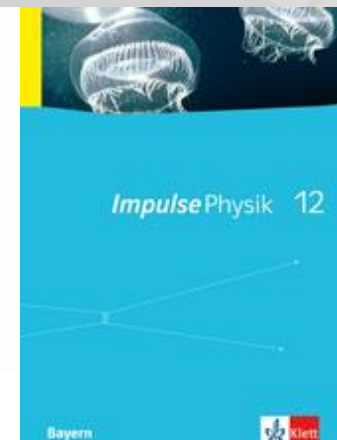
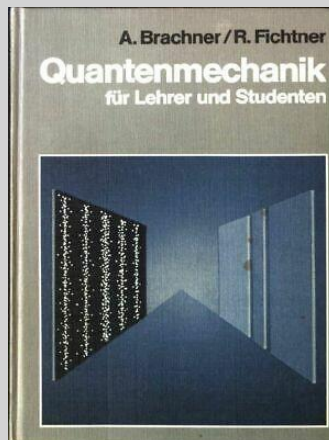


Unterrichtskonzepte zur Quantentheorie

Ein kritischer Vergleich (und konstruktive Vorschläge)

Oliver Passon
Bergische Universität Wuppertal



Quellenlage

Fachdidaktik

milq

Münchener
Internetprojekt zur
Lehrerfortbildung in
Quantenmechanik

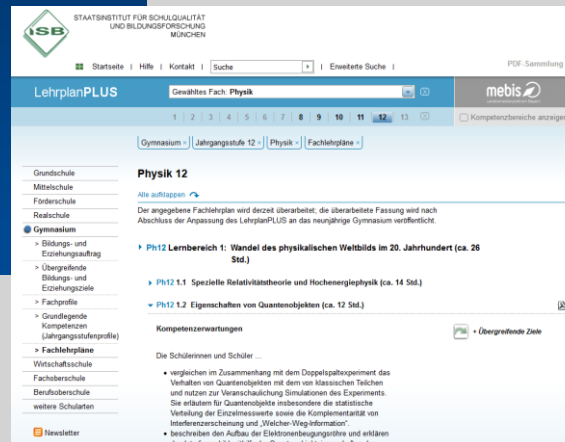


Das Erlanger Konzept zur Quantenphysik

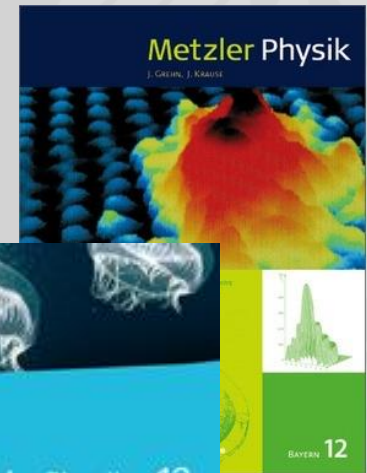
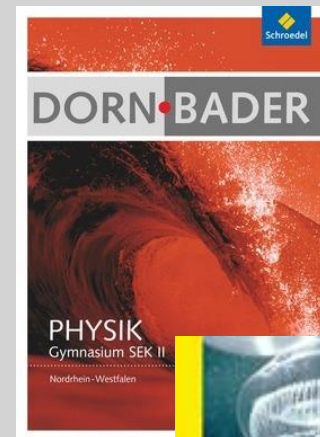
Jan-Peter Meyn
jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

1. Motivation: Physik des 21. Jahrhunderts
2. Moderner Physikunterricht mit Quanten
3. Das Photon als Quantenobjekt
4. Quantenphysik kommt aus der Optik
5. Folgerungen für den Unterricht

Lehrpläne



Lehrmittel



Wer unterrichtet Ihre Schülerinnen und Schüler?

Hier: QM Video des „*Simple Club*“



Vorbemerkung zur Lernwirksamkeit

Klassische Konzeptwechseltheorie (Posner et al. 1982)

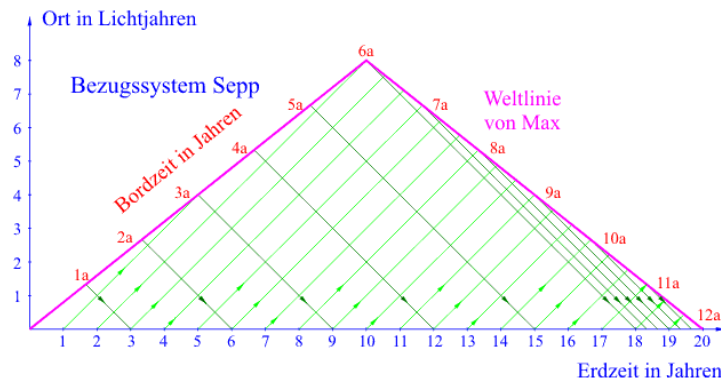
1. Es besteht **Unzufriedenheit** mit dem alten Konzept („dissatisfaction“).
2. Das neue Konzept ist **nachvollziehbar** und **verständlich** („intelligible“).
3. Das neue Konzept ist **glaubwürdig** und **überzeugend** („plausible“).
4. Das neue Konzept ist **fruchtbar** bei der Deutung vieler Zusammenhänge („fruitful“).

Idee: Die Sicherheit eines Präkonzepts gibt der Lerner nicht leichtfertig auf. Dieser Verlust an Stabilität muss kompensiert werden!

Die spezielle Relativitätstheorie in der Schule

Der Sachverhalt ist vollständig paradox und irritierend – vielleicht sogar mysteriös...

