Grundlage: Statistische Interpretation
- zentrale Begriffe: Eigenschaft und Präparation

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

- Einführung von Wellen
- Bahnkurve in der Klassischen Physik
- Bahnkurve im E-Feld
- Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen
- Doppelspaltversuch mit Elektronen
- Merkwürdigkeiten der Quantenphysik
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- Anwendungen der Quantenphysik

- Definition einer Welle:

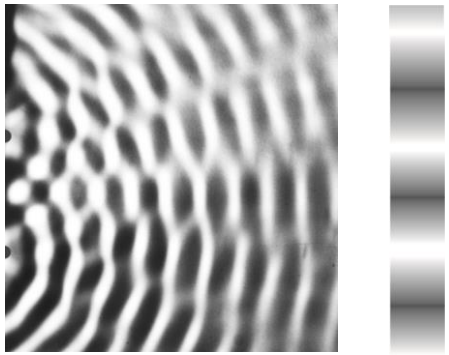
  „Unter einer Welle versteht man eine sich räumlich und zeitlich ausbreitende Störung.“

  Beispiele für mechanische Wellen: Seilwelle, Wasserwelle, Schallwelle

  $\Rightarrow$ Transversalwelle, Longitudinalwelle

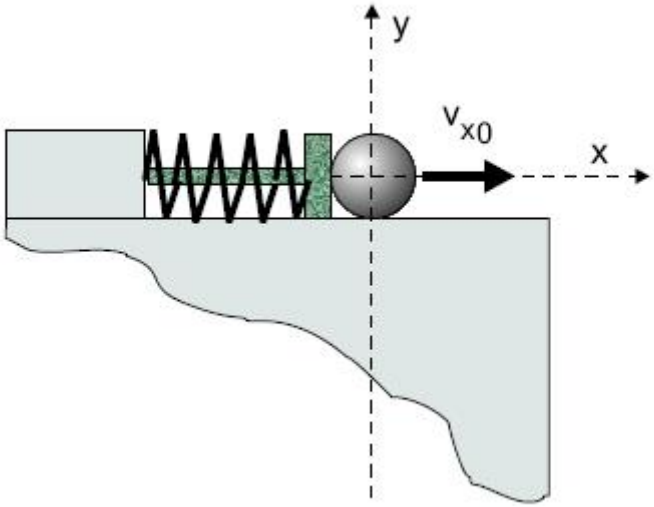
- Interferenz (qualitativ):
  Überlagerung zweier oder mehrerer Wellen

- Interferenzmuster:



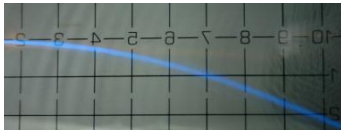
- Beugung (qualitativ):
  Wellen können sich auch hinter Hindernissen oder Öffnungen ausbreiten

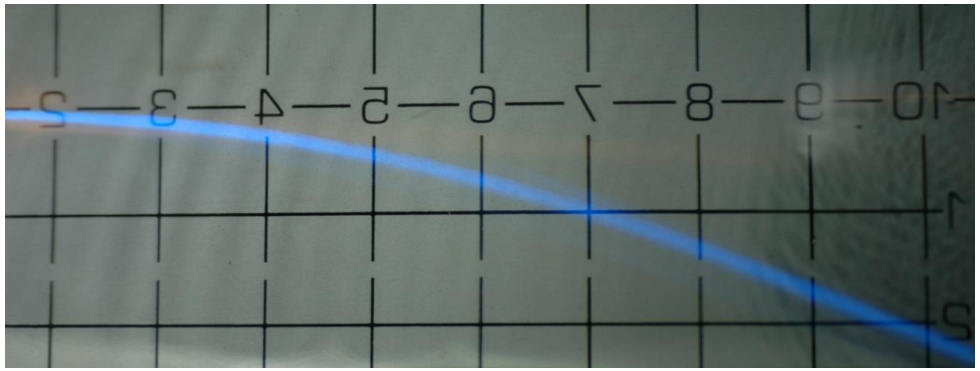
Bahnkurve in der Klassischen Physik



In der Klassischen Physik können Körpern die Eigenschaften *Ort* und *Geschwindigkeit* ohne Probleme zugeschrieben werden.

Bahnkurve im E-Feld



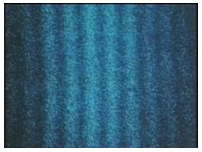


In der Quantenphysik können Elektronen die Eigenschaften *Ort* und *Geschwindigkeit* scheinbar auch zugeschrieben werden.

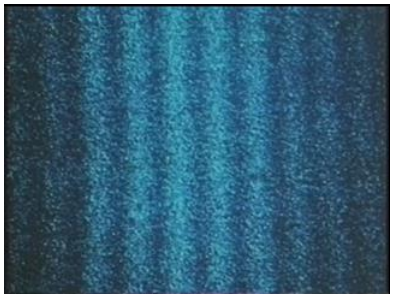
Jedoch Beobachtung:

Die Bahnkurve der Elektronen ist im Verhältnis zur Größe des Elektrons sehr breit!

Kann ich hier wirklich von der Eigenschaft *Ort* sprechen?



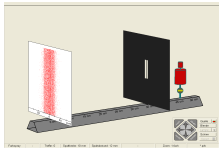
- Film über Realexperiment des Doppelspaltversuchs mit Elektronen

