

**KAPITEL 3: AUFGABEN ZUM DENKEN UND DISKUTIEREN, ZUM REPETIEREN UND RECHNEN****3.1) Kontrollfragen zum Kapitel 3**

Seite 1: Was sind die Stärken des «Naturphilosophen» Albert Einstein?

Seite 2: Wozu dient ein Heisenberg-Mikroskop?

Seite 3: Könnte man Ort und Geschwindigkeit eines Elektrons mit einem schnellen RTM bestimmen?

Seite 4: Inwiefern hat das Elektron keine bestimmte Grösse und Form?

Seite 6: Was haben die hohen Töne eines Alphorns mit den Zuständen eines Atoms zu tun?

Seite 7: Wie macht sich der Spin bemerkbar?

Seite 8: Welche drei Effekte führen zur stabilen Elektronenpaar-Bindung im Wasserstoff-Molekül?

Seite 10: Wo treffen Sie den klassischen Zufall im Alltag an?

Seite 11: Wie äussert sich der quantenphysikalische Zufall, wenn nicht im Zerfallsgesetz?

Seite 12: Was ist «Schrödingers Katze»?

Seite 13: Was bedeutet «Dekohärenz» auf Deutsch und was ist damit gemeint?

Seite 14: Unter welchen Umständen kommt in der Physik «eine spukhafte Fernwirkung» ins Spiel?

Seite 15: Was sollte die «verborgene Variable» leisten? Weshalb «sollte»?

Seite 16: Was ist «Verschränkung»? Erläutern Sie den Begriff an einem Beispiel.

Seite 17: Wodurch unterscheiden sich Quantenobjekte von klassischen Objekten?

Seite 18: Wie zeigt es sich, dass eine Portion Materie ein Bose-Einstein-Kondensat bildet?

Seite 19: Was verstehen heutige Experimentalphysiker unter einem «Schrödinger-Kätzchen»?

**3.2) Sind «Elementarteilchen» wirklich Teilchen?**

a) Im CERN beschleunigen die Teilchen(!)physiker und -physikerinnen Blei-Atomkerne usw. auf eine Energie von 10 TeV und mehr. Rechnen Sie diese Energie in J um.

b) Die Relativitätstheorie sagt, dass der Impuls dieser Quantenobjekte  $10 \text{ TeV}/c$  beträgt, wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist. Drücken Sie diesen Impuls in den üblichen Einheiten aus.

c) Berechnen Sie die zugehörige de Broglie-Wellenlänge und kommentieren Sie diese.

**3.3) Abstrakt wie Heisenberg oder konkret wie Schrödinger oder wie im Karlsruher Physikkurs?**

a) Werner Heisenberg schrieb am 1. Juli 1925 an Wolfgang Pauli über eine neue Mechanik: *Im Gegenteil ist meine Meinung über Mechanik (...) von Tag zu Tag radikaler (...) Es ist wirklich meine Überzeugung, dass eine Interpretation (...) von Kreisen und Ellipsenbahnen [in Atomen] nicht den geringsten physikalischen Sinn hat und meine ganzen kümmerlichen Bestrebungen gehen dahin, den Begriff der Bahnen, die man doch nicht beobachten kann, restlos umzubringen und geeignet zu ersetzen.* – Was geschieht hier im Kopf von Heisenberg?

b) Kommentieren Sie stichwortartig, was Heisenberg 1926 seinem Freund Pauli geschrieben hat: *Je mehr ich über den physikalischen Teil der Schrödingerschen Arbeit nachdenke, desto abscheulicher finde ich ihn. Was Schrödinger über die Anschaulichkeit seiner Theorie schreibt ... ich finde es Mist.*

c) Kommentieren Sie das anschauliche Ding namens «Elektronium», das Ende des 20. Jahrhunderts im Karlsruher Kurs für Gymnasialphysik KPK folgendermassen definiert wird: *Das Quadrat der Psi-Funktion ist ein Mass für die Massendichte und die Ladungsdichte des Elektroniums.*

[www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/atome\\_kerne\\_teilchen\\_sekii.pdf](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/download/atome_kerne_teilchen_sekii.pdf)

d) Wie gross ist die Ortsunschärfe der Quantenobjekte in 3.2, wenn ihre Impulsunschärfe 10% ihres Impulses beträgt?

**3.4) Mit der Unbestimmtheitsrelation rechnerisch klären:**

a) Vor der Entdeckung des Neutrons musste man die Kernladung mit «Kern-Elektronen» kompensieren. Beispielsweise dachte man sich den Helium-Kern aufgebaut aus  $4 p^+$  und  $2 e^-$ .

a) Weshalb störte die zusätzliche Masse der Elektronen nicht? Wann wurde das Neutron entdeckt?

b) Weshalb kann jedoch ein Elektron nicht im Atomkern eingeschlossen sein?

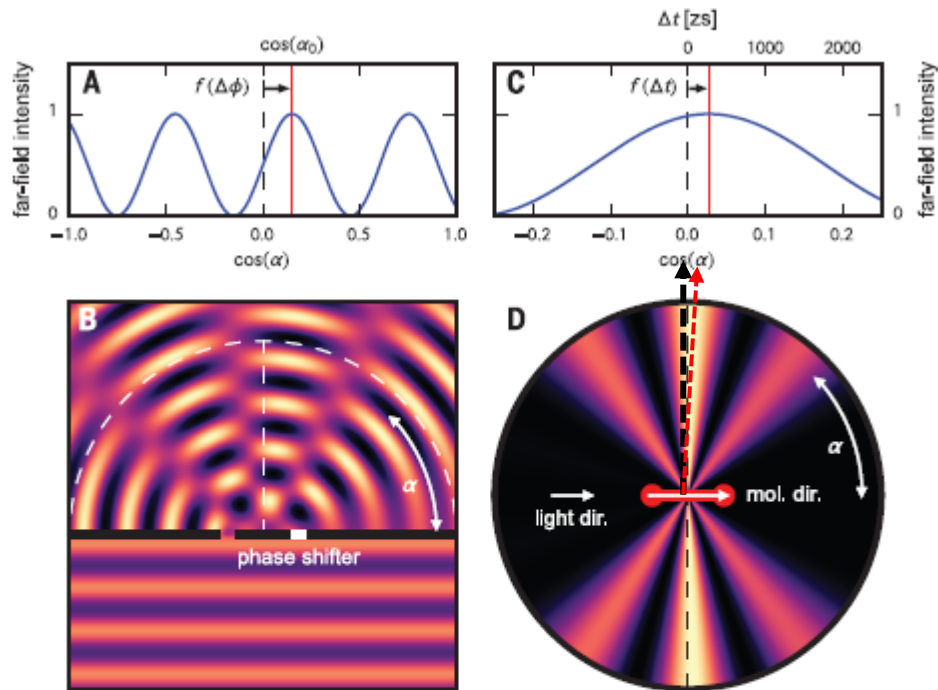
**3.5) Mit der Unbestimmtheitsrelation rechnerisch klären:**

Wenn man beim Zeilinger-Experiment nach dem Doppelspalt den Ort des  $n$  auf  $60 \mu\text{m}$  genau bestimmte, könnte man doch herausfinden, durch welchen Spalt es geflogen ist! – Wieso nicht?

### 3.6) Das Zepto-Sekunden-Experiment (vgl. 3.1.3)

Sind die beiden Protonen im H<sub>2</sub>-Molekül wirklich  $1.4 \cdot a = 74 \text{ pm}$  voneinander entfernt, fragen sich Grundmann et al. im «Birth time delay experiment in der Fachzeitschrift *Science* 370, 2020. Das kann man mit der Laufzeitmethode überprüfen. Allerdings muss man dann 250 Zeptosekunden messen können. Hier hilft die Quantenphysik:

Man schießt ein Lichtquant mit der Energie 800 eV auf das H<sub>2</sub>. Durch doppelten Photoeffekt ( $\rightarrow 1.3$ ) löst es beide Elektronen aus dem Molekül. Das erste Elektron meldet START, das zweite STOPP, denn das Lichtquant muss, nachdem es «am Ort» des ersten Elektrons eine Wirkung erzeugt hat, zuerst «zum Ort» des zweiten Elektrons fliegen, bevor es dort auch eine Wirkung erzeugen kann. Das  $\psi_{\text{Molekül}}$  der Elektronen hat an den Orten der 2 Protonen je ein Maximum.