Die “Paradoxie” erzwingt eine Revision der Raum-Zeit Vorstellungen.



Zur Veranschaulichung betrachten wir ein einfaches Zahlenbeispiel, das von Darwin vorgeschlagen wurde:

An einem Neujahrstag verlässt Astronaut Max seinen Zwillingbruder Sepp in einem Raumschiff, das mit $v = 0,80 \cdot c$ fährt. Nach zehn Jahren, gemessen von der Erde aus, kehrt er um und fährt mit gleicher Geschwindigkeit zurück. Dort trifft er nach einer Gesamtreisezeit von zwanzig Jahren (Erdzeit) wieder ein.

Für die Borduhren hat die Hinreise wegen der Zeitdilatation jedoch nur

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} \cdot 10 \text{ Jahre} = \sqrt{1 - (0,80)^2} \cdot 10 \text{ Jahre} = 6 \text{ Jahre}$$

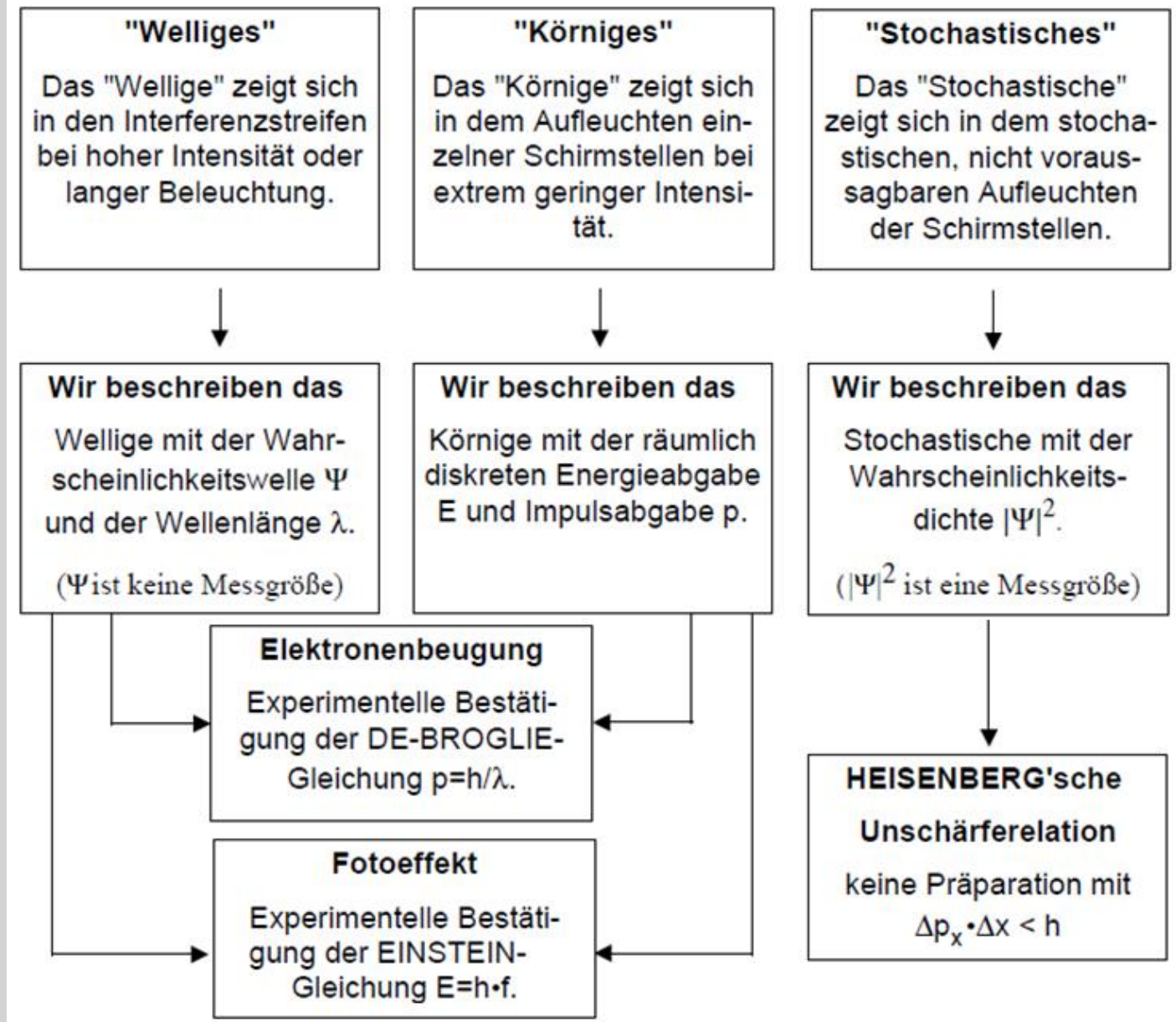
gedauert, ebenso wie die Rückreise (Beachten Sie: Der Effekt der Zeitdilatation ist von der Bewegungsrichtung unabhängig; die hergeleiteten Formeln gelten ebenso für negatives v). Max war also insgesamt nur 12 Jahre nach Bordzeit unterwegs. Nach der Rückkehr ist Max um 8 Jahre jünger als Sepp.

Auf der Grundlage plausibler Postulate wird das Paradoxon zu einem „Orthodoxon“...

