

# Atome & Kerne

Sommersemester 2019  
Vorlesung # 8, 16.05.19



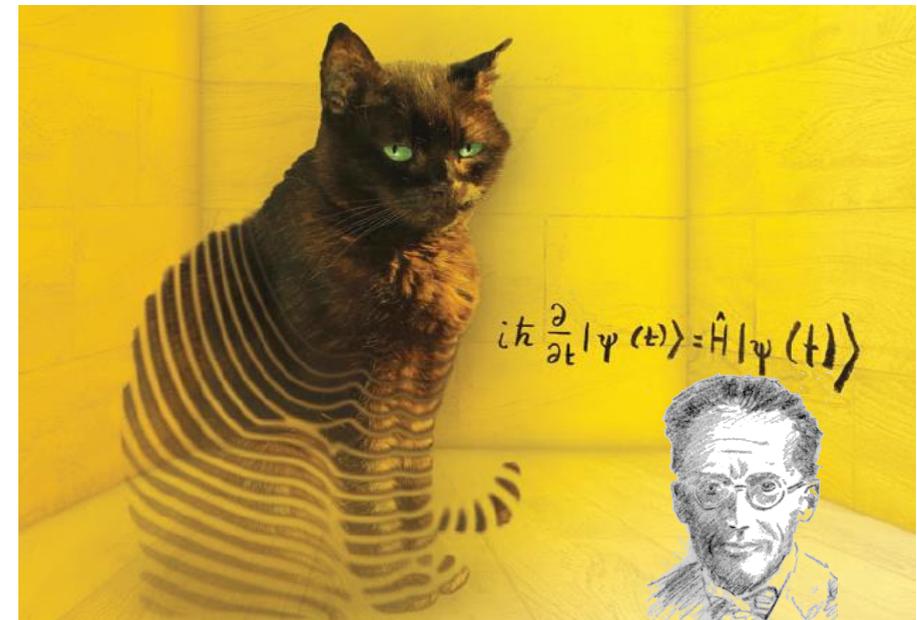
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Teilchenphysik, Fakultät für Physik

## Bohrsches Atommodell

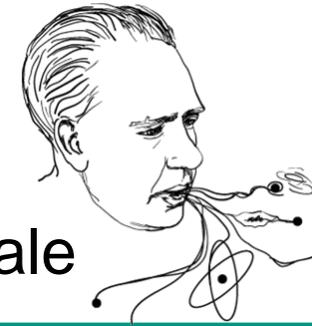
- exotische Atome & PET

## Elemente der Quantenmechanik

- Schrödinger-Gleichung
- harmonischer Oszillator in der QM
- Messungen & Observable
- Schrödingers Katze



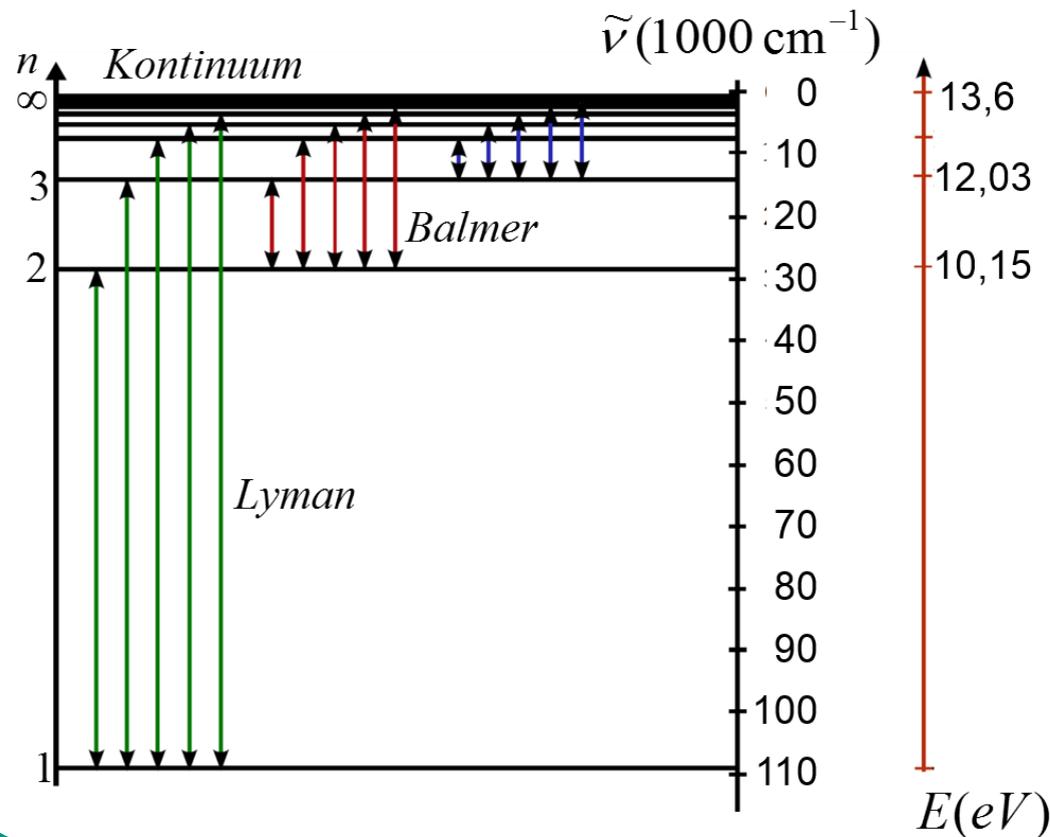
# Bohrsches Atommodell



## ■ Niels Bohr: quasi-klassisches Modell für Atomorbitale

### ■ Termschema H-Atom:

$$\tilde{\nu} \sim R_H \cdot \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad n_1 = 1, 2, \dots; n_2 > n_1$$



### ■ Bohrsche Postulate:

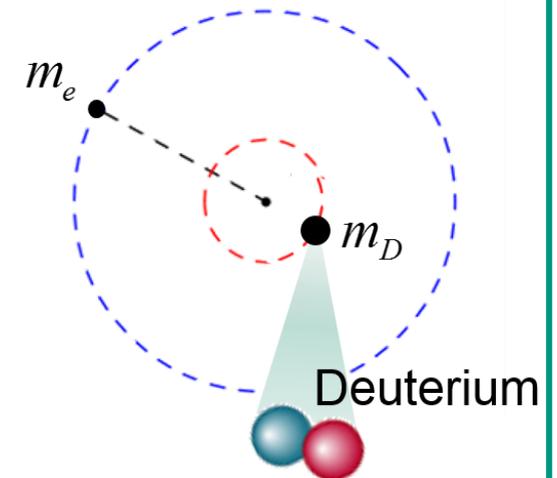
- diskrete Elektron-Orbitale
- stationärer Zustand: strahlungslos
- Korrespondenzprinzip für  $n \rightarrow \infty$

### ■ Bohrsche Radien:

$$r_n = n^2 \cdot \underbrace{\hbar^2 \cdot \frac{4\pi \varepsilon_0}{m_e \cdot e^2}}_{a_0} = n^2 \cdot 52,9 \text{ pm}$$

### ■ endliche Kern- masse: ( $^2\text{H}=\text{D}$ )

$$\mu_D = \frac{m_e \cdot m_D}{m_e + m_D}$$



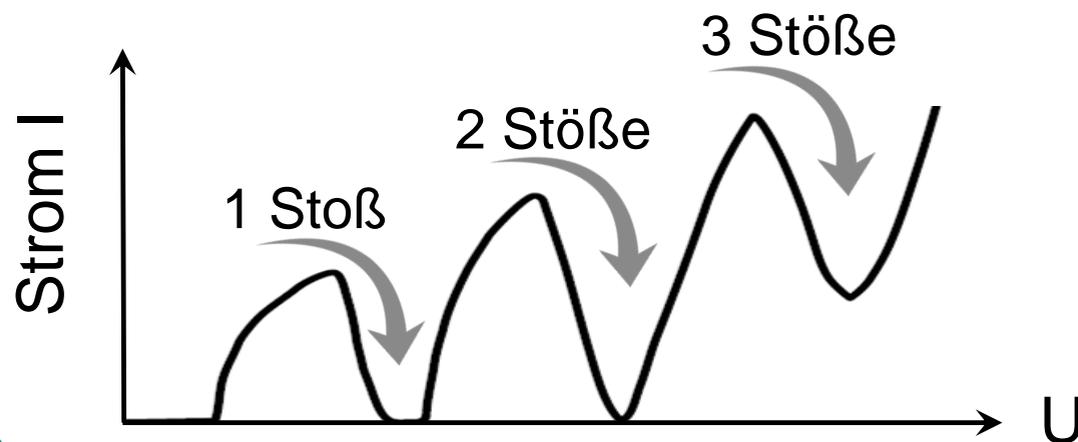
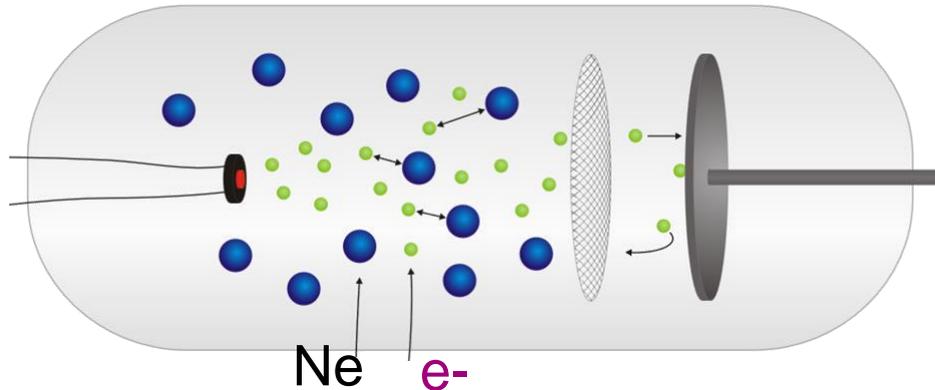
# Streuprozesse & Bohr-Sommerfeld Theorie



## ■ Sommerfeld: Erweiterung des Bohrmodells durch Bahndrehimpuls

### ■ Elektronenstreuung:

- Anregung diskreter Niveaus
- Beispiel: Franck-Hertz Versuch

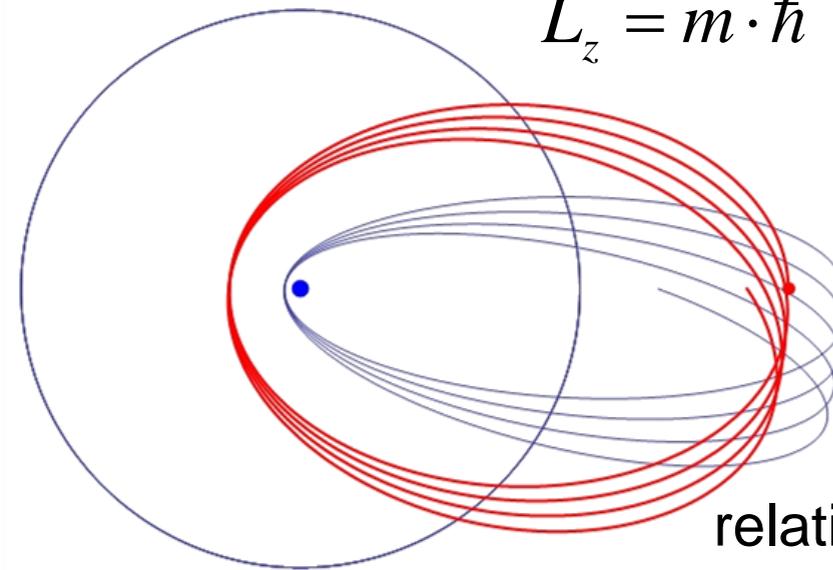


### ■ Bohr-Sommerfeld-Theorie:

- Quantenzahl: Bahndrehimpuls  $\ell$  mit  $\ell = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$
- s,p,d,f,... Orbitale (elliptisch)

$$L = |\vec{L}| = \sqrt{\ell \cdot (\ell + 1)} \cdot \hbar$$

$$L_z = m \cdot \hbar$$

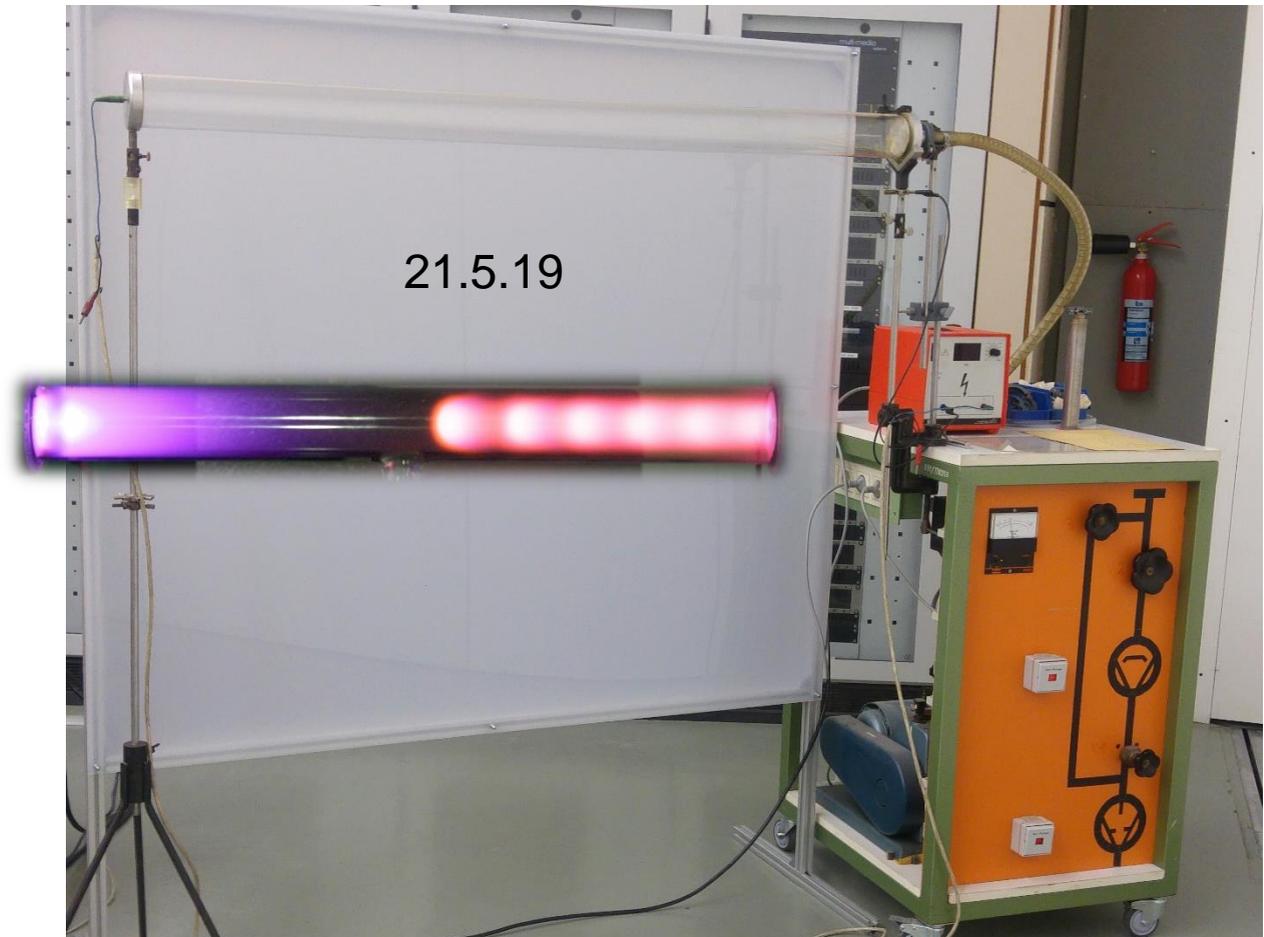


relativistische  
Effekte

# Experiment: selbstständige Gasentladung

## ■ Gasentladung in luftgefülltem Rohr:

- elektrischer Strom fließt durch Rohr
- Aufrechterhaltung der Entladung durch Stoßionisation
- zündet ab Mindeststrom
  
- kleiner Strom ( $\mu\text{A}$ ):  
dunkle Entladung
  
- mittlerer Strom (mA):  
Glimm-Entladung, Farbe  
durch Molekül-Spezies
  
- hoher Strom (A):  
Lichtbogenentladung



# Fun with Facts: atomare Stoßprozesse

## ■ wie gehe ich bei der Inbetriebnahme von UHV auf HV vor?

A) zuerst auf UHV evakuieren und dann auf HV-Potenzial legen

B) zuerst auf HV Potenzial legen und dann auf UHV evakuieren

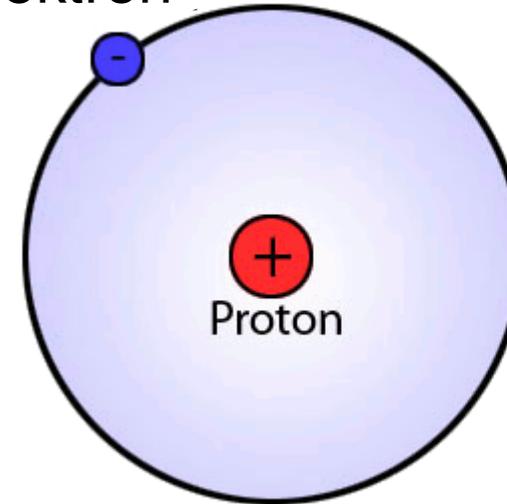
**UHV** = **U**ltra**H**och**V**akuum    **HV** = **H**igh **V**oltage im kV-Bereich