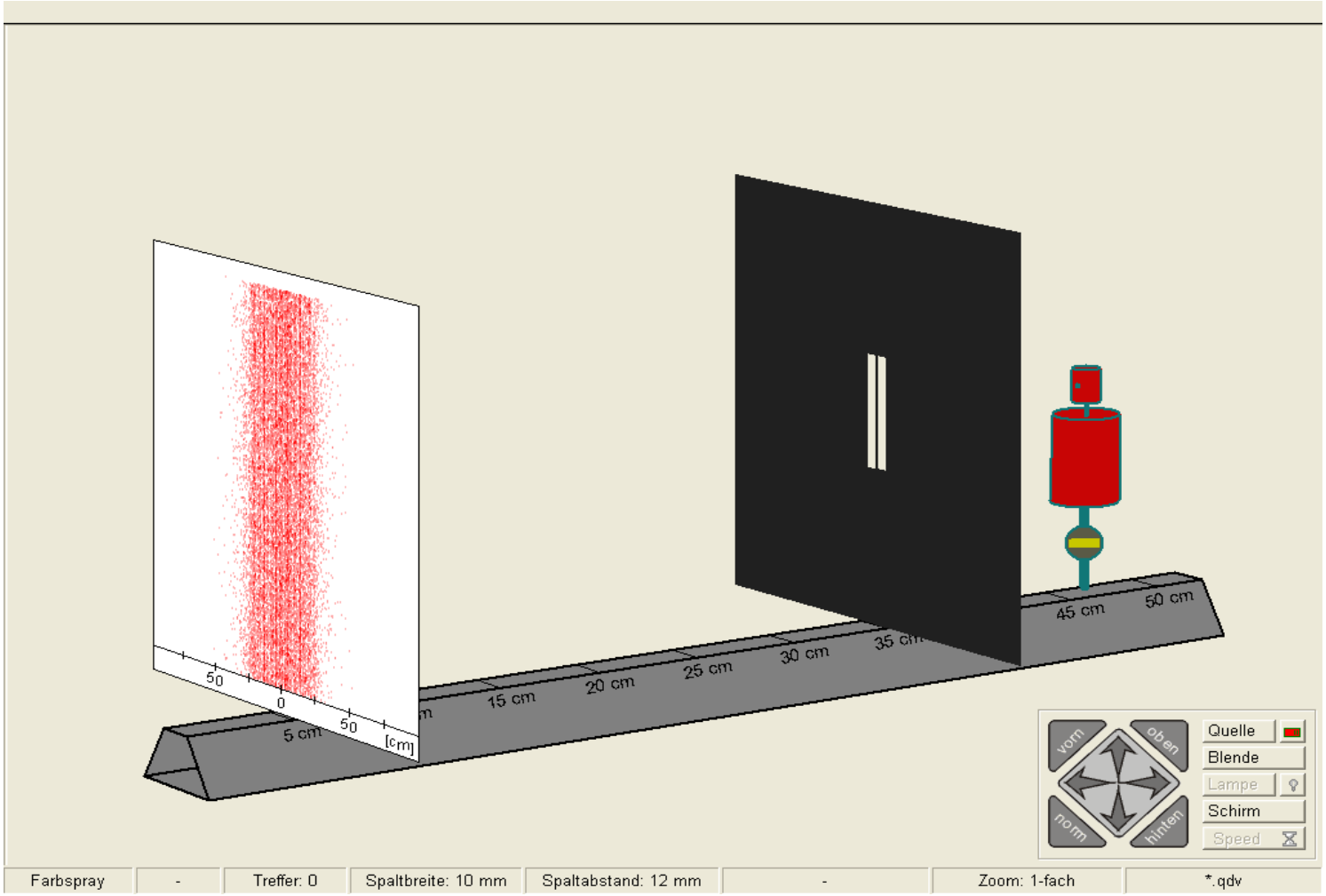


Beobachtung: Interferenzmuster auf Schirm

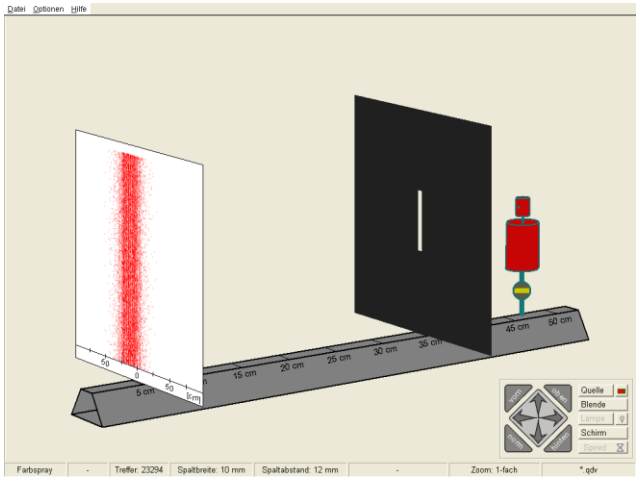
Entspricht dies den Erwartungen?

Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen

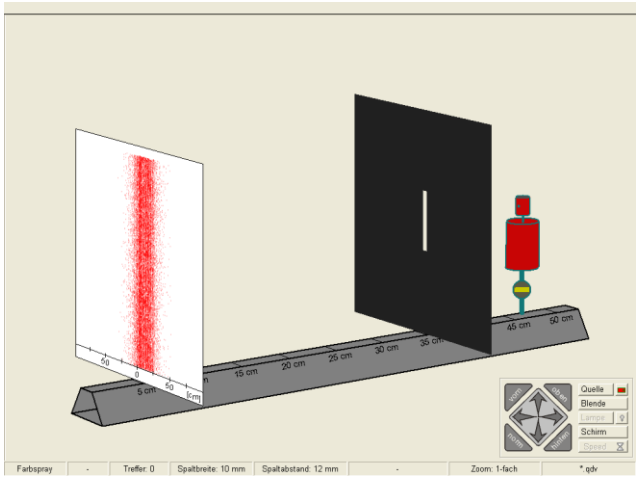




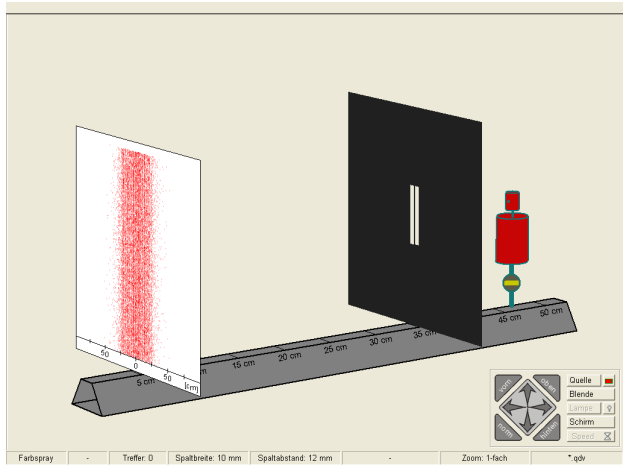
Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen



$P_1(x)$

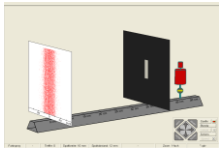


$P_2(x)$



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

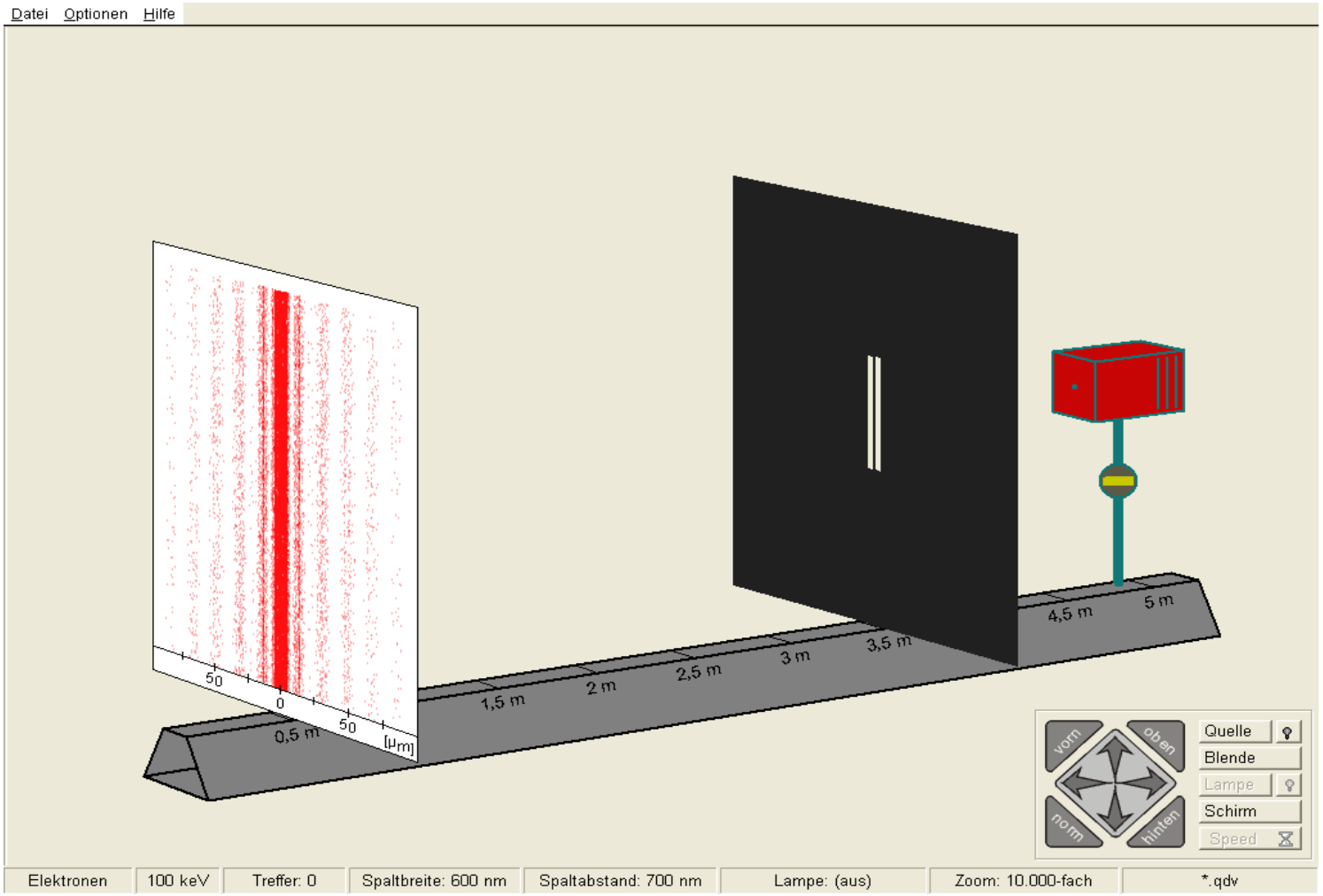
Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen



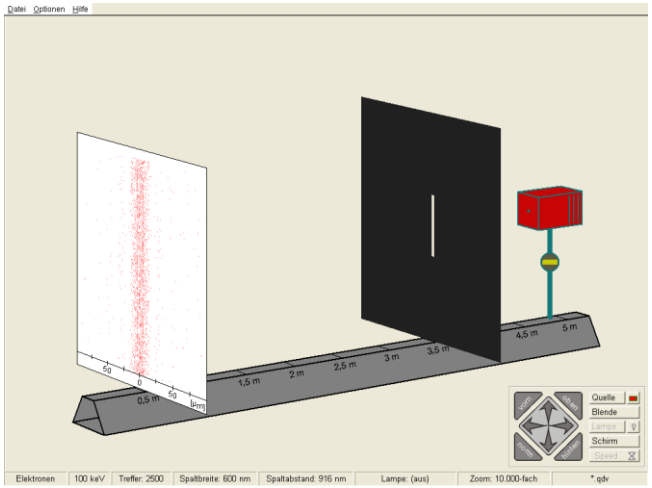
- Die Farbpartikel gehen entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2