**Fig. 1. Concept of birth time delay measurement.** (A) Intensity distribution on a screen in the far field behind the double slit in (B). (B) A plane wave impinges on a double slit. The phase shift  $[\Delta\phi]$  in the right slit causes a tilt of the interference pattern. (C and D) Emission of a photoelectron wave from two indistinguishable atoms of a homonuclear diatomic molecule mimics the double-slit setup in (B). Here, the angle  $\alpha$  is enclosed by the electron momentum vector and the molecular axis. A time delay ( $\Delta t$ ) between the emission from one of the two centers—e.g., originating from the travel time of the photon impinging from the left side in (D)—leads to a shift of the interference fringes in (C). The ratio of slit distance (molecular bond length  $R$ , respectively) to wavelength is 1.65 in both cases [(B) and (D)]. In (B) the right-hand part of the wave is delayed by  $\Delta\phi = \pi/2$ , whereas in (D) a birth time delay of 247 zs causes  $\Delta\phi \approx \pi/11$  for  $R = 0.74 \text{ \AA}$ . light dir., light direction; mol. dir., molecular direction.

Die vom **Computer generierte** Darstellung D erläutert das Messprinzip. Dargestellt ist die günstige Situation, wo das von links einfallende Lichtquant (light dir.) genau in Längsrichtung auf das H<sub>2</sub>-Molekül trifft (mol. dir.). Aus der Summe von  $\psi_{\text{Elektron1}}$  und  $\psi_{\text{Elektron2}}$ , den **Zuständen der weggeschleuderten Elektronen**, entsteht ein Interferenzbild wie beim Doppelspalt B. Weil aber das zweite Elektron um  $\Delta t = 250 \text{ zs}$  später wegfliegt, entsteht die in 3.1.3 erwähnte Phasenverschiebung. Durch sie wird das Interferenzbild unsymmetrisch: Das Maximum zeigt in die rote, statt schwarze Pfeilrichtung.

- Wie lautet die Bornsche Regel zur Sprechweise: «Das Elektron WIRKT überall und nirgends.»?
- Überprüfen Sie den Abstand der Protonen im Molekül.
- Welche Kenntnisse aus den Modulen 1 und 2 benötigen Sie zur Erklärung des Experiments?
- Informieren Sie sich über den Compton-Effekt. In welcher Beziehung steht er zu diesem Experiment?
- Studieren Sie die Legende zu Figur 1 und klären Sie eventuell auftauchende Fragen.

### 3.7) Der kontinuierliche Übergang vom Welligen zum Körnigen

Entwerfen Sie für Quantenobjekte *mit* Ruhemasse ein Schema analog zum Schema für Quantenobjekte *ohne* Ruhemasse in Figur 1.8.

Ein Referenzwert könnte die Atomstrahl-Oberflächenanalyse (vgl. Aufgabe 2.11) sein; ein anderer die Kollision von Protonen mit maximaler Energie im CERN; Röntgen-Elektronen liegen dazwischen.

### 3.8) Albert Einstein setzt den «Zufall» in «»-Zeichen.

Albert Einstein ist *nicht* im Dunklen hinter dem Spinhthariskop gesessen und hat den Zufall beim Beobachten des Alpha-Zerfalls *beobachtet!* Sondern er hat 1917 *die Unregelmässigkeit der Elementarprozesse* durchgerechnet und gefunden: *Die Schwäche der Theorie* [derjenigen von Einstein selbst über das Licht → Kapitel 1] *liegt darin (...) dass sie Zeit und Richtung der Elementarprozesse dem «Zufall» überlässt.* – Warum «»?

### 3.9) Schwankung beim radioaktiven Zerfall

Untersuchen Sie analog zu 3.4 den Zerfall und die Schwankungen von 8 Atomen.

- Wie viele Wahlmöglichkeiten gibt es nach einer Halbwertszeit?
- Wie viele verschiedenen Ereignisse gibt es? Was sind die absoluten Häufigkeiten dieser Ereignisse?
- Welche Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt sich?
- Mit welcher Wahrscheinlichkeit gibt es ein Resultat mit  $4 \pm 1$  respektive mit  $4 \pm 2$ ?
- In einer Tabelle finden Sie von verschiedenen Alpha-Zerfällen Halbwertszeit und Energie. Erklären Sie den Zusammenhang zwischen  $T$  und  $E$  mit der Annahme, der Zerfall sei ein Tunneleffekt.
- Üblicherweise hat man beim radioaktiven Zerfall eine grosse Anzahl von Atomen mit einer kleinen Zerfallswahrscheinlichkeit. Nähern Sie sich dieser Situation mit 4, respektive 8 Atomen mit einer Zerfallswahrscheinlichkeit von  $\frac{1}{4}$  pro  $T$ . Bestimmen und kommentieren Sie die Verteilungen nach  $T$ .
- Betrachten Sie 4 Atome nach  $2T$ ,  $3T$  und – wenn Sie Zeit und Lust haben - nach  $4T$ .

### 3.10) Werfen Sie einen Blick in die Viele-Welten-Theorie von Everett!

[https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds\\_interpretation](https://en.wikipedia.org/wiki/Many-worlds_interpretation)

Achtung: Verlieren Sie sich in diesem unendlich-dimensionalen Universum!

Lesen Sie die Einleitung und die «1. History».

Lesen Sie den Kommentar zur Katzen-Geschichte.

Machen Sie sich eigene Gedanken zum Bild.

Werfen Sie, wenn Sie Lust haben, einen Blick in den langen Artikel in der deutschen WIKIPEDIA.



### 3.11) Ein Blick in die Nobel-Lecture von David Ketterle über Bose-Einstein-Kondensation

<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/ketterle-lecture.pdf>

Auf den Seiten 131-136 finden Sie die Kurzgeschichte der Entdeckung der BEK in Natrium mit dem Originaleintrag im Laborjournal. Auf der Seite 141 finden Sie genauere Angaben zur Interferenz von Materiewellen. Viele Fotos vermitteln einen Eindruck davon, dass Physik eine kollektive Aktivität ist.

### 3.12) Zwei Konzepte für das Licht

In der Zeitschrift *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* (PhyDid 1/2 (2003)S. 67) liefern A. Weis und R. Wynands im Artikel *Three demonstration experiments on the wave and particle nature of light* in der Einleitung folgende Beschreibung des Lichts: *From an experimentalist's point of view light propagates as a wave and deposits its energy in discrete quanta only, for instance during detection.*

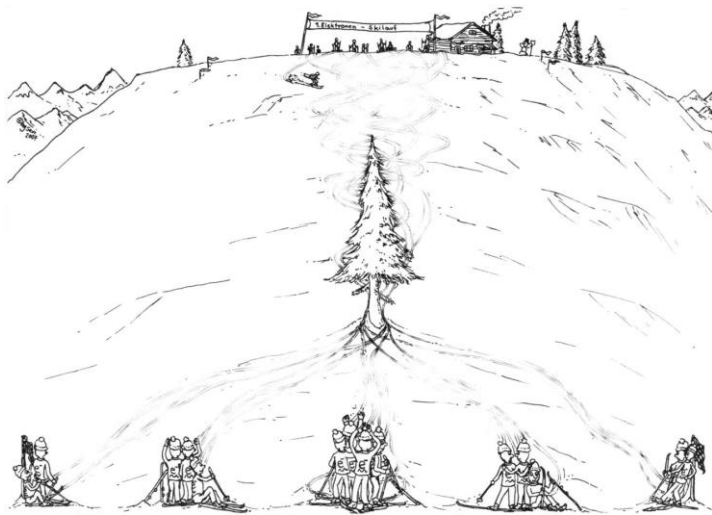
- In welchem Verhältnis stehen die beiden Aspekte des Lichts nach der Ansicht der Autoren?
- Wieso kann ein theoretischer Physiker mit dem *experimentalist's point of view* nicht zufrieden sein?
- Kommentieren Sie folgende Klage des Physikdidaktikers Michael Lichtfeldt von 1992: *Die Schüler kommen mit einer hohen Bereitschaft in den Physikunterricht, Modelle so zu benutzen, wie es gerade in ihre jeweilige Vorstellungswelt passt.*

**3.13) Fehler vermeiden: Interpretation des Franck-Hertz-Versuchs nicht mit Teilchenstösse**

- a) Informieren Sie sich über den Franck-Hertz-Versuch im Internet <https://de.wikipedia.org/wiki/Franck-Hertz-Versuch>
- b) Was sollte der Versuch seinerzeit zeigen?
- c) Wie erklärt man die Auffängerstrom-Kurve mit Teilchenstössen?
- d) Wie erklärt man die Kurve unter Vermeidung des Teilchenbilds mit Zuständen?