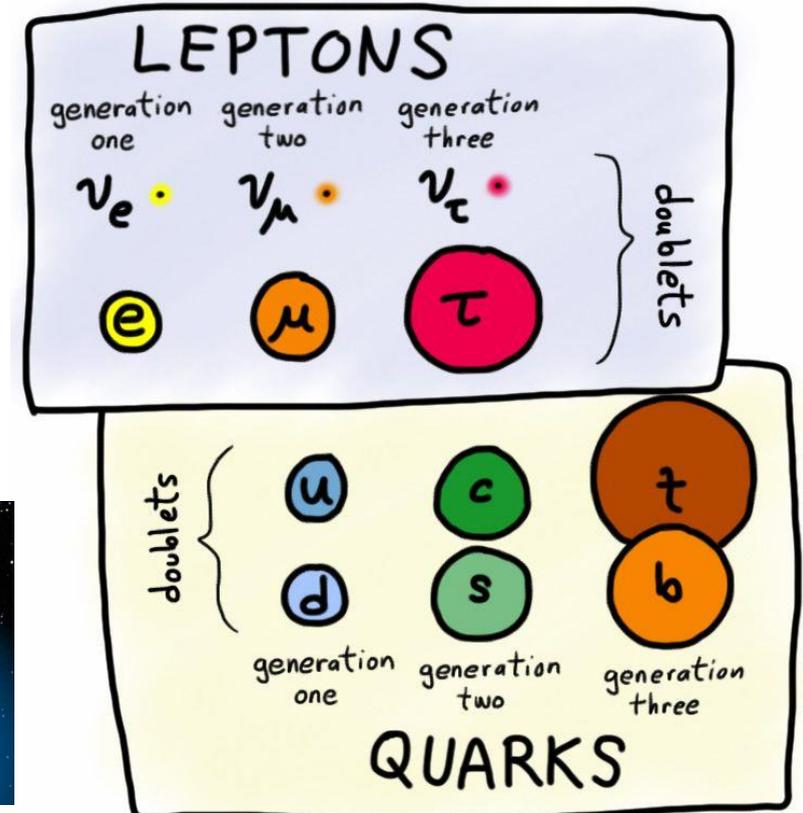
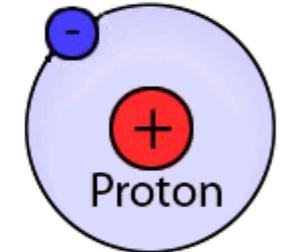
# 4.5 Exotische Atome

- **Myonische Atome** und **Positronium**:  
exotische, instabile Atome zum Studium von elementaren Wechselwirkungen & Teilcheneigenschaften
- **Myonisches H-Atom**:  
ersetze Elektron mit  $m_e$  durch schwereres Myon mit  $m_\mu$  (207  $\times$  schwerer)
  - Erzeugung von Myonen ( $\mu$ ) in:
    - a) Teilchenbeschleuniger
    - b) kosmische Höhenstrahlung

Elektron



Myon



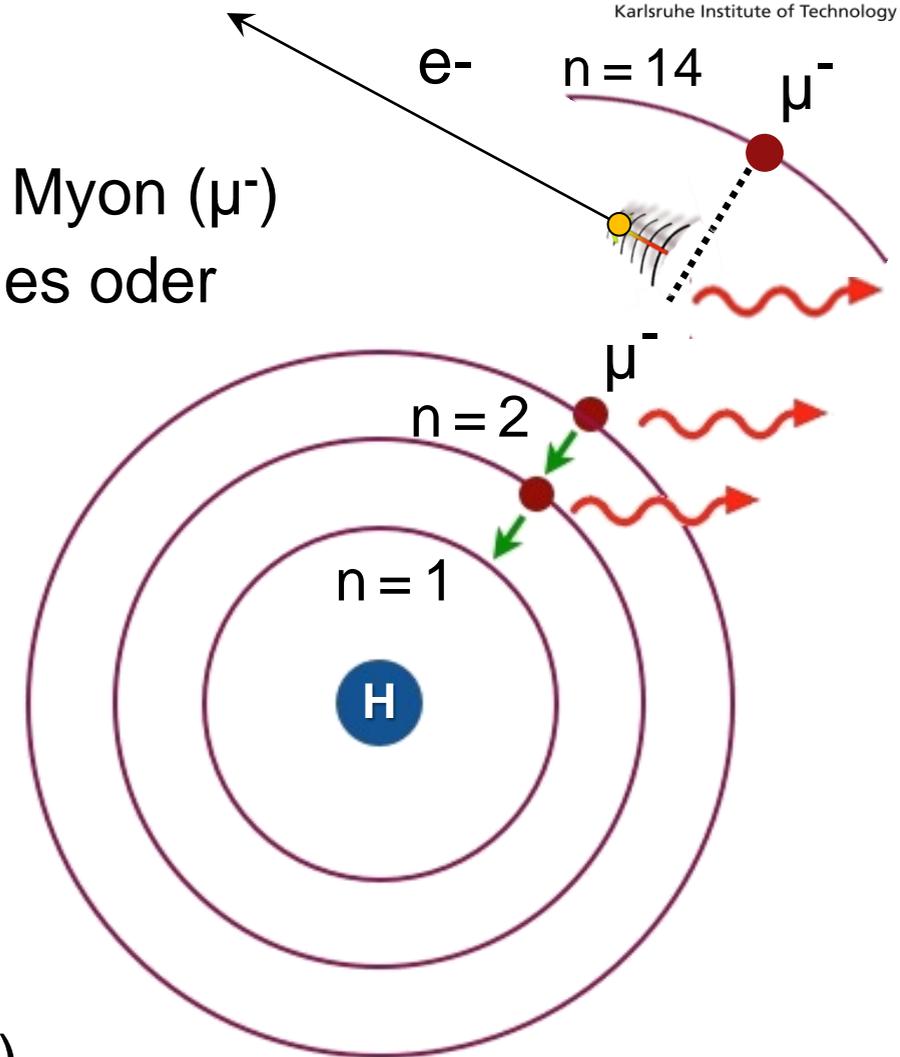
# Myonische Atome

## ■ Myonische Atome

**exotische, instabile Atome:** ein negatives Myon ( $\mu^-$ ) kaskadiert auf innerste Schale, dort zerfällt es oder reagiert mit dem Kern ( $\mu\text{s}$ -Lebensdauer)

■ experimentelle Vorgehensweise:  
 $\mu^-$  werden in ein H-Target geleitet

- $\mu^-$  wird in einem Zustand mit hohem  $n$  ( $\approx 14$ ) und  $\ell$  eingefangen
- $\mu^-$  kaskadiert auf das niedrigste Niveau 1s (Elektron wird dabei freigesetzt)
- bei den Übergängen werden Photonen emittiert, die Aufschluss geben über **Energie der Orbitale des Myons**



# Myonische Atome

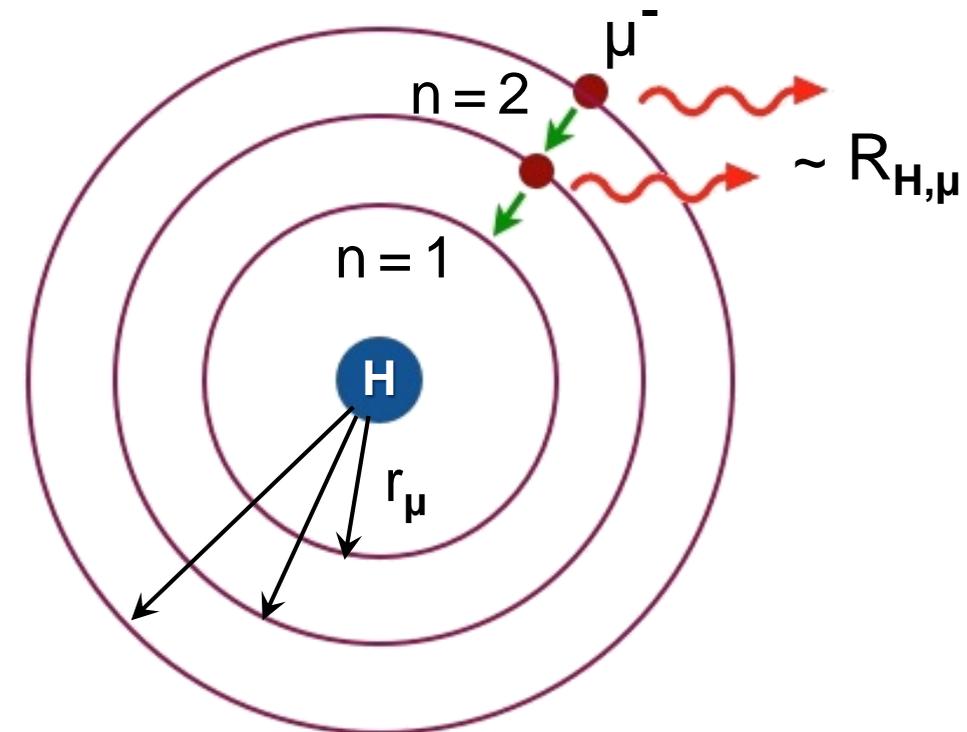
- **Bahnradien**  $r_\mu$  des Myons im H-Atom sind  $\sim 200 \times$  kleiner als beim Elektron:

$$r_\mu = n^2 \cdot \hbar^2 \cdot \frac{4\pi\epsilon_0}{m_\mu \cdot e^2}$$

Myonmasse: 105,658 MeV

- **Übergangsenergien** des Myons ( $\sim R_{H,\mu}$ ) im H-Atom sind  $\sim 200 \times$  größer als beim Elektron:

$$R_{H,\mu} = \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \cdot \frac{m_\mu}{2\hbar^2}$$



Myonmasse: 105,658 MeV

# myonischer Wasserstoff

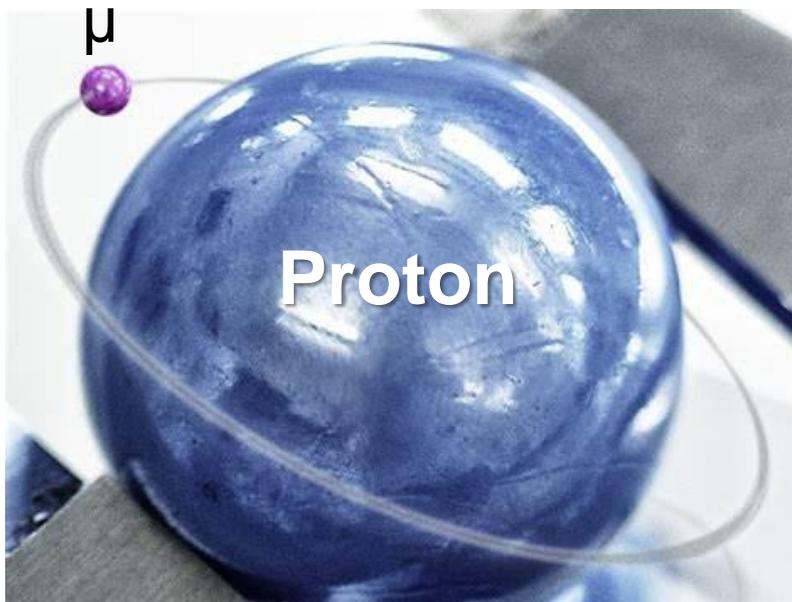
- Experimente mit myonischen H-Atomen am PSI (Schweiz)
  - Myonen-Orbitale verlaufen sehr nahe am zentralen Proton & geben Aufschluss über **mittleren Ladungsradius  $r_p$**



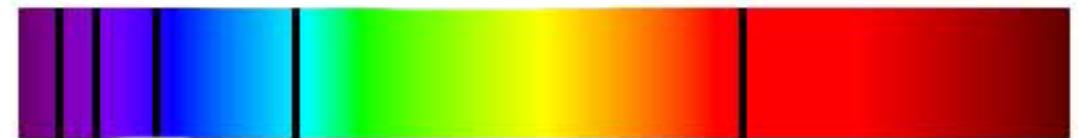
- myonische H-Atome:  $r_p = 0,84184(67) \text{ fm}$
- klass. Spektroskopie :  $r_p = 0,8768(69) \text{ fm}$



$5\sigma$  Diskrepanz



Absorptionsspektrum



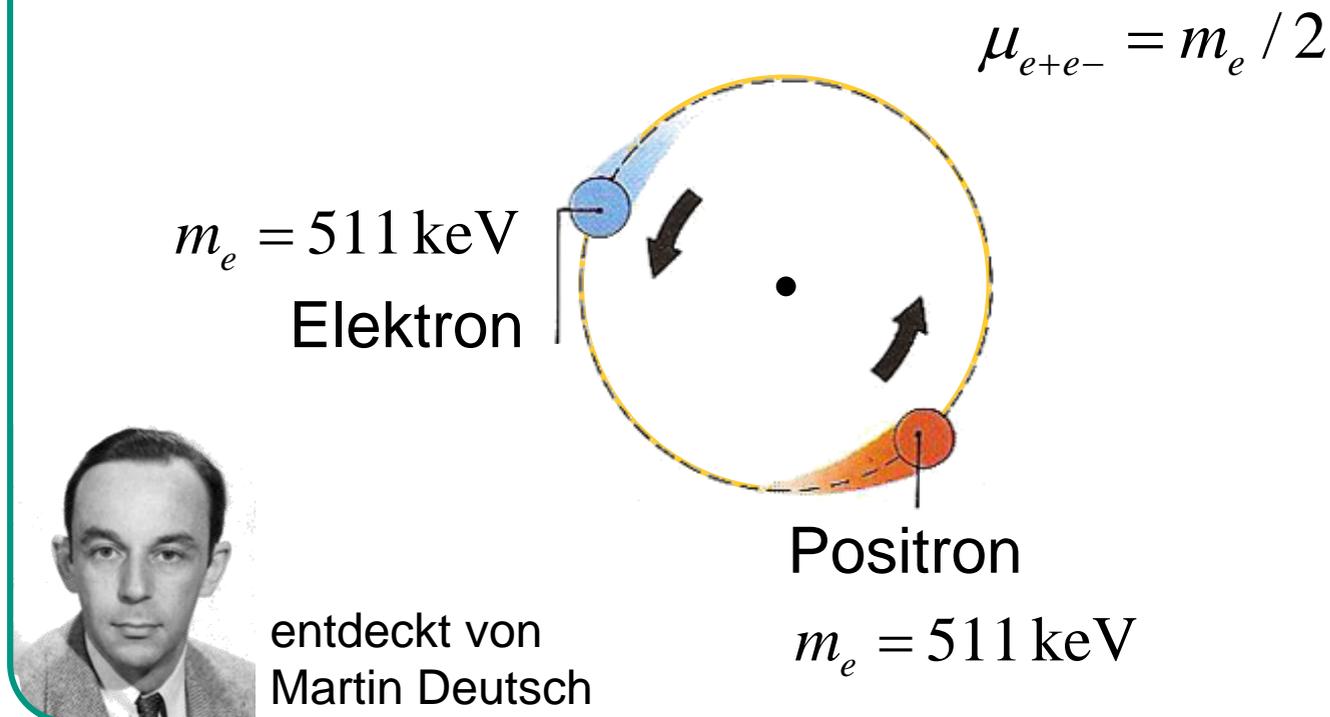
Emissionsspektrum



# Positronium: Ortho- und Para-Zustand

- **Positronium:** gebundener, kurzlebiger Zustand eines Elektrons und eines Positrons (Anti-Teilchen des Elektrons)
  - ein H-Atom-ähnliches System mit charakteristischen Orbitalen

## Positronium



Radius:  $2 \times$  H-Atom

$$r_{e+e-} \sim \frac{1}{\mu_{e+e-}}$$

Energie:  $\frac{1}{2} \times$  H-Atom

$$R_{H,e+e-} \sim \mu_{e+e-}$$

# Positronium: Ortho- und Para-Zustand

- **Positronium**- kommt in 2 unterschiedlichen Zuständen vor:

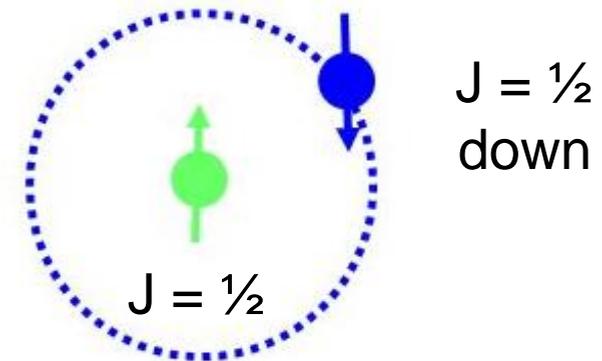
Singulett-Zustand mit  $J = 0$  Triplett-Zustand mit  $J = 1$

## - Para-Positronium ( $\uparrow\downarrow$ ):

Gesamtdrehimpuls  $J = 0$

$$\tau = 1,25 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

„kurze“ Lebensdauer



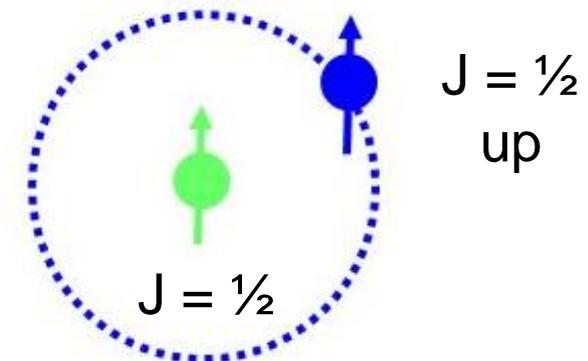
## - Ortho-Positronium ( $\uparrow\uparrow$ ):

Gesamtdrehimpuls  $J = 1$

$e^+ + e^- \rightarrow 3 \gamma$  (da  $\gamma$  einen Spin  $S = 1$  hat)

$$\tau = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

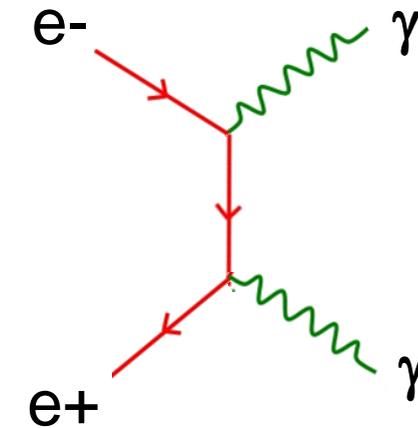
„lange“ Lebensdauer



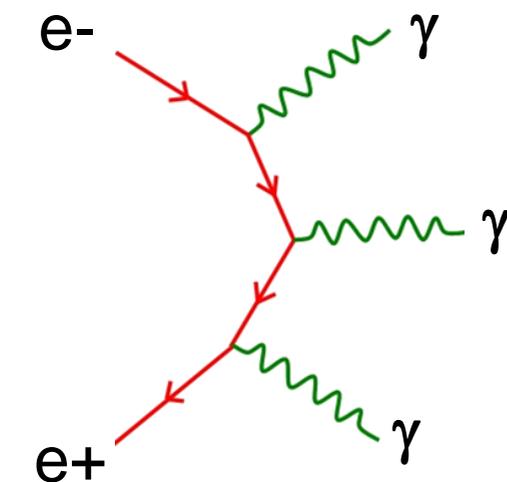
# Positronium: Ortho- und Para-Zustand

- **Positronium-** Zustand annihiliert in 2 (3) Gammas  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma (+\gamma)$

- **Para-Positronium** ( $\uparrow\downarrow$ ):  
Gesamtdrehimpuls  $J = 0$   
 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$   
da  $\gamma$  einen Spin  $S = 1$  hat



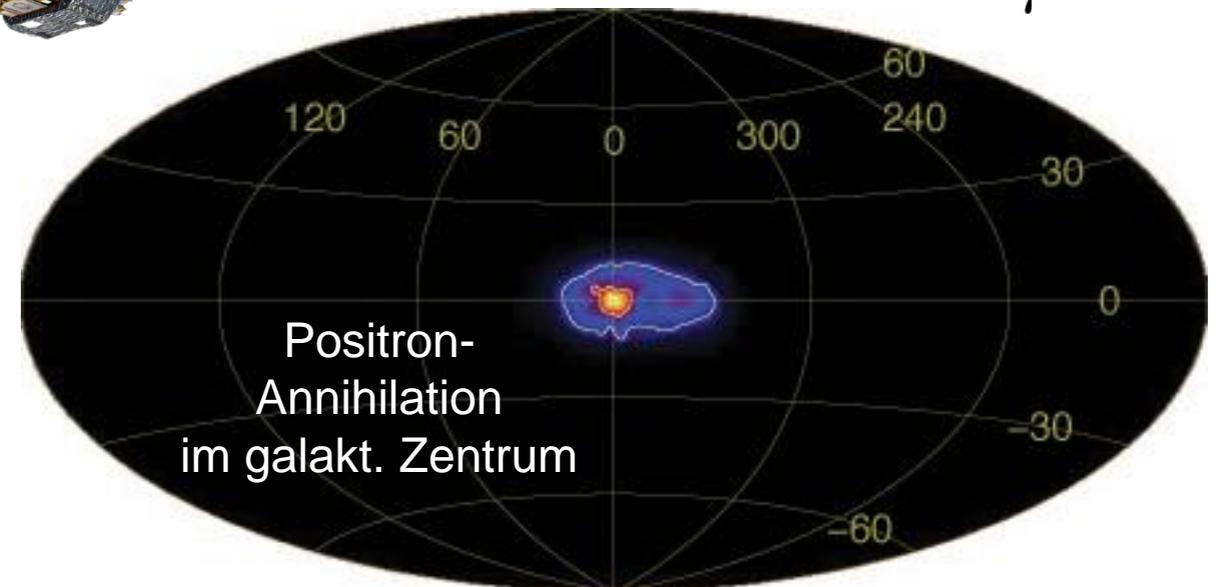
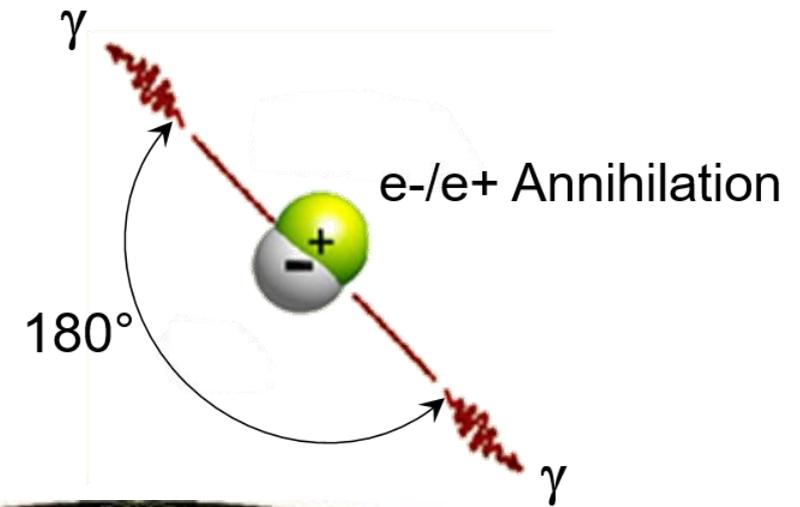
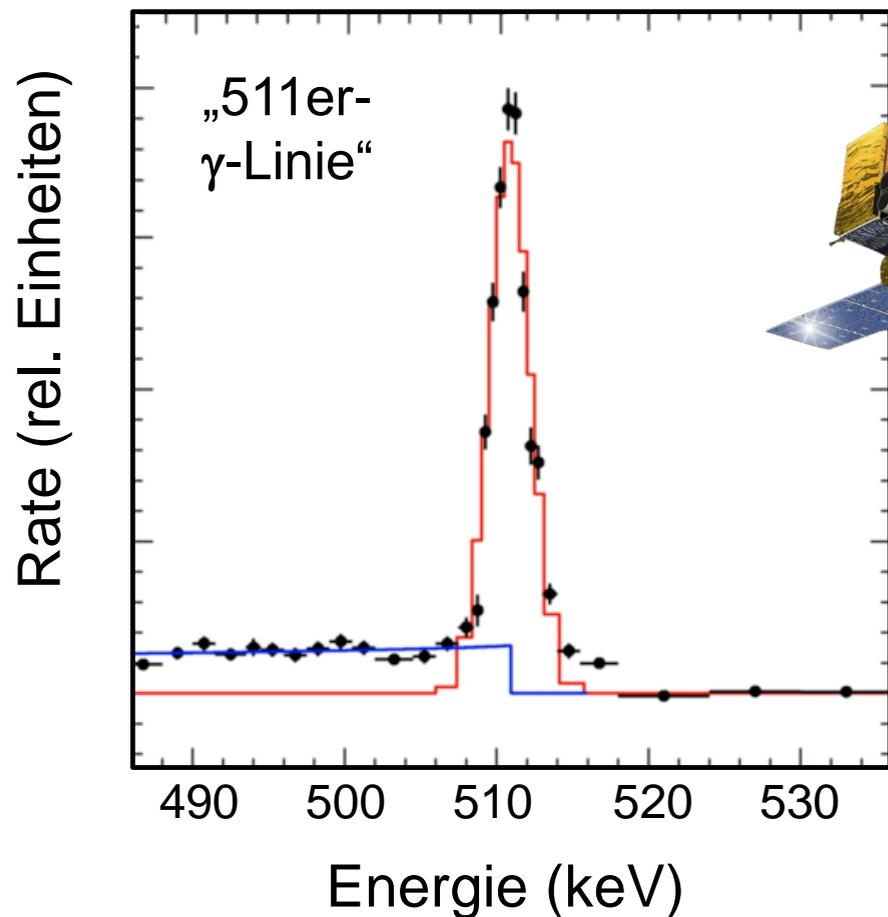
- **Ortho-Positronium** ( $\uparrow\uparrow$ ):  
Gesamtdrehimpuls  $J = 1$   
 $e^+ + e^- \rightarrow 3\gamma$   
da  $\gamma$  einen Spin  $S = 1$  hat

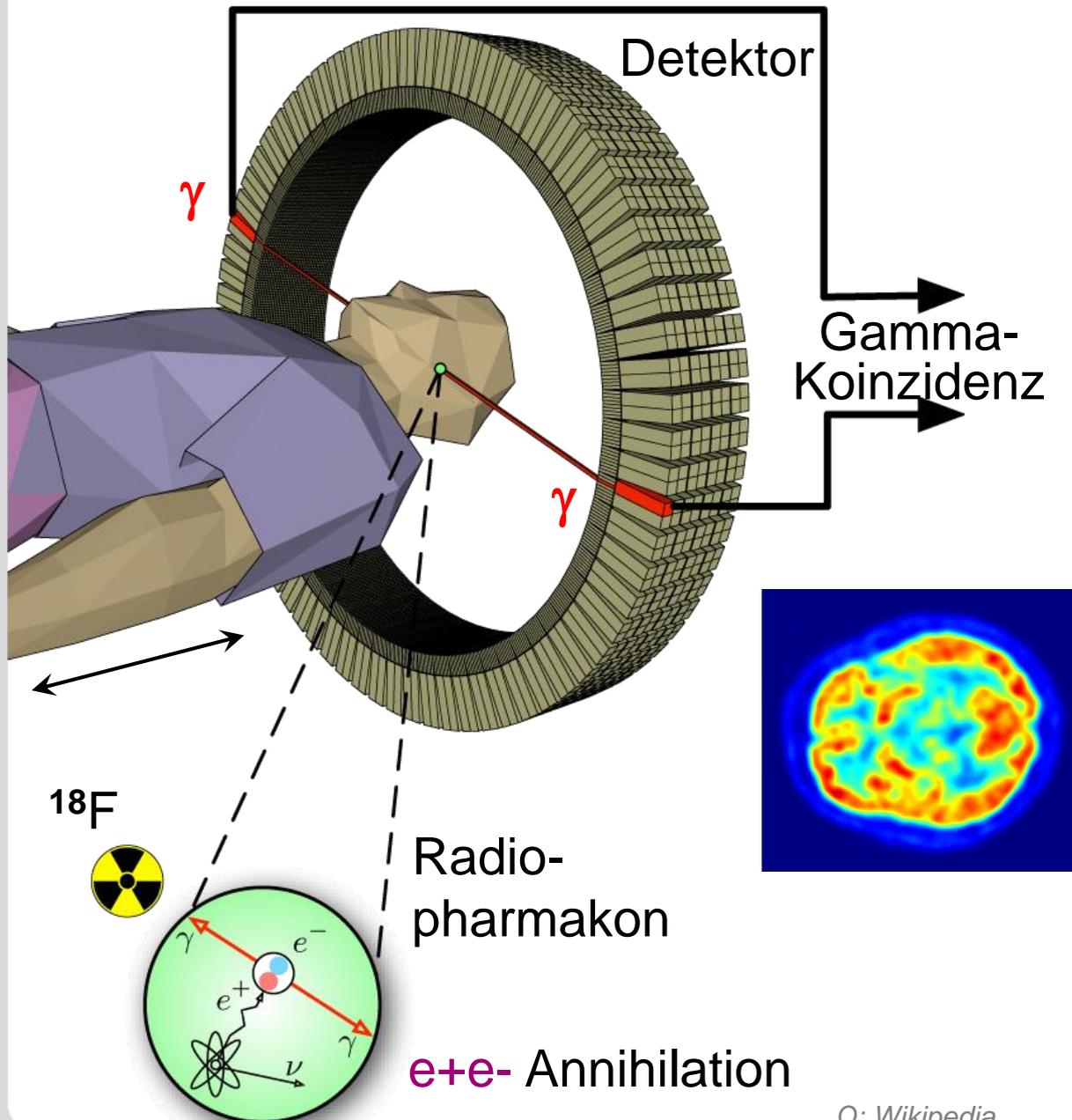


# Positron-Annihilation in der Galaxis

■ **Positronium**: die 511 keV Gammaquanten aus der  $e^+e^-$  Annihilation sind charakteristisch für diesen Prozess

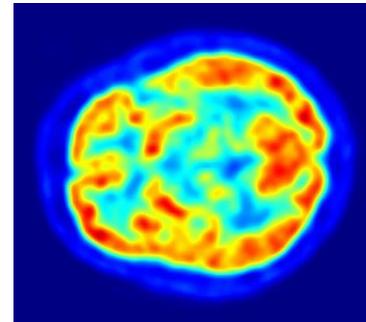
- Emission „**back-to-back**“ unter  $180^\circ$
- bei externer Quelle: nur 1 Gamma im Detektor





## ■ Positron-Emissions-Tomographie (PET):

- bildgebendes Verfahren in der Nuklearmedizin über den Nachweis der Gammas aus  $e^+e^-$  Annihilation
- Nachweis der Koinzidenz der beiden 511 keV Gammas ( $180^\circ$ )
  - ⇒ räumliche Verteilung des Radiopharmakons (z.B. F-18)
  - ⇒ 3D Abbildung der Stoffwechselvorgänge (Onkologie)



Q: Wikipedia

# Positronium – Anwendung: PET

- **F&E-Arbeiten (Bachelor/Master):**  
schnellere Detektoren & Elektronik,  
Signalverarbeitung, Bildanalyse

- **Positron-Emissions-Tomographie (PET):**

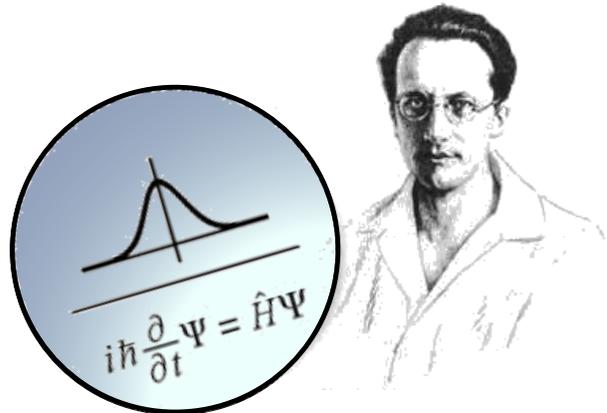
- bildgebendes Verfahren in der Nuklearmedizin über den Nachweis der Gammas aus  $e^+e^-$  Annihilation
- Nachweis der Koinzidenz der beiden 511 keV Gammas ( $180^\circ$ )



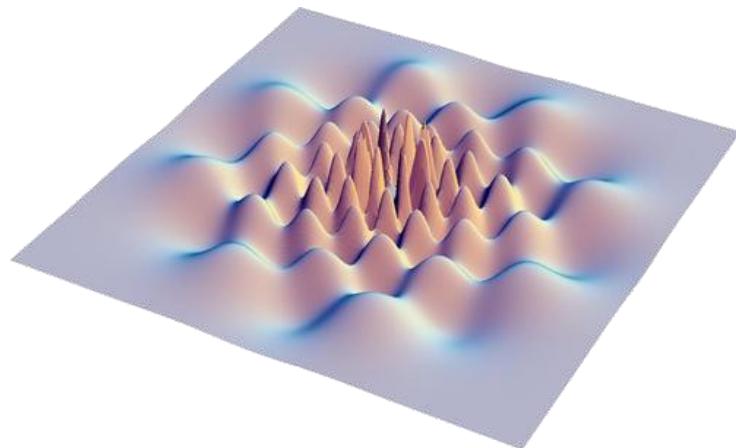
PET Scanner



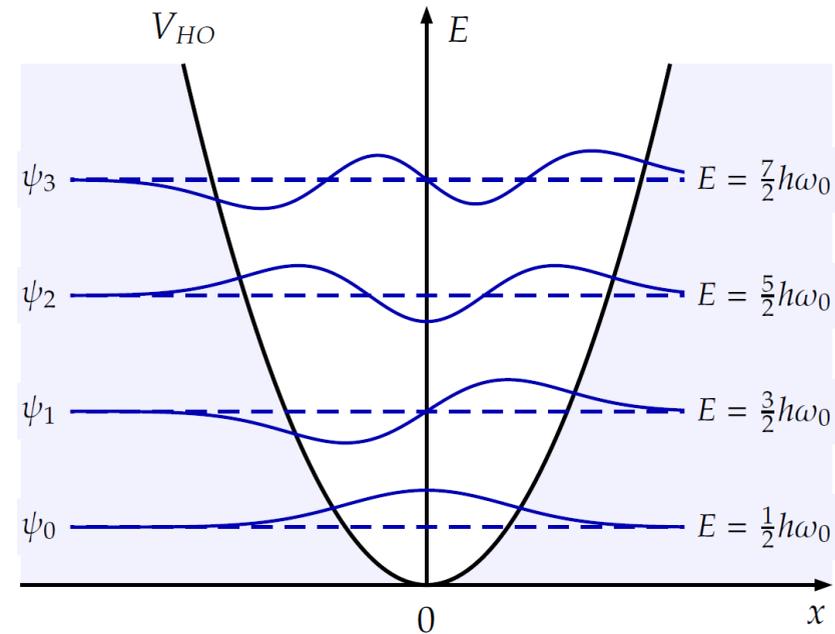
# 5. Elemente der Quantenmechanik



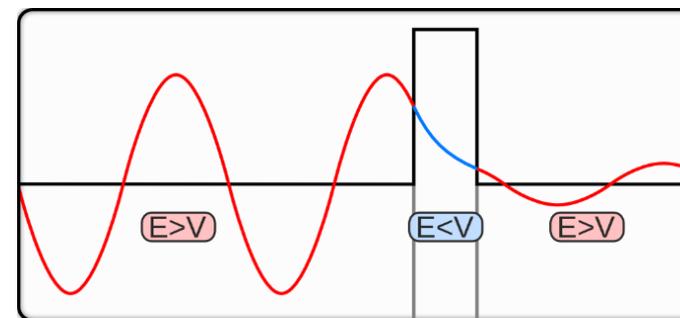
Schrödinger-Gleichung



Messungen in der QM



einfache quantenmechanische Systeme: harmon. Oszillator



Tunneleffekt

# 5.1 Schrödinger-Gleichung

- bisherige Atom-Modelle (Bohr-Sommerfeld) waren halb-klassisch, jetzt vollständig **quantenmechanische Beschreibung** von Prozessen

- Ausgangspunkt: **Wellenfunktion**, die die „Propagation von Materiewellen“ im Raum (Ortsvektor  $r$ ) und der Zeit ( $t$ ) beschreibt

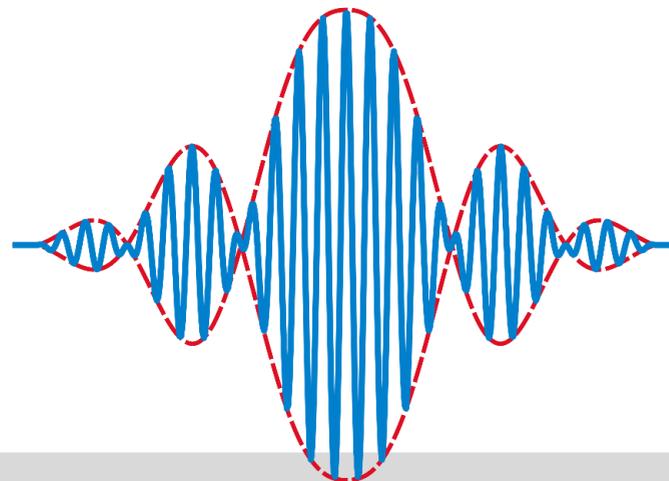
$$\Psi(\vec{r}, t) = A \cdot e^{-\frac{i}{\hbar}(E \cdot t - \vec{p} \cdot \vec{r})}$$

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \cdot e^{-i(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

$$E = \hbar \cdot \omega \quad \text{mit Kreisfrequenz} \quad \omega = 2\pi \cdot \nu$$

$$\vec{p} = \hbar \cdot \vec{k} \quad \text{mit Wellenzahl} \quad |\vec{k}| = 2\pi / \lambda$$

Amplitude

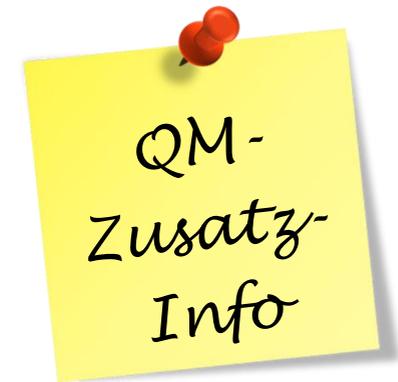


# Schrödinger-Gleichung

- Wellenfunktion  $\Psi$  ist Lösung einer Gleichung, der (zeitabhängigen) **Schrödinger-Gleichung**

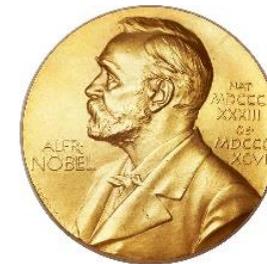
$$i\hbar \cdot \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \cdot \Psi$$

$\hat{H}$  = Hamilton-Operator (Energieoperator)



Hamilton-Operator  $\hat{H}$

- $\Rightarrow$  Zeitentwicklung des Systems
- oft aus Hamiltonfunktion des klassischen Systems, dabei Quantisierungsregeln für  $p, x$



Nobelpreis 1933



Erwin Schrödinger

- Wichtiger Spezialfall: stationäre Systeme, beschrieben durch die **zeitunabhängige Schrödingergleichung**

$$\hat{H} \Psi(\vec{r}) = E \cdot \Psi(\vec{r})$$

$$E = \hbar \cdot \omega$$

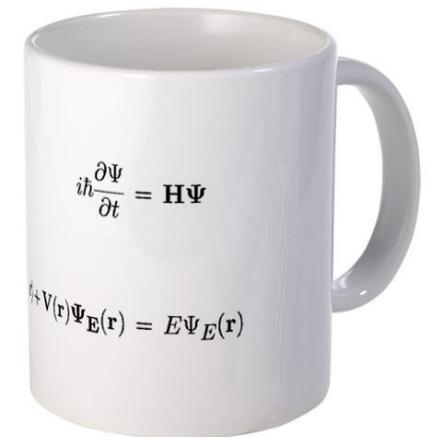
$$\Psi(\vec{r})$$

**Eigenwert-Gleichung**

quantisierte Energie-Eigenwerte

Eigenfunktion

**Grundpostulat der QM:  
Eigenwerte identisch mit Meßwerten**

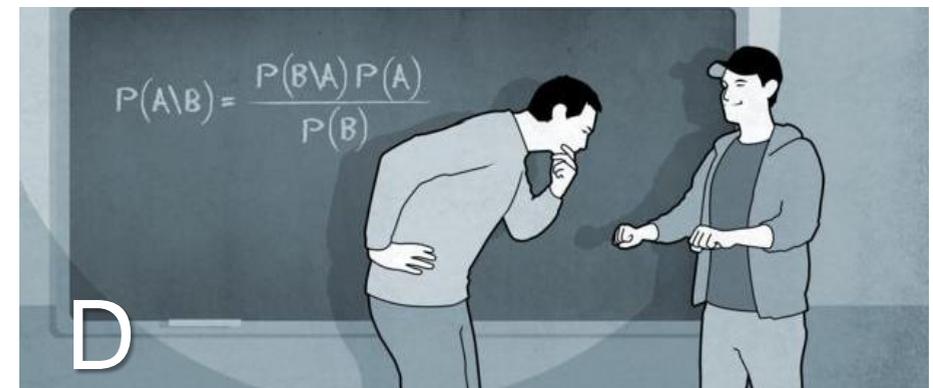
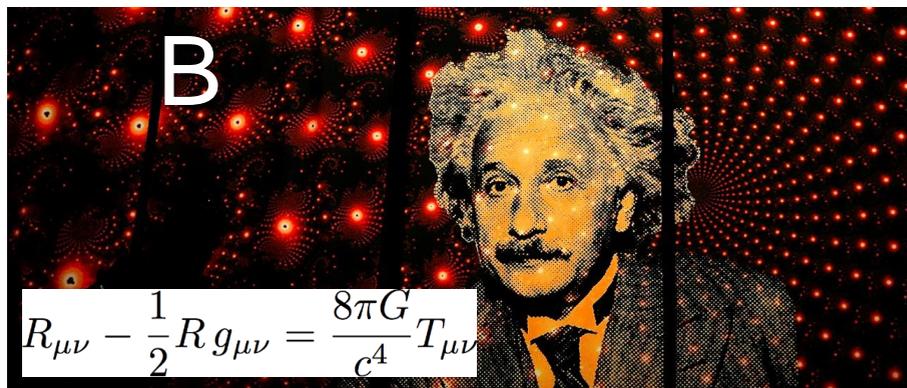
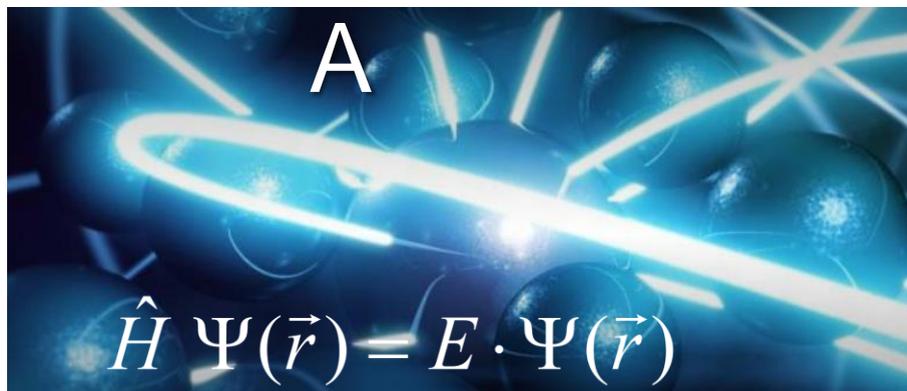
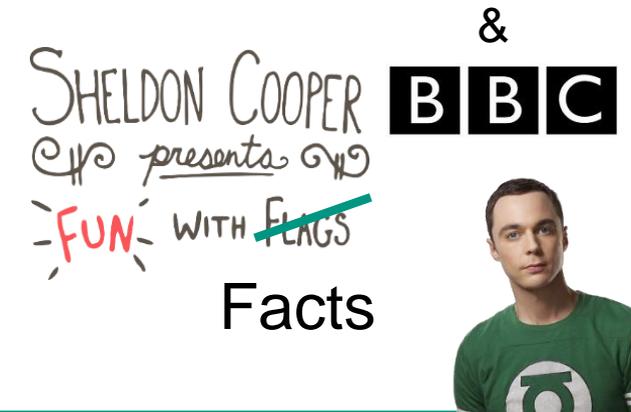


- mit der Schrödingergleichung lassen sich Atomorbitale über Elektronen-Wellenfunktionen in Potenzial  $V$  präzise berechnen

# Fun with Facts: elegante Gleichungen

■ Frage: welche Gleichung finde ich besonders elegant/schön?

- A) Schrödinger/Dirac-Gleichung
- B) Einstein-Feldgleichungen
- C) Wellengleichung
- D) Bayes Theorem

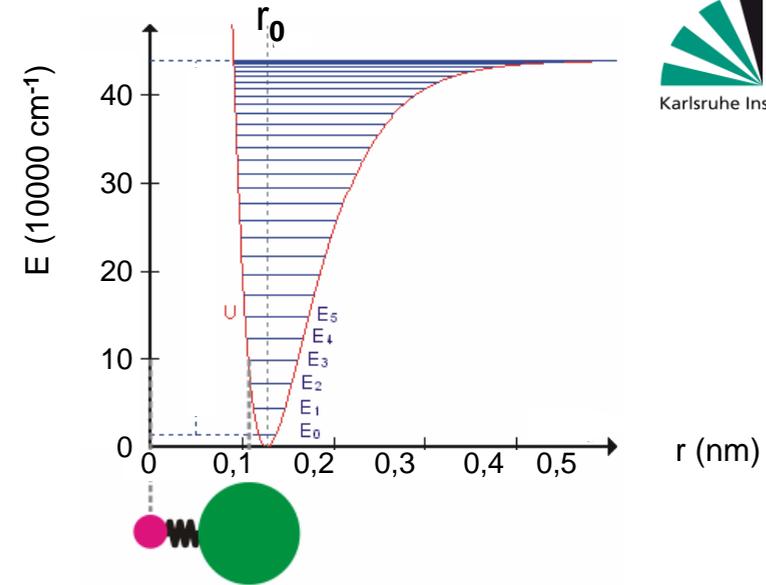
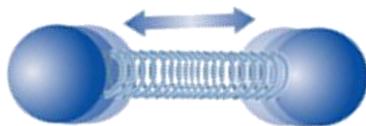


# 5.2 Einfache QM-Systeme

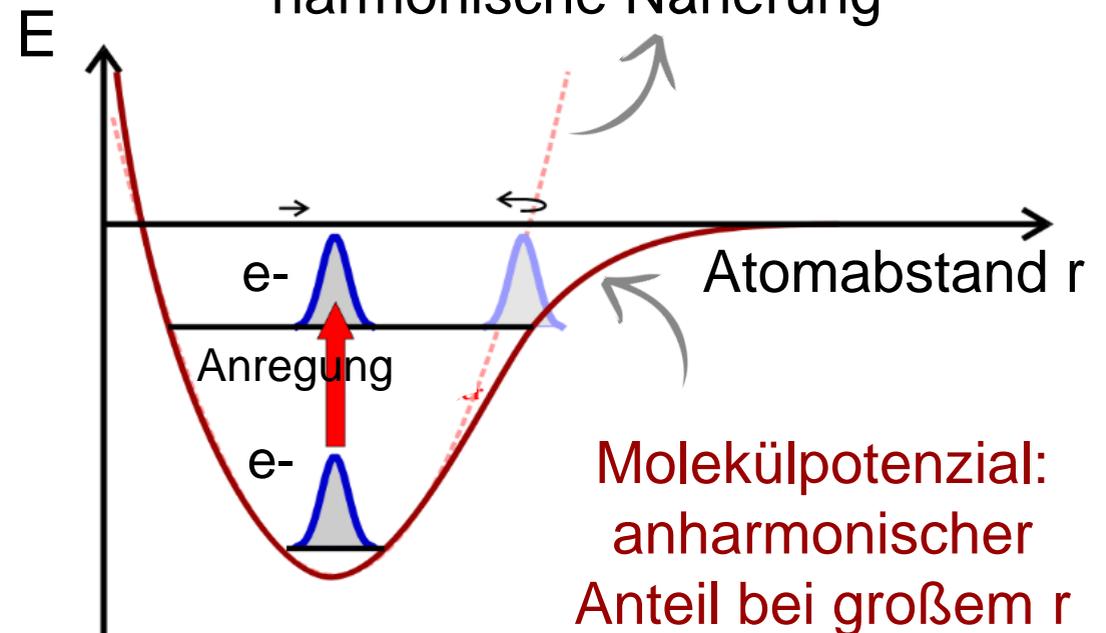
## ■ Wichtiges Modellsystem in der QM: **harmonischer Oszillator**

- typisches Potenzial in der Umgebung einer stabilen Gleichgewichtslage
- Beispiel: Schwingung von 2-atomigen Molekülen (mit anharmonischem Anteil!)

Vibration Molekül



harmonische Näherung



Molekülpotenzial:  
anharmonischer Anteil bei großem r

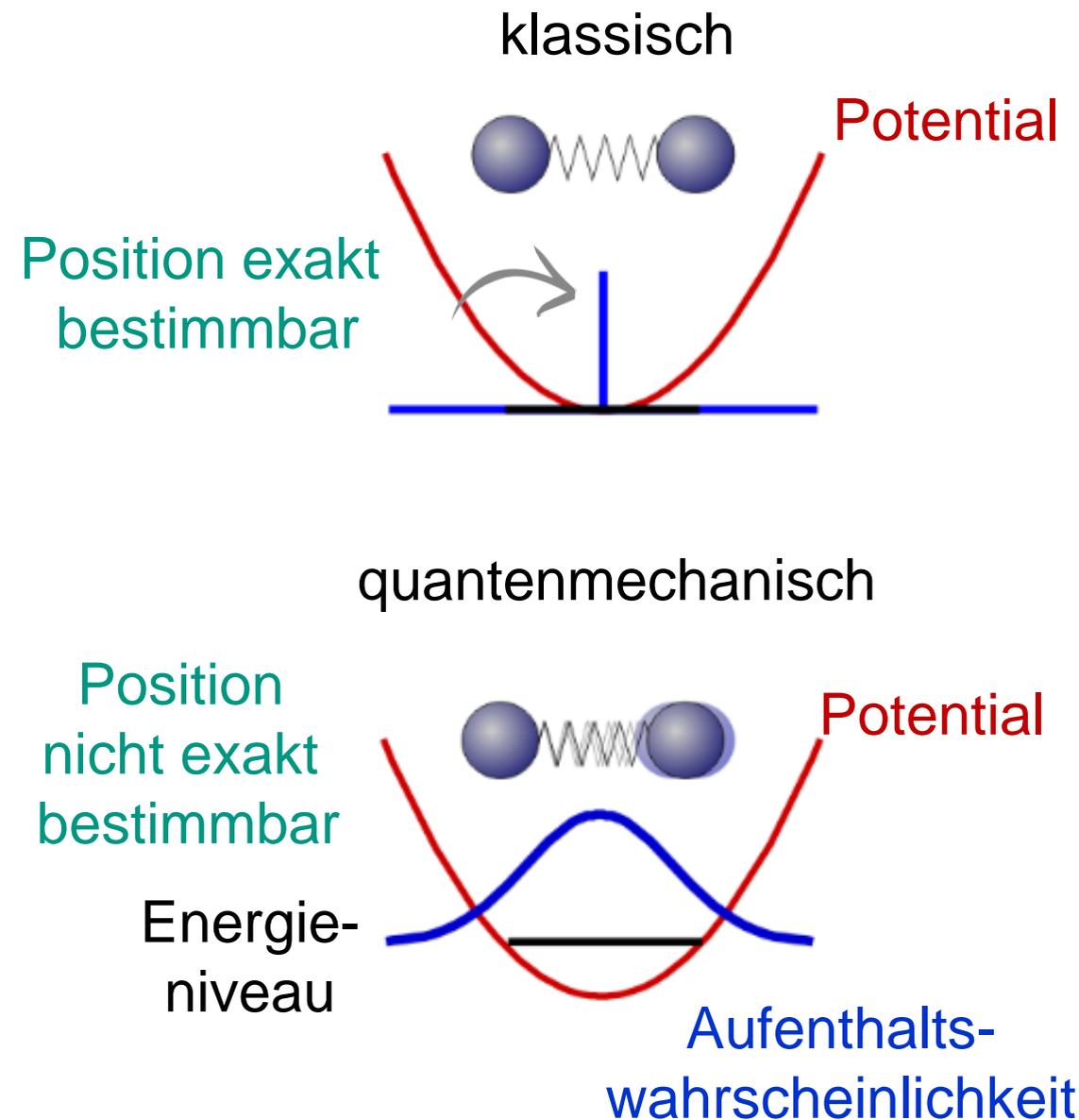
# Harmonischer Oszillator in der QM

## ■ Wichtiges Modellsystem in der QM: **harmonischer Oszillator**

- genaue analytische Lösung verfügbar
- eindimensionaler harmonischer Oszillator mit Eigen(kreis-)frequenz  $\omega$ :

$$V(x) = \frac{1}{2} k \cdot x^2 = \frac{1}{2} m \cdot \omega^2 \cdot x^2$$

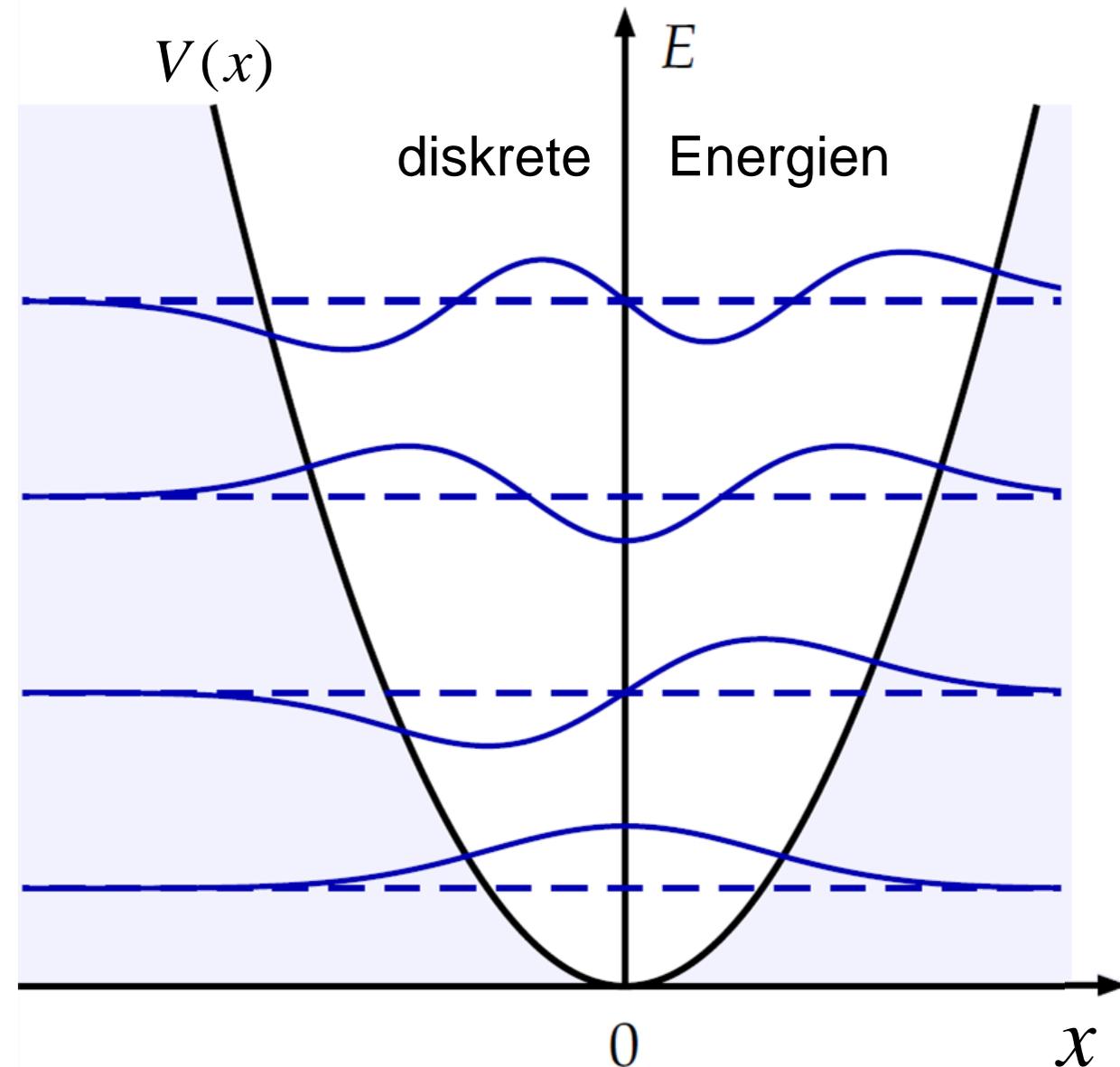
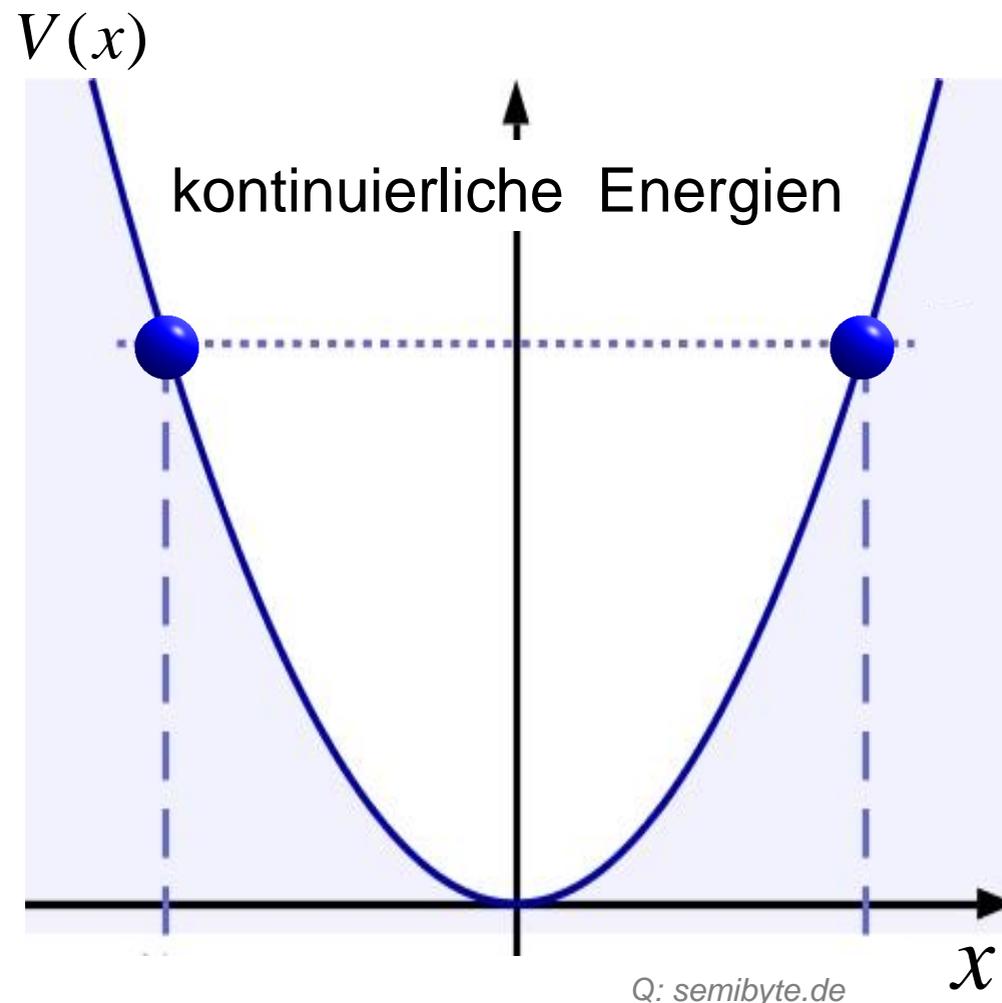
klassische Beschreibung mit  $\omega^2 = k / m$



# harmonischer Oszillator (1-dim)

## ■ Harmonischer Oszillator: Unterschiede zwischen klassischem und QM Fall

- klassisch: Kontinuum
- **QM: diskrete Energiewerte**



# Nullpunktenergie

## ■ Harmonischer Oszillator in der Quantenmechanik:

### - Nullpunktenergie

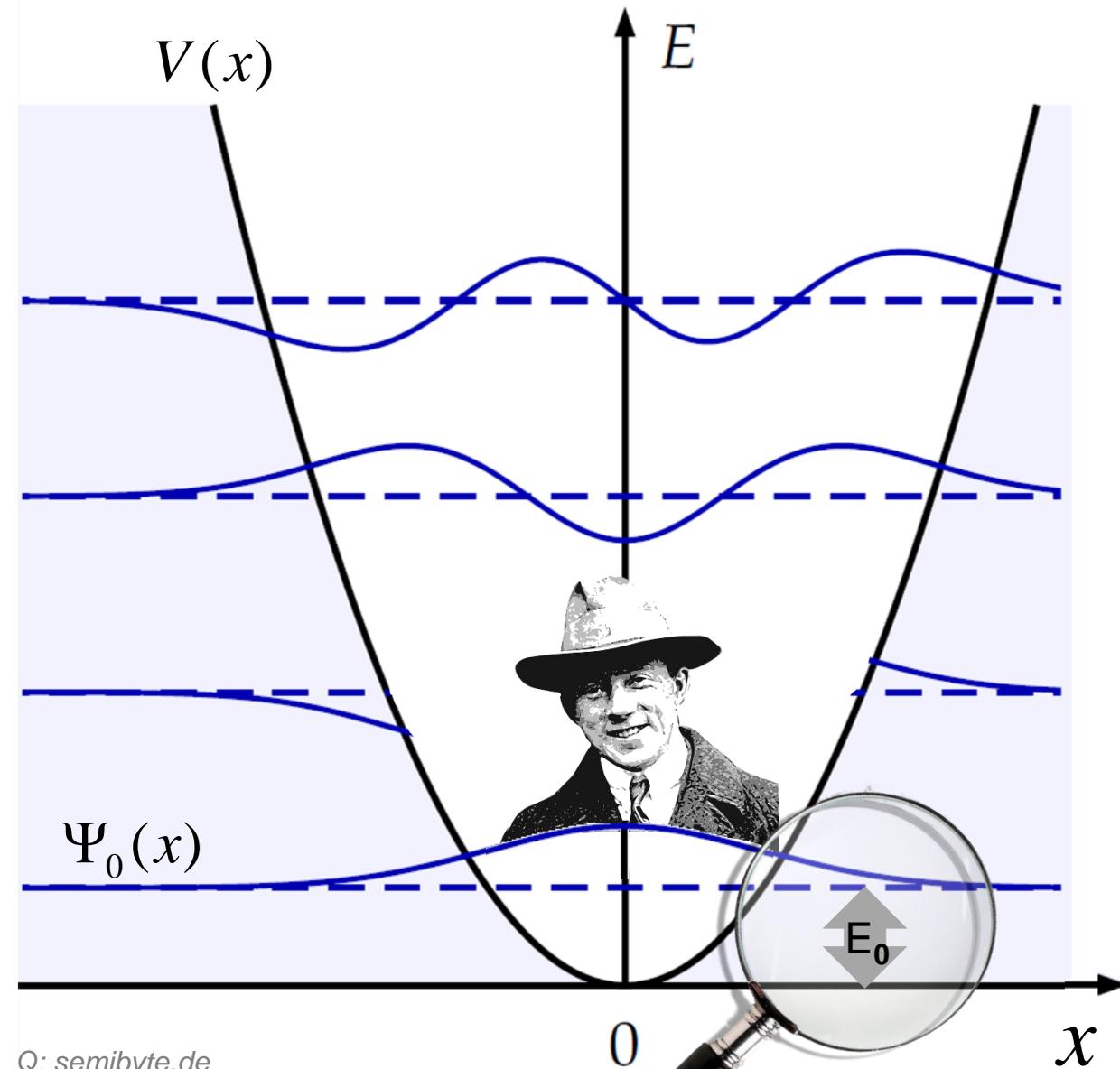
$$E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}$$

### - Heisenbergsche Unschärferelation:

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

### - $\Psi_0(x)$ : Gauß-förmige Wellenfunktion, die um $x = 0$ zentriert ist

Nullpunktenergie:  $\frac{\hbar\omega}{2}$



Q: semibyte.de

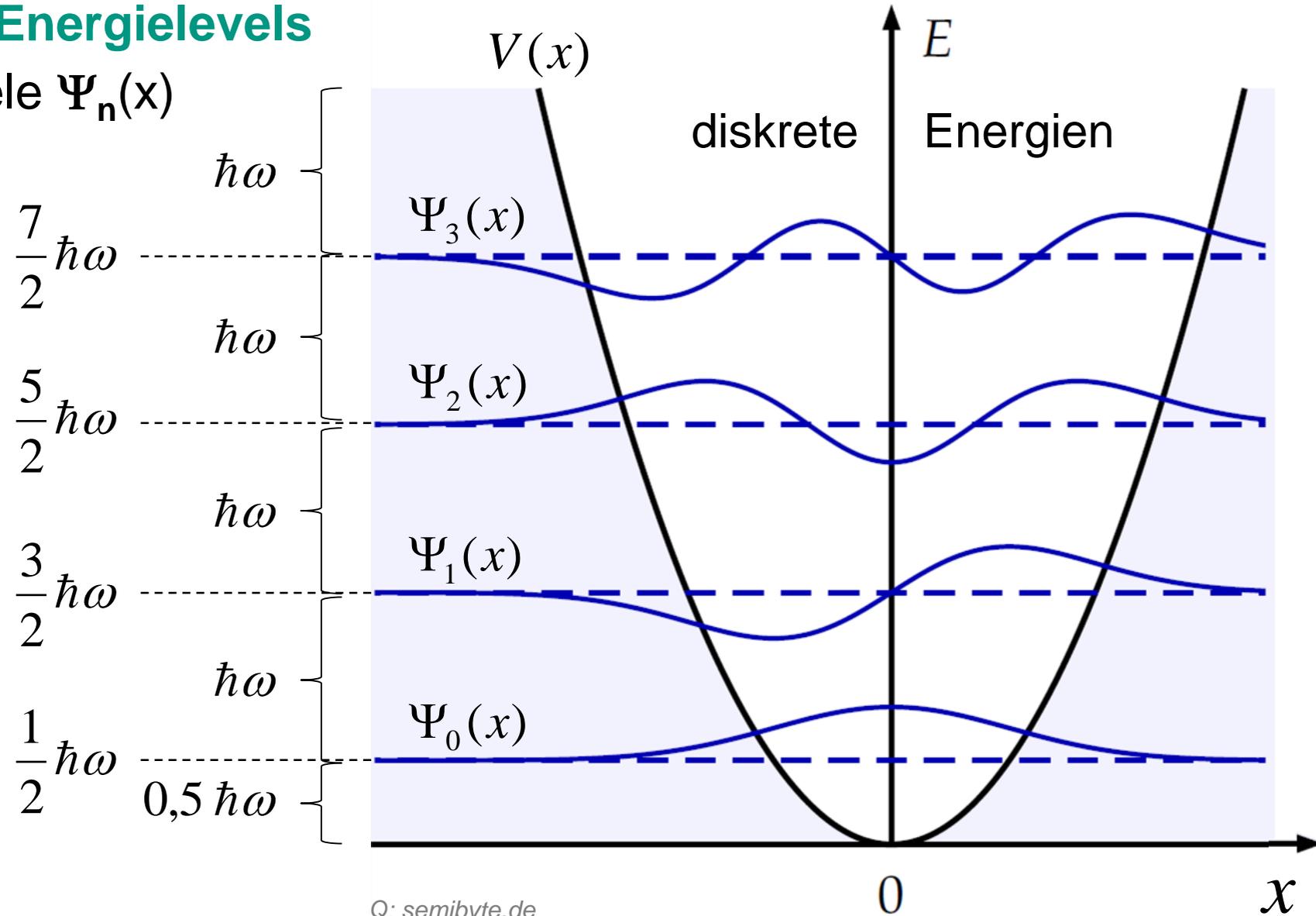
# Energieniveaus

■ jede Eigenfunktion  $\Psi_n(x)$  hat ihren Energieeigenwert  $E_n$ :

- äquidistante Energielevels

- unendliche viele  $\Psi_n(x)$

$$E_n = \hbar\omega \cdot \left( n + \frac{1}{2} \right)$$



Q: semibyte.de

# Einschub: Parität (1)

- **Parität P** = **Symmetrie** gegenüber einer **Spiegelung am Ursprung**

$$\Psi(x) \rightarrow \Psi(-x) \quad (\text{hier: 1-dim.})$$

$$\text{Ortsvektor: } \hat{x} \rightarrow -\hat{x} \quad \text{Impulsvektor: } \hat{p} \rightarrow -\hat{p}$$

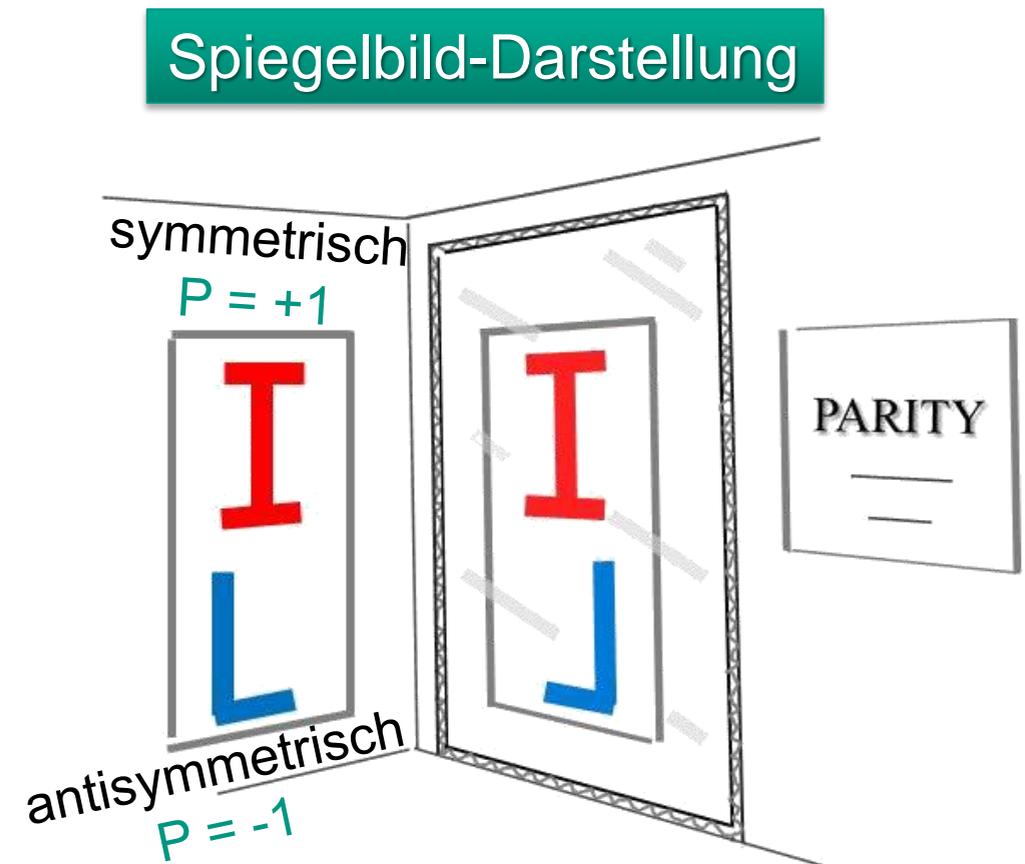
- **Parität P** allg. in 3-dim. - Koordinaten

$$P: \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

- **Parität P** - Eigenwerte

+1: gerade, even (symmetrisch)

-1: ungerade, odd (anti-symmetrisch)



# Einschub: Parität (2)

- **Parität P** = **Symmetrie** gegenüber einer **Spiegelung am Ursprung**

$$\Psi(x) \rightarrow \Psi(-x) \quad (\text{hier: 1-dim.})$$

- **Parität P** einer Wellenfunktion

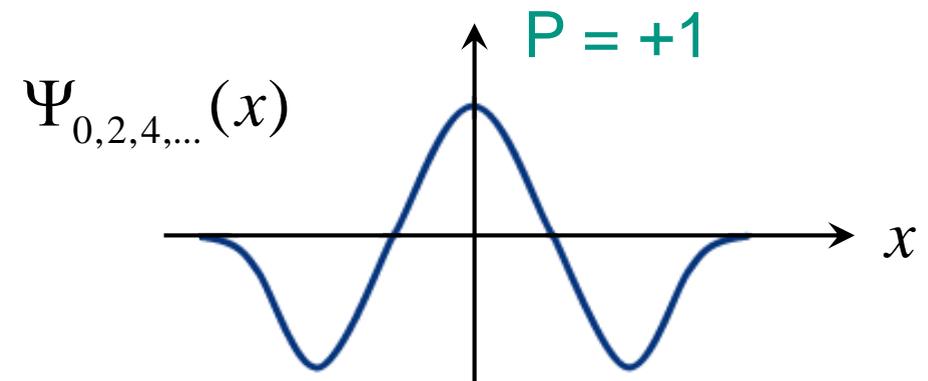
$$P \Psi(\vec{r}) = e^{i\varphi/2} \cdot \Psi(-\vec{r})$$

↑  
unitärer Operator

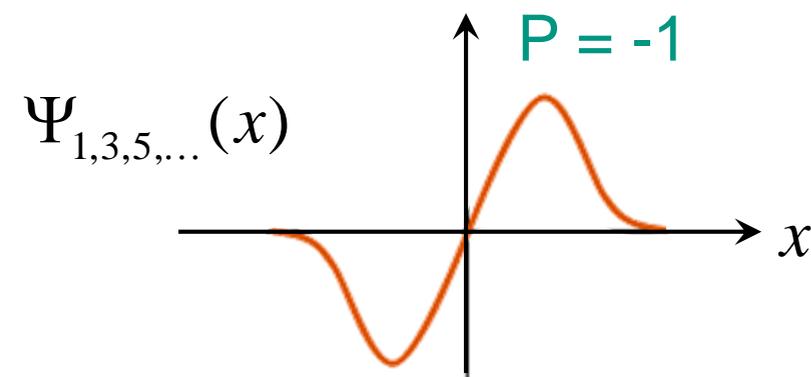
$$P = \pm 1$$

- symmetrisch:  $P = +1$
- antisymmetrisch:  $P = -1$

symmetrisch (gerade, **even**)



antisymmetrisch (ungerade, **odd**)

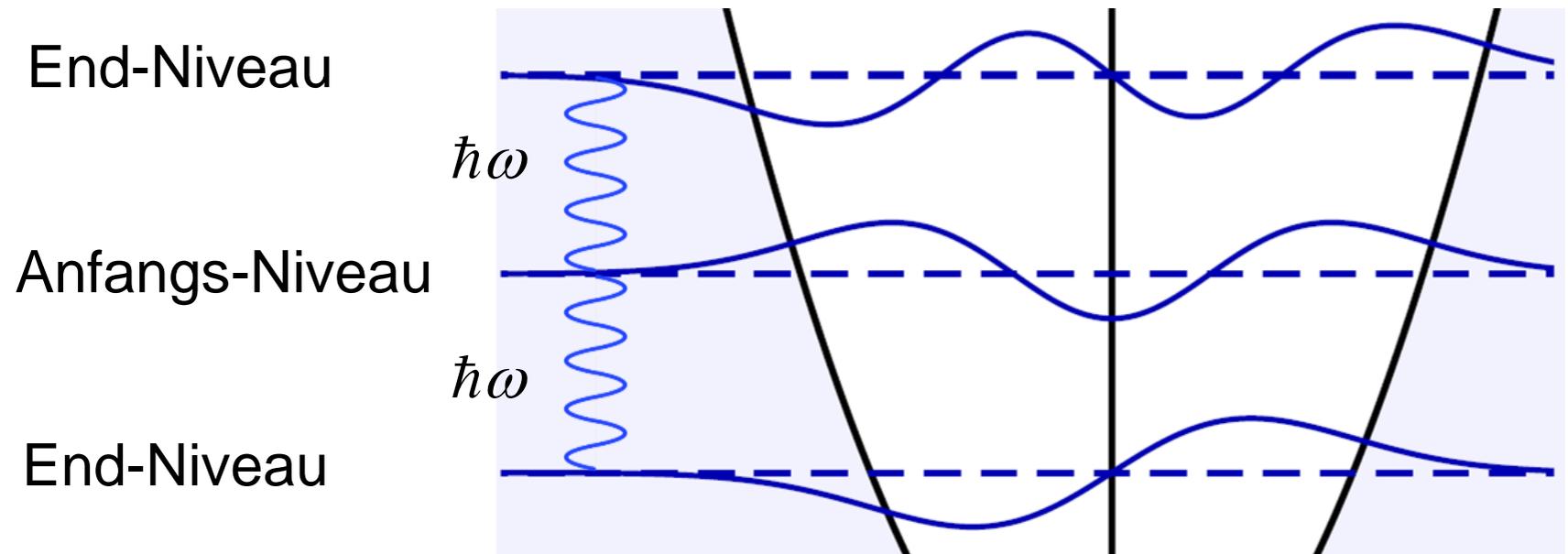


# Einschub: Parität (3)

## ■ Parität $P$ = multiplikative Symmetrie

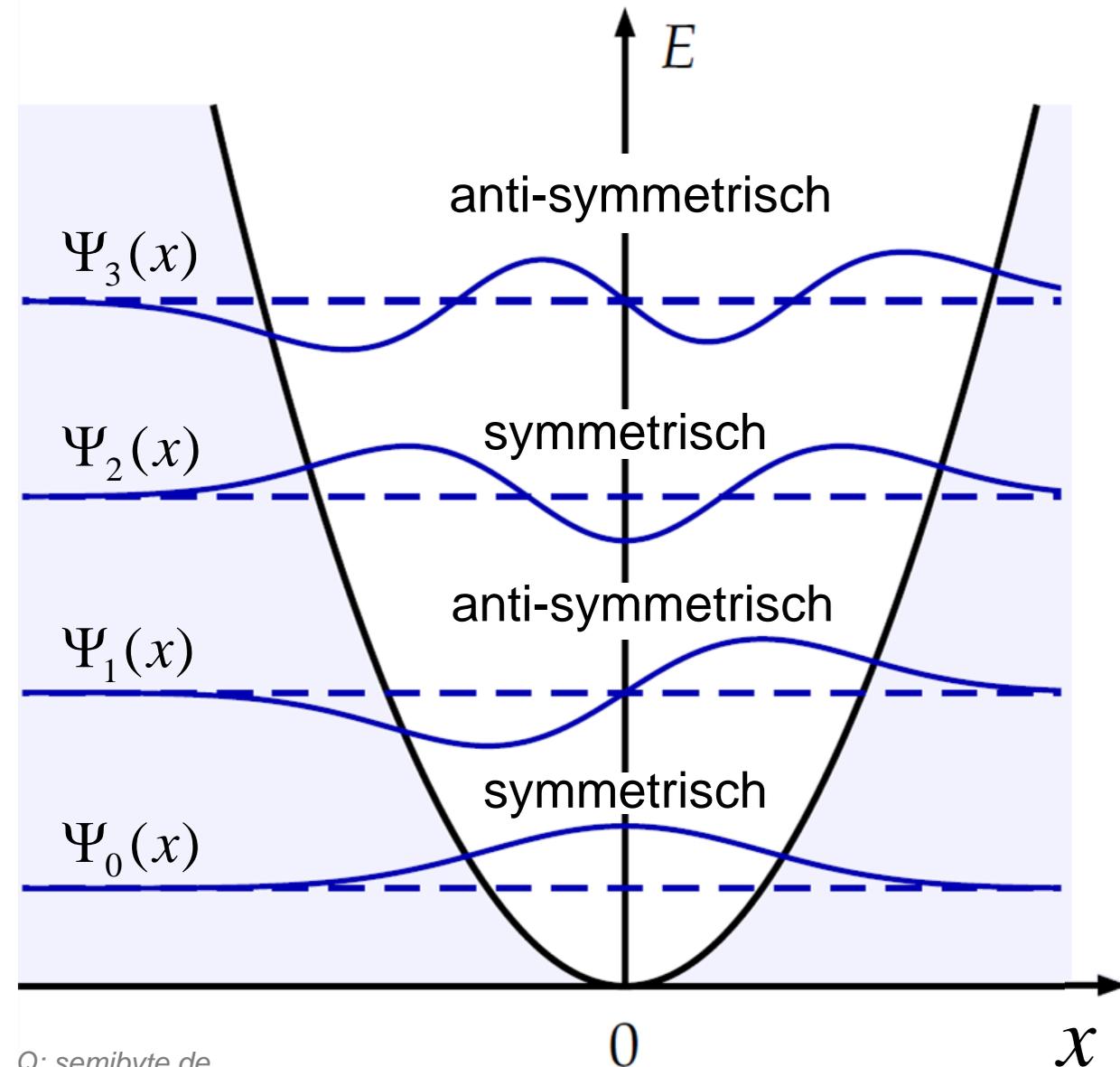
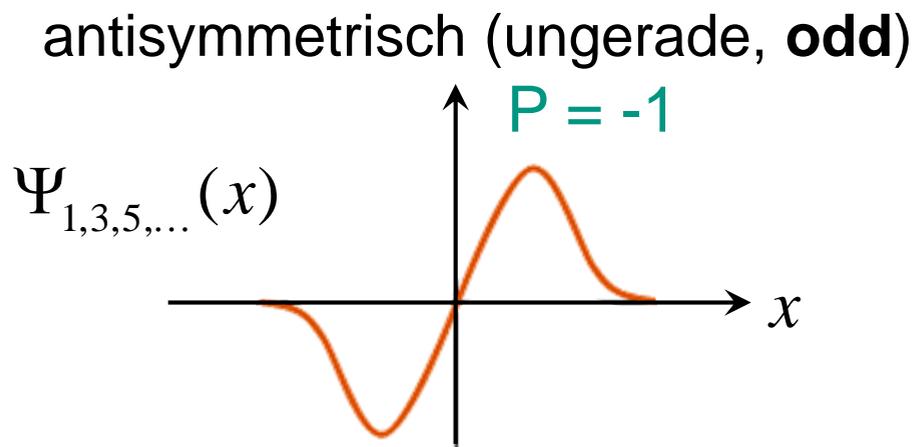
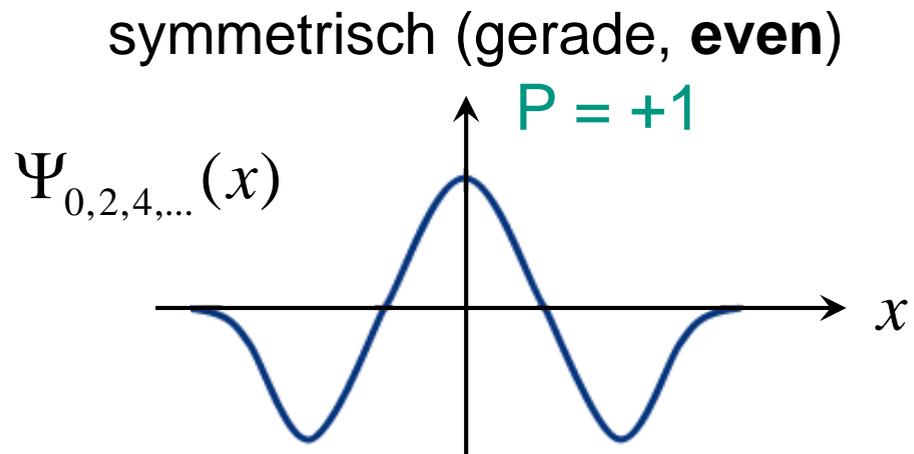
$$P(\Psi_n) = \underbrace{P(\Psi_{n+1,n-1})}_{\text{Parität des Endzustands}} \cdot \underbrace{(-1)^1}_{\text{Parität eines Photons: } -1}$$

Parität des Anfangs-Niveaus  $\nearrow$   
 $P(\text{End-Niveau})$   
 $P(\text{Photon/Photonen})$   
**Parität bleibt erhalten bei elektromagnetischer Ww.**



# Symmetrische/antisymmetrische WF

- Eigenfunktionen mit positiver bzw. negativer **Paritäts-Symmetrie P**



Q: semibyte.de

# gerade/ungerade Wellenfunktion

## ■ Parität $P$ = multiplikative Symmetrie

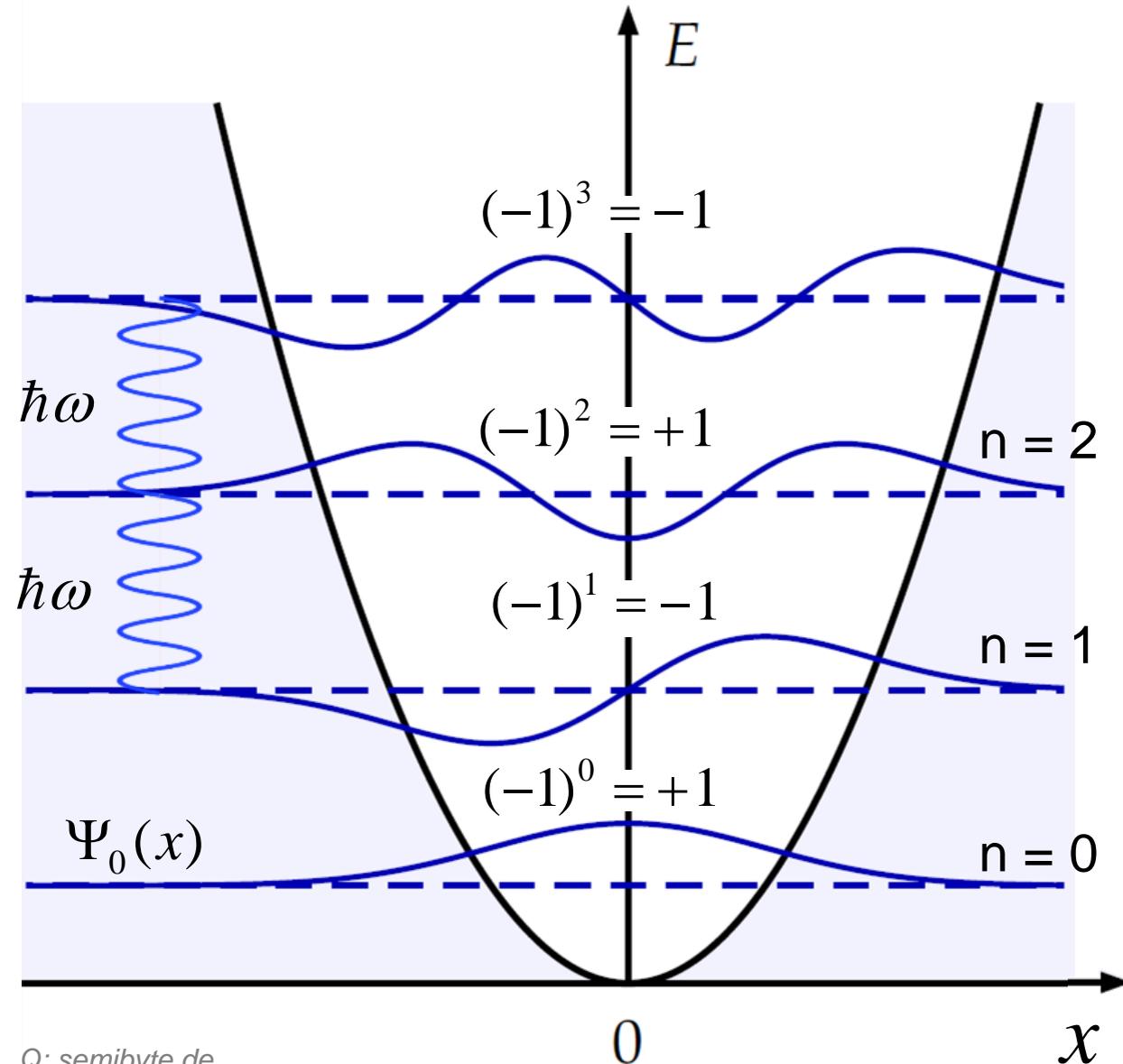
symmetrische &  
antisymmetrische  
Zustände  
wechseln sich ab

$$P = (-1)^n$$

Photon vermittelt  
jeweils den Übergang



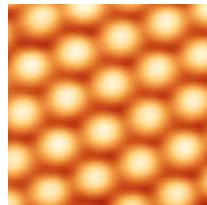
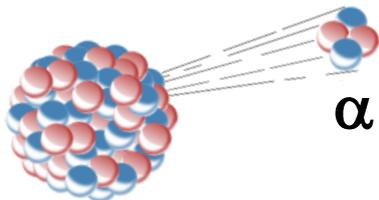
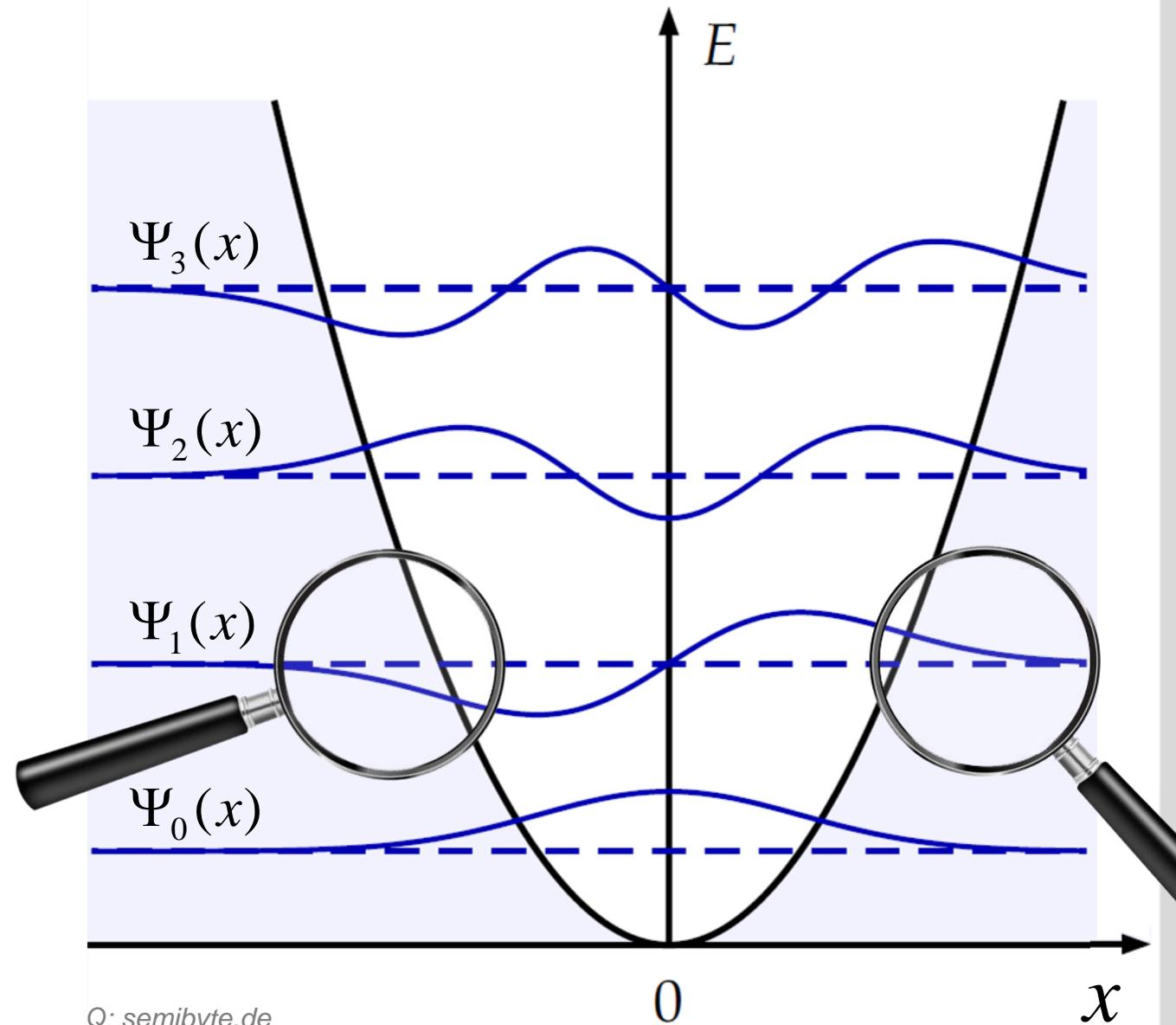
Photon	
Masse	$m = 0$
Spin	$J = 1$
Parität	$P = -1$



Q: semibyte.de

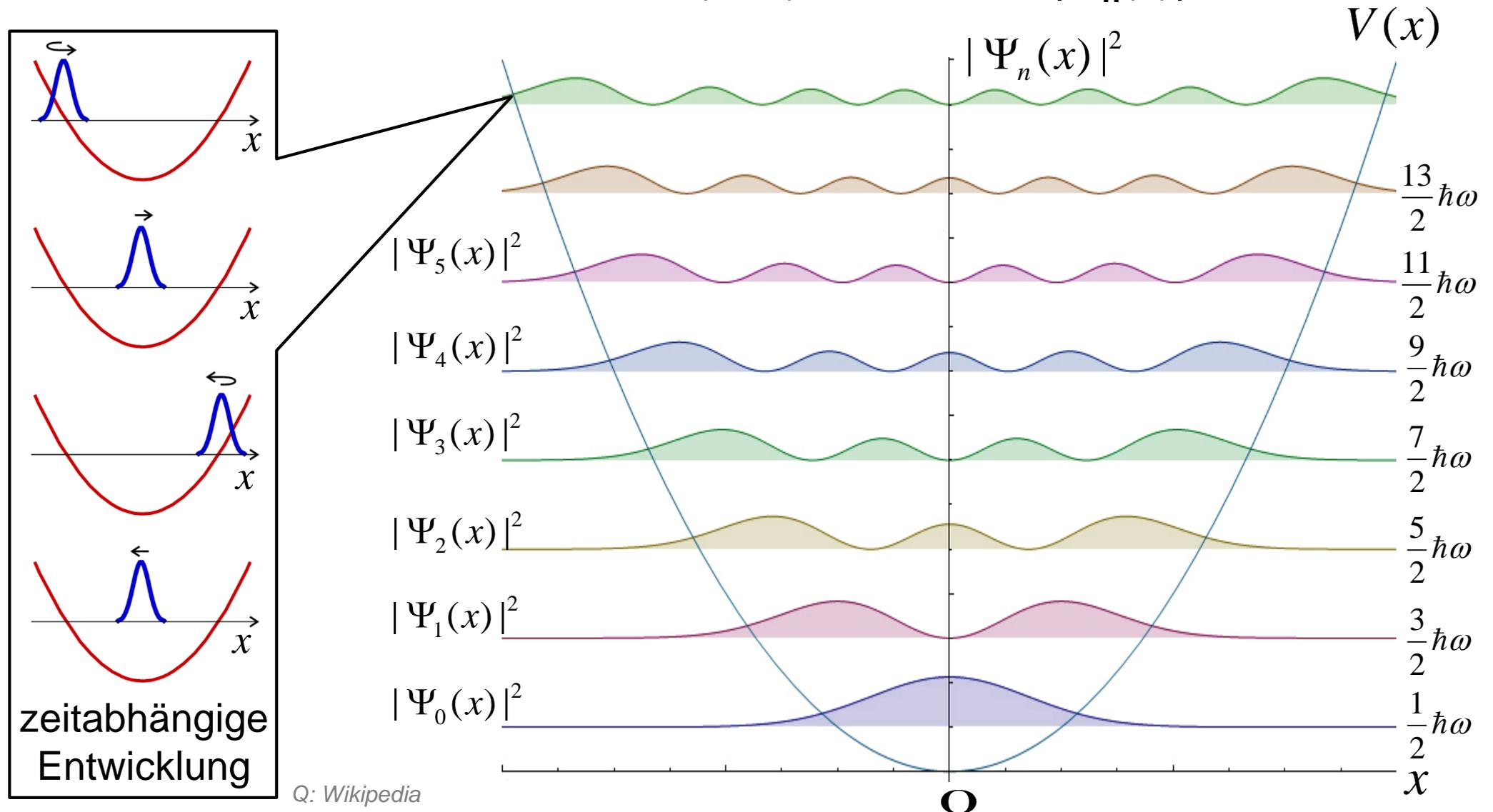
# Verlauf der Wellenfunktion bei $E < V(x)$

- Wellenfunktion „dringt ein“ in klassisch verbotene Gebiete mit  $E < V(x)$ 
  - Wellenfunktion  $\Psi_n(x)$  klingt im klassisch verbotenen Bereich mit  $E < V(x)$  **exponentiell** ab
  - daraus resultiert der **Tunneleffekt**: Teilchen können einen Potenzialwall durchtunneln, z.B. beim  $\alpha$ -Zerfall (Kap. 11.2) oder Elektron (Kap. 5.4)



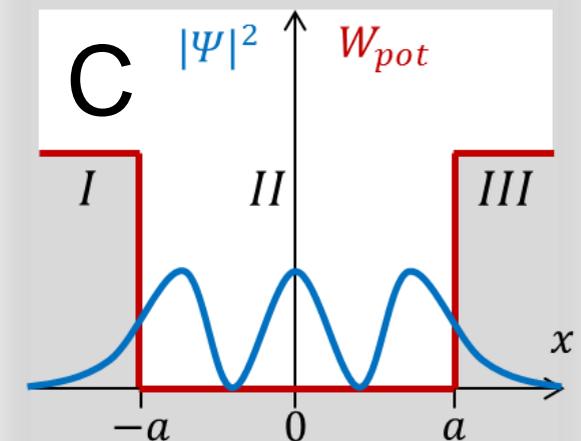
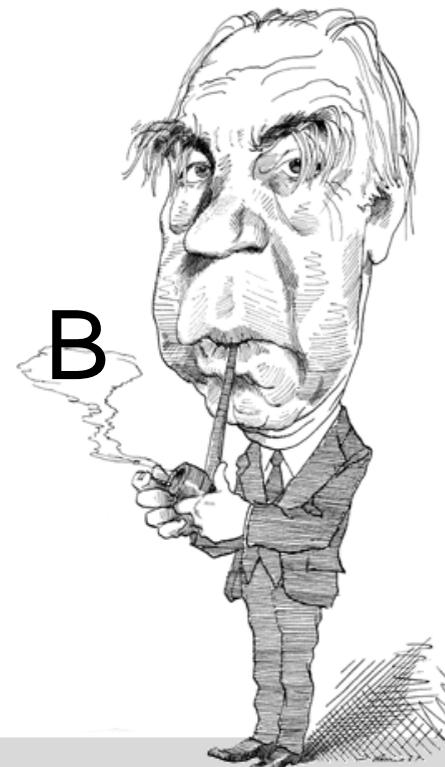
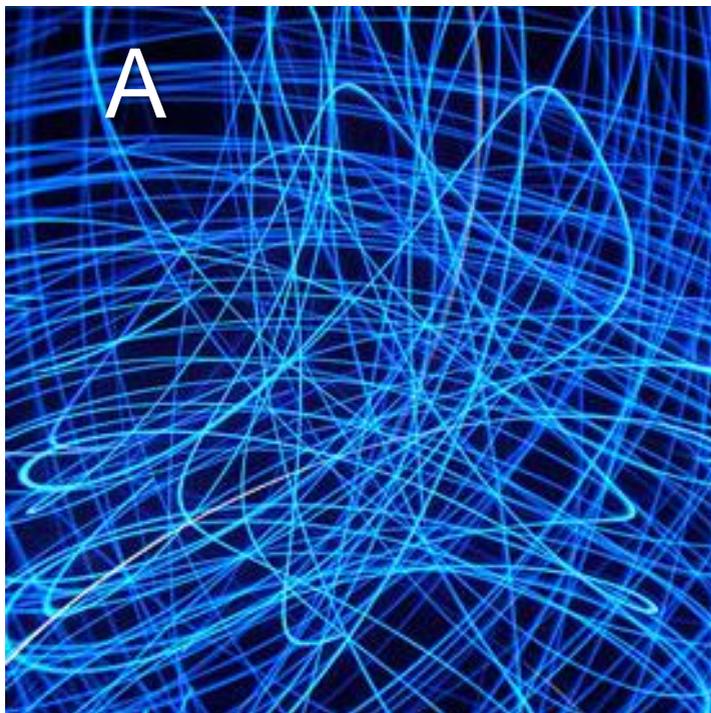
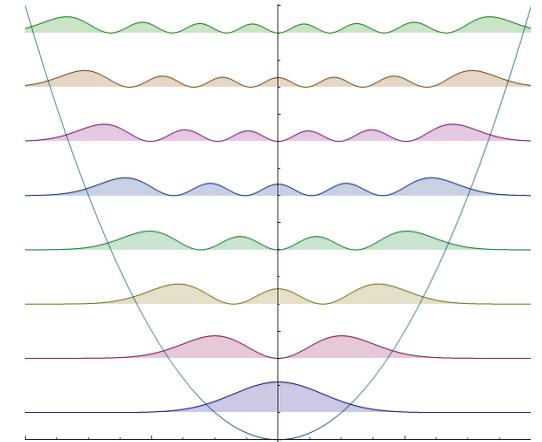
# Aufenthaltswahrscheinlichkeit

- Betragsquadrat der Wellenfunktion  $|\Psi_n(x)|^2$  definiert die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens:  $(n+1)$  Maxima für  $|\Psi_n(x)|^2$



## ■ warum ändern sich die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten mit $n$ ?

- A) Interferenzmuster ist rein **stochastisch** in der QM
- B) Übergang von reinem QM- zum **klass. Oszillator**
- C) abhängig vom **Transmission** in das klassisch verbotene Gebiet mit  $E < V$

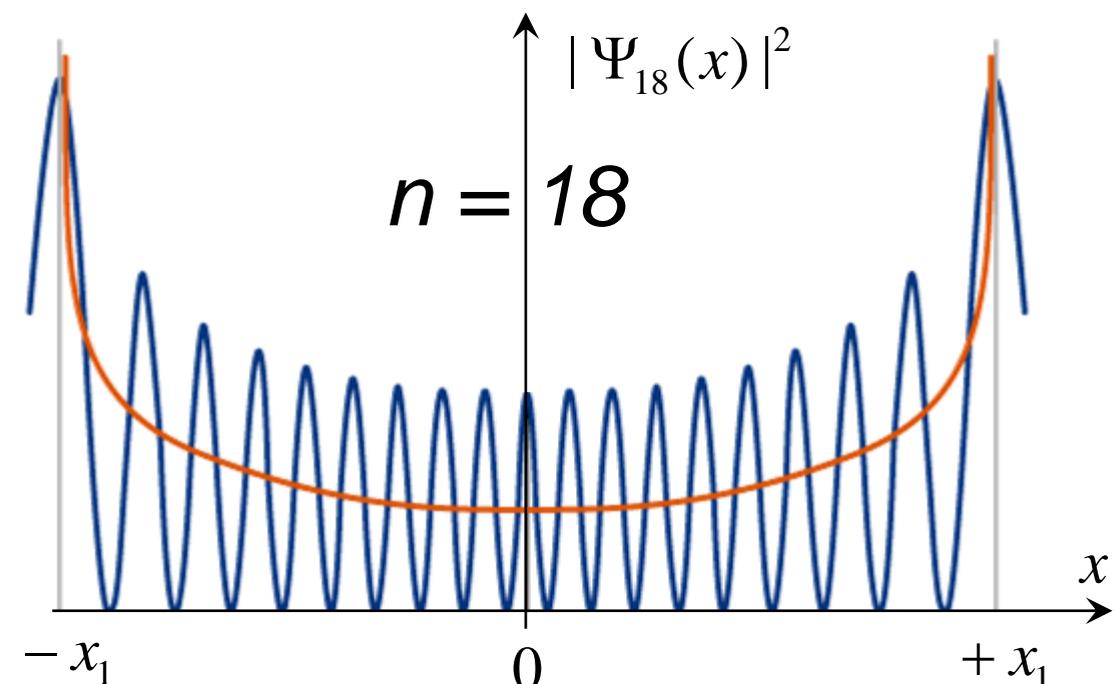
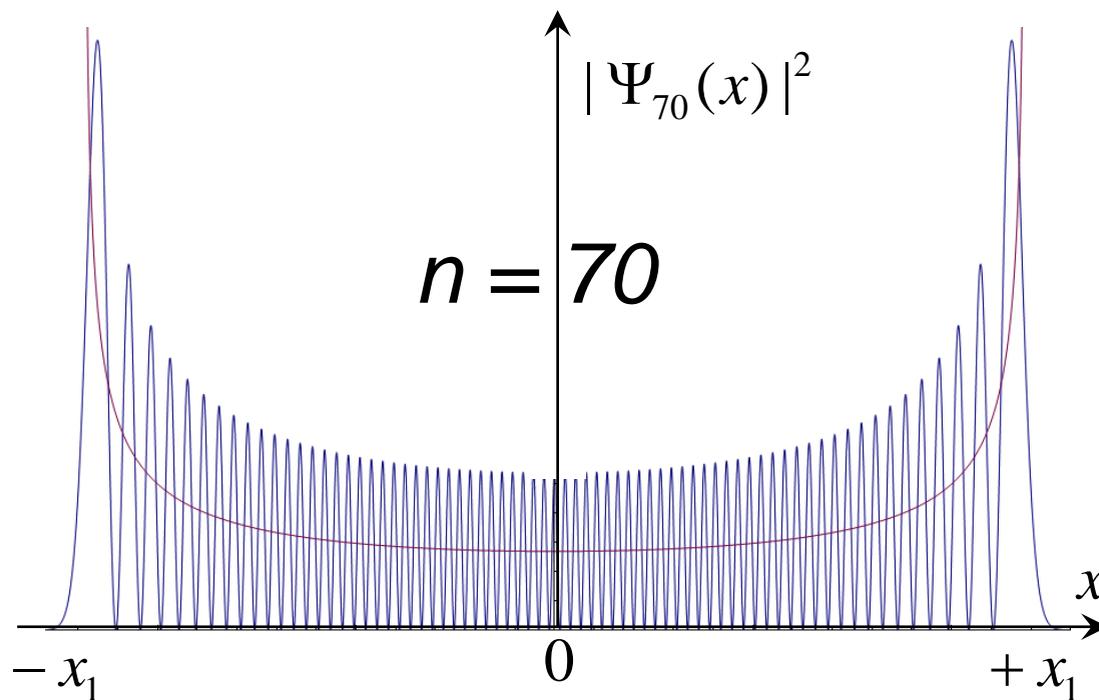


# Asymptotisches Verhalten

- **Korrespondenzprinzip:** im Grenzfall großer  $n$  ( $n \rightarrow \infty$ ) erfolgt der Übergang zum klassischen harmonischen Oszillator
  - Hauptmaxima der Aufenthaltswahrscheinlichkeit wie im klassischen Oszillator an den beiden Umkehrpunkten  $x = -x_1, +x_1$

— klass. Oszillator  
— QM-

— klass. Oszillator  
— QM-



Q: Wikipedia

# 5.3 Messungen in der QM

- Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation (1926):
  - **probabilistische** Deutung der Wellenfunktion  $\Psi(\vec{r},t)$  für Quantenobjekte
  - Wahrscheinlichkeitsdichte  $\rho$  :

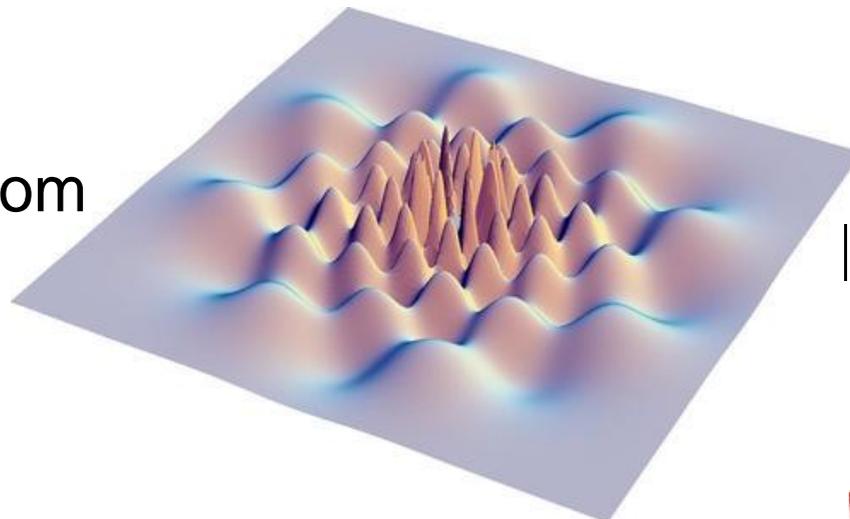
$$\rho(\vec{r},t) = |\Psi(\vec{r},t)|^2 \quad \text{mit} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(\vec{r},t)|^2 dV = 1$$

= Wahrscheinlichkeit, ein Quantenobjekt räumlich zu lokalisieren (Wellen- und Teilchencharakter des Objekts)



Nobelpreis 1954

H-Atom



$|\Psi(\vec{r},t)|^2$



Max Born

**VERY IMPORTANT**

## ■ **Observable** in der QM:

der einer Messgröße zugeordnete hermitische Operator

Beispiel: totale Energie **E** & Hamilton-Operator  **$\hat{H}$**

$$\begin{array}{ccc} & & \text{Eigenfunktion} \\ & & | \\ & \hat{H} \Psi(\vec{r}) = E \cdot \Psi(\vec{r}) & \text{Eigenwertgleichung} \\ & | & | \\ \text{Operator} & & \text{Eigenwert} \\ & & \text{(Messgröße)} \end{array}$$

## ■ **Komplementäre Observable** in der QM:

Messgrößen, die nicht simultan bestimmt werden können

Beispiele: Ort **x** & Impuls  **$p_x$** , Energie **E** und Zeit **dt**

entsprechen **nicht-kommutativen Operatoren**

# Superpositionsprinzip

## ■ Interferenz von Elektronen am Doppelspalt

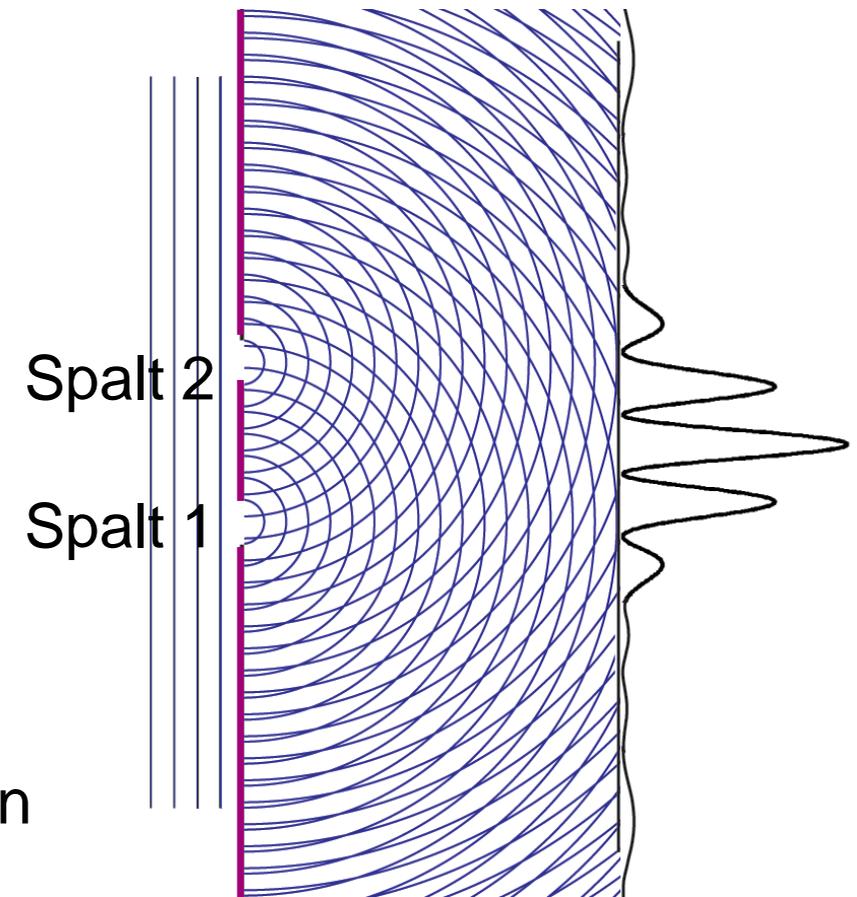
- Interferenz nur solange Superposition der Wellen aus Spalt 1 und Spalt 2 möglich,  $\Rightarrow$  n Spalte
- **Superpositionsprinzip** der QM:

$$\Psi(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Psi_i(\vec{r}, t)$$

$$\text{mit } \sum_{i=1}^n |\alpha_i|^2 = 1$$

## ■ Superposition von Zuständen

- ein Quantensystem kann in einer **Superposition von Eigenzuständen** sein
- **QM ist linear**: Superpositionen von Lösungen der Schrödinger-Gl. sind auch Lösungen



Interferenz von Elektronen  
am Doppelspalt

# Beispiel: Schrödingers Katze

## ■ Berühmtes Beispiel der Superposition von Zuständen

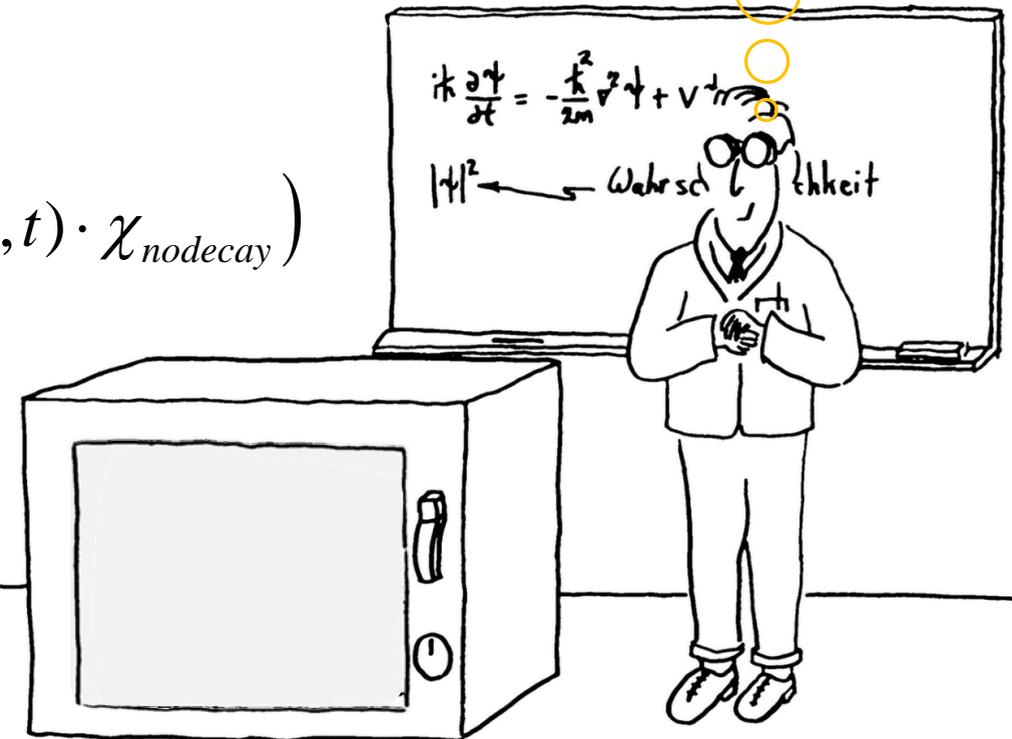
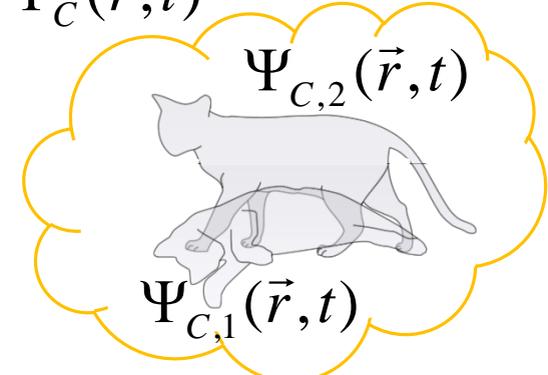
- Gedankenexperiment von E. Schrödinger (1935)
- Zustand der Katze (makroskopisches System) wird korreliert mit dem radioaktivem Zerfall eines Kerns
- Überlagerung von 2 Zuständen:

$$\Psi_C(\vec{r}, t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \Psi_{C,1}(\vec{r}, t) \cdot \chi_{decay} + \Psi_{C,2}(\vec{r}, t) \cdot \chi_{nodecay} \right)$$

- Interpretation einer QM-Messung:  
Selektion eines der beiden  
Zustände



$$\Psi_C(\vec{r}, t)$$



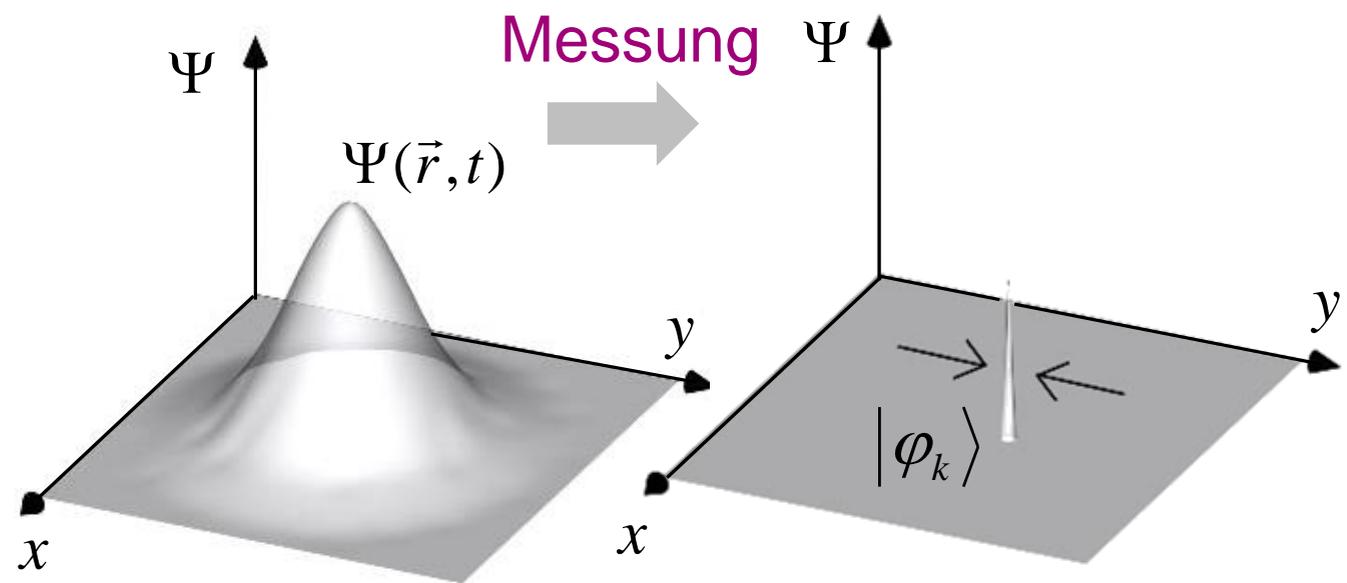
# Interpretationen einer Messung - 1

## ■ **Kopenhagen:** Bei der Messung eines überlagerten Zustands kollabiert die Wellenfunktion instantan (nicht lokale Fernwirkung)

- System werde beschrieben durch orthonormale Eigenvektoren, z.B.  $|1\rangle$  und  $|2\rangle$
- Messung projiziert einen der möglichen Eigenzustände mit Bornscher Wahrscheinlichkeit  $P_k$



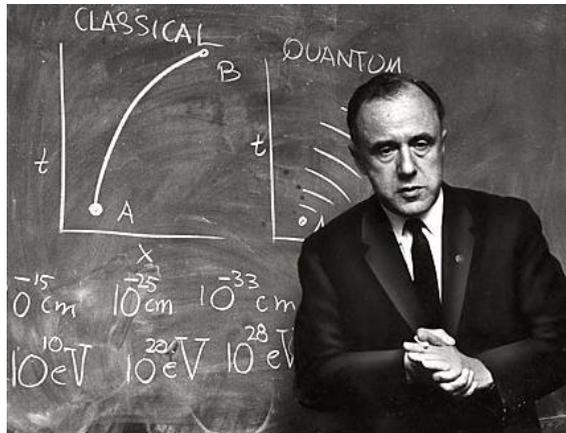
N. Bohr, W. Heisenberg, W. Pauli



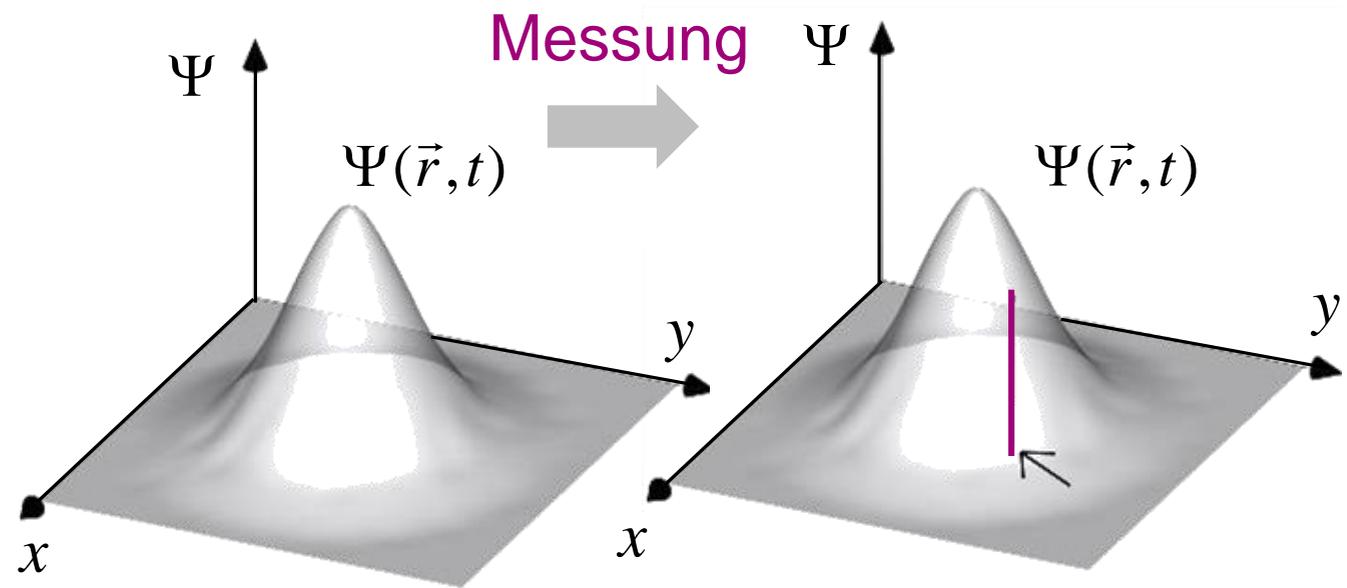
# Interpretationen einer Messung - 2

- **Viele Welten:** Bei der Messung eines überlagerten Zustands wird einer der Zustände beobachtet (viele Welten), Wellenfunktion existiert weiter

- Existenz einer universellen deterministischen Wellenfunktion  $\Psi$  (kein Kollaps von  $\Psi$ )
- lokale Theorie: Splitting in parallele Welten ist nicht zeitsymmetrisch, aber kausal



H. Everett III John Archibald Wheeler



# Interpretationen einer Messung - 3

- **Quanten-Dekohärenz:** Bei der Messung eines überlagerten Zustands ist zu beachten, dass das System in Wechselwirkung mit der Umwelt steht, z.B. einem Wärmebad
  - **Quantenmechanische Streuprozesse** (Photonen) transferieren immer Information nach außen  $\Rightarrow$  Kohärenz des Systems geht verloren
  - Quanten-Dekohärenz führt zum „Kollaps der Wellenfunktion“

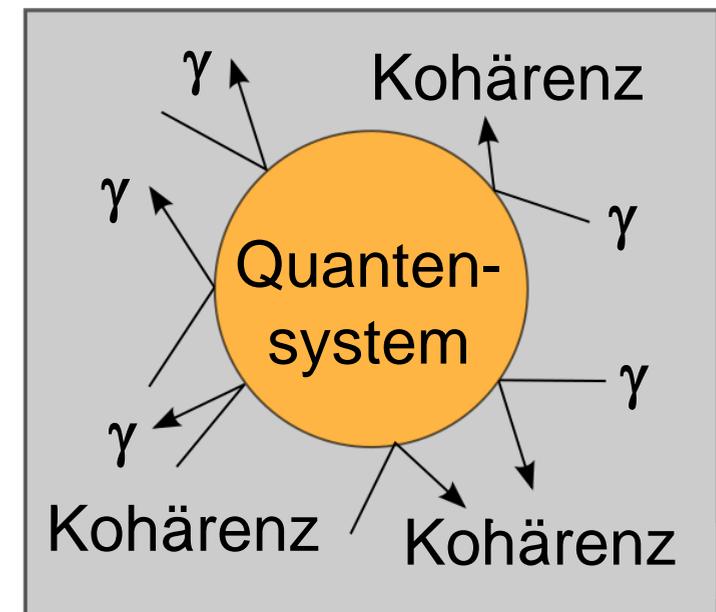


D. Bohm



H. Dieter Zeh

Quanten-  
Dekohärenz



# Fun with Facts: Schrödingers Katze

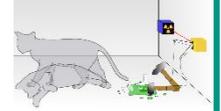
■ welche Interpretation der QM favorisiere ich?

A) Kopenhagen Interpretation: instantaner Kollaps

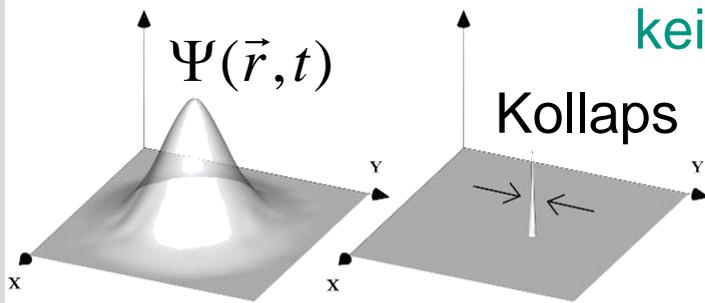
B) Viele-Welten-Interpretation von H. Everett III.

C) Dekohärenz makroskopischer Objekte

SHELDON COOPER  
presents  
~~FUN WITH FLAGS~~



Facts



keine Antwort-Superposition, bitte