Unterrichtskonzepte

- Bedingungen für den Konzeptwechsel (→ Lernwirksamkeit)
- Fachliche Angemessenheit („Anschlussfähigkeit“)
 - **Schwerpunkt:** Welle-Teilchen Dualismus
 - Bedeutung der Wellenfunktion
 - Geschichte des Photon-Konzepts
 - Wandel des Teilchenbegriffs in der modernen Physik

Josef Leisen:

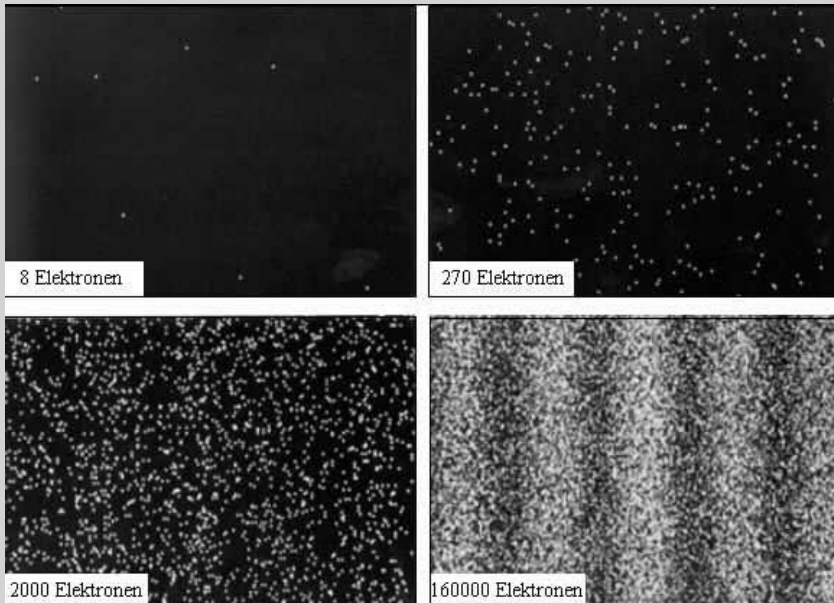


Leisen, Josef(2000): Quantenphysik/Mikroobjekte. Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der Sekundarstufe II. Bad Kreuznach: Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz 2000.

- Licht hat auch Teilcheneigenschaften ($\rightarrow$ Photonen)
- Elektronen haben auch Welleneigenschaften ($\rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$)

In einigen Lehrplänen: „Überwindung des Welle-Teilchen Dualismus durch die Wahrscheinlichkeitsdeutung von Born“.

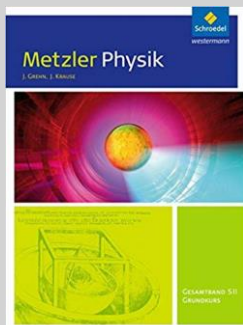
„Welle-Teilchen Dualismus“ von Elektronen



„Hitachi-Experiment“ mit elektronischem Biprisma



Beugung von Elektronen an polykristallinem Graphit

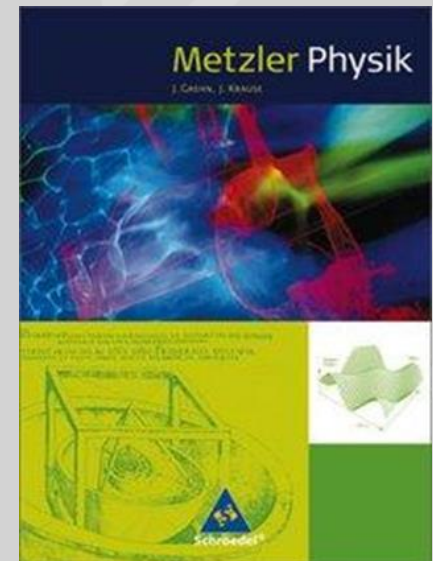
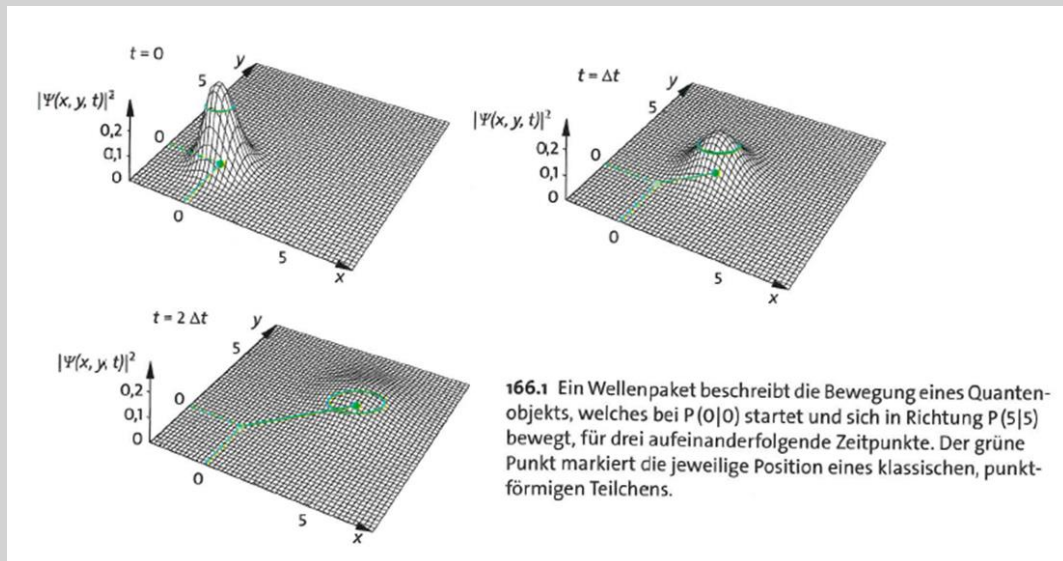


