

Erkenntnistheoretische Implikationen der Quantentheorie

Oliver Passon

Zentralinstitut für Angewandte Mathematik
Forschungszentrum Jülich

Vorbemerkungen

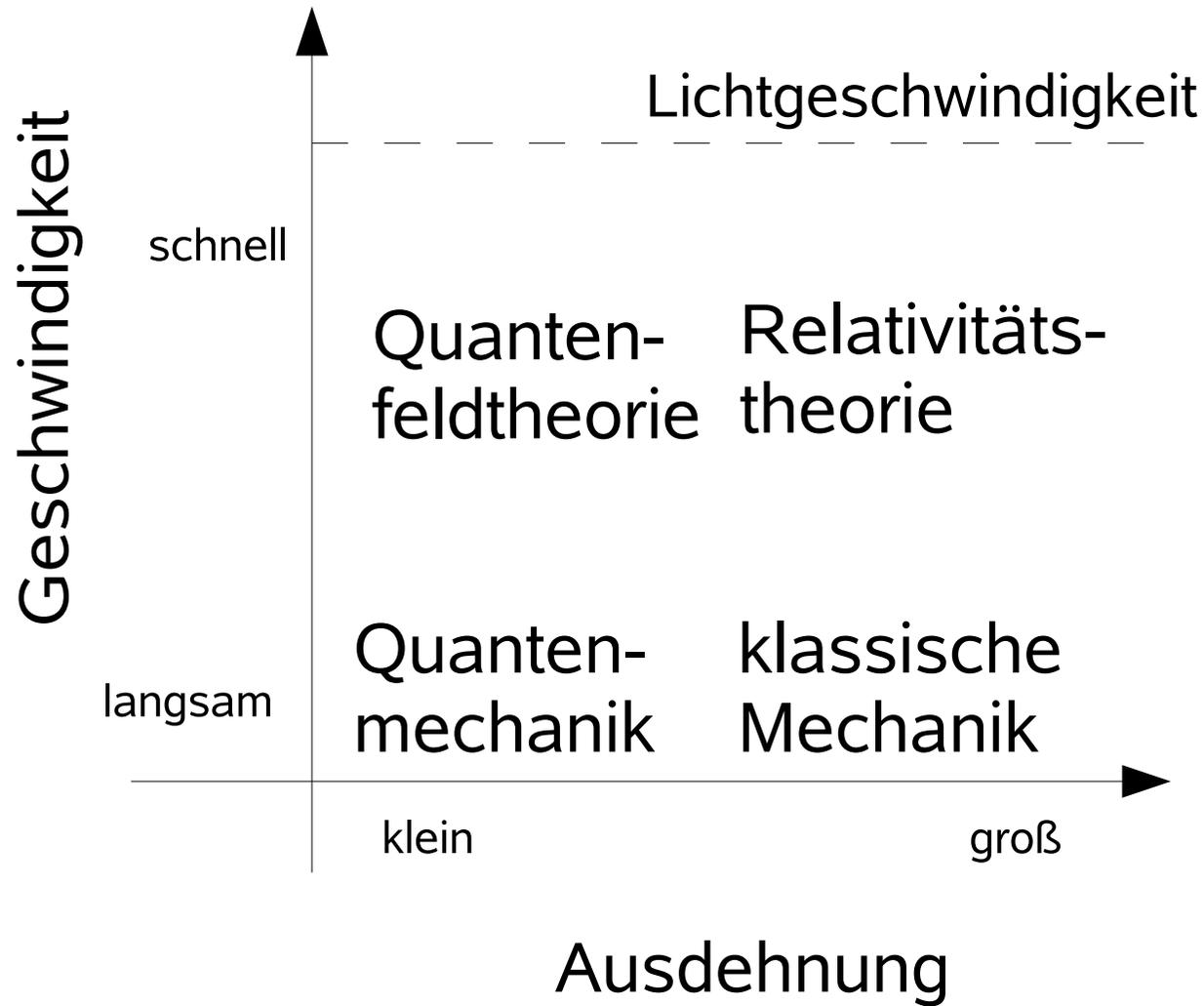
In erster Näherung gilt:

Quantenmechanik = Quantenphysik = Quantentheorie

Diese Namen bezeichnen die physikalische Theorie, die ab dem Beginn des 20. Jahrhunderts von Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Max Born, Pascual Jordan, Paul Dirac, John von Neumann und anderen entwickelt wurde.

Grob gesprochen ist es die Theorie, die “kleine” Objekte beschreibt, also etwa Atome.

Wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt, ist in der Regel die **nichtrelativistische** Quantenmechanik gemeint.



Zitate

“Diejenigen, die nicht schockiert sind, wenn sie zum ersten mal mit Quantenmechanik zu tun haben, haben sie nicht verstanden.”

Niels Bohr

“Ich erinnere mich an viele Diskussionen mit Bohr, die bis spät in die Nacht dauerten und fast in Verzweiflung endeten. Und wenn ich am Ende solcher Diskussionen allein einen Spaziergang im benachbarten Park unternahm, wiederholte ich immer und immer wieder die Frage, ob die Natur wirklich so absurd sein könne, wie sie uns in diesen Atomexperimenten erschien.”

Werner Heisenberg

“Nicht mehr die objektiven Ereignisse, sondern die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten gewisser Ereignisse können in mathematischen Formeln festgelegt werden. Nicht mehr das faktische Geschehen selbst, sondern die Möglichkeit zum Geschehen - die 'Potentia', wenn wir diesen Begriff der Philosophie des Aristoteles verwenden wollen - ist strengen Naturgesetzen unterworfen.”

Werner Heisenberg

“Entgegen allen rückschrittlichen Bemühungen ... bin ich gewiß, daß der statistische Charakter der Psi-Funktion und damit der Naturgesetze ... den Stil der Gesetze wenigstens für einige Jahrhunderte bestimmen wird ... Von einem Weg zurück zu träumen, zurück zum klassischen Stil von Newton-Maxwell...scheint mir hoffnungslos, abwegig ...”

Wolfgang Pauli

“Die Quantenmechanik ist sehr achtunggebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, daß das noch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der Alte nicht würfelt.”

Albert Einstein

“Wenn es bei dieser verdammten Quantenspringerei bleiben soll, so bedaure ich, mich mit der Quantentheorie überhaupt befaßt zu haben.”

Erwin Schrödinger

“I think it is safe to say that no one understands quantum mechanics.”

Richard Feynman

Inhalt

- Klassische Physik
 - Punktmechanik (freier Fall und harmonischer Oszillator)
 - Wellen (Interferenz und Beugung)
- Quantenmechanik
 - Historische Entwicklung (Planck, Bohr, de Broglie)
 - Schrödingertheorie und Bornsche Deutung der Wellenfunktion
 - Heisenbergsche Unschärferelation, Nichtlokalität
 - Das Messproblem der Quantenmechanik
 - Nichtlokalität

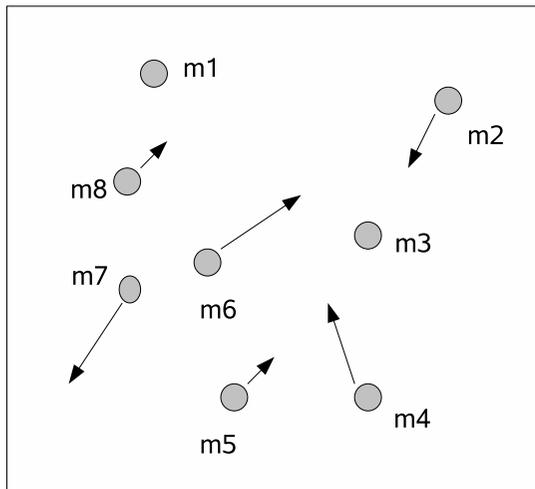
Klassische Mechanik

Ziel: Was versteht der Physiker unter der “Beschreibung eines Systems”

Newton'sche (Teilchen-)Mechanik

Um die Neuartigkeit der Quantenmechanik würdigen zu können, sollten Grundzüge der klassischen Physik bekannt sein.

Ziel der klassischen Mechanik: “Die Bewegung von Körpern zu berechnen (*Ort als Funktion der Zeit, $r(t)$*), falls die auf sie wirkenden Kräfte bekannt sind”.



Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung}$$

Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

Kraft = Masse \times Beschleunigung

$$F = m \cdot a(t)$$

Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

Kraft = Masse \times Beschleunigung

$$F = m \cdot a(t)$$

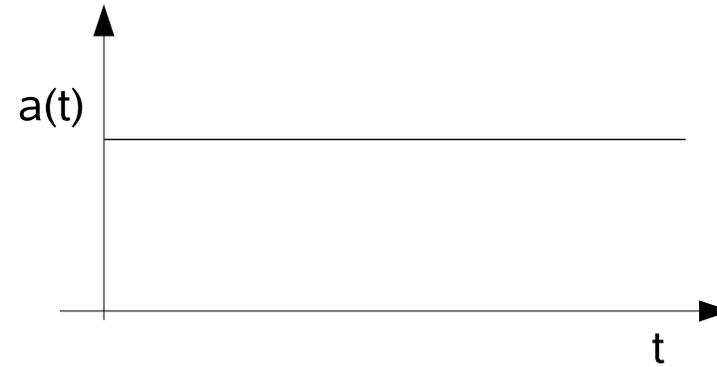
Gegeben: ein Kraftgesetz F

Gesucht: $r(t)$ (sprich "Ort als Funktion der Zeit", also: wann ist das Teilchen wo?)

Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

Kraft = Masse \times Beschleunigung

$$F = m \cdot a(t)$$



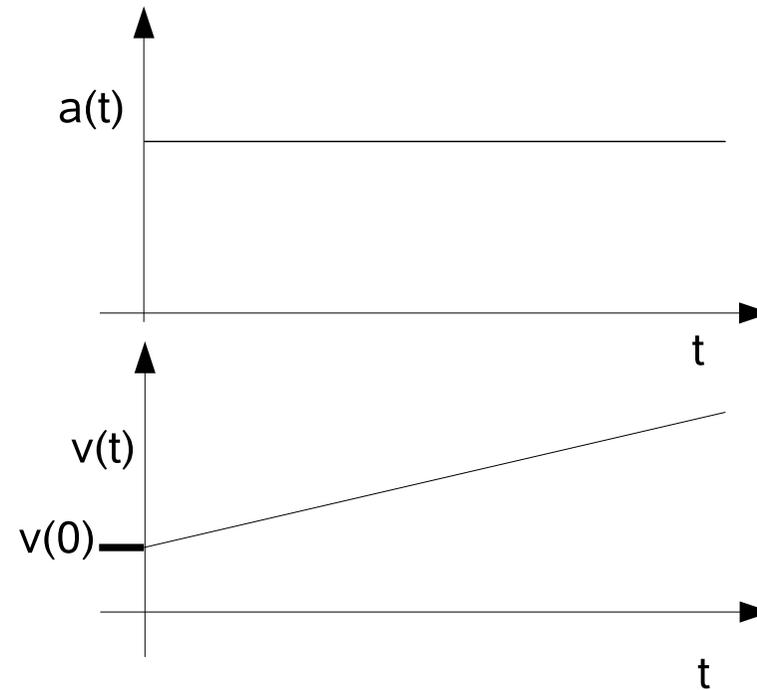
Gegeben: ein Kraftgesetz F

Gesucht: $r(t)$ (sprich "Ort als Funktion der Zeit", also: wann ist das Teilchen wo?)

Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

Kraft = Masse \times Beschleunigung

$$F = m \cdot a(t)$$



Gegeben: ein Kraftgesetz F

Gesucht: $r(t)$ (sprich "Ort als Funktion der Zeit", also: wann ist das Teilchen wo?)

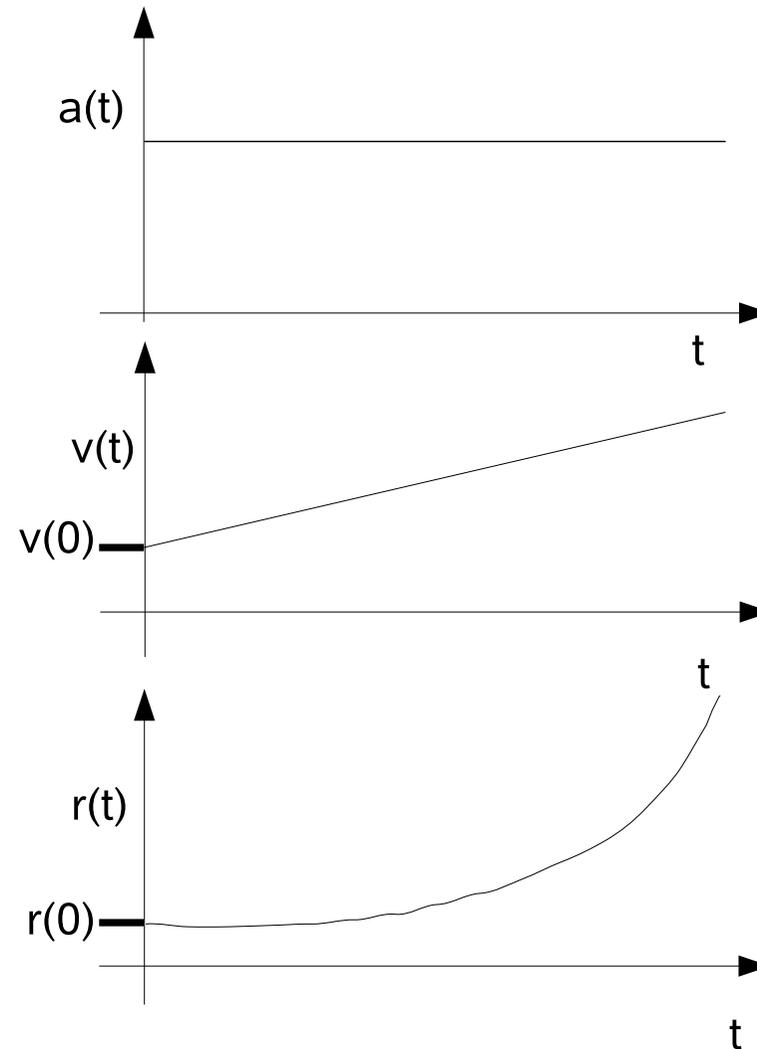
Newton'sche Bewegungsgesetz (1687)

Kraft = Masse \times Beschleunigung

$$F = m \cdot a(t)$$

Gegeben: ein Kraftgesetz F

Gesucht: $r(t)$ (sprich "Ort als Funktion der Zeit", also: wann ist das Teilchen wo?)



Exkurs: Differentialgleichungen

$F = m \cdot a$ ist eine Differentialgleichung, d.h. eine Bestimmungsgleichung für eine Funktion, über deren Ableitungen etwas bekannt ist...

Exkurs: Differentialgleichungen

$F = m \cdot a$ ist eine Differentialgleichung, d.h. eine Bestimmungsgleichung für eine Funktion, über deren Ableitungen etwas bekannt ist...

Algebraische Gleichung

$$5 \cdot a - 27 = 12$$

$$5 \cdot a = 12 + 27$$

$$a = 39/5$$

Exkurs: Differentialgleichungen

$F = m \cdot a$ ist eine Differentialgleichung, d.h. eine Bestimmungsgleichung für eine Funktion, über deren Ableitungen etwas bekannt ist...

Algebraische Gleichung

$$5 \cdot a - 27 = 12$$

$$5 \cdot a = 12 + 27$$

$$a = 39/5$$

Differentialgleichung

$$f'(x) = 12x$$

$$\Rightarrow f(x) = 6x^2 + C$$

Exkurs: Differentialgleichungen

$F = m \cdot a$ ist eine Differentialgleichung, d.h. eine Bestimmungsgleichung für eine Funktion, über deren Ableitungen etwas bekannt ist...

Algebraische Gleichung

$$5 \cdot a - 27 = 12$$

$$5 \cdot a = 12 + 27$$

$$a = 39/5$$

Differentialgleichung

$$f'(x) = 12x$$

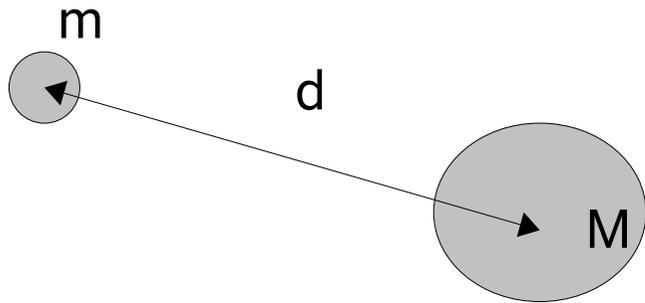
$$\Rightarrow f(x) = 6x^2 + C$$

wir schreiben \dot{r} statt r' für die Ableitung der Funktion $r(t)$ nach t

\dot{r} = Geschwindigkeit (v)

\ddot{r} = Beschleunigung (a)

Newton'sche Gravitationsgesetz



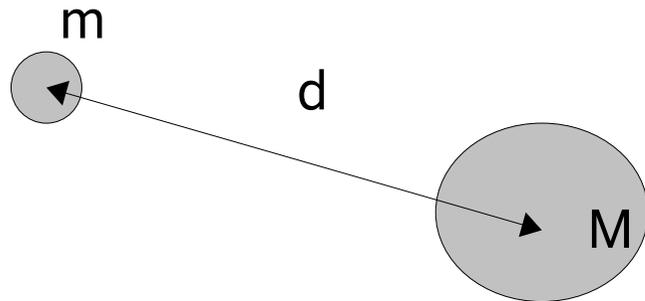
$$F_{grav} = -\gamma \cdot \frac{mM}{d^2}$$

mit: m, M den Massen der beteiligten Körper

d = Abstand zwischen den Körpern

γ = Gravitationskonstante

Newton'sche Gravitationsgesetz



$$F_{grav} = -\gamma \cdot \frac{mM}{d^2}$$

mit: m, M den Massen der beteiligten Körper

d = Abstand zwischen den Körpern

γ = Gravitationskonstante

⇒ Lösung der Newton'schen Bewegungsgleichung führt auf die “Keplerschen Gesetze” der Planetenbewegung.

1. Planetenbewegung auf Ellipsen
2. “Fahrstrahl” von der Sonne zum Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen
3. ...

Newton'sche Mechanik: harmonischer Oszillator

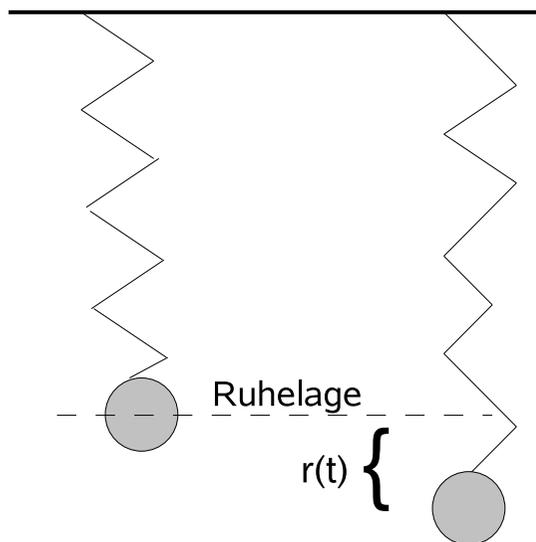
Häufig besitzt ein System eine feste Ruhelage. Bei Auslenkung aus dieser kommt es zu einer Schwingungsbewegung.

Bsp.: Pendel, Kugel in einer Schüssel, Masse an einer Feder...

Newtonsche Mechanik: harmonischer Oszillator

Häufig besitzt ein System eine feste Ruhelage. Bei Auslenkung aus dieser kommt es zu einer Schwingungsbewegung.

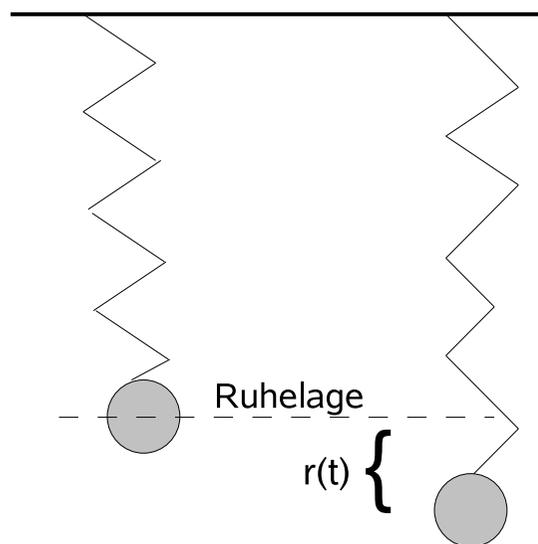
Bsp.: Pendel, Kugel in einer Schüssel, Masse an einer Feder...



Newtonsche Mechanik: harmonischer Oszillator

Häufig besitzt ein System eine feste Ruhelage. Bei Auslenkung aus dieser kommt es zu einer Schwingungsbewegung.

Bsp.: Pendel, Kugel in einer Schüssel, Masse an einer Feder...

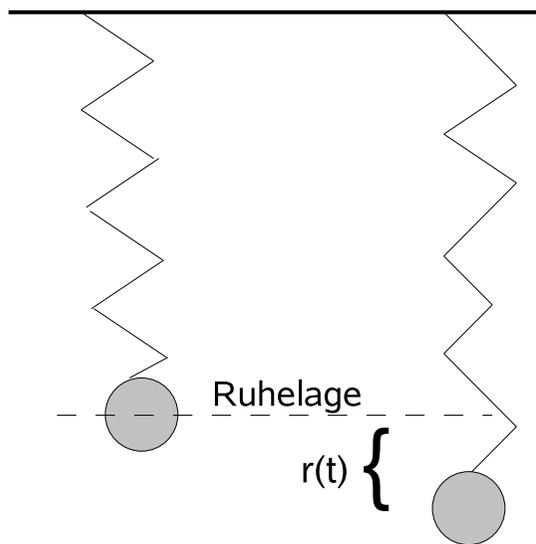


Kraft: proportional zur Auslenkung $F = -k \cdot r(t)$
 $D =$ "Federkonstante"

Newtonsche Mechanik: harmonischer Oszillator

Häufig besitzt ein System eine feste Ruhelage. Bei Auslenkung aus dieser kommt es zu einer Schwingungsbewegung.

Bsp.: Pendel, Kugel in einer Schüssel, Masse an einer Feder...



Kraft: proportional zur Auslenkung $F = -k \cdot r(t)$
 $D =$ "Federkonstante"

Bewegungsgleichung:

$$-D \cdot r(t) = m \cdot a(t)$$

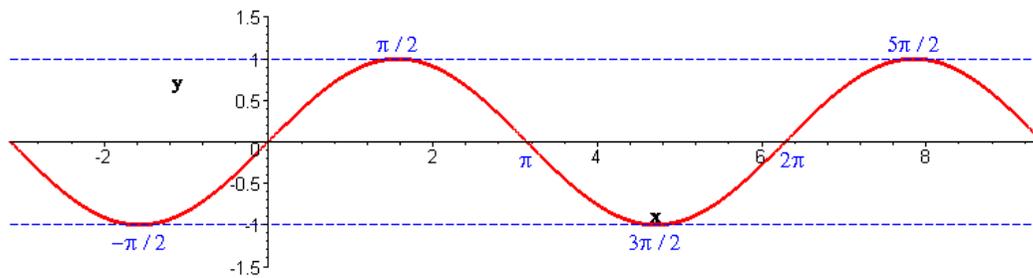
$$-D \cdot r(t) = m \cdot \ddot{r}(t)$$

$$-(D/m) \cdot r(t) = \ddot{r}(t)$$

Gesucht wird als eine Funktion $r(t)$, deren 2. Ableitung (bis auf Vorfaktoren) wieder die selbe Funktion $r(t)$ ergibt.

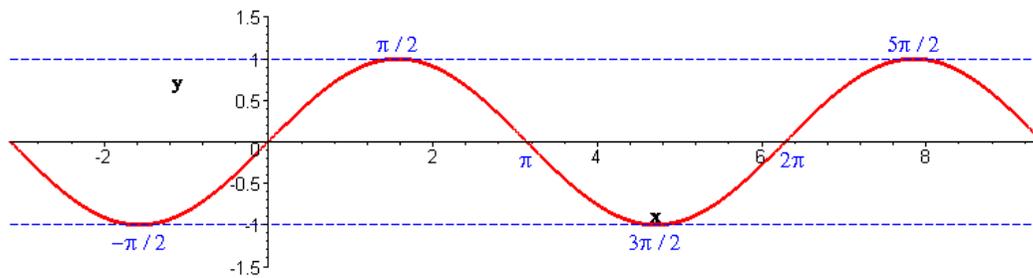
Gesucht wird als eine Funktion $r(t)$, deren 2. Ableitung (bis auf Vorfaktoren) wieder die selbe Funktion $r(t)$ ergibt. Dies sind gerade die trigonometrischen Funktionen (sin, cos).

$$r(t) \sim \sin t \sqrt{D/m} \quad \text{mit: } \omega = \sqrt{D/m}$$



Gesucht wird als eine Funktion $r(t)$, deren 2. Ableitung (bis auf Vorfaktoren) wieder die selbe Funktion $r(t)$ ergibt. Dies sind gerade die trigonometrischen Funktionen (sin, cos).

$$r(t) \sim \sin t \sqrt{D/m} \quad \text{mit: } \omega = \sqrt{D/m}$$



ω bezeichnet die “Winkelgeschwindigkeit”, d.h. $\omega = 2\pi/T$ mit T der Periode der Schwingung. D. h. heisst, nach T Sekunden wiederholt sich die Bewegung.

Wellen

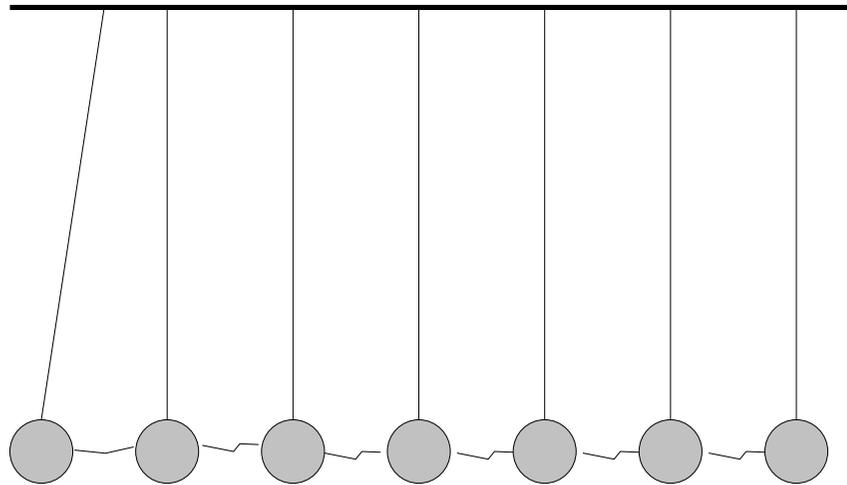
Def.: Welle = periodische Bewegung in Raum und Zeit

Wellen

Def.: Welle = periodische Bewegung in Raum und Zeit

Mechanisches Modell: Kette gekoppelter Pendel.

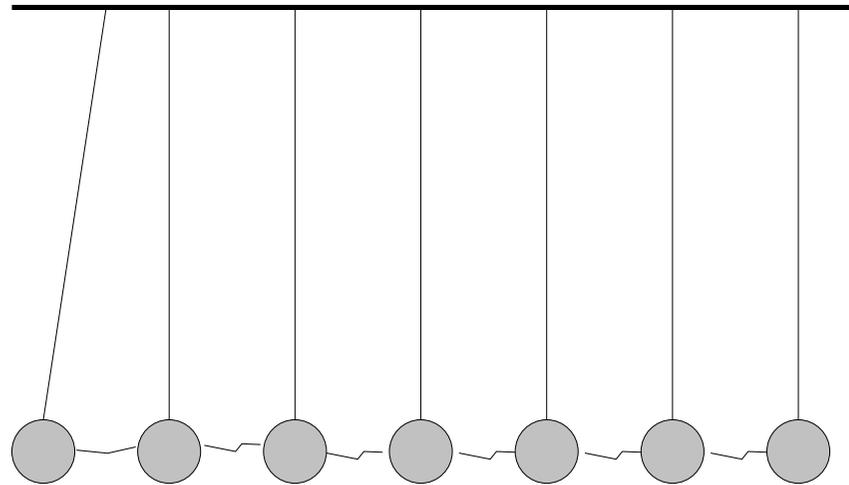
Wird das erste Pendel angestoßen, führt es eine Bewegung gemäß $y_1 \sim \sin(\omega \cdot t)$ aus.



Def.: Welle = periodische Bewegung in Raum und Zeit

Mechanisches Modell: Kette gekoppelter Pendel.

Wird das erste Pendel angestoßen, führt es eine Bewegung gemäß $y_1 \sim \sin(\omega \cdot t)$ aus.



Mit Verzögerung werden die anderen Pendel auch schwingen ($y_n \sim \sin(\omega t - \phi)$). Die Verzögerung ϕ ist offensichtlich umso größer, je weiter der Abstand ist: $\phi \sim x_i$ bzw. $\phi = k \cdot x_i$ (k ="Wellenzahl").

2 Größen charakterisieren eine Welle:

2 Größen charakterisieren eine Welle:

$T = 2\pi/\omega$ die **zeitliche Periode**

$\lambda = 2\pi/k$ die **Wellenlänge** bzw. **räumliche Periode**

2 Größen charakterisieren eine Welle:

$T = 2\pi/\omega$ die **zeitliche Periode**

$\lambda = 2\pi/k$ die **Wellenlänge** bzw. **räumliche Periode**

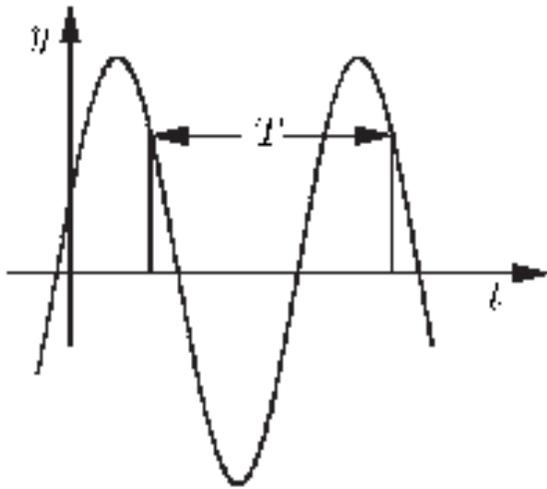


Abbildung 5.2: Schwingungsdauer oder Periode T

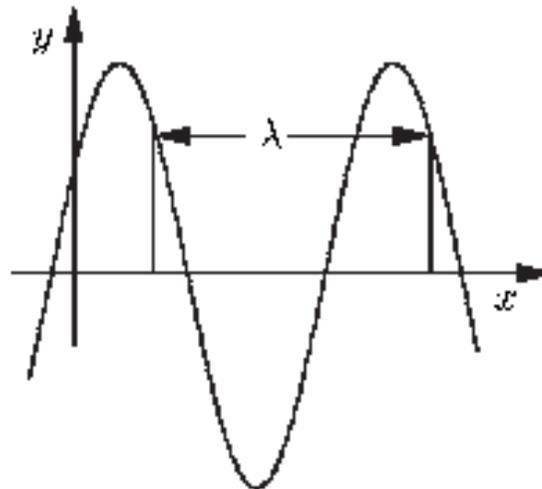
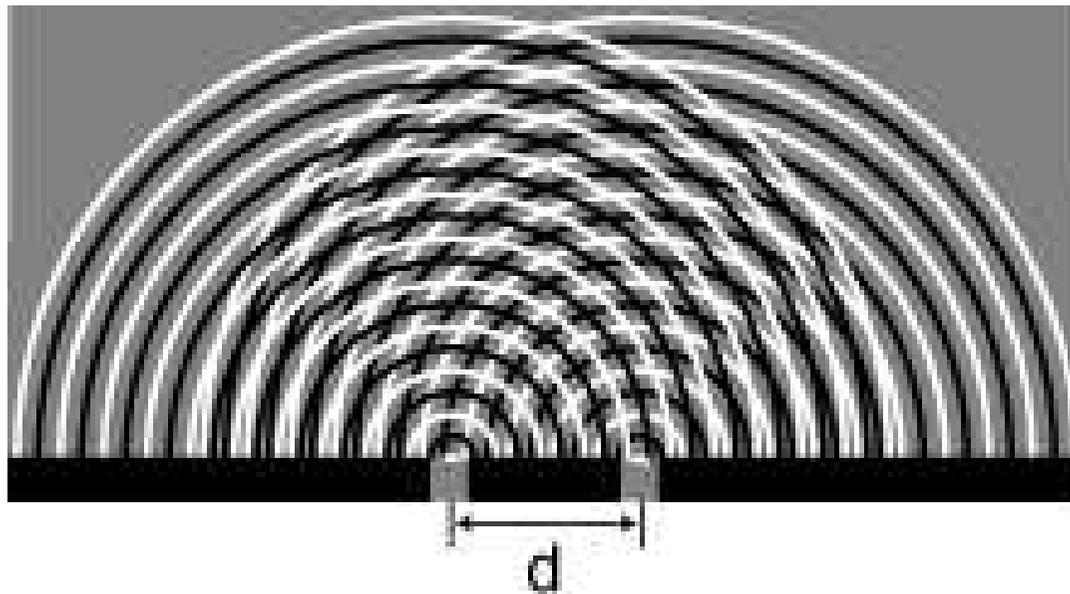


Abbildung 5.3: Wellenlänge λ

In einer Welle findet kein “Stofftransport” statt. Was sich ausbreitet ist eine “Anregung” (bzw. Energie)...eine Welle hat keinen “Ort”

Charakteristische Phänomene: Beugung und Interferenz



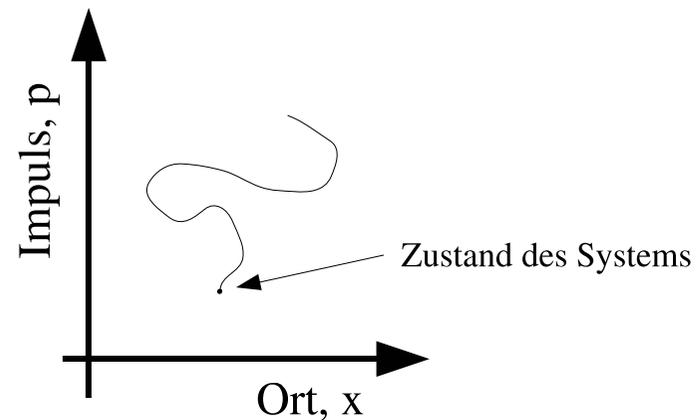
Gegenseitige Verstärkung und Schwächung von überlagerten Wellen beim Doppelspalt ($d \approx \lambda$).

Zentrale Konzepte der klassischen Mechanik:

Gegeben sind die Kräfte und die Eigenschaften des Systems (Masse, Ladung, etc.pp.) auf die sie wirksam sind.

Gesucht wird die Funktion $r(t)$, sprich “der Ort als Funktion der Zeit” (bzw. die zeitliche Entwicklung anderer das System charakterisierender Eigenschaften).

Bei Kenntnis von Anfangsort und Anfangsgeschwindigkeit ist die Bewegung eindeutig festgelegt (Determinismus).



Alle Größen sind kontinuierlich (Ort, Impuls, Energie etc.) d.h. verändern sich nicht sprunghaft.

Newton und die kausal-deterministische Weltsicht

“Wir müssen (...) den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren und als die Ursache des folgenden betrachten. Eine Intelligenz, die für einen gegebenen Augenblick alle in der Natur wirkenden Kräfte, sowie die gegenseitige Lage der sie zusammensetzenden Elemente kannte, und überdies umfassend genug wäre, um die gegebenen Größen der Analysis zu unterwerfen, werde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie des leichtesten Atoms umschließen; nichts wäre für sie ungewiss und Zukunft wie Vergangenheit würden ihr offen vor Augen liegen.”

Pierre Laplace, “Essai philosophique sur les probabilités” (1814)
(“Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeit”, Leipzig 1932, S. 1f)

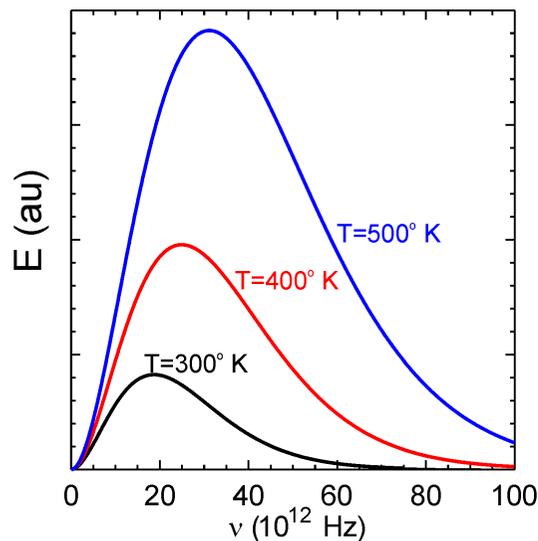
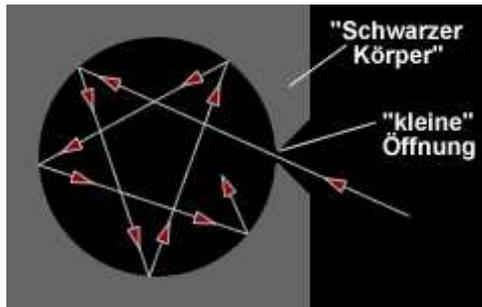
Quantenmechanik



Max Planck (1858-1947)

Historischer Ausgangspunkt

Max Planck erklärt die "Schwarzkörperstrahlung" (1900)



Die gemessene Intensitätsverteilung kann nur erklärt werden, wenn man annimmt, dass die Energie **nicht kontinuierlich** abgestrahlt wird, sondern in **Paketen** ("Quanten"):

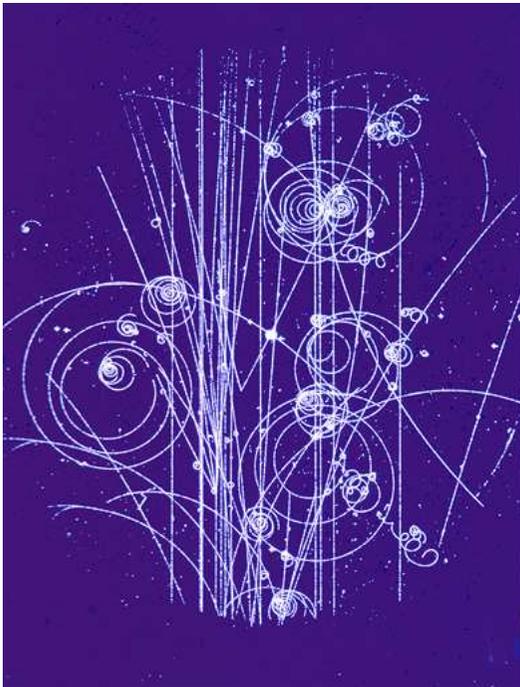
$$E = h \cdot f$$

mit: f = Frequenz der Strahlung

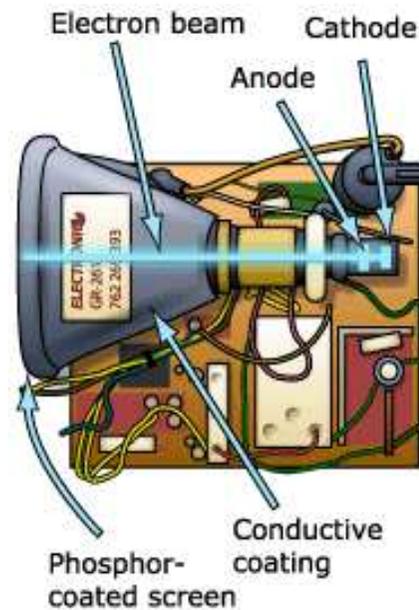
$$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Joule Sek.}$$

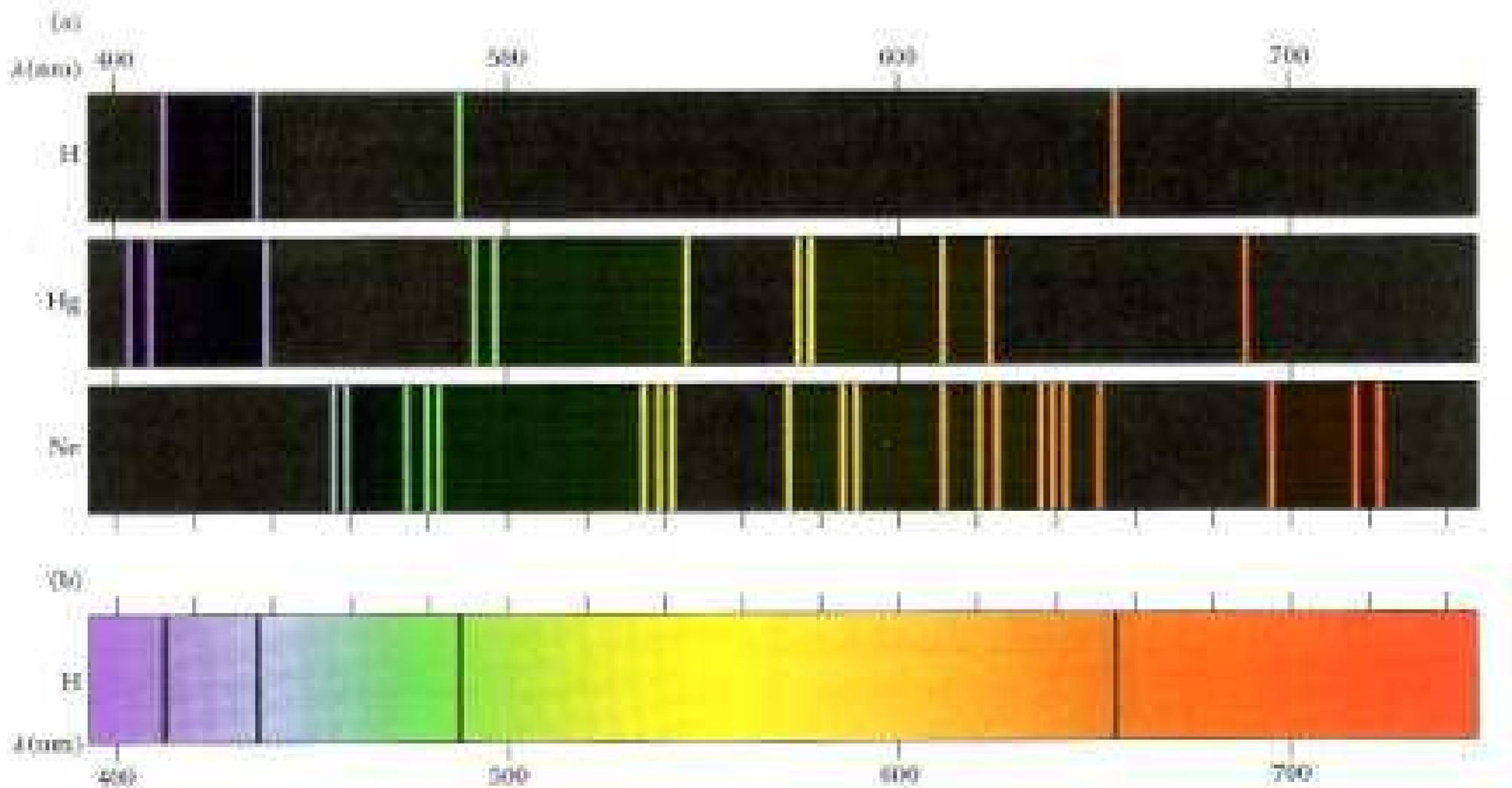
"Plancksche Wirkungsquantum"

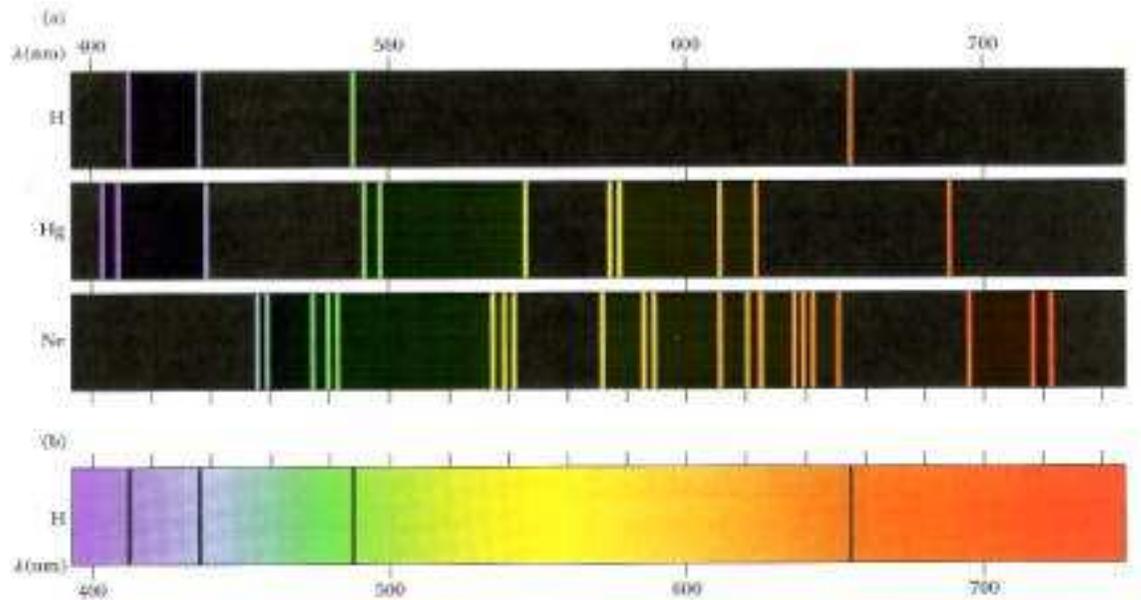
1897 “entdeckt” **J. J. Thompson** das Elektron (d.h. identifiziert sog. “Kathodenstrahlen” als Teilchen). Seine Masse beträgt $\approx 10^{-30}$ kg.



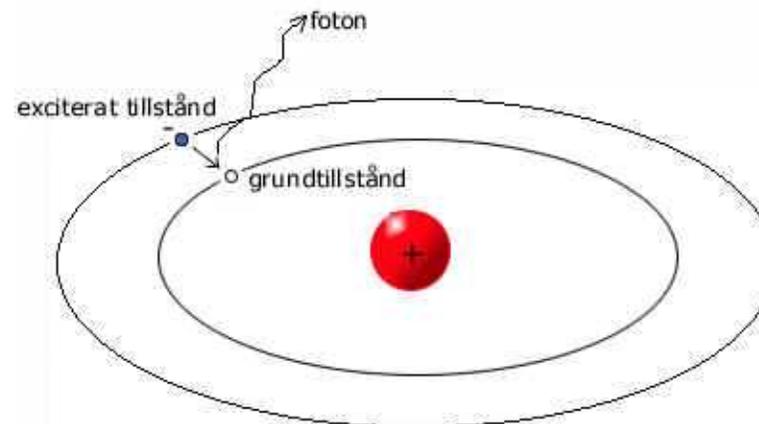
$$\text{Impuls} = \frac{\text{Magnetfeld}}{\text{Radius der Spurkrümmung}}$$







Niels Bohr (1913): Erklärt das diskrete Spektrum des Wasserstoff durch *diskrete* Elektronenbahnen

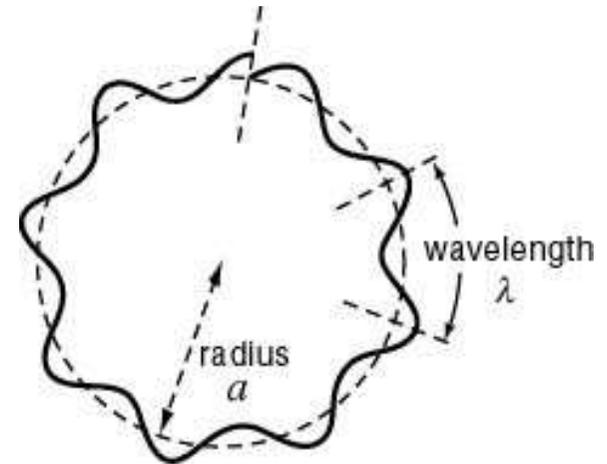




Louis de Broglie (1924): Jedem Teilchen ist auch eine Welle zugeordnet

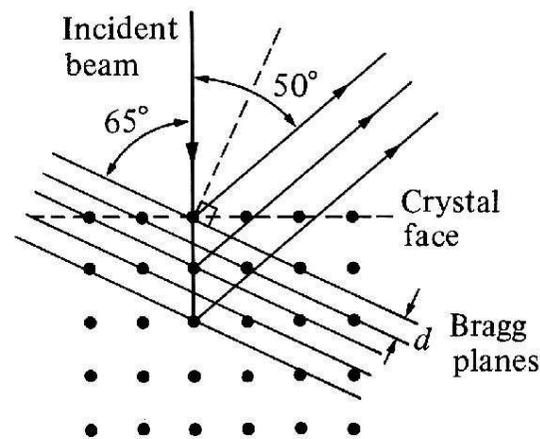
$$p = h \cdot \lambda = \hbar \cdot k \text{ sowie}$$

$$E = h \cdot f = \hbar \cdot \omega$$



Bsp.: de Broglie Wellenlänge eines Baseball
 $m = 0.15 \text{ kg}$, $v = 40 \text{ m/sek} \Rightarrow \lambda = 10^{-34} \text{ m}$

Bei Elektronen (Spannung einige Volt)
 $\lambda \approx 10^{-10} \text{ m}$



Clinton Davisson und Lester Germer (1927) bestätigen die “Wellennatur” des Elektrons durch **Beugung** an einem Kristallgitter:

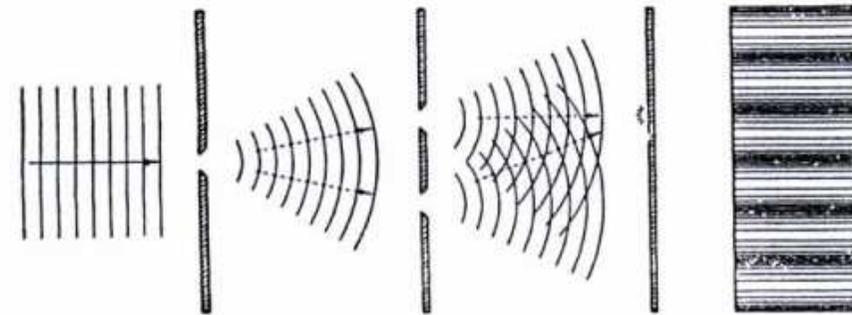
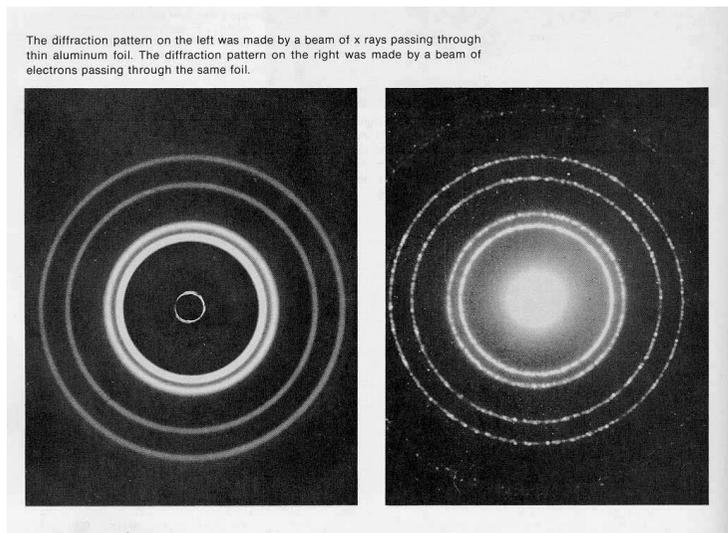


Abb. 5.2. Schematische Darstellung des Doppelspaltexperimentes (nach Niels Bohr)

Eigenschaften des, z.Bsp. Elektrons

Teilcheneigenschaften

Masse = $9 \cdot 10^{-31}$ kg

“Bahn” in der Blasenkammer
(Ort und Geschwindigkeit)

Ablenkung im Magnetfeld

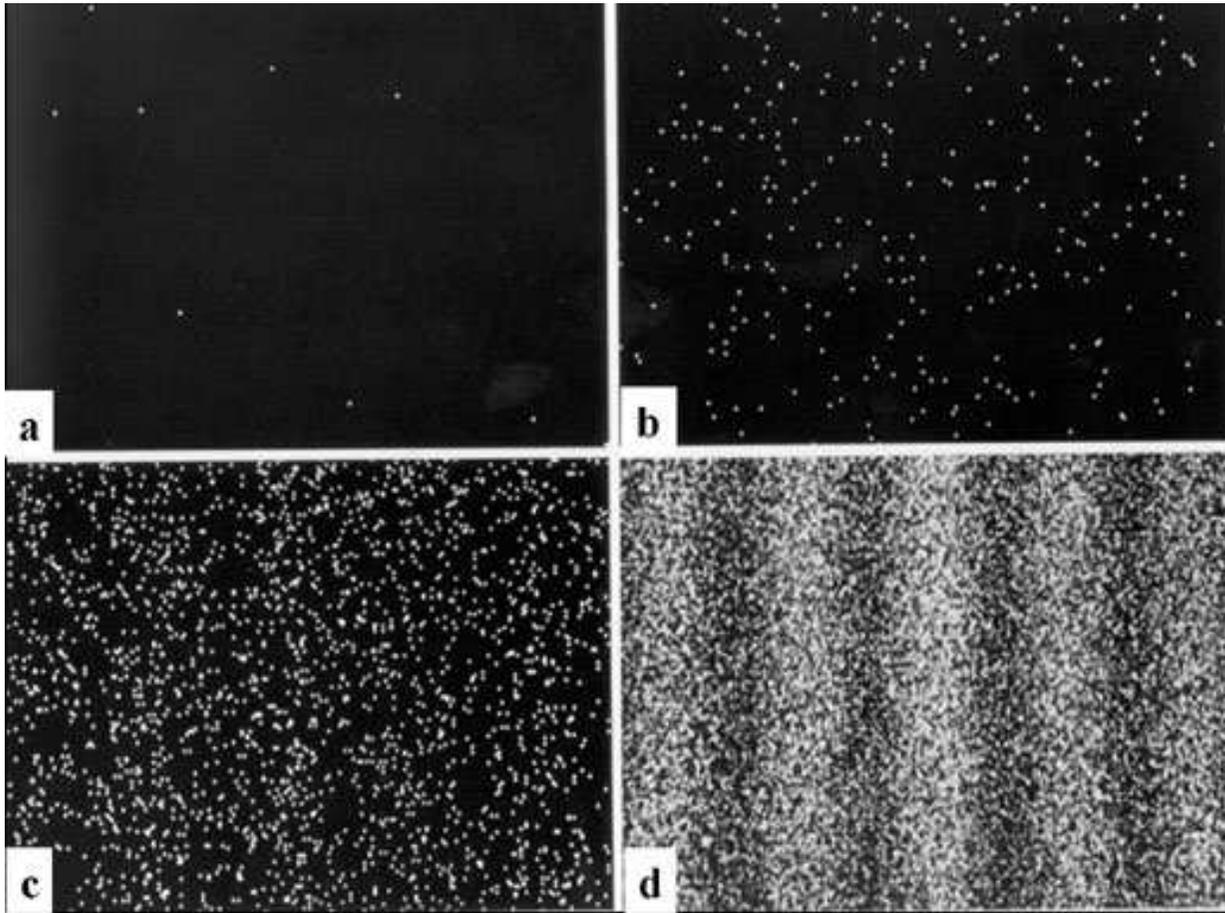
Welleneigenschaften

Wellenlänge $\lambda = h/p$

Frequenz $f = E/h$

Beugung und Interferenz

Die klassischen Konzepte von Welle und Teilchen erlauben keine angemessene Beschreibung



Woher “wissen” die einzelnen Elektronen wo sie hin müssen?

Erwin Schrödinger (1926): Findet eine mathematische Beschreibung der Quantenphänomene mit Hilfe einer sog. *Wellenfunktion* $\psi(x, t)$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V\psi \quad \text{Schrödingergleichung}$$



Das Potential V kodiert die Eigenschaften des “Systems”
Die Lösung der Gleichung ist die Funktion $\psi(x, t)$ (“Zustand” des Systems)

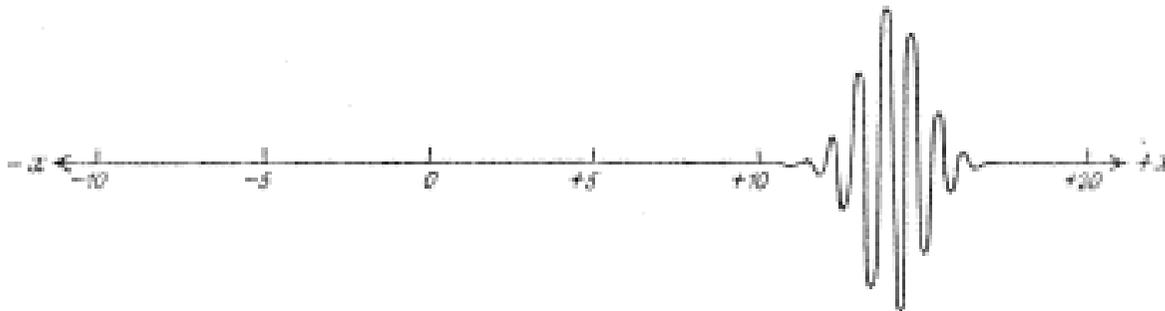
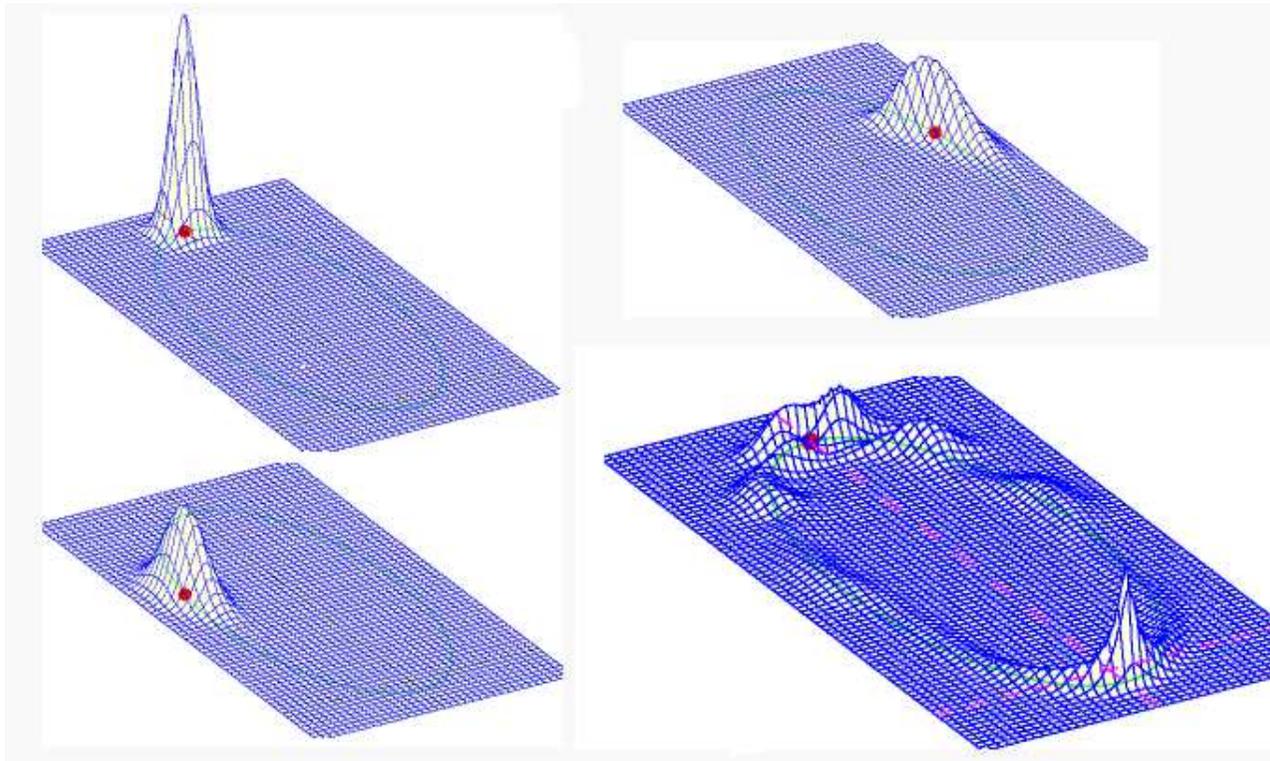


Fig. 1. Pendelnde Wellengruppe als unidulationsmechanisches Bild des Massenpunktes.

Die Wellenfunktion kann nicht unmittelbar realistisch gedeutet werden:



(außerdem: ψ komplexwertig und auf dem “Konfigurationsraum” definiert...)

Interpretation der Wellenfunktion: Bornsche Regel

Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.

[Vorläufige Mitteilung.¹⁾]

Von Max Born, Göttingen.

(Eingegangen am 25. Juni 1926.)

Durch eine Untersuchung der Stoßvorgänge wird die Auffassung entwickelt, daß die Quantenmechanik in der Schrödingerschen Form nicht nur die stationären Zustände, sondern auch die Quantensprünge zu beschreiben gestattet.

¹⁾ Diese Mitteilung war ursprünglich für die „Naturwissenschaften“ bestimmt, konnte aber dort wegen Raummangel nicht aufgenommen werden. Ich hoffe, daß ihre Veröffentlichung an dieser Stelle nicht überflüssig erscheint.

Zeitschrift für Physik. Bd. XXXVII.

57

Will man nun dieses Resultat korpuskular umdeuten, so ist nur eine Interpretation möglich: $\Phi_{n,m}(\alpha, \beta, \gamma)$ bestimmt die Wahrscheinlichkeit¹⁾ dafür, daß das aus der z -Richtung kommende Elektron in die durch α, β, γ

¹⁾ Anmerkung bei der Korrektur: Genauere Überlegung zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit dem Quadrat der Größe $\Phi_{n,m}$ proportional ist.

57*

$|\psi|^2$ ist eine
“Wahrscheinlichkeitsdichte”, d.h.
 $|\psi|^2 \Delta V$ ist die
Wahrscheinlichkeit,
ein Teilchen im
Raumbereich ΔV
zu finden (**Max Born, 1926**).

Anmerkungen zur Bornschen Wahrscheinlichkeitsdeutung

Nach Born kann man also sprechen, dass z.Bsp. ein Elektron ein **Teilchen** ist, deren Nachweiswahrscheinlichkeit sich gemäß einer **Welle** ausbreitet.

Der Bezug auf die “Messung” bzw. “Beobachtung” bringt einen **anthropozentrischen** Zug in die Physik. Und was ist mit der Kosmologie, wo jeder Beobachter Teil des Systems ist?

“Quantenfolklore”: Die QM begründet eine aktive physikalische Rolle für das Bewusstsein, erklärt den freien Willen etc.pp.

(quantenmechanische) Wahrscheinlichkeiten

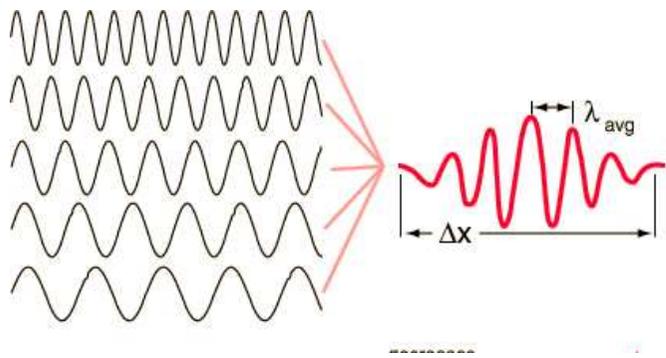
Auch in der klassischen Physik werden **Wahrscheinlichkeitsaussagen** getroffen. Diese reflektieren jedoch in der Regel nur die **Unkenntnis** über die genauen Eigenschaften (“Ignoranzinterpretierbarkeit von Wkt”).

Im Besonderen hat jede festgestellt Eigenschaft auch schon **vorher** vorgelegen.

Innerhalb der Quantenmechanik kann jedoch **nicht** widerspruchsfrei angenommen werden, dass die gemessenen Eigenschaften schon vor der Messung vorliegen (→ Interferenz als Bsp. ...).

Unschärferelation

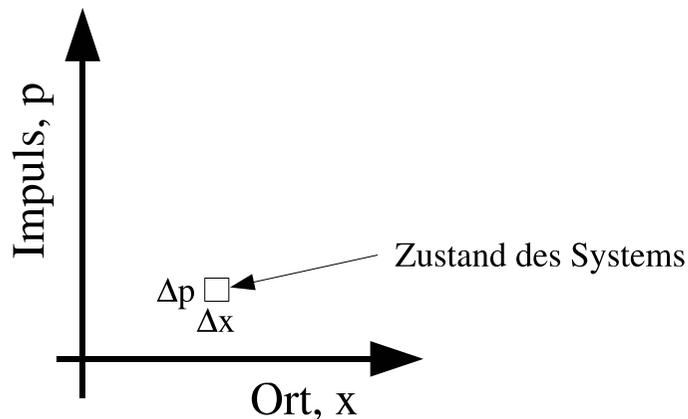
Es gibt keinen Zustand, der **gleichzeitig** einen scharfen Ort **und** einen scharfen Impuls hat.



$$\Delta p = \hbar \Delta k$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Heisenbergsche Unschärferelation



“Quantenfolklore”: QM ist indeterministisch, da (i) nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden, und (ii) ein System nicht mehr durch einen **Punkt** im Phasenraum charakterisiert wird.

Unschärferelation II

Die Unschärfe zwischen Ort und Impuls hat **nichts** mit einer “Störung” beim Akt der Messung zu tun. Es ist eine mathematische Konsequenz der Theorie.

Allerdings kann man sich fragen, ob man diese Relation experimentell hintergehen kann:

Heisenbergs “Gammastrahlmikroskop”:

Ortsauflösung: $\Delta x \geq \lambda$

Impulsauflösung: $\Delta p \geq \frac{h}{\lambda}$

$\Rightarrow \Delta x \Delta p \geq h$

Damit wird die Unschärferelation jedoch **nicht** begründet (sondern nur plausibel gemacht, dass ihre experimentelle Widerlegung nicht möglich ist...)!

Wenn man annimmt, daß die hier versuchte Deutung der Quantenmechanik schon in wesentlichen Punkten richtig ist, so mag es erlaubt sein, in wenigen Worten auf ihre prinzipiellen Konsequenzen einzugehen. Daß die Quantentheorie im Gegensatz zur klassischen eine wesentlich statistische Theorie sei in dem Sinne, daß aus exakt gegebenen Daten nur statistische Schlüsse gezogen werden könnten, haben wir nicht angenommen. Gegen solche Annahmen sprechen ja z. B. auch die bekannten Experimente von Geiger und Bothe. Vielmehr gelten in allen Fällen, in denen in der klassischen Theorie Relationen bestehen zwischen Größen, die wirklich alle exakt meßbar sind, die entsprechenden exakten Relationen auch in der Quantentheorie (Impuls- und Energiesatz). Aber an der scharfen Formulierung des Kausalgesetzes: „Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen“, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungstücken prinzipiell nicht kennenlernen. Deshalb ist alles Wahrnehmen eine Auswahl aus einer Fülle von Möglichkeiten und eine Beschränkung des zukünftig Möglichen. Da nun der statistische Charakter der Quantentheorie so eng an die Ungenauigkeit aller Wahrnehmung geknüpft ist, könnte man zu der Vermutung verleitet werden, daß sich hinter der wahrgenommenen statistischen Welt noch eine „wirkliche“ Welt verberge, in der das Kausalgesetz gilt. Aber solche Spekulationen scheinen uns, das betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben. Vielmehr kann man den wahren Sachverhalt viel besser so charakterisieren: Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik und damit der Gleichung (1) unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.

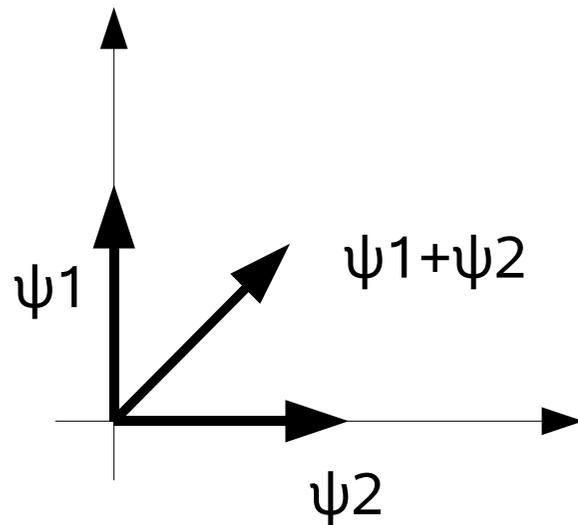
Heisenberg (1927), “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik”, Zeitschrift für Physik 43, S. 172-198.

Das Messproblem der Quantenmechanik

Die Vorhersagen der Schrödingergleichung + Born Regel haben sich experimentell glänzend bestätigt.

Allerdings kann man vom konzeptionellen Standpunkt aus nicht einfach behaupten, dass $|\psi|^2$ die Wahrscheinlichkeit für die Messung des Teilchens ist! Die Messung ist nämlich selbst ein physikalisches Phänomen, das zum Gegenstand einer quantenmechanischen Untersuchung gemacht werden kann (und muss?).

Überlagerungszustände



$\psi = c_1 \cdot \psi_1 + c_2 \cdot \psi_2 \Rightarrow \psi_i$ wird mit der Wahrscheinlichkeit c_i^2 gemessen.

Nach der Messung wird das System durch die **neue** Wellenfunktion ψ_i beschrieben (“Kollaps” bzw. “Reduktion” der Wellenfunktion).

Frage: Was ist die inhaltliche Bedeutung dieser Überlagerungszustände? (“verwaschenes Modell der Wirklichkeit”) (→ Schrödingers Katze)

Φ = Wellenfunktion des Messgerätes (Zustände Φ_0 , Φ_1 und Φ_2)

$$\psi_1 \otimes \Phi_0 \Rightarrow \psi_1 \otimes \Phi_1$$

$$\psi_2 \otimes \Phi_0 \Rightarrow \psi_2 \otimes \Phi_2$$

Φ = Wellenfunktion des Messgerätes (Zustände Φ_0 , Φ_1 und Φ_2)

$$\psi_1 \otimes \Phi_0 \Rightarrow \psi_1 \otimes \Phi_1$$

$$\psi_2 \otimes \Phi_0 \Rightarrow \psi_2 \otimes \Phi_2$$

Daraus folgt bei $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$

$$\psi \otimes \Phi_0 \Rightarrow \psi_1 \otimes \Phi_1 + \psi_2 \otimes \Phi_2$$

Hier liegt nun eine Überlagerung **makroskopisch** verschiedener Zustände vor! \Rightarrow Die QM kann das Eintreten von **definierten** Messergebnissen bei **einzelnen** Messungen nicht vorhersagen!

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

23. Jahrgang

29. November 1935

Heft 48

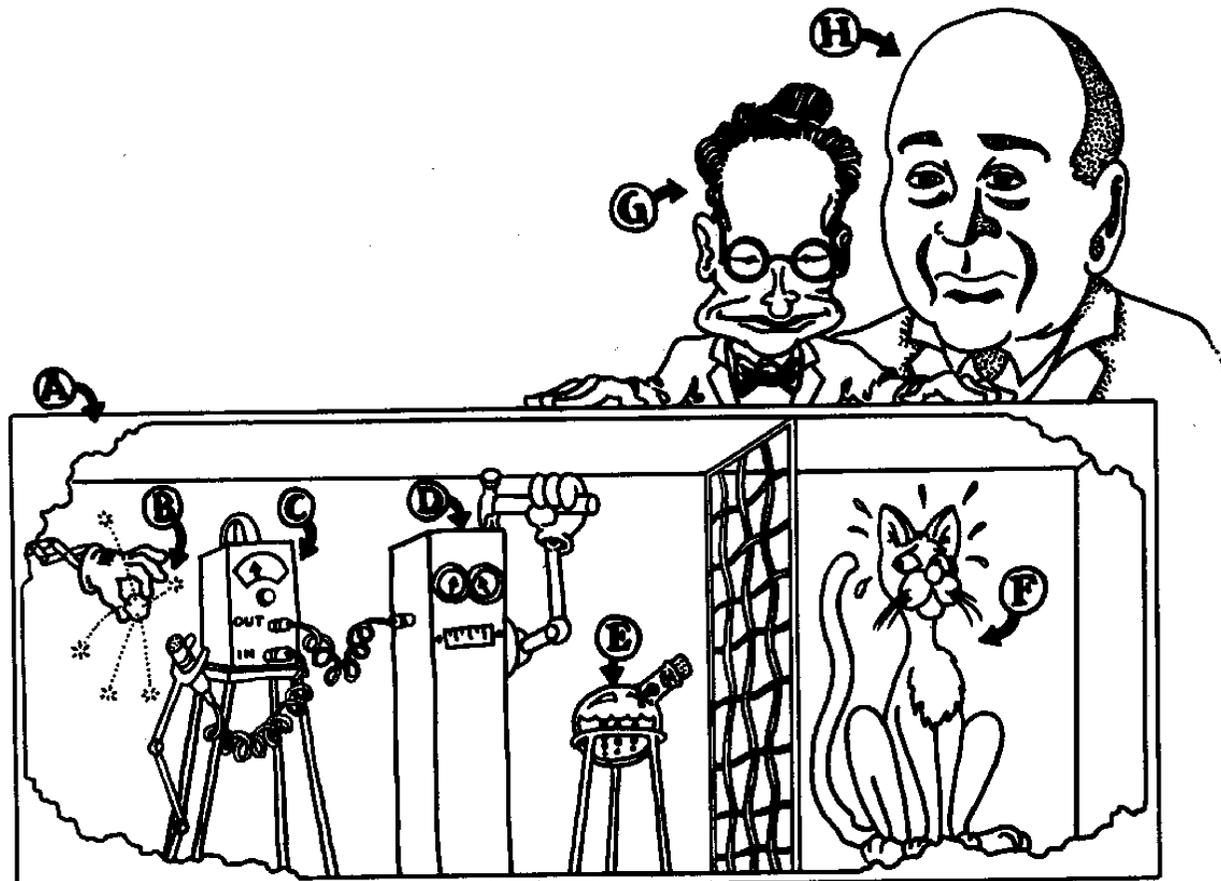
Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik.

Von E. SCHRÖDINGER, Oxford.

Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine (die man gegen den direkten Zugriff der Katze sichern muß): in einem GEIGERSCHEN Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, daß im Lauf einer Stunde *vielleicht* eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, daß die Katze noch lebt, *wenn* inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiftet haben. Die ψ -Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, daß in ihr die lebende und die tote Katze (s. v. v.) zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind.

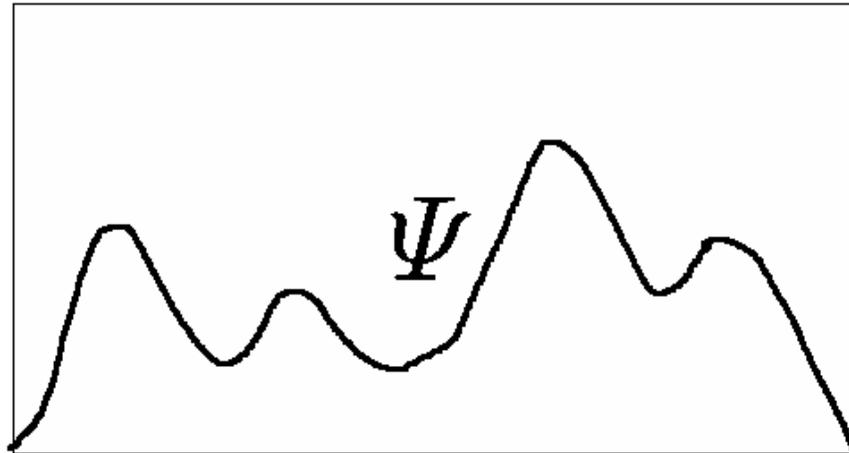
Das Typische an diesen Fällen ist, daß eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung *entscheiden* läßt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein „verwaschenes Modell“ als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen. An sich enthielte es nichts Unklares oder Widerspruchsvolles. Es ist ein Unterschied zwischen einer verwackelten oder unscharf eingestellten Photographie und einer Aufnahme von Wolken und Nebelschwaden.

(Fortsetzung folgt.)

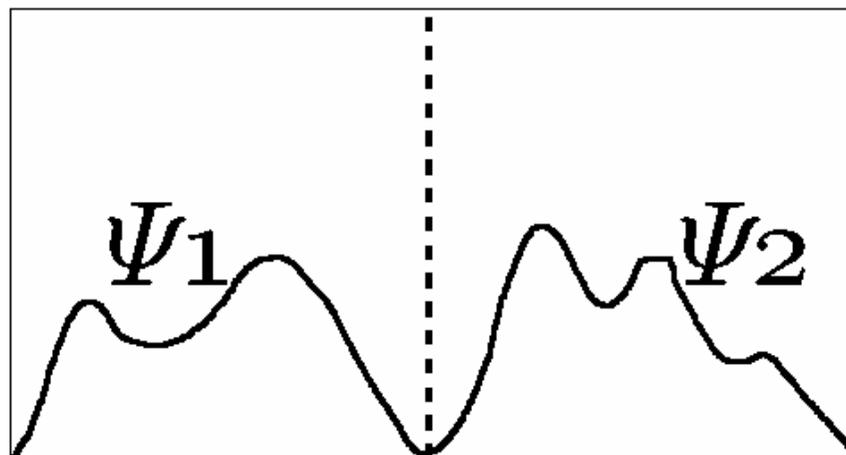


(William R. Warren, Jr., © 1985, reproduced with permission.)

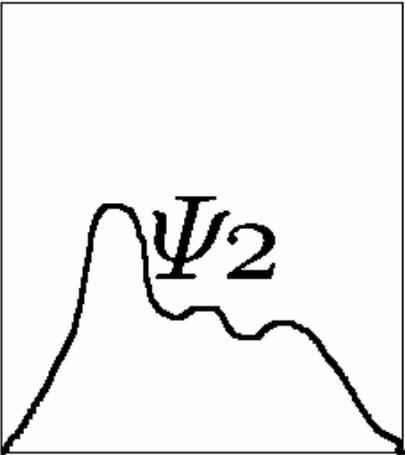
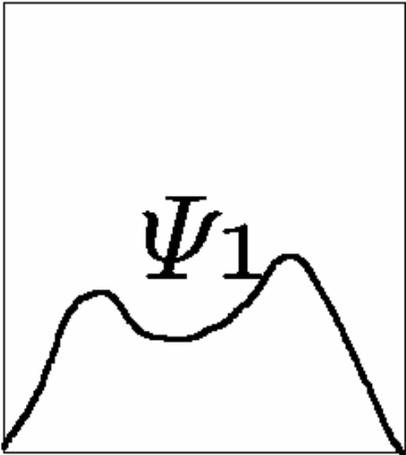
Nichtlokalität: 1 Teilchen, beschrieben durch ψ , in Kiste eingesperrt.



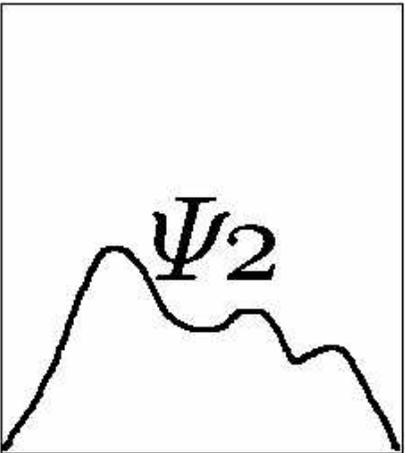
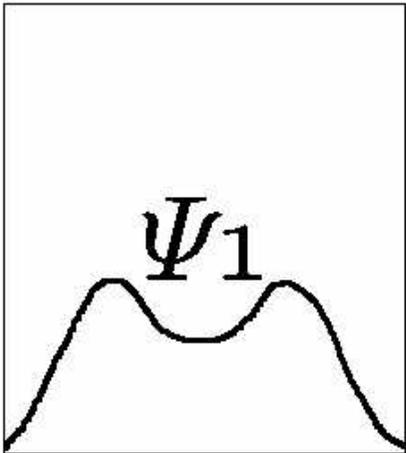
Nichtlokalität: Eine Teilung wird vorgenommen ($\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$)...



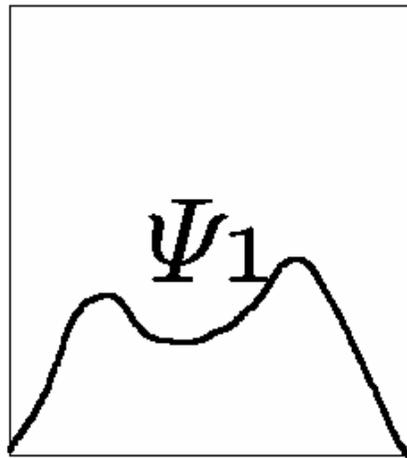
Nichtlokalität: ...und die beiden Behälter entfernt.



Nichtlokalität: Diese Trennung kann beliebig groß sein!



Nichtlokalität

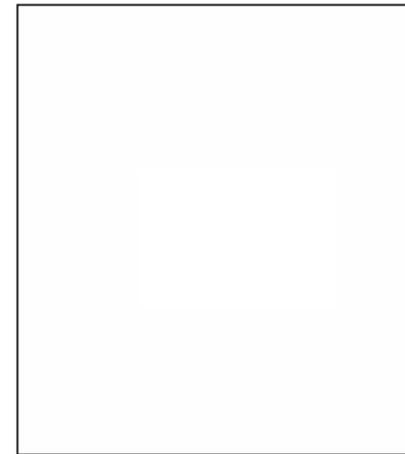


Bei einer Messung gibt es eine Wahrscheinlichkeit p , das Teilchen in der ersten Kiste zu finden, bzw. eine Wahrscheinlichkeit $1 - p$, es in der 2. Kiste nachzuweisen.

Nichtlokalität

$$\Psi = \Psi_1$$

•



Findet eine Messung an der ersten Kiste statt und findet man z.Bsp. das Teilchen, scheint dies auch unmittelbaren Einfluss auf die Wellenfunktion ψ_2 zu haben!

Ein Argument von diesem Typ ist von Einstein verwendet worden, um zu argumentieren, dass eine der beiden folgenden Aussagen falsch sein muss:

1. Die quantenmechanische Wellenfunktion liefert eine *vollständige* Beschreibung
2. Die Zustände *räumlich getrennter* Systeme sind *unabhängig* von einander.

Für Einstein selber war die *Lokalitätsforderung* (2) geradezu ein *Voraussetzung* für jede Physik... Er sah die Quantenmechanik also als unvollständig an!

A. Einstein, B. Podolski und N. Rosen, *Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?*, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).

die Bell Pointe

Theorem von Bell: Keine lokale “Vervollständigung” der Quantenmechanik kann alle Vorhersagen der QM reproduzieren.

(Einige dieser QM Vorhersagen wurden in der Tat erfolgreich experimentell überprüft)

⇒ Entweder ist die QM vollständig und nicht-lokal oder die QM ist unvollständig, ihre Vervollständigung jedoch nichtlokal!

Mit anderen Worten: Jede Theorie, die die Vorhersagen der QM reproduzieren kann (die QM damit eingeschlossen), beinhaltet ein Moment der “spukhaften Fernwirkung”.

Zusammenfassung

- Es gibt solide experimentelle Evidenz für Teilchen **und** Wellencharakter von Materie
- Born 1926: Die **Wahrscheinlichkeit** ein Teilchen zu messen, breitet sich wie eine Welle aus.
- offene Fragen:
 - Wird die betreffende Eigenschaft erst durch die Messung erzeugt?
 - Welle von was?
 - Findet eine Fernwirkung statt?
 - würfelt Gott?