$\Rightarrow$ Farbpartikel besitzen die Eigenschaft *Ort*

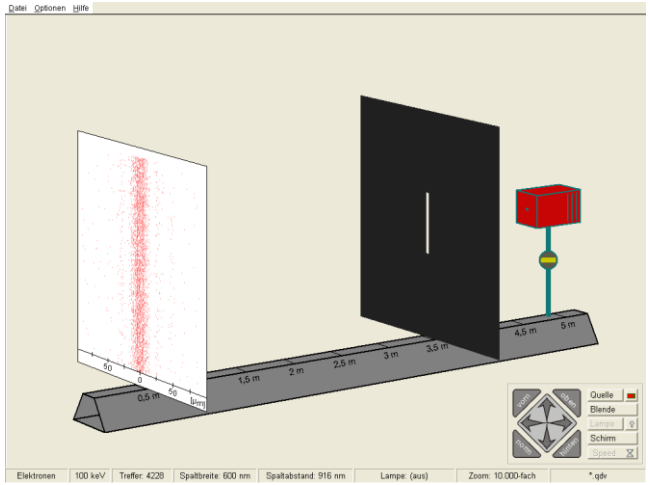
Doppelspaltversuch mit Elektronen



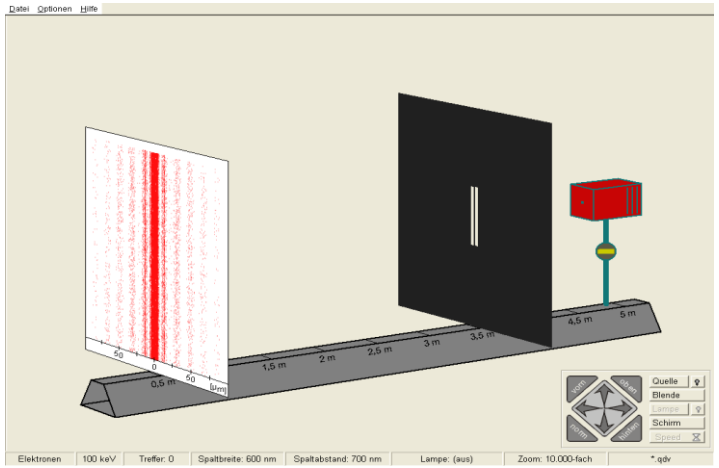
Doppelspaltversuch mit Elektronen



$P_1(x)$

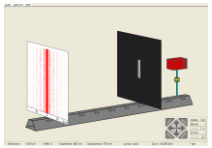


$P_2(x)$



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

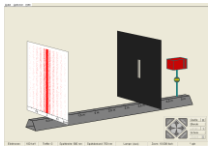
Doppelspaltversuch mit Elektronen



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

$\Rightarrow$ Elektronen besitzen **<u>nicht</u>** die Eigenschaft *Ort*

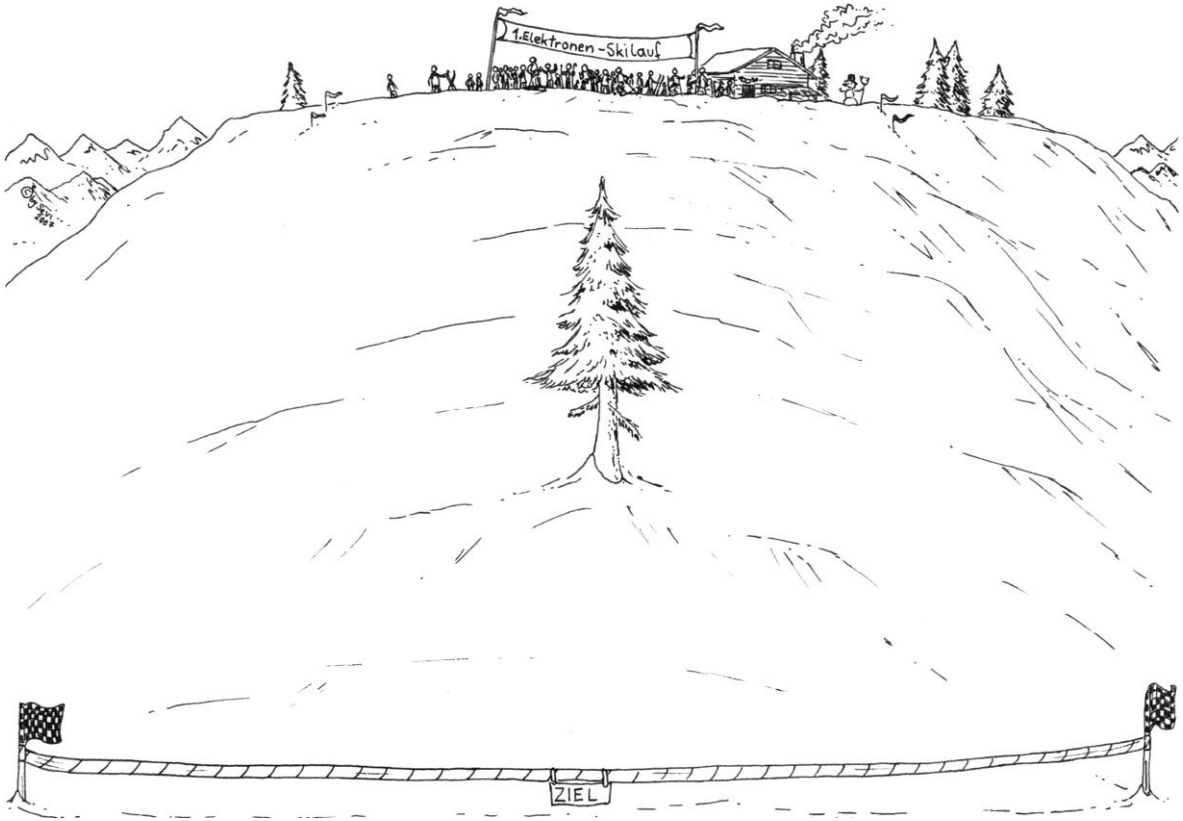
Doppelspaltversuch mit Elektronen



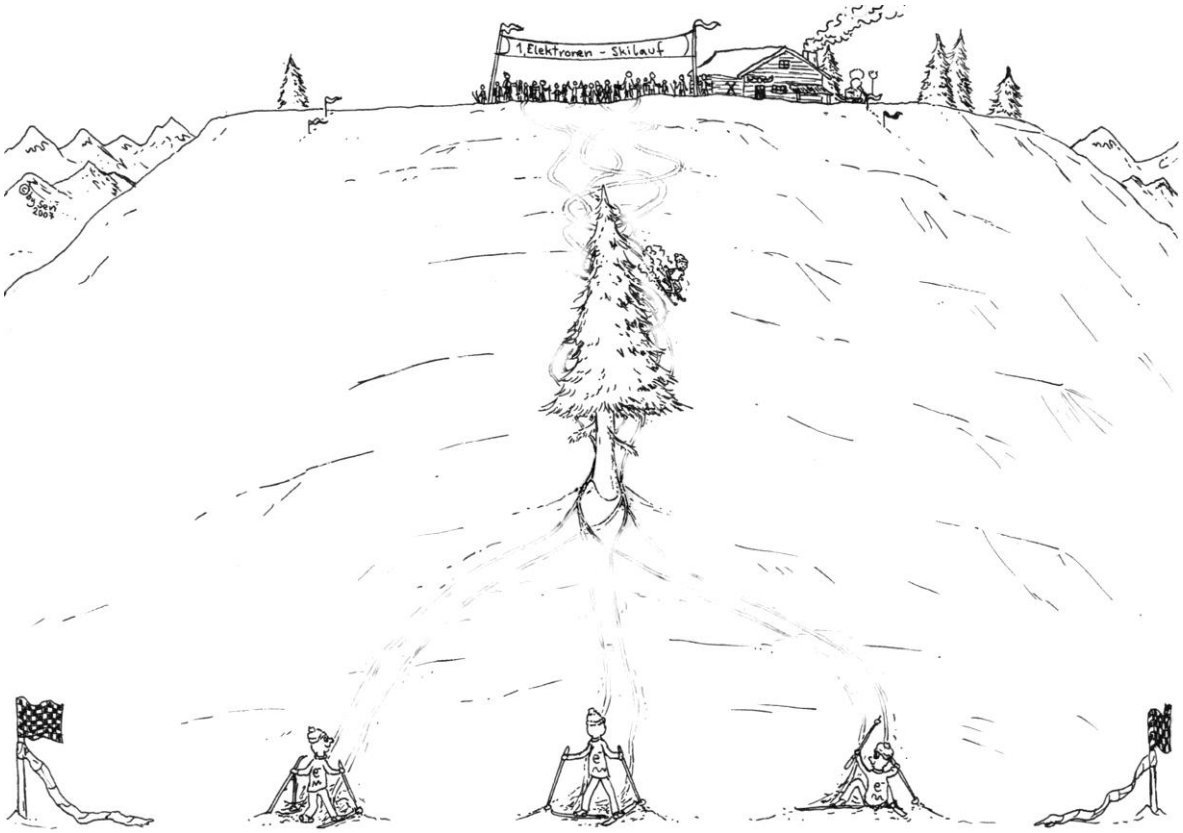
- Die Auftrefforte auf dem Schirm lassen sich für einzelne Elektronen nicht vorher sagen

$\Rightarrow$ Übergang zur Wahrscheinlichkeitsaussage!