Metzler (S. 161): „Welleneigenschaften wie Beugung und Interferenz sind auch bei Elektronen zu beobachten. Die Ausbreitung von Elektronen kann mithilfe des Wellenmodells zutreffend beschrieben werden.“

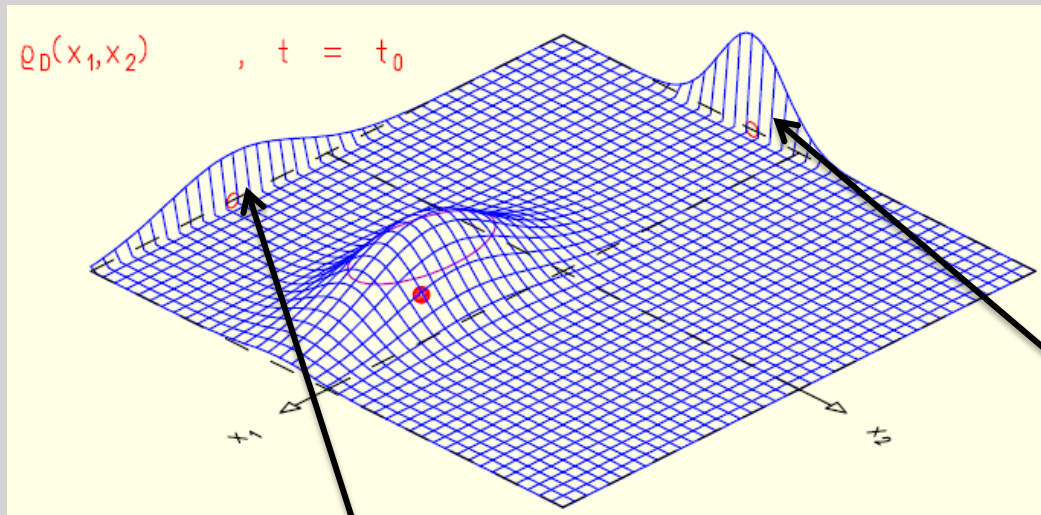
In einem n -Teilchen System, ist die Wellenfunktion auf dem Konfigurationsraum definiert: $\Psi = \Psi(t, \vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n)$

Nur bei 1-Teilchen Systemen, fallen Orts- und Konfigurationsraum zusammen (aber: $\Psi(x, t) \in \mathbb{C} \dots$).

Beispielsysteme in Lehrbuchliteratur (Schule und Hochschule): Doppelspalt, Teilchen im Potenzialtopf, Tunneleffekt, Wasserstoffatom, harmonischer Oszillator, freies Teilchen, ...



Aus dem 8. Kapitel: Wahrscheinlichkeitsdichte ($\rho = |\Psi|^2$)
von zwei gekoppelte 1-dim harmonischen Oszillatoren



Randverteilung für Teilchen 1

Randverteilung für Teilchen 2

$|\Psi(x_1, x_2)|^2 =$ Wahrscheinlichkeitsdichte, Teilchen 1 bei
 x_1 und Teilchen 2 bei x_2 zu finden.

Ununterscheidbarkeit

Bisher stillschweigend angenommen: Teilchen 1 am Ort x_1
Teilchen 2 am Ort x_2

Im allgemeinen sind Zustände in der QM ununterscheidbar!

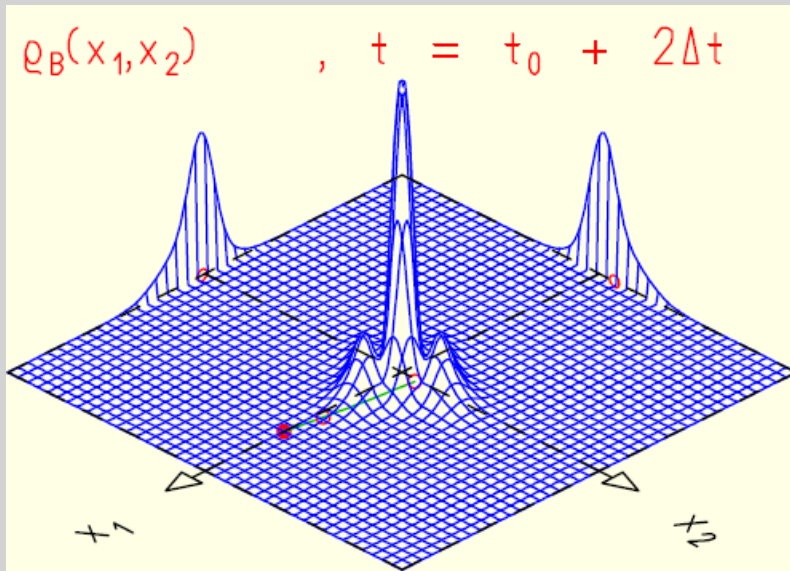
Für zwei **ununterscheidbare** Teilchen ist die Wellenfunktion entweder symmetrisch oder antisymmetrisch:

$$\psi(x_1, x_2, t) = \psi(x_2, x_1, t)$$

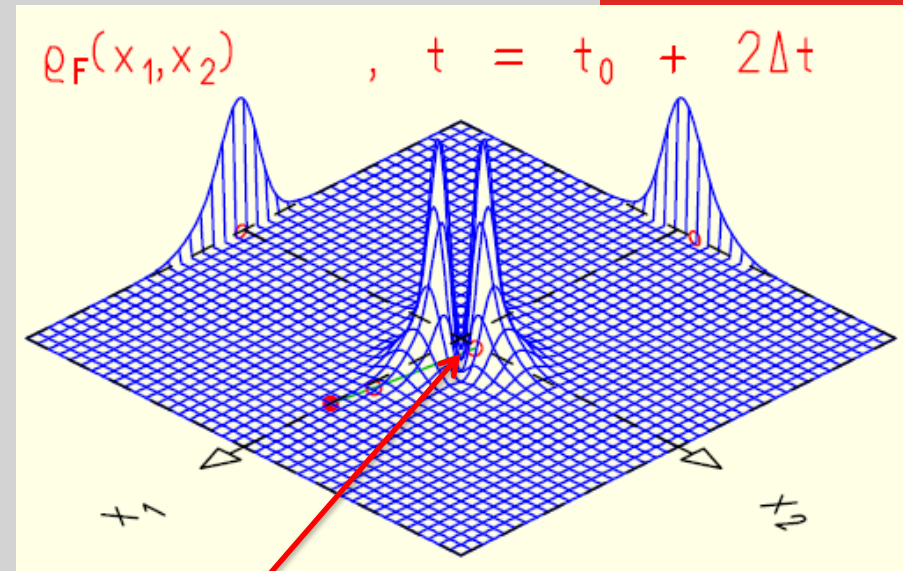

Symmetrisch („Bosonen“)

$$\psi(x_1, x_2, t) = -\psi(x_2, x_1, t)$$


Antisymmetrisch („Fermionen“)



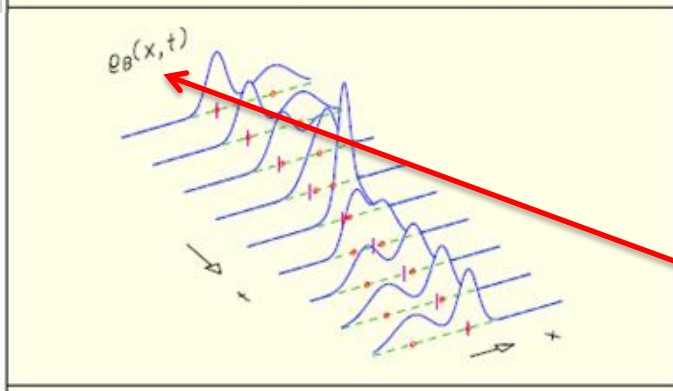
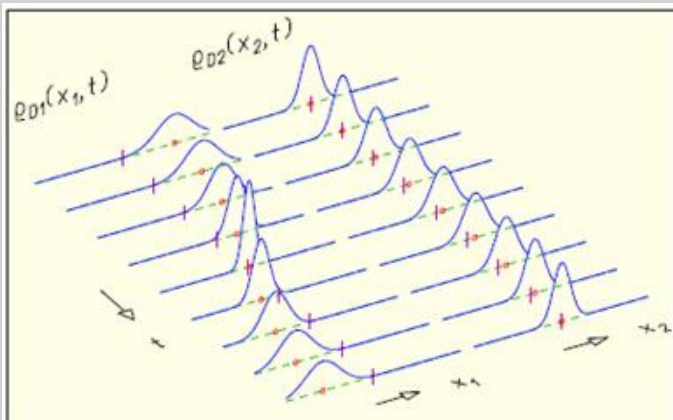
Zwei Bosonen als gekoppelte
harmonische Oszillatoren



Zwei Fermionen als gekoppelte
harmonische Oszillatoren

$\psi(x, x, t) = 0$ Spezialfall des „Pauli-Prinzip“

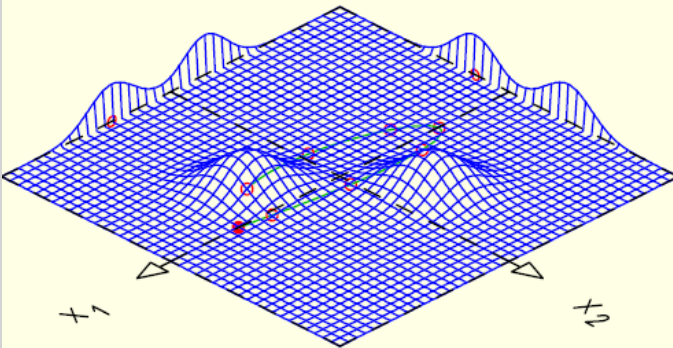
unterscheidbar



ununterscheidbar (symmetrisch=Bose)

Hoppla: Hier steht bloß $\rho_B(x, t)$,
denn es gilt $\rho(x_1) = \rho(x_2)$

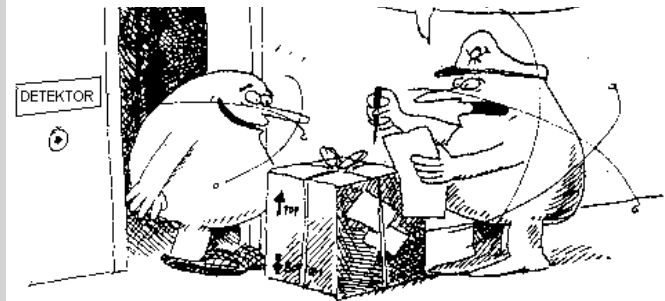
$\rho_B(x_1, x_2)$, $t = t_0 + 7\Delta t$



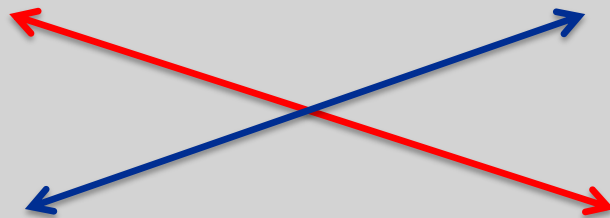
- Der vorgebliche Erfolg des „Wellenmodells“ verdankt sich der Betrachtung zu einfacher Beispiele.