**3.14) Fehler vermeiden: Interpretation des Comics mit Quanten-Skifahrerinnen**

a) Kommentieren Sie das als Veranschaulichung für Quantenobjekte gedachte Bild eines Skirennens. Es stammt aus einer qualitativen Einführung in die Quantenphysik für das 10. Schuljahr (milq10).



- b) Der Doppelspalt, der durch die Tanne erzeugt wird, habe einen Spaltabstand von 0.5 m, die Entfernung zum Ziel sei 50 m und der Abstand vom Mittenziel zu den ersten Nebenzielen sei 5 m. – Wie gross ist die de Broglie-Wellenlänge der Skifahrerinnen und Skifahrer?
- c) Nehmen Sie an, die Skifahrerinnen und Skifahrer seien 66 kg schwer und konstant mit 20 m/s unterwegs. – Wie gross ist Plancks Konstante  $h^*$  in dieser Veranschaulichung?
- d) Wie gross ist die Energie von Lichtquanten im Sichtbaren mit  $h^*$ ?
- e) Wir nehmen an, das Starthäuschen

sorge für eine Positionsgenauigkeit quer zur Startrichtung von  $\pm 1$  m. – Wie gross ist die Unsicherheit der Geschwindigkeit quer zur Startrichtung mindestens und welche Streuung des Skifahrer-Strahls ist bei der Tanne zu erwarten, wenn sie 50 m vom Start entfernt ist.

**3.15) Fehler vermeiden: Versuch, ein freies Quantenobjekt als Staublawine darzustellen**

a) Wie wäre eine Veranschaulichung mit einer 3300 kg schweren Staublawine, die sich in Bregenz in 80 m Höhe löst, ohne von Luft- und andere Störungen behindert zu werden über den gefrorenen See strömt, sich in der Mitte von Romanshorn und Friedrichshafen quantenphysikalisch um die 50 m lange Fähre bewegt und bei Konstanz quantenphysikalisch lokalisiert wird? Nehmen Sie die Distanzen zu je 20 km an. Vergrössern Sie Plancks Konstante in dieser Veranschaulichung auf 66 kJs.

- b) Vergleichen Sie die Entfernung des ersten Nebenmaximums mit der Distanz vom Hafen zum SEA LIFE.
- c) Welches Nebenmaximum wäre in Kreuzlingen?
- d) Wie könnte ein Mechanismus aussehen, der in der Lage wäre, die Lawine in Konstanz zu lokalisieren?
- e) Finden Sie einen Wellenaspekt für dieses Schnee-Quantenobjekt, oder ist es doch ein reines Teilchen?
- f) Schreiben Sie einen Essay mit dem Thema «Von den Schwierigkeiten beim Versuch, freie Quantenobjekte anschaulich darzustellen.»



Die ursprüngliche Herleitung von Bells Ungleichung ist alles andere als einfach. Der theoretische Physiker David Mermin hat eine einfachere gefunden und 1981 im *Journal of Philosophy*, July, S. 397-408, veröffentlicht. Eine Figur aus seinen ***Quantum Mysteries for Anyone*** ist nebenan abgedruckt. Die Stellung der Detektoren A und B ist zufällig. Wenn ihre Einstellung zur Farbe des Partikels passt, melden sie es.

1985 schilderte Mermin humorvoll, wie sich die Physics community angesichts der neuen Erkenntnisse zur Kopenhagener Orthodoxie stellt: *To this moderate point of view I would only add the observation that contemporary physicists come in two varieties.*

*Type 1 physicists are bothered by EPR and Bell's theorem.*

*Type 2 (the majority) are not, but one has to distinguish two subvarieties.*

*Type 2a physicists explain why they are not bothered. Their explanations tend either to miss the point entirely (like Born's to Einstein) or to contain physical assertions that can be shown to be false.*

*Type 2b are not bothered and refuse to explain why. Their position is unassailable.*

*(There is a variant of type 2b who say that Bohr straightened out the whole business, but refuse to explain how.)*

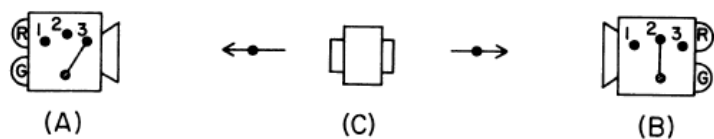


Fig. 2. The complete device. A and B are the two detectors. C is the box from which the two particles emerge.

**KAPITEL 3: KURZ-LÖSUNGEN DER AUFGABEN**

3.1 -

3.2a  $E = 10 \text{ TeV} = 10 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 1.63 \cdot 10^{-18} \cdot 10^{13} \text{ J} = 1.63 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

3.2b  $p = 1.63 \cdot 10^{-5} \text{ J} / 3.00 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} = 5.4 \cdot 10^{-13} \text{ mkg/s}$ .

3.2c  $\lambda_{dB} = h/p = 1.2 \cdot 10^{-20} \text{ m}$ , also viel kleiner als irgendwelche Strukturen.

=&gt; Der Wellenaspekt macht sich in normalen Strukturen nicht bemerkbar.

=&gt; Es darf von Teilchen gesprochen werden.

3.3a Heisenberg löste sich gerade von den anschaulichen Bahnvorstellungen von Bohr und seines Doktorvaters Sommerfeld.

3.3b Heisenberg wollte eine ganz neue, abstrakte Mechanik für das Atominnere. Schrödinger wollte auch die neue Mechanik für das Atominnere möglichst anschaulich.

3.3c Es ist problematisch, Masse und Ladung des Elektrons derart zu «pulverisieren» oder zu «verschmieren», nur damit die Ladungsverteilung gleich aussieht wie im Orbital, das man mit der Quantenmechanik erhält. Ein zusätzlicher Begriff, den niemand sonst verwendet, irritiert. Er ist unnütz, wenn er nicht einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn ermöglicht. Er macht Probleme, denn wie sollte man sich einen «verschmierter Spin» ausdenken?

3.3d  $\Delta p = 5.4 \cdot 10^{-14} \text{ mkg/s} \Rightarrow \Delta x > h/4\pi \Delta p = (6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) / (4\pi \cdot 5.4 \cdot 10^{-14} \text{ mkg/s}) \approx 10^{-20} \text{ m}$

3.4a Das Elektron ist rund 2000mal leichter als das Proton; Massenmessung nicht genau genug. Mit der Entdeckung des Neutrons durch Chadwick wurde 1933 das Rätsel gelöst.

3.4b  $\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x \cdot m \Delta v > h/4\pi \Rightarrow \Delta v > h/4\pi \Delta x \cdot m = (6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) / (4\pi \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \approx 10^{-10} \text{ m/s}$   
Diese nicht-relativistische Abschätzung zeigt, dass das Elektron im Kern mit 100-facher Lichtgeschwindigkeit unterwegs wäre. Das kann nicht sein.

3.5 Wir nehmen an, die Neutronen hätten zuerst quer zur Flugrichtung den Impuls = 0. Wenn ihre Position quer zur Flugrichtung auf 30  $\mu\text{m}$  genau bestimmt wird, kommt die UBR ins Spiel:  
 $\Delta x \cdot \Delta p = \Delta x \cdot m \Delta v > h/4\pi$ ;  $\Delta v > h/4\pi \Delta x \cdot m = (6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) / (4\pi \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .  
Für den Weg zu den Zählern benötigt das n:  $\Delta t = \Delta s / \Delta v = 5 \text{ m} / 220 \text{ m/s} = 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ s}$ .  
Damit verschiebt es sich quer zur Flugrichtung:  $\Delta y = \Delta v \cdot \Delta t = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \cdot 2.3 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 36 \mu\text{m}$   
Die UBR «sorgt dafür», dass das n nun ins 1. Interferenzminimum neben dem Hauptmaximum fliegt und damit das Interferenzbild verschwindet: Kein Wellenaspekt mehr, weil das n durch den zusätzlichen Spalt quer zur Flugrichtung auf seinen Teilchenaspekt reduziert wurde.3.6a Die Wahrscheinlichkeitsdichte  $w$ , dass ein Quantenobjekt bei  $x$  **wirkt** =  $w(x) = \psi^2(x)$ 

3.6b  $\Delta s = c \cdot \Delta t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 250 \cdot 10^{-21} \text{ s} = 75 \cdot 10^{12} \text{ m}$

3.6c Verwandlung eines Lichtquants, Interferenz von Materiewellen

3.6d Doppelter Compton-Effekt; Energie- und Impulserhaltung

3.6e -

3.7 Achtung: Beim Licht hat die Masse einen festen Wert (Ruhemasse des Photons = 0).

Die Masse von Quantenobjekten kann aber sehr unterschiedlich sein:

$$\text{Elektron} : \text{Proton} : \text{Uranatom} : \text{Riesenmolekül} = 1 : 2 \cdot 10^3 : 5 \cdot 10^5 : 10^8$$

=&gt; Die Energie entscheidet nicht allein über «wellig» oder «körnig».