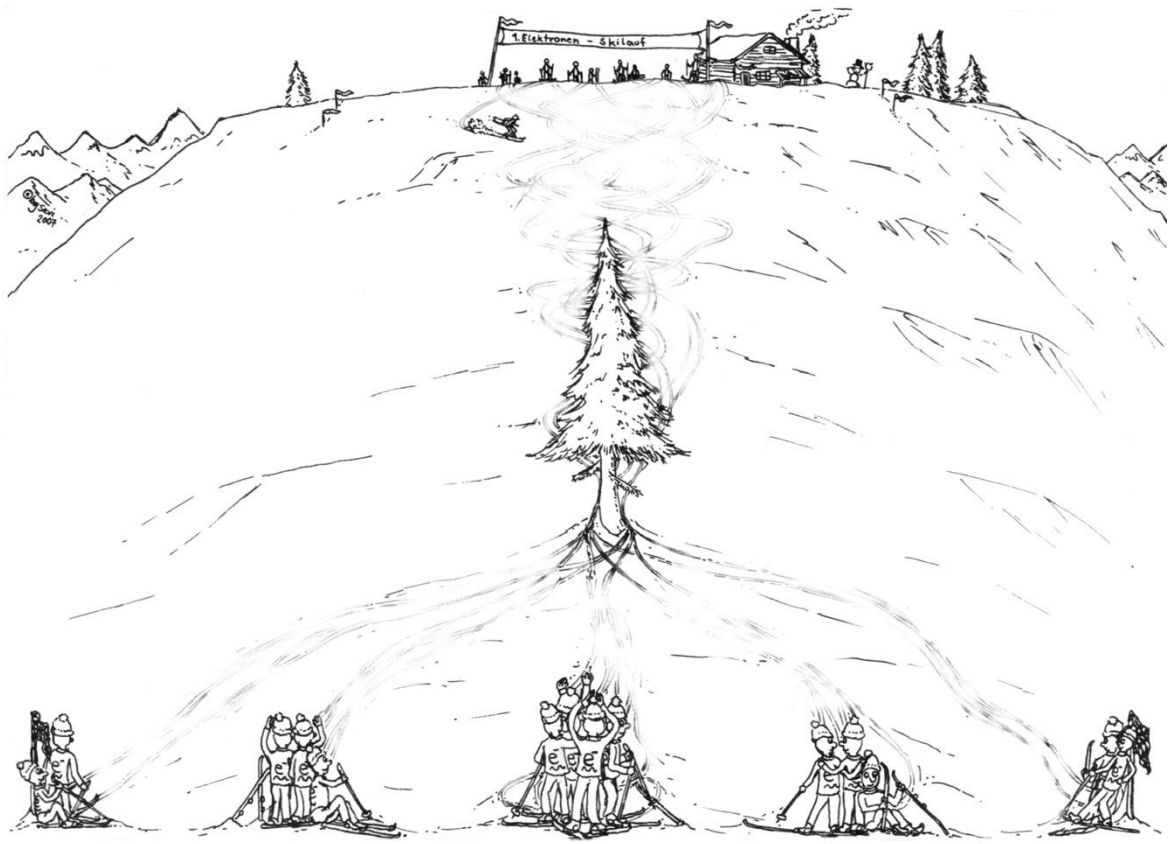
- Zusammenfassung der Ergebnisse am Cartoon *Skifahrer*