Metzler (S. 161): „Die Ausbreitung von Elektronen kann mithilfe des Wellenmodells zutreffend beschrieben werden.“

Wenn sie den Empfang des Wellenpakets bestätigen könnten

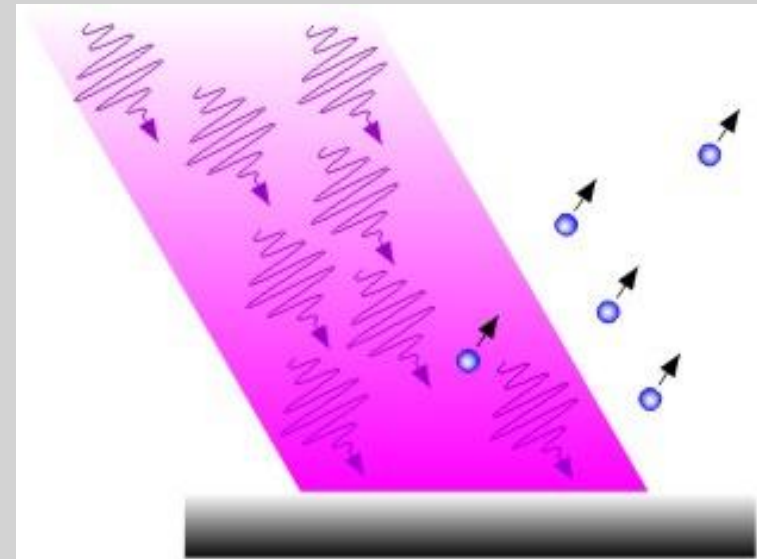
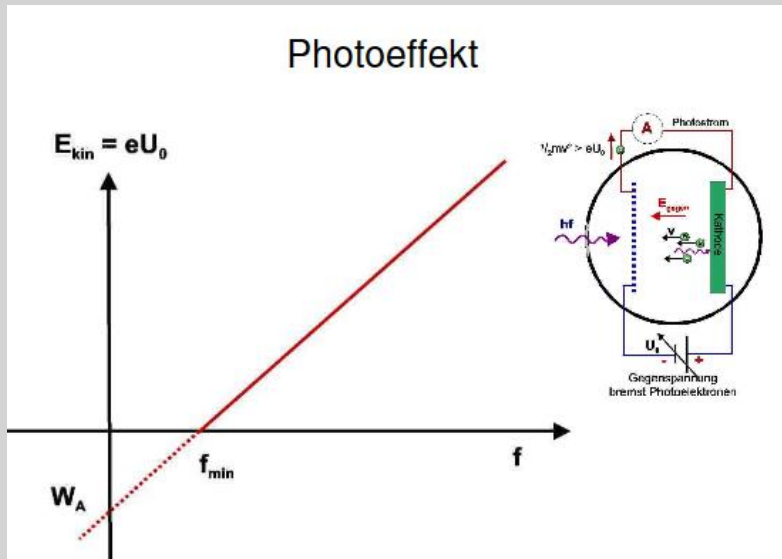


Lichtwellen haben auch Teilcheneigenschaften

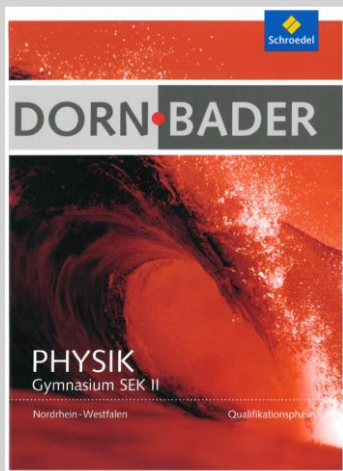


Elektronenteilchen haben auch Welleneigenschaften

Welle-Teilchen Dualismus des Lichts



Quelle: LEIFI



„Er [Einstein] postulierte, dass Licht tatsächlich durch winzig kleine Lichtquanten – wir nennen sie heute Photonen – übertragen wird.“ (S. 36)

Übliches Narrativ:

- **1900** führt Planck zur Erklärung der Schwarzkörperstrahlung das „Energiequant“ ($E = h \cdot f$) ein.
- **1905** deutet Einstein das Plancksche Energiequant als „Lichtquant“ („Photon“).
- **1913** Bohrs Atommodell hat diskrete Energieniveaus. Beim Übergang werden Photonen emittiert oder absorbiert.
- **1922** Die Entdeckung und Erklärung des Comptoneffekts als γe^- Streuung beweist die Lichtquantenhypothese.

...und seine Ungenauigkeiten:

- Unter Wissenschaftshistorikern ist umstritten, ob Planck eine Quantisierung intendierte.
- Einsteins Lichtquantenhypothese bezieht sich auf das Wiensche Strahlungsgesetz!
- Bohr lehnte bis ca. 1925 Lichtquanten ab. In seinem Atommodell kommen sie nicht vor.
- Der Comptoneffekt ist (wie der Photoeffekt) auch semi-klassisch erklärbar. Dabei muss das Strahlungsfeld gar nicht quantisiert werden. Das Photon ist ein Objekt der QFT!

Das Photon sollte nicht Teil des Curriculums der (nichtrelativistischen) Quantenmechanik sein. Es ist ein Objekt der Quantenfeldtheorie.

Pragmatische Alternativ: Einsteins Erklärung für den lichtelektrischen Effekt sollte wie das Bohrsche Atommodell behandelt werden: „historisch wichtig – fachlich überholt“.

Die Parallelisierung von „Elektron“ und „Photon“ hinsichtlich ihrer „Teilchenhaftigkeit“ ist fachlich nicht tragfähig, denn:

- Es gibt **keine** Wellenfunktion für das Photon!
- Es gibt **keine** Wahrscheinlichkeitsinterpretation für das Photon!
- Es gibt **keinen** Ortsoperator für das Photon!

Scully M O and Sargent M III 1972 The concept of the photon Phys. Today 25 39–47,
Strnad J 1986 Photons in introductory quantum Physics Am. J. Phys. 54 650–2, Kidd R,
Ardini J and Anton A 1989 Evolution of the modern photon Am. J. Phys. 57 27–35.

Die Erfassung der Quantengesetze durch kontinuierliche Funktionen.

Von E. SCHRÖDINGER, Berlin.

Die Naturwissenschaften 17(26): 486-489 (28. Juni 1929)

Ein langer Lichtwellenzug von beliebiger Gestalt laufe gegen ein kleines Körnchen K einer lichtempfindlichen Substanz an und streiche darüber weg.

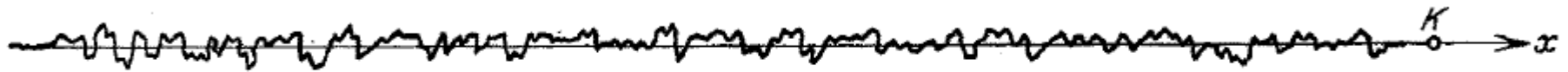


Fig. 1.

Wird das Körnchen zersetzt? **Klassische Erwartung:** Schwellwert der Amplitude oder Integration der Wirkung spielen eine Rolle...

Nichts von alledem ist der Fall, sondern es kommt lediglich auf die *Gestalt* des vorbeistreichenden Wellenzuges an, und zwar auf eine Gestaltseigenschaft, die sich gar nicht so mit einem Blick übersehen läßt, sondern die nur durch umfangreiche Berechnungen zu ermitteln ist.

Die „photochemische Wirksamkeit“ hängt davon ab, ob in der Fourier Zerlegung des Wellenzuges eine Komponente $\lambda < \lambda_0$ findet.

Zwischenstand:

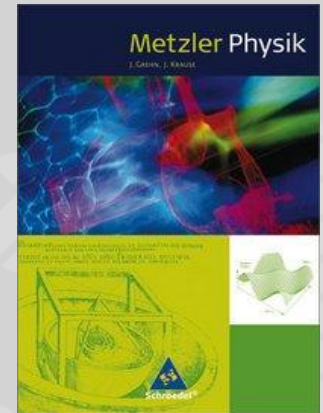
- Elektronen können nicht als Wellen (in der Raumzeit) beschrieben werden.
- Photonen können nicht als Teilchen (in der Raumzeit) beschrieben werden.
- Elektronen und Photonen sollten weniger stark analogisiert werden.

Was sind sie dann?
und/oder
Wie kann man mit diesem Problem umgehen?

Die Modell-Rhetorik



„Das Photon als Welle in der Ausbreitung ist ein **Modell**. Das Photon als Teilchen in der Wechselwirkung ist ein anderes **Modell**. Da ein physikalisches Objekt wie ein Photon durch seine Eigenschaften eindeutig beschrieben wird, kann es weder das eine noch das andere sein. Deshalb wird das Photon als Quantenobjekt bezeichnet.“ (S. 163)



„Die Frage, was genau beim Wechsel des **Modells** von Wellen**modell** zum Teilchen**modell** passiert, beantwortet kein **Modell**. Es ist schließlich ein **Modell** und nicht die Theorie. In diesem Sinne ist die Quantentheorie nicht anschaulich und daher **scheinbar unverstündlich**.“ (S. 167)

Warum werden diese **Modelle** dann zunächst so stark gemacht?

- Unterrichtet man die Elektrodynamik, indem man zunächst ein mechanisches Modell des Lichtäthers einführt?
- Kommt dies bei den SuS an? (Vgl. Simple Club Video)

Konzeptwechsel und Lernwirksamkeit



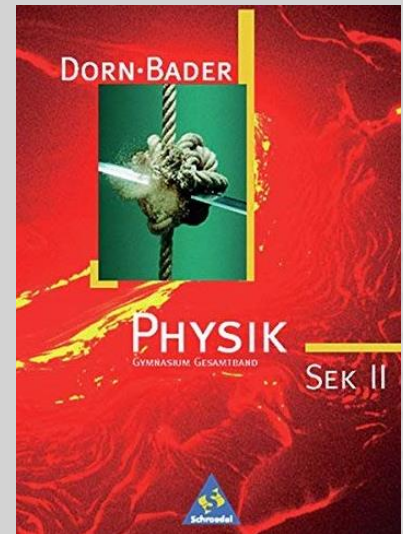
Wellen oder Teilchen?

Sowohl mit Licht als auch mit Elektronenstrahlung gibt es Experimente, wovon die einen eher mit dem Wellenmodell, die anderen eher mit dem Teilchenmodell verständlich erklärt werden können. Aber was ist Licht oder Elektronenstrahlung nun wirklich? Welle oder Teilchen? Ein Physiker formulierte dieses Dilemma für das Licht schon fast resignierend: "Montag, Mittwoch und Freitag ist das Licht eine Welle, Dienstag, Donnerstag und Samstag ist es ein Teilchen und am Sonntag ruht es."

Weiteres Beispiel für Mystifizierung: EPR Paradoxon und Nichtlokalität

Aus dem Dorn-Bader (2012, S. 466)

„Gemäß dem Messpostulat richten die Photonen ihre Polarisation opportunistisch nach der Stellung von P_1 . Erst P_1 erzeugt eine der beiden Polarisationsrichtungen, also **Realität**, und gibt sie als Messresultat aus.“



„Man versucht das Photon zu überlisten. *Wenn beide unterwegs sind*, dreht man das rechte Gerät P_1 schnell um $\varphi = 30^\circ \dots$ “

→ selten fehlt der Hinweis auf die „spukhafte Fernwirkung“

All dies begründet die Sorge:

Im Unterricht der Quantenmechanik wird kein klarer begrifflicher Rahmen geliefert und ihre Paradoxien werden in die Nähe des **nicht Verstehbaren** gerückt.

Dies ist leicht erklärlich: Grundlagenfragen werden seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert...

Aber: Bei all dem droht, die *vollkommene* operationale Beherrschung der Quantenmechanik in den Hintergrund zu treten.

!!!

1. Es besteht eine **Unzufriedenheit** mit dem alten Konzept („dissatisfaction“).
2. Das neue Konzept ist **nachvollziehbar** und **verständlich** (???) („intelligible“).
3. Das neue Konzept ist **glaubwürdig** und überzeugend (???) („plausible“).
4. Das neue Konzept ist **fruchtbar** (!?) bei der Deutung vieler (alter und neuer) Zusammenhänge („fruitful“).

Das alte Konzept wird nicht durch eine verständliche und glaubwürdige Alternative ersetzt.



Frage: Wie sieht ein verständliches und plausibles Unterrichtskonzept zur QM dann aus?

Ensemble Deutung und die Umdeutung des Teilchenbegriffs

Frage: Was beschreibt die Wellenfunktion
 $\Psi(x,t)$?

a) Individuelle Systeme

b) Die statistischen Eigenschaften einer großen Zahl identisch präparierter Zustände

- Die Interpretation b) wird „Ensemble-Deutung“ oder die „minimale Interpretation“ der QM genannt. Sie begründet ihre operationale Beherrschung – aller Debatten zum Trotz...
- Die EI hat eine gewisse Natürlichkeit, da sich Wahrscheinlichkeitsaussagen ebenfalls nur auf (hypothetisch) unendlich oft wiederholbare Vorgänge beziehen („Frequentismus“).

Vgl. Wiesner und Müller (1996) „Die Ensemble Interpretation der Quantenmechanik“ *Physik in der Schule* **34**: 343. und **Milq.** Siehe auch Ballentine, L. (1970, 1998)

Wie hilft die Ensemble-Deutung?

Ist das Elektron gemäß der QM Welle, Teilchen oder beides zugleich?

Einzelne Elektronen liegen gar nicht im Gegenstandsbereich der Theorie. Die QM macht (experimentell bestätigte) Aussagen über das statistische Verhalten von Ensembles.

Wird über das Schicksal von Schrödingers Katze erst durch die Beobachtung entschieden?



Einzelne Katzen (bzw. einzelne Messungen) liegen gar nicht im Gegenstandsbereich der Theorie. Die QM macht (experimentell bestätigte) Aussagen über das statistische Verhalten von Ensembles.

Gibt es eine Theorie, die über die einzelnen Elemente des Ensembles noch genauere Aussagen macht?

Dies wird kontrovers diskutiert. Entweder man ergänzt die QM um weitere Regeln der „Interpretation“ (Kopenhagen, etc.) oder man ergänzt den Formalismus (Bohm, spontaner Kollaps etc.).

Und was passiert mit dem Photon?

<i>Merkmale von Teilchen</i>	Klassische Mechanik	Quantenmechanik (z. Bsp. Elektron)	Quantenfeldtheorie (z. Bsp. Photon)
<i>Anzahl</i>	✓	✓	(✓)
<i>Ort</i>	✓	(✓)	
<i>Bahn</i>	✓		
<i>unterscheidbar</i>	✓		

Ein Photon „Teilchen“ zu nennen, sagt weniger über Photonen, als über den gewandelten „Teilchenbegriff“ aus.

Statt einer Zusammenfassung:

Vorschlag für die QM in der Schule

- Eine konsistente „**minimale Interpretation**“ einführen (Ballentine 1970, Ballentine 1998, m. E. **Milq**).
 - Ψ beschreibt kein Einzelsystem, sondern ein Ensemble identisch präparierter Zustände.
- Die offenen Fragen/Probleme vor diesem **Hintergrund** behandeln! (**Idee**: Das Verstandene genau so stark betonen, wie die offenen Fragen (→ Chance auf **Konzeptwechsel** wird erhöht!))
- Die **historische** Bedeutung der Lichtquantenhypothese betonen. Das Photon des aktuellen Verständnisses ist davon zu **unterscheiden**.



Herzlichen Dank!