Bei der Atomstrahl-Oberflächenanalyse werden typischerweise Helium-Atome mit einer Energie von 50 meV benützt. Im CERN stossen Protonen mit einer Energie von 10 TeV aufeinander. Beim Atomstrahl führt die klassische Physik zu einer de Broglie-Wellenlänge von der Grösse  $10^{-10} \text{ m}$ , also der Grössenordnung von Atomen. => «wellig»

Beim CERN hat man es mit relativistischen Quantenobjekten zu tun. Für sie gilt  $p = E/c$ . Damit erhält man eine de Broglie-Wellenlänge von der Grösse  $10^{-19}$  m. Das ist etwa 1/10000 eines Atomkerns und die kleinste Grösse, die man «messen» kann. => «körnig»

3.8 Die «Schwäche der Theorie» ist effektiv ihre Stärke, denn sie bildet bereits den Zufall der Quantenphysik ab, der erst 9 Jahre später in der Quantenmechanik klar zutage tritt. Einstein hoffte bis ans Lebensende, die Natur wäre anders, ohne Zufall. Und die Physik würde am Ende eine versteckte Ursache für das nur scheinbar Zufällige finden und in einer besseren Theorie darstellen.

3.9a 8 Atome zerfallen. Situation nach 1 Halbwertszeit: Es sind total  $(1+1)^8 = 256$  Fälle

3.9b Es gibt 9 verschiedene Ereignisse

Die absoluten Häufigkeiten betragen 1 / 8 / 28 / 56 / **70** / 56 / 28 / 8 / 1

3.9c Die Wahrscheinlichkeiten  $p_1$  bis  $p_9$  betragen:

0.39 % / 3.1 % / 10.9 % / 21.9 % / **27.3%** / 21.9 % / 10.9 % / 3.1 % / 0.39 % (total = 100%)

Am Häufigsten zerfällt die Hälfte = 4.

3.9d Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Ereignisses im Bereich  $4 \pm 1$  beträgt 71.1%.

Die Wahrscheinlichkeit im Bereich  $4 \pm 2$  beträgt 92.9%.

3.9e Die Wahrscheinlichkeiten betragen nach einer Zeit  $T$ :

für 4 Atome: 3.9‰, 4.7%, 21%, 42%, 32%

für 8 Atome : 0.02‰, 0.37‰, 3.8‰, 2.3%, 8.7%, 21%, 31%, 27%, 10%

Die Verteilungen sind sehr unsymmetrisch.

3.9f Die 3.9‰ = 0.4% sind zerfallen und spielen keine neue Rolle  $\Leftrightarrow$  «ziehen ohne zurücklegen»

Die Wahrscheinlichkeiten betragen nach einer Zeit  $2T$ :

Das nicht zerfallene Atom in den 4.7% zerfällt mit Ws.  $\frac{1}{4}$  : 1.2% und bleibt mit Ws.  $\frac{3}{4}$  : 3.5%.

Die 21% teilen sich ebenso auf in: 1.3% und 7.9% und die 11.9%, die nicht zerfallen.

Die 42% teilen sich in: 0.7% und 5.9% und 17.7% und die 17.7%, die nicht zerfallen.

Die 32% teilen sich in: 0%, 1.5%, 6.7%, 13.4% und die 10.2%, die nicht zerfallen.

Noch keines ist zerfallen mit Ws. 10.2% = 10.2%

Genau eines ist zerfallen mit Ws. 17.7% + 13.4% = 31.1%

Genau zwei sind zerfallen mit Ws. 11.9% + 17.7% + 6.7% = 36.3%

Genau drei sind zerfallen mit Ws. 3.5% + 7.9% + 5.9% + 1.5% = 18.8%

Genau vier sind zerfallen mit Ws. 0.4% + 1.2% + 1.3% + 0.7% + 0.1% = 3.7%

Mit diesen Werten ist erneut die Verteilung nach der Zeit  $3T$  durchzurechnen:

Die 3.7% sind zerfallen und spielen keine neue Rolle.

Das nicht zerfallene Atom in den 18.8% zerfällt mit Ws.  $\frac{1}{4}$  : 4.7% und bleibt mit Ws.  $\frac{3}{4}$  : 14.1%.

Die 36.3% teilen sich ebenso auf in: 2.3% und 13.6% und die 20.4%, die nicht zerfallen.

Die 31.1% teilen sich in: 0.5% und 4.3% und 13.2% und die 13.2%, die nicht zerfallen.

Die 10.2% teilen sich in: 0%, 0.5%, 2.1%, 4.3% und die 3.2%, die nicht zerfallen.

Noch keines ist zerfallen mit Ws. 3.2% = 3.2%

Genau eines ist zerfallen mit Ws. 13.2% + 4.3% = 17.5%

Genau zwei sind zerfallen mit Ws. 11.9% + 13.2% + 6.7% = 35.7%

Genau drei sind zerfallen mit Ws. 3.5% + 7.9% + 4.3% + 1.5% = 17.5%

Genau vier sind zerfallen mit Ws. 0.4% + 1.2% + 1.3% + 0.5% + 0% = 3.2%

Die Verteilungen auf 0, 1, 2, 3, 4 nicht zerfallene Atome verändert sich in der Zeit folgendermassen:

	0	1	2	3	4	noch nicht zerfallene Atome
0T	0	0	0	0	100	in ganzen %
1T	0	5	21	42	32	in ganzen %
2T	4	11	36	31	10	in ganzen %
3T	11	33	36	17	3	in ganzen % Ebenso mit 4T ...

Die Erwartungswerte dieser Verteilungen nehmen exponentiell ab: 4.0 => 3.0 => 2.2 => 1.7

Zur Veränderung der Schwankung lässt sich bei dieser kleinen Anzahl Atome nichts sagen. Erst anspruchsvollere Statistik ermöglicht präzise Aussagen für Schwankungen bei grossen Zahlen.

3.10 -

3.11 -

3.12a Wellen- und Teilchenaspekt sind praktisch nur nacheinander beobachtbar und daher dürfen die beiden Modelle beziehungslos nacheinander und nebeneinander benützt werden.

3.12b Ad hoc Theorien genügen nicht. Das Wesen des Lichts muss in einer Theorie dargestellt werden, die sowohl bei Wellen- als auch bei Teilchenexperimenten benützt werden kann.

3.12c Auch 100 Jahre später haben manche ausgebildeten Experimentalphysiker die gleiche Neigung wie Schülerinnen und Schüler im Gymnasium...

3.13a -

3.13b Bohrs Atommodell ist korrekt

3.13c Hg-Atome geben bei einem inelastischen Stoss ihre ganze Bewegungsenergie an ruhende Hg-Atome ab, bei denen ein Elektron auf eine höhere Bahn springt.

3.13d -

3.14a Gleiche Fehler wie in 2.6 erläutert.

3.14b  $\lambda_{dB} = 0.5 \text{ m} \cdot 5 \text{ m} / 50 \text{ m} = 5 \text{ cm}$

3.14c  $h^* = \lambda_{dB} \cdot p = 5 \text{ cm} \cdot 66 \text{ kg} \cdot 20 \text{ m/s} = 66 \text{ Js}$

3.14d  $E = h^*f = 66 \text{ Js} \cdot 1 \text{ THz} = 66 \text{ TJ}$ , wie eine Atombombe! Keine Torkamera möglich.

3.14e  $\Delta x \cdot m \Delta v > h/4\pi \Rightarrow \Delta v > h^*/4\pi \cdot \Delta x \cdot m = 0.1 \text{ m/s} \Rightarrow \Delta x = 1 \text{ m} + 20 \text{ cm}$

3.14a Man kann die Staublawine als Aufenthaltswahrscheinlichkeitswolke für das Quantenobjekt durchgehen lassen. Ihr Zustand ist eine Überlagerung von Zuständen mit verschiedenem Impuls und damit verschiedener Geschwindigkeit und damit auseinanderlaufend. Wie schnell?

$\lambda_{dB} = h^*/p = 66 \text{ kJs} / 3300 \text{ kg} \cdot 100 \text{ m/s} = 0.2 \text{ m}$

3.15b  $d = 0.2 \text{ m} \cdot 20'000 \text{ m} / 50 \text{ m} = 160 \text{ m} \Rightarrow$  beim SEA LIFE

3.15c Etwa das 3.

3.15d Eine Serie von Riesenstaubsaugern im Abstand von 10 m mit je einem Sensor und einer Schaltung, die alle andern abschaltet, wenn einer anspricht.

3.15e Ich finde keinen ...

3.15f -



**KAPITEL 3: MINT AUFGABEN****M3.1) Mehr als H-Atome**

- Die Alkali-Atome sind dem Wasserstoff ähnlich. Wieso? Weshalb ist das Li-Atom grösser, obwohl die elektrische Kraft zum Zentrum dreimal stärker ist?
- Arnold Sommerfeld (mit Zigarre neben Bohr) war in München u. a. der Lehrer von Heisenberg und Pauli. Er berechnete das Helium nach Bohrs Modell. - Was ist beim He auch zu berücksichtigen?
- In welcher Zeitspanne war das Atommodell nach Bohr und Sommerfeld die wissenschaftliche Spitze?

**M3.2) Historische Annäherung an die Bedeutung der Wellen von de Broglie und von Schrödinger**

- De Broglie in seiner Dissertation von 1924: «*Unser Theorem dagegen lehrt, dass sie [die Welle, die keinesfalls Energie befördert] die Verteilung der Phasen eines Ereignisses im Raum darstellt; sie ist eine Phasenwelle*» - Was ist die Phase einer Welle?
- Schrödinger schreibt in seiner «zweiten Mitteilung» vom Februar 1926: «*Das wirkliche mechanische Geschehen [eines mechanischen Systems, z. B. des H-Atoms] wird in zutreffender Weise erfasst oder abgebildet durch die Wellenvorgänge im  $q$ -Raum*». – Was ist der  $q$ -Raum?
- Schrödinger in der «vierten Mitteilung» und Pauli in einem Brief vom Dezember 1926 bezeichnen die Grösse  $\psi$  als «Feldskalar». – Was ist ein Feld, was ein Skalar? Was könnte ein Feldskalar sein?

**M3.3) Historische Annäherung an die Bedeutung der Schrödinger Wellen? Teil II**

- Born schreibt im Juni 1926 «*Bei der vollständigen Analogie zwischen Lichtquant und Elektron aber wird man daran denken, die Gesetze der Elektronenbewegung in ähnlicher Weise zu formulieren. Und hier liegt es nahe, die de Broglie-Schrödingerschen Wellen als das 'Gespensterfeld' oder besser 'Führungsfeld' anzusehen*». – Wieso ein Gespensterfeld? Was wird geführt?
- Sommerfeld meint in einem Vortrag zum Thema «Zum gegenwärtigen Stande der Atomphysik» im Januar 1927, dass Schrödingers Welle «*nicht ganz so anschaulich ist wie bei der schwingenden Saite, weil es [das Problem des H-Atoms] nicht mechanische, sondern metaphysische Schwingungen betrifft*.» (v. Meyenn, 2011, S. 397) – Was ist metaphysisch?

**M3.4) Wahrscheinlichkeitsverteilungen bei einer Grippe-Epidemie**

- Vergleichen Sie die Wahrscheinlichkeitsverteilung für das Auffinden von COVIT-19-Viren um ein Partylokal mit dem  $1s$ -Orbital.
- Unter welchen Umständen gibt es sich ausbreitende Wahrscheinlichkeitswellen bei Viren und in der Quantenphysik?
- Gibt es Schrödingers Feldskalar  $\psi$  bei Viren?

**M3.5) Spendenbrunnen-Trichter**

Beim «Spendenbrunnen» in Museen usw. rotiert die Münze immer schneller in die Tiefe. Wieso macht das Elektron im elektrischen Trichter des H-Atoms nicht das Gleiche?

**M3.6) Tiger tunnelt durch Gitterstäbe**

- George Gamow dachte sich eine Welt, bei der  $h$  soviel grösser wäre, dass Tiger durch die Gitter des Zoos tunneln könnten. – Wieviel grösser müsste  $h$  sein?
- Könnten dann grundsätzlich auch Autos durch Garagenwände tunneln?

**M3.7) Zum Korrespondenzprinzip**

Das Korrespondenzprinzip sagt, dass für grosse Quantenzahlen die Quantenphysik mit der klassischen Physik übereinstimmt. Überprüfen Sie dieses Prinzip mit der Strahlung, die beim Übergang vom Zustand  $n$  in den Zustand  $n-1$  ausgesandt wird, wenn  $n \rightarrow \infty$ . Es zeigt sich, dass die Frequenz dieser Strahlung mit der Umlauffrequenz eines Elektrons auf einer Bohr-Bahn übereinstimmt. Benützen Sie dazu die Formeln für Energie und Bahnradius aus einer Formelsammlung.

**KAPITEL 3: KURZLÖSUNGEN ZU DEN MINT AUFGABEN**

M3.1a 1 leicht gebundenes Valenzelektron. Die 2 inneren Elektronen neutralisieren 2 Protonenladungen und stossen das äusserste Elektron ab.

M3.1b Abstossung zwischen den Elektronen. Elektronen können auf verschiedenen Bahnebenen sein. Später: Die 2 Elektronen sind ununterscheidbare Fermionen.

M3.1c Physikgeschichte: 1913 bis 1926 (Schrödinger) => Schulgenauigkeit: ca. 1910 bis ca. 1930

M3.3a Die Wahrscheinlichkeitsverteilung, die das Wellenfeld bestimmt, schien noch gespensterhaft. Sie schien die Elektronen usw. mitzuführen.

M3.3b Aristoteles teilte seine Werke in solche, die sich mit der Natur (physis) beschäftigten und solche, die darüber hinauswiesen.

WIKIPEDIA: Die *Metaphysik* (lateinisch *metaphysica*; griechisch μετά *metá* ‚danach‘, ‚hinter‘, ‚jenseits‘ und φύσις *phýsis* ‚Natur‘, ‚natürliche Beschaffenheit‘) ist eine Grunddisziplin der Philosophie. (...) Konkret bedeutet dies, dass die klassische Metaphysik „letzte Fragen“ behandelt, beispielsweise: Gibt es einen letzten Sinn, warum die Welt überhaupt existiert?

M3.4a Partybühne hat höchsten Wert und entspricht Atomkern.

M3.4b Husten verändert Virenverteilung. Ionisationsvorgang verändert Psi und Ladungsdichte.

M3.4c Beispiel für Feldskalar = Temperaturverteilung. Kein Sinn für Psi bei Viren, da keine Auslöschung durch Interferenz möglich ist.

M3.5 Münze verliert Energie. Elektron verliert keine Energie, in stationärem Zustand!

M3.6a Gitter = 10 cm  $\approx \lambda_{\text{de Broglie}} = h^*/mv = h^*/(200 \text{ kg} \cdot 5 \text{ m/s}) \Rightarrow h^* = 10^{-4} \text{ Js} \Rightarrow$  rund  $10^{+30}$  mal grösser.

M3.6b Unter den Annahmen von a) JA. Wenn  $h$  überall grösser wäre, gäbe es aber keine Atome ...

M3.7 (1) Einerseits gelten für  $f_k$ :

$$\Delta E_{k \rightarrow k-1} = E_{k-1} - E_k = hf_k \quad \text{und aus der Formelsammlung} \quad E_k = -(1/k)^2 \cdot mZ^2 e^4 / 8(\epsilon h)^2$$

(2) Andererseits gelten für  $f_k$  auch:

$$r_k m v_k = k \cdot h / 2\pi \quad \text{und generell für eine Kreisbewegung} \quad 2\pi f_k r_k = v_k$$

$$\text{und aus der Formelsammlung} \quad r_k = k^2 \cdot \epsilon h^2 / \pi m e^2$$

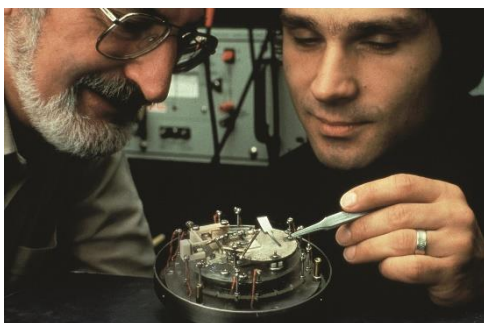
Wenn man (1) vereinfacht und für grosse  $k$  betrachtet, ergibt sich der gleiche Wert, wie aus (2):

$$f_k = \frac{1}{k^3} \frac{m e^4}{4 \epsilon^2 h^3}$$

Das ist, was die klassische Elektrodynamik sagt und was mit der Anschauung übereinstimmt: Ein mit  $f_k$  kreisendes Elektron strahlt mit der Frequenz  $f_k$ . Genau das aber gilt im atomaren Normalfall, in der Nähe des Grundzustands, für kleine Werte von  $k$ , nicht!

**Bilder zum Verhältnis von Theorie (viel im Kapitel 3) und Experiment (wenig im Kapitel 3).**

Experimentalphysiker Rohrer und Bednorz, Erfinder des Rastertunnelmikroskops, im IBM- Forschungslabor Rüschlikon, Schweiz.



In Bohrs Hörsaal sitzen junge Theoretiker - 1929. Fehler mussten Heisenberg und Pauli mit einem Trompetenstoss oder einer Kanone melden.



**ABSCHNITT 3.2: EXPERIMENTE ZUM RADIOAKTIVEN ZERFALL**

**UMFELD:** Hans Geiger und Walter Müller präsentieren 1928 das *Elektronenzählrohr zum Nachweis schwächster Aktivitäten*. Damit wird der sichere Nachweis *einzelner* Betas oder Gammas möglich. Im Bild sehen Sie ein Zählrohr von 1935. Vorher brauchte man hunderte ionisierender Quantenobjekte für fotografische Schichten oder Ionisationskammern. Anfänglich zeigt das laute Knacken des angeschlossenen Lautsprechers den Teilchenaspekt der Gamma-Strahlung. Radoröhren ermöglichen bald den Bau schneller Zählgeräte und Koinzidenzschaltungen für raffiniertere Fragestellungen.



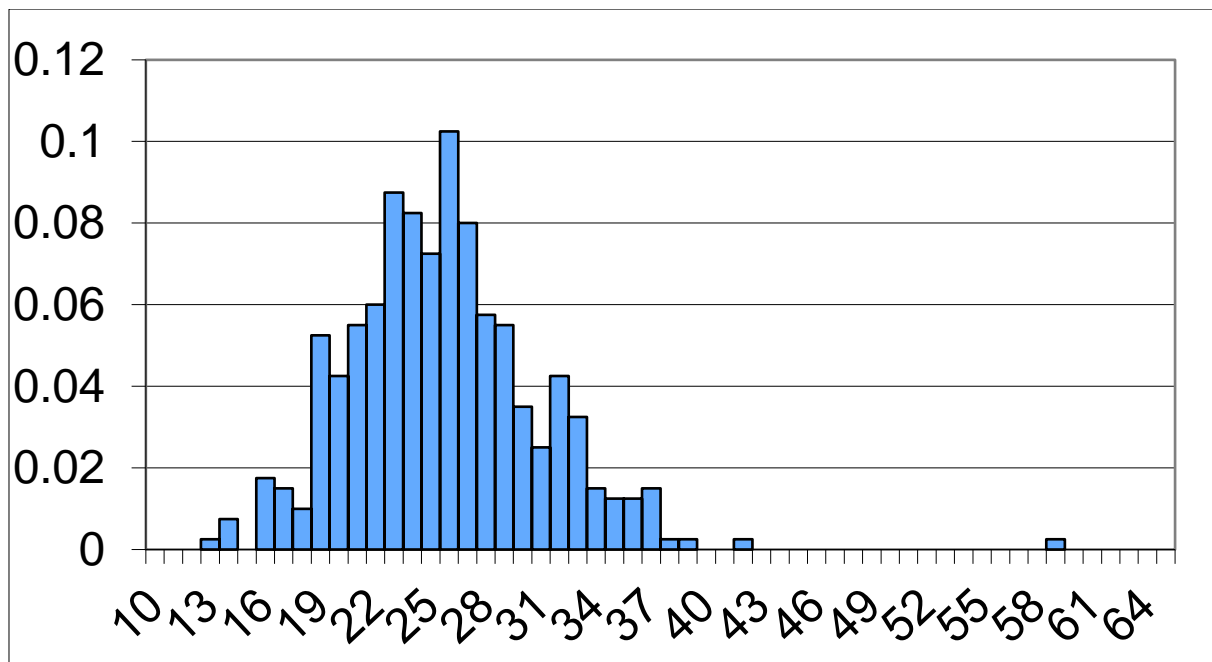
**EXPERIMENT:**

Beachten Sie die beim Arbeiten mit ionisierender Strahlung nötigen Vorsichtsmassnahmen! Man benützt eine Beta- oder Gamma-Quelle. Quellenstärke und Abstand werden so gewählt, dass der am GM-Zählrohr oder einem anderen Detektor angeschlossene Zähler etwa 100 Impulse pro Minute registriert werden. Damit hat man die im Abschnitt 2.5 besprochene Situation.

**AUSWERTUNG «nach Gehör»:** Die käuflichen Quellen besitzen eine so lange Halbwertszeit, dass entsprechend (2.3b) innerhalb einiger Lektionen keine Veränderung der Aktivität  $I_0$  beobachtet werden kann. Ein ans Zählgerät angeschlossener Lautsprecher macht die in 2.5.5 erläuterten Schwankungen leicht hörbar. Eine Serie von mindestens 10 Messungen zeigt die Spannweite der Schwankungen. Das Zusammenfügen von mindestens 10 Serien erlaubt die Überprüfung der Vorhersage. Da die Vorhersage auf der Annahme vollständigen Zufalls beruht, ist das Wirken des Zufalls bestätigt: Auch wenn es schon Einstein unsympathisch war und uns irritiert: quantenphysikalische Vorgänge werden zufällig ausgelöst!

**AUSWERTUNG mit GM-Zähler und Data-Logger:**

Ein Beispiel aus der Kantonsschule Wattwil hat folgendermassen ausgesehen:



Mittelwert = 25.665  
 Varianz = 26.985

Median = 25  
 Standardabweichung = 5.195

Modus = 26  
 Varianzbreite = 46

**BILANZ:**

Mit passenden Nachweisgeräten kann **das Wirken des Zufalls** beim radioaktiven Zerfall nicht nur wahrnehmbar gemacht, sondern auch quantitativ überprüft werden.

**MEDIEN****ABSCHNITT 3.2: MEDIEN ZUM RADIOAKTIVEN ZERFALL**

Alpha-Teilchen treffen auf Leuchtschirm:

<https://youtube.com/watch?v=2iwRbIMpPMs>

**ABSCHNITT 3.3: MEDIEN ZUR UNBESTIMMTHEITSRELATION**

Ganz kurz auf You-tube zur Unbestimmtheitsrelation:

<https://www.youtube.com/watch?v=Ckzy1tYbVIk>

**ABSCHNITT 3.3: MEDIEN ZUR SCHRÖDINGER-GLEICHUNG**

You-tube zur Schrödinger-Gleichung:

<https://www.youtube.com/watch?v=O6g-7rUgrdg>

**ABSCHNITT 3.6: MEDIEN ZU SCHRÖDINGERS KATZE**

You-tube zu Schrödingers Katze:

<https://www.youtube.com/watch?v=7jY5Q6u65uo>

**Neben dem expandierenden Universum der elektronischen Medien gibt es immer noch Bücher ...**

**ABSCHNITT 3.8: EINSTEINS MENSCHLICHE STÄRKEN UND SCHWÄCHEN SERIÖS DARGESTELLT**

Von Albrecht Fölsing: Albert Einstein – Eine Biographie. Frankfurt 1993: Suhrkamp.

Von Armin Hermann: Albert Einstein – Der Weltweise und sein Jahrhundert. München 1994: Piper.

**ABSCHNITT 2.6: SIMULATION ZUR WAHRSCHEINLICHKEITSVERTEILUNG**

Gehen Sie zum Angebot QuVis der St. Andrews University in Schottland:

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

Wählen Sie LEVEL **Introductory** und LANGUAGE **German**.

Als Ergänzung zum Kapitel 2 eignet sich die Simulation:

**Klassischer Oszillator**

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/de/simulations/sims/classical-oscillator-de/classical-oscillator-de.html>

Hinweis: Klicken auf die **Fragezeichen** hilft manchmal weiter.

Auch in der klassischen Mechanik ist es möglich, die Wahrscheinlichkeitsdichte zu bestimmen, die sich aus Borns Regel für die Quantenmechanik ergibt.

In der klassischen Mechanik arbeitet man nicht mit Wahrscheinlichkeitsdichten, weil man Ort, Geschwindigkeit usw. eines Tennisballs, Satelliten usw. für jeden Zeitpunkt genau angeben kann.

Lesen Sie die kurzen Texte in den **Blöcken mit den Fragezeichen** sorgfältig.

Starten Sie eine **neue Messreihe**.

Wechseln Sie zwischen **Anzahl der beobachteten Ereignisse** und **Histogramm der Wahrscheinlichkeitsdichte**.

Beobachten Sie den Einfluss der **Intervallbreite**.

Wenn Sie Lust haben, wechseln Sie in der Menuleiste von Simulation zu **Herausforderung**.

Wahrscheinlichkeiten können auf Längen (eindimensionales Federpendel...),  
auf Flächen (Trommenfell, Quantenpferch...),  
oder in Räumen (Fliege in der Küche, **Atom**...) verteilt sein.

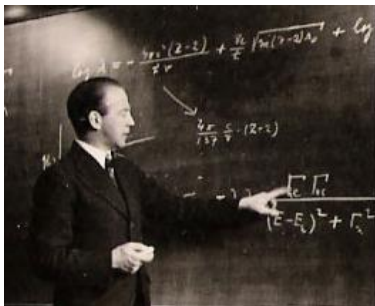
### NACHDENKEN ÜBER PHYSIK 3: PHYSIK UND INTERDISZIPLINARITÄT – 3 BEISPIELE

#### 1 Physik und Mathematik

Die Beziehungen zwischen Physik und Mathematik sind eng. Alle grossen Mathematiker von Archimedes bis Gauss sind auch bedeutende Physiker gewesen. Die Abhängigkeit ist wechselseitig: Newton erfand die Infinitesimalrechnung, damit er die Physik der Planetenbewegung erfassen konnte. Umgekehrt formulierte Heisenberg seine neue Atommechanik so, dass Born ihm sagen musste, dies sei die den Mathematikern schon lange bekannte Matrizenrechnung.

Die Spezialisierung der Wissenschaften im 19. Jahrhundert bewirkte einen Trend zur «reinen» Mathematik. 1940 behauptete der britische Mathematiker Harold Hardy: *Ich habe nie etwas 'Nützlich' gemacht. Keine Entdeckung von mir hat je oder wird wahrscheinlich je, direkt oder indirekt, zum Guten oder Bösen einen Unterschied zum Wohlergehen der Welt machen.* Just dieser Trend brachte Heisenberg zur Physik. Als Maturand las er «Raum-Zeit-Materie», Hermann Weyls Standardwerk zur Relativitätstheorie. Heisenbergs Vater schickte ihn zwecks Berufsberatung zum Mathematiker-Kollegen Ferdinand Lindemann, der die Unmöglichkeit der Quadratur des Kreises bewiesen hatte. Wie der junge Werner diesem sein Interesse für die Relativitätstheorie gestand, meinte der Ordinarius der Universität München: *Dann sind Sie für die Mathematik sowieso verdorben.*

Platon legte geometrische Formen als Fundament, und für Galilei war Mathematik die Sprache der



Natur. Aber in der Quantenphysik spielt die Mathematik eine noch bedeutendere Rolle als in der klassischen Physik, beispielsweise in der Elektrodynamik. Zuerst stand die «Zahlenmystik» hinter den Regelmässigkeiten der Spektren. Sie führte vom Wasserstoffspektrum zu Bohrs Atom-Modell. Später leitete sie zu den halben Quantenzahlen und zum Spin. Im Mai 1925 flüchtete Borns Privatdozent Heisenberg (links im Bild) infolge Heuschnupfens nach Helgoland. Dort fand er Zeit für *die Möglichkeit entscheidender Durchblicke durch den «Nebel der Atomphysik».* Zwar meinte er,

*dass es ja keine Gewähr dafür gäbe, dass das so entstehende mathematische Schema überhaupt widerspruchsfrei durchgeführt werden könnte.* Doch hatte er Erfolg. Born und Jordan in Göttingen und Dirac in Cambridge vervollständigten die Theorie, in der nur beobachtbare Grössen vorkommen.

Einstein wandte ein: *Sie glauben doch nicht im Ernst, dass man in eine physikalische Theorie nur beobachtbare Grössen aufnehmen kann.* Heisenberg entgegnete: *Einstweilen wissen wir noch gar nicht, in welcher Sprache wir über das Geschehen im Atom reden können. Wir haben zwar eine mathematische Sprache (...) aber wir wissen nicht, wie diese Sprache mit der gewöhnlichen Sprache zusammenhängt.* Die Interpretationsprobleme begannen, als Schrödinger seine anschauliche Wellenmechanik publizierte, die sich als mathematisch gleichwertig erwies. Die Interpretationsprobleme sind Übersetzungsprobleme von der Mathematik, die mit den Messwerten der Experimente in Übereinstimmung ist, in die Alltagssprache, deren Wörter und Metaphern die Quantenobjekte nicht adäquat erfassen. Interpretationsprobleme halten bis in die Gegenwart an.

#### Zwei Arten Mathematik für einen einzigen physikalischen Inhalt: eine kleine Gegenüberstellung

**(1) Heisenberg** war davon überzeugt, dass im Atom eine komplett andere Mechanik nötig war. 1925 warf er die Raum-Zeit-Beschreibung über Bord und erfand die Matrizenmechanik. Sie war den Zeitgenossen fremd, weil die Ideen revolutionär und die Matrizen unanschaulich sind.

Der junge Heisenberg war von Born in Göttingen nach Kopenhagen an Bohr «ausgeliehen» worden, als er seine Helgoland- Idee hatte und sich sagte, die Physik müsse sich nur auf beobachtbare Grössen stützen. Die Elektronen im Atom könnten nicht wie Kometen durch die Funktionen  $x(t)$  und  $v(t)$  beschrieben werden, weil der Ort eines Quantenobjekts gar nicht gemessen werden könne und demnach für die Physik gar nicht existiere. Elektronen im Atom müssten durch ganzheitliche **Schemata**  $\psi$  erfasst werden. Diese «Schemata» erwiesen sich als Matrizen mit unendlich vielen Spalten und Zeilen. Diese Mathematik ist der Kern seiner *quantentheoretischen Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.*

Der Würfel nebenan sei unser *anschauliches Modell* für das abstrakte, als Matrix formulierte  $\psi$ . **Messungen** am Quantenobjekt werden durch **Operatoren** dargestellt. Es gibt den Orts-Operator  $\hat{x}$ , den Impuls-Operator  $\hat{p}$  usw. Denken Sie sich Drehungen des Würfels als



Veranschaulichung der Operatoren: Wenn Sie den Würfel zuerst so rollen, dass die 2 oben ist  $\hat{x}$ , und anschliessend im Uhrzeigersinn drehen  $\hat{p}$ , schaut die 3 gegen links vorn. Wenn Sie aber zuerst drehen  $\hat{p}$  und dann rollen  $\hat{x}$ , schaut die 3 nach oben. Das von der Multiplikation vertraute Vertauschungsgesetz  $ab = ba$  gilt bei den Würfeloperationen *nicht!* Genau so gilt es nicht für die Operatoren der Matrizenmechanik. Heisenberg fand für die Orts- und Impulsoperatoren die Beziehung  $\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = h/2\pi i \cdot \hat{1}$ . Diese Vertauschungsregel schränkt die gleichzeitige Messbarkeit von  $x$  und  $p$  ein. In einer Vortragsreihe in Chicago unter dem Titel *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie* veranschaulicht er sie mit Gedankenexperimenten, die zu den Unbestimmtheitsrelationen führen.

Matrizenoperationen sind Ihnen vermutlich aus der Raumgeometrie bekannt:

Die Matrix rechts dreht den Vektor aus der y-Richtung in die z-Richtung:  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ .

Man kann zwei gleich grosse Matrizen addieren und multiplizieren und auch sonst umformen.

Es gelang Heisenberg, das Energiespektrum des harmonischen Oszillators mit seinen neuen Schemata auszurechnen. Wolfgang Pauli konnte später das Spektrum des H-Atoms mit den Matrizen ausrechnen und den «reality-check» für die schwierige Matrizenmechanik liefern. Unten ist ein Ausschnitt aus einer Matrizenberechnung der mit dem Spin verbundenen Energie in einem Magnetfeld  $B$ .

$$\mathcal{H} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 & 0 & \pi \cdot v_{01}^{\uparrow\uparrow} & \pi \cdot v_{01}^{\uparrow\downarrow} & \dots \\ 0 & \epsilon_0 & \pi \cdot v_{01}^{\downarrow\uparrow} & \pi \cdot v_{01}^{\downarrow\downarrow} & \dots \\ \pi \cdot v_{10}^{\uparrow\uparrow} & \pi \cdot v_{10}^{\uparrow\downarrow} & \epsilon_1 & 0 & \dots \\ \pi \cdot v_{10}^{\downarrow\uparrow} & \pi \cdot v_{10}^{\downarrow\downarrow} & 0 & \epsilon_1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad \hat{\pi}_x = \sqrt{\frac{e\hbar B}{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

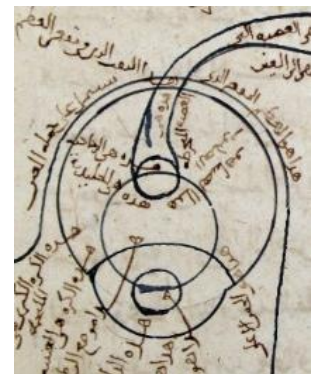
**(2) Schrödinger** wollte die Gesetze der Mechanik im Atominnern möglichst wenig ändern. 1926 behielt er die Raum-Zeit-Beschreibung bei und erfand die Wellenmechanik. Sie war den Zeitgenossen sofort sympathisch, weil die Ideen vertraut und Wellen anschaulich sind.

Schrödinger war schon ein paar Jahre ordentlicher Professor in Zürich, als er durch Einstein und andere auf de Broglies Ideen aufmerksam gemacht wurde. Über Neujahr 1925/1926 weilte er in der Villa Frisia in Arosa «zur Kur» und fand die Gleichung für die **Wellen  $\psi(x,t)$** , mit denen er das Elektron im H-Atom beschreiben konnte. Ebenso wie in anderen Systemen (Saiten, Säulen, Platten usw.) nur gewisse stehende Wellen mit gewissen Energien möglich sind, so sind im Atom nur gewisse  $\psi$ -Wellen stabil. So konnte er auf «natürliche Weise» zeigen, dass im Atom nur gewisse Energien möglich sind, was zum bekannten Spektrum führt. Er konnte schon bald zeigen, dass «seine» und Heisenbergs Quantenmechanik zu den gleichen Ergebnissen führen. Seine Operatoren sind Faktoren wie  $x$  oder Ableitungen  $dx/dt$  usw. Für den Einstieg in die Quantenmechanik ist Schrödingers Mathematik einfacher.

**2 Physik und Biologie**

Physik ist ursprünglich Naturphilosophie, also Naturwissenschaft im umfassenden Sinn. Erst im 18. entwickelten sich die Disziplinen Astronomie, Physik, Chemie, Biologie und Geologie, Meteorologie usw. zu eigenständigen Wissenschaften. Die auf dem Wechselspiel von Experiment und Theorie beruhende Methodik der Physik bleibt bis in die Gegenwart wesentlich: Astrophysik, physikalische Chemie, Biophysik, Geophysik usw.

Vielleicht begann Wissenschaft mit dem Wissen um die Gesundheit. Die frühen Mediziner haben immer auch physikalische Kenntnisse entwickelt. Im Bild ist die Darstellung der Funktionsweise des Auges durch al Haitam um 1000. Das Wort «physicus» bezeichnete den Arzt. Bei der Suche nach der Lebenskraft, der vis vitae, stiess Galvani auf die Froschelektrizität. Elektroschock war vor dem zweiten Weltkrieg eine unumstrittene Therapie bei schweren Psychosen. Röntgenuntersuchungen und Strahlentherapie sind dank physikalischer Entdeckungen möglich. Die sportliche Leistungsfähigkeit des Menschen wird mechanisch ausgemessen.



In seiner Autobiographie «Der Teil und das Ganze» schrieb Heisenberg auch ein Kapitel «Gespräche über das Verhältnis zwischen Biologie, Physik und Chemie (1930-1932)». Ein Gespräch findet bei einem Segelausflug mit Niels Bohr statt. Wie wäre es nach einem Zusammenstoß mit einem Wal? Beide hätten ein Loch. Aber während das vom Wal zuheilen würde, bliebe das des Schiffs. *Das ist eben der Unterschied zwischen lebender und toter Materie.* Niels Bohr fand, im Erbgut des Wals stecke eine gestaltende Kraft, von der er selbst nichts wisse. *Wenn du so von gestaltender Kraft sprichst, meinst du damit etwas ganz ausserhalb der bisherigen Physik und Chemie, ausserhalb der heutigen Atomphysik, oder meinst du, dass sich diese gestaltende Kraft irgendwie in der Lagerung von Atomen, in ihrer Wechselwirkung (...) und dergleichen ausdrückt?* fragte Heisenberg zurück. Am Schluss der längeren Antwort sagte Bohr: *Die Frage muss also wohl so lauten: Kann die Tendenz, solche Gestalten zu bilden (...) aus der Quantenmechanik verstanden werden?* Gleichartige Fragen beschäftigten zehn Jahre später Schrödinger in seinem Buch «Was ist Leben?» Solche Fragen sind bis heute offen.

### 3 Physik und Philosophie

Die philosophischen Werke des Aristoteles werden in die Physik und die Metaphysik eingeteilt. Heute wird Metaphysisches, Übersinnliches, auch mit der Quantenphysik in Zusammenhang gebracht, etwa unter dem Stichwort «Quantenphilosophie». Bei Aristoteles taucht bereits der Satz vom Widerspruch als einem Grundelement der Logik auf.

Die klassische, duale Logik (gerade-ungerade, Welle-Teilchen usw.) gilt in der Quantenphysik nicht mehr. Es wurden dreiwertige und dialogische Versionen von logischen Systemen entwickelt. John von Neumann (im Bild vor einem von ihm für das Manhattan Projekt entwickelten Computer) prägte in den 30er Jahren den Begriff «Quantenlogik». Sie ist ein Forschungsgebiet im Grenzbereich zwischen Mathematik, Physik und Philosophie.



Carl Friedrich von Weizsäcker meinte: *Physik ist das legitime Kind einer Ehe zwischen Philosophie und Handwerk.* Er war, wie der spätere Bundespräsident Richard, ein Sohn von Ernst von Weizsäcker, eines hohen Diplomaten im Dritten Reich. Carl Friedrich (links in Leipzig) begann mit 18 sein Studium bei Heisenberg, blieb sein Mitarbeiter auch während des Kriegs im «Atomverein» und *brachte eine philosophische Note: Wie steht die Quantenphysik zu Kants Philosophie, nachdem klargeworden ist, dass die Relativitätstheorie Kants absolute Vorstellungen von Raum und Zeit über den Haufen geworfen hat? Gibt es Erkenntnis a priori? Wie ist Kants «Ding an sich» beim Elektron? Welche Rolle spielt die Alltagssprache in der Quantenphysik?*



Ethik war schon in der Antike wichtig: Wie ist es mit dem freien Willen in der Quantenphysik? Wie dürfen die Quantenphysiker in Nazi-Deutschland ihre Kenntnis über Kernspaltung nutzen? C. F. von Weizsäcker rechtfertigte sich nach Kriegsende gegenüber den Alliierten philosophisch klug.

#### **Fragen zum Recherchieren, Nachdenken und Diskutieren:**

1a) Wer hat die Matrizenrechnung «erfunden» und welche Anwendungen für sie gab es bereits vor Heisenbergs Matrizenmechanik für diese Form der Mathematik?

1b) Hermann Weyl (im Bild in seinem ETH-Büro) hat auch das Buch «Gruppentheorie und Quantenmechanik» geschrieben. Wieso spielt Gruppentheorie eine Rolle in der Quantenphysik? Wie sieht die Gruppe der Deckabbildungen eines gleichseitigen Dreiecks aus?



2a) Stellen Sie zusammen, welche physikalischen Geräte Sie bei Ihren bisherigen Kontakten mit Medizin, Zahnmedizin oder Tiermedizin angetroffen haben. Welche hätte man nicht durch «Naturmethoden» ersetzen können?

2b) Wie stehen Sie zum Darwinismus? Vergleichen Sie Ihre Position mit derjenigen, die in Heisenbergs Autobiographie sichtbar wird.

3a) Kommentieren Sie Laplace, der um 1800 schreibt: «Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Universums als Folge eines früheren Zustandes ansehen und als Ursache des Zustandes, der danach kommt. Eine Intelligenz, die in einem gegebenen Augenblick alle Kräfte kennt (...) würde in der gleichen Formel die Bewegungen der größten Himmelskörper und die des leichtesten Atoms einbegreifen. Nichts wäre für sie ungewiss, Zukunft und Vergangenheit lägen klar vor ihren Augen.»

3b) Stellen Sie die beiden Positionen «Realismus» und «Idealismus» kurz einander gegenüber.