Merkwürdigkeiten der Quantenphysik

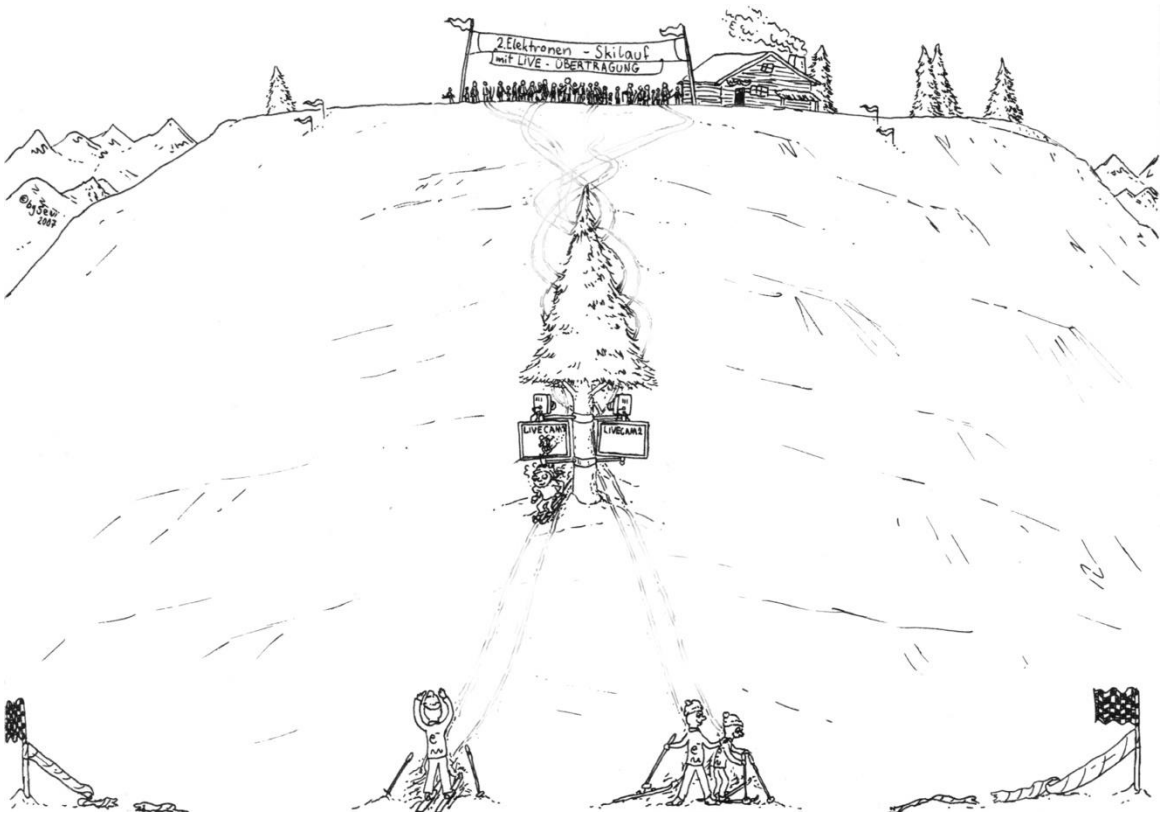


Merkwürdigkeiten der Quantenphysik

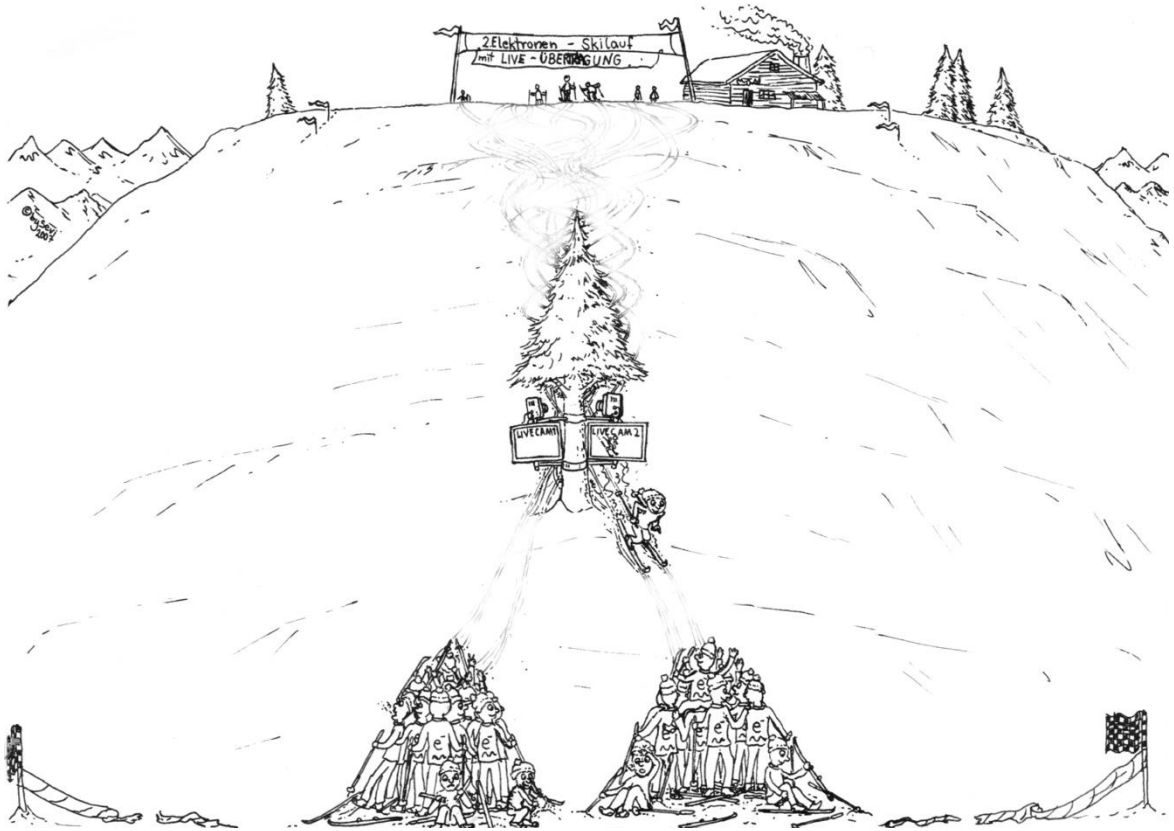


- …und Hinführung zum Doppelspaltversuch mit Lampe

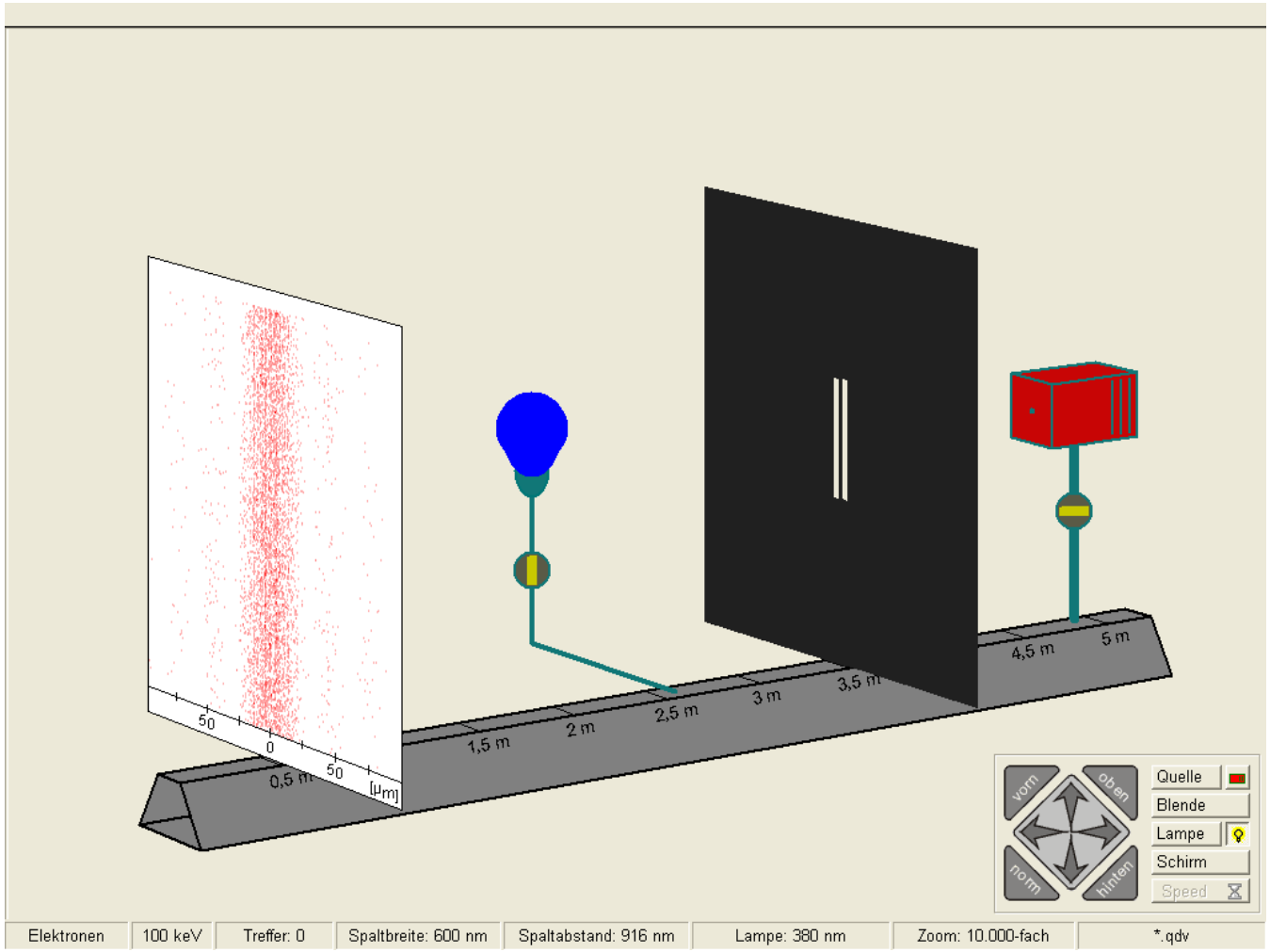
Merkwürdigkeiten der Quantenphysik



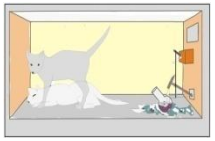
Merkwürdigkeiten der Quantenphysik



Merkwürdigkeiten der Quantenphysik

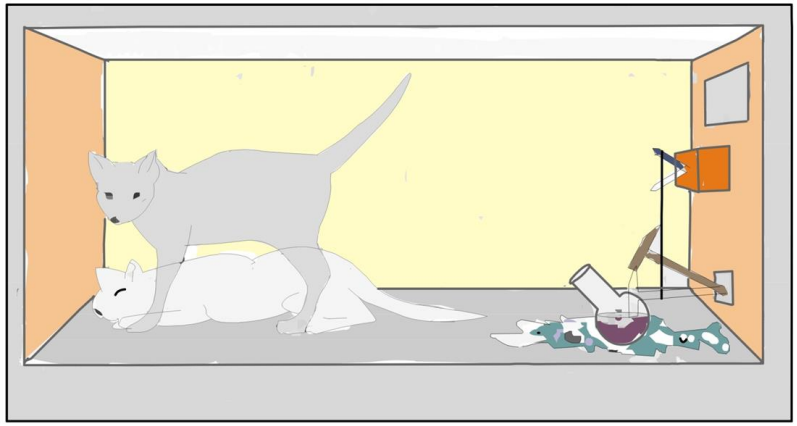


- Unterschied zwischen
  - dem „Messen von Eigenschaften“ und
  - dem „Besitzen von Eigenschaften“



- Unterschied zwischen
  - dem „Messen von Eigenschaften“ und
  - dem „Besitzen von Eigenschaften“

- Exkurs „Schrödingers Katze“



- Begriff der Präparation:

  Verfahren, mit dem Objekte in einen bestimmten Zustand gebracht werden.

  $\Rightarrow$ physikalische Systeme mit bestimmten Eigenschaften

- Wann besitzt ein Objekt eine Eigenschaft?

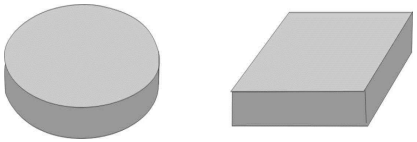
  Messreihe für eine Eigenschaft:

  - ein und derselbe Messwert

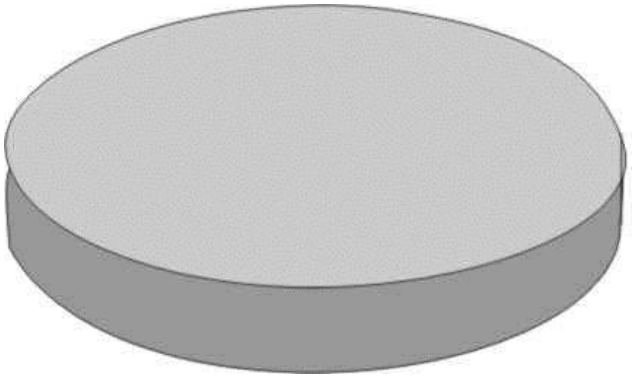
    $\Rightarrow$ Objekte besitzen die Eigenschaft

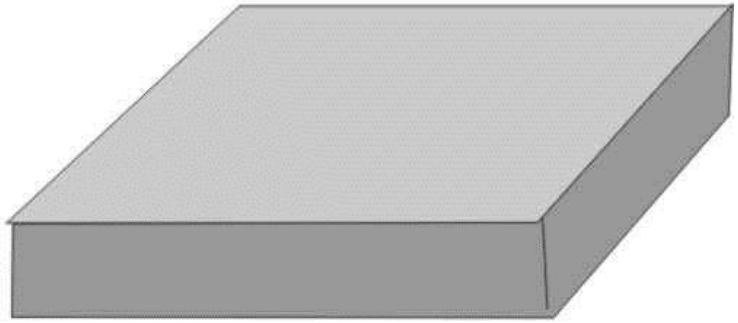
  - unterschiedliche Messwerte

    $\Rightarrow$ Objekte besitzen nicht die Eigenschaft

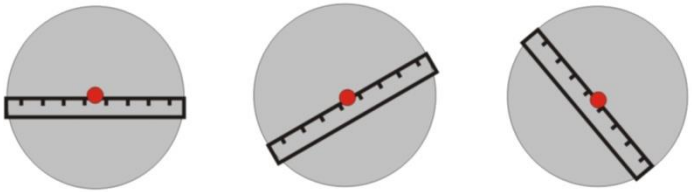


- Eigenschaften *Seitenlänge* und *Durchmesser*

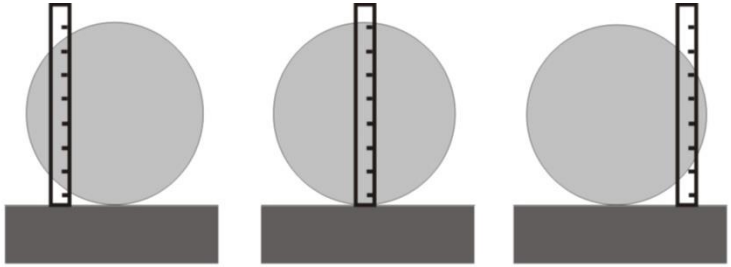




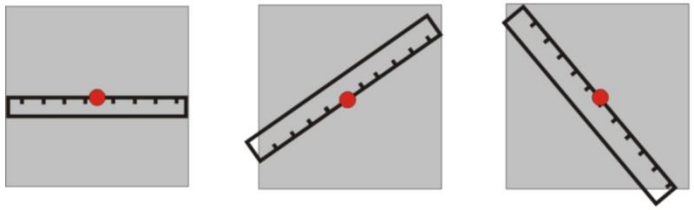
Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation



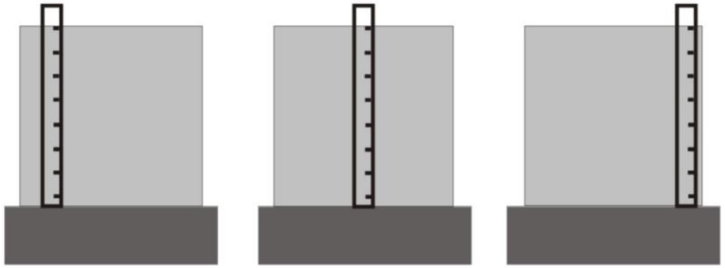
Messwerte streuen nicht
⇒ besitzen die Eigenschaft *Durchmesser*



Messwerte streuen
⇒ besitzen nicht die Eigenschaft *Seitenlänge*



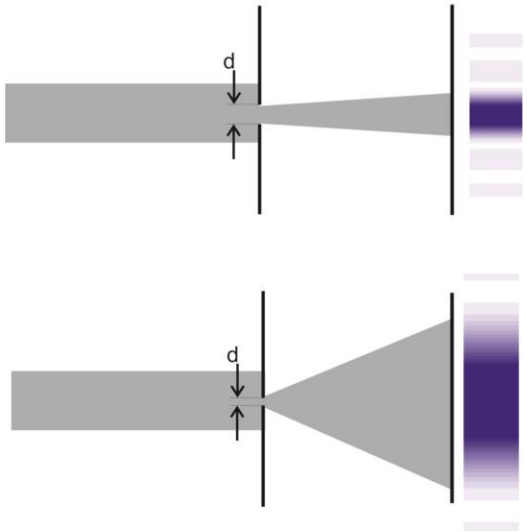
Messwerte streuen
⇒ besitzen nicht die Eigenschaft *Durchmesser*



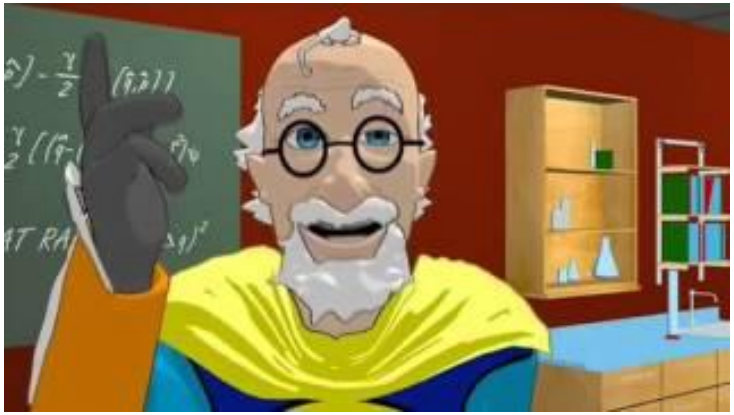
Messwerte streuen nicht
⇒ besitzen die Eigenschaft *Seitenlänge*

- Was passiert, wenn ich versuche, zwei Eigenschaften zu präparieren?

  Eigenschaften *Ort* und *Geschwindigkeit*
  $\Rightarrow$ Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation



- What the bleep do we (k)now!?

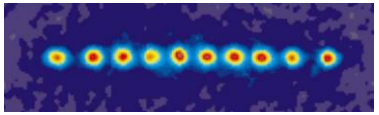


[2]

- anderes Quantenobjekt: Photon
  $\Rightarrow$ Photoeffekt, Doppelspaltexperiment

  Allerdings <u>keine</u> Diskussion über die *Orts*- und *Geschwindigkeits*-Eigenschaften möglich!

Anwendungen der Quantenphysik



[3]

- Der Quantencomputer
  als Beispiel der Anwendungsmöglichkeiten und Bereich aktueller Forschung
  - Vergleich klassischer Computer und Quantencomputer
  - experimentelle Realisierung

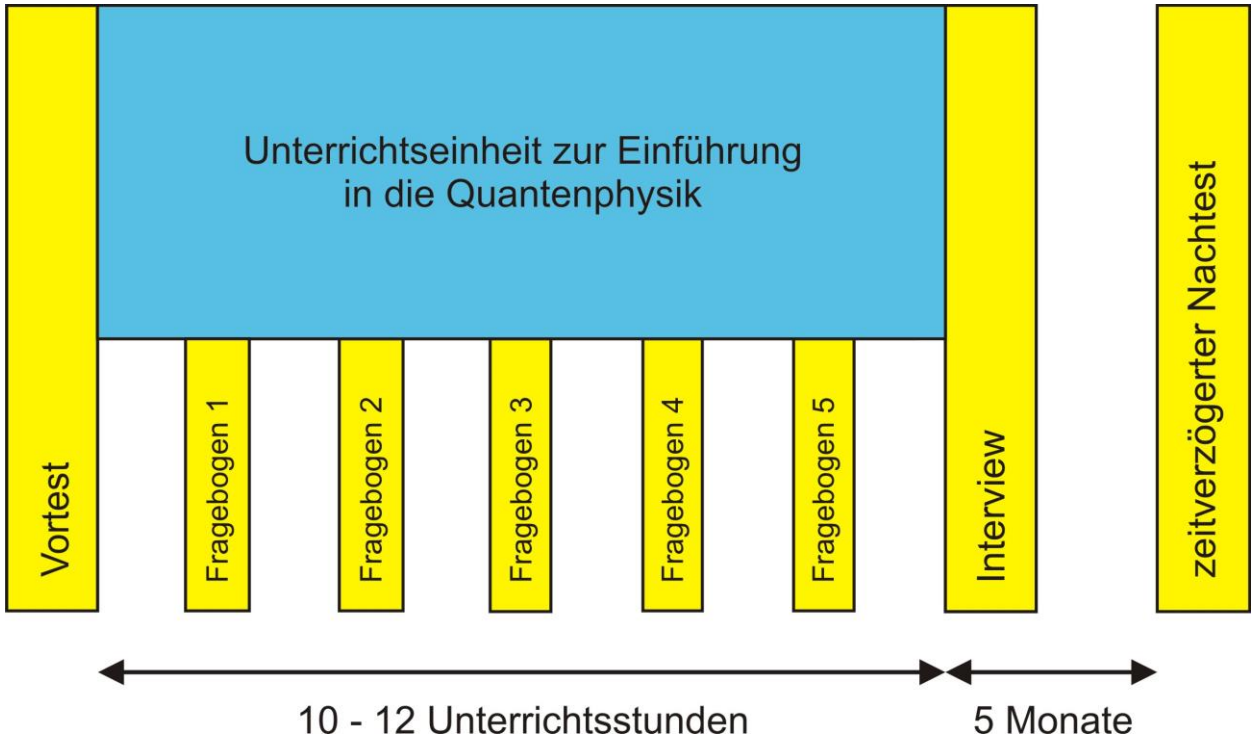
Empirische Untersuchung und Ergebnisse der Haupterprobung

Empirische Untersuchung: Haupterprobung

- Stichprobe
  - 14 Klassen an 5 bayerischen Gymnasien (*N* = 351)
  - naturwissenschaftlich-technologischer, sprachlicher, wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher Zweig
- Erhebungsinstrumente
  - teilstandardisierte Fragebögen
  - teilstandardisierte Interviews

Untersuchungsdesign

- One-Group Pretest-Posttest-FollowUpTest-Design



Ziele der empirischen Untersuchung

- Erhebung und Analyse
  - des Lernerfolgs
  - der Interessantheit und Verständlichkeit der Unterrichtseinheit
  - des Interesses der SchülerInnen am Thema Quantenphysik
  - der Zusammenhänge mit Fachinteresse, Physiknote, Geschlecht, Ausbildungsrichtung, usw.

Vortest

- ausgewählte Items zum Wissen über
  - Wellen
  - Besitzen der Eigenschaften *Ort* und *Geschwindigkeit* in der Klassischen Physik
  - zentrale Inhalte der Quantenphysik

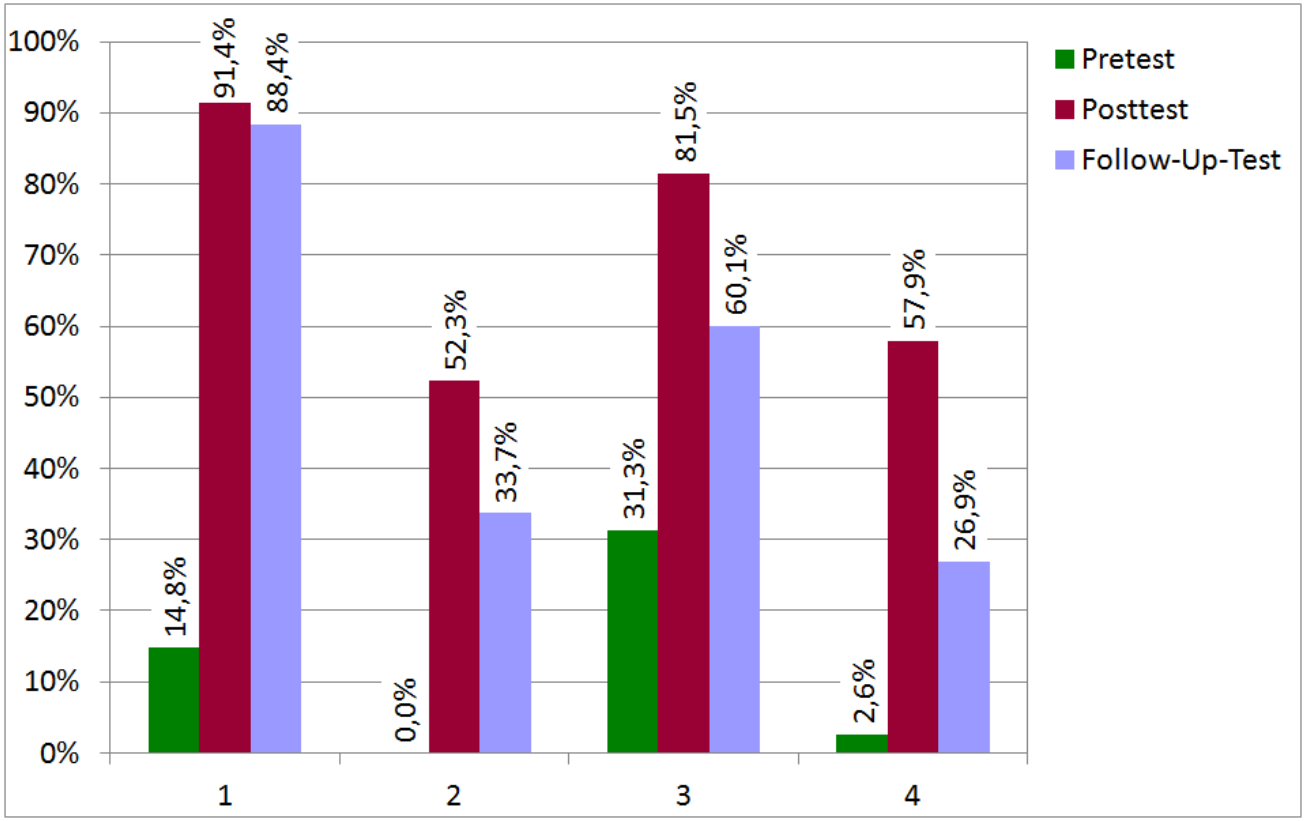
Posttests und zeitverzögerter Nachtest

- Items zum Wissen über
  - wichtige Grundlagen der Klassischen Physik
  - zentrale Wesenszügen der Quantenphysik

Empirische Untersuchung: Ergebnisse der Haupterprobung

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

Lernerfolg

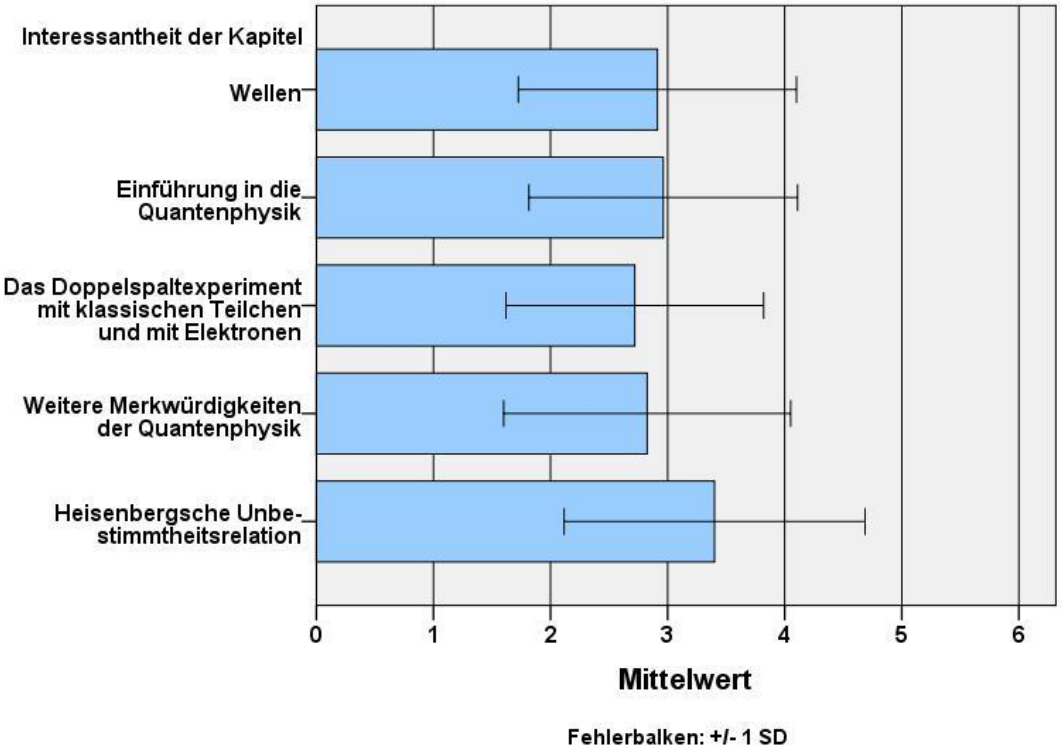


1: Eigenschaft *Ort* in der Quantenphysik
2: Aussagen über Einzelereignisse in der Quantenphysik
3: Unterschied Besitzen/Messen von Eigenschaften in der Quantenphysik
4: Aussage der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation

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

Interessantheit der Kapitel



sechsstufige Skala: sehr ≙ 1, …, gar nicht ≙ 6

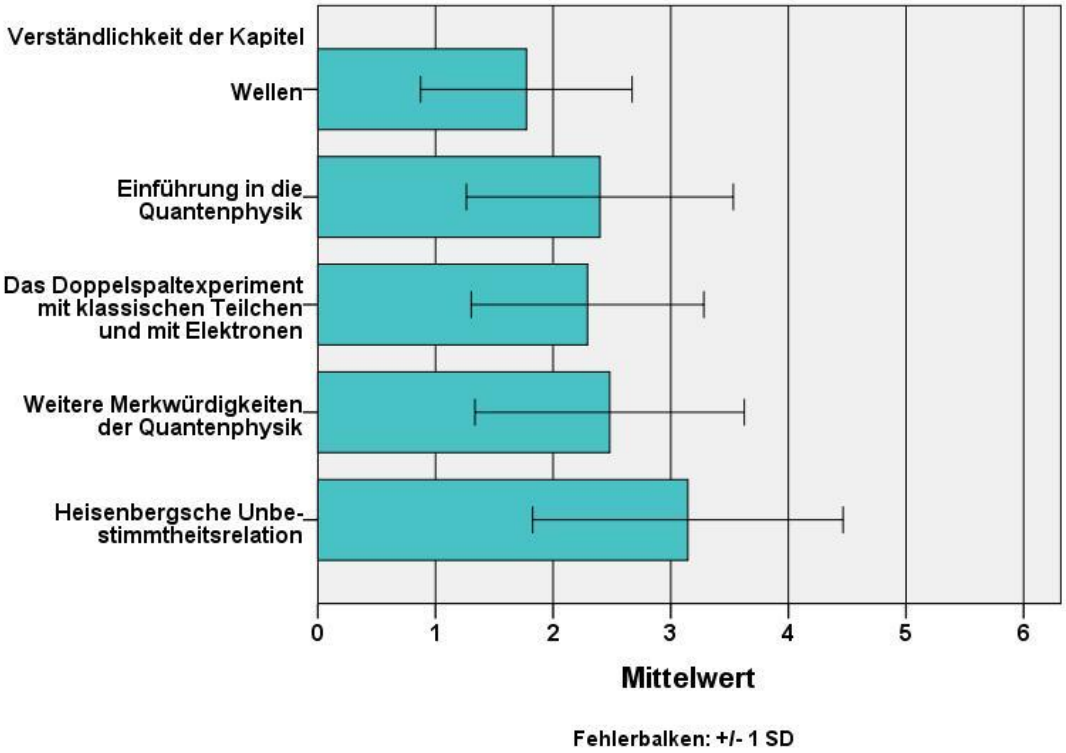
Interessanteste Inhalte

- Doppelspaltexperiment
- Wellen
- Elektronen-Skilauf
- Schrödingers Katze
- Verhalten von Quantenobjekten
- Interferenz(muster)
- Unterschiede Klassische Physik – Quantenphysik
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- alle Themen

Uninteressanteste Inhalte

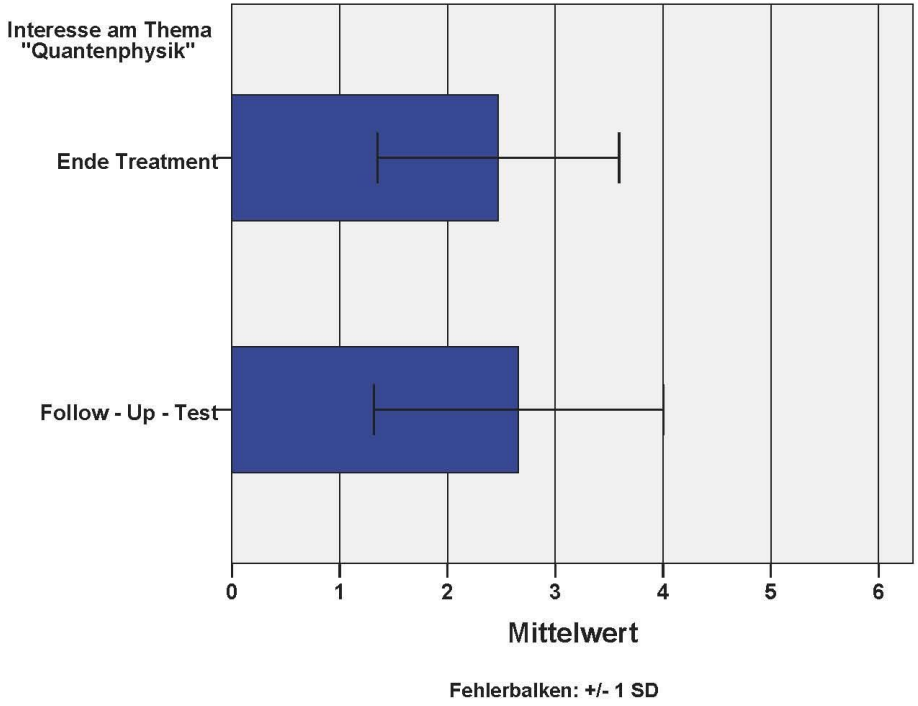
- Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- Wellen
- kein Thema
- Bahnkurve in der Klassischen Physik
- Elektronen-Skilauf
- Schrödingers Katze
- Doppelspaltexperiment
- Präparation

Verständlichkeit der Kapitel



sechsstufige Skala: sehr ≙ 1, …, gar nicht ≙ 6

Interesse am Thema *Quantenphysik*



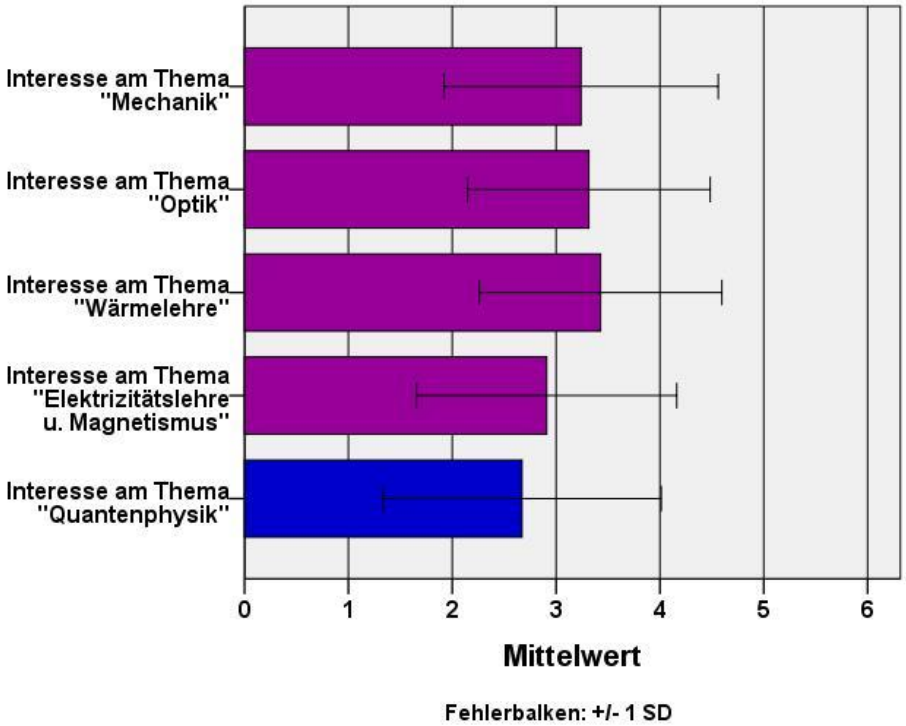
sechsstufige Skala: sehr ≙ 1, …, gar nicht ≙ 6

Interesse am Thema *Quantenphysik*

- Ergebnisse univariate dreifaktorielle Kovarianzanalyse

		Ende Treatment	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



sechsstufige Skala: sehr ≙ 1, …, gar nicht ≙ 6

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

Zitate von SchülerInnen

- „ ‚…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] http://www.stupidedia.org/images/5/59/Atommodell.svg

[2] https://i.ytimg.com/vi/fwXQjRBLwsQ/hqdefault.jpg

[3] Nägerl et al. (1998): Ion strings for quantum gates.
Applied Physics B: Laser and Optics, 66, S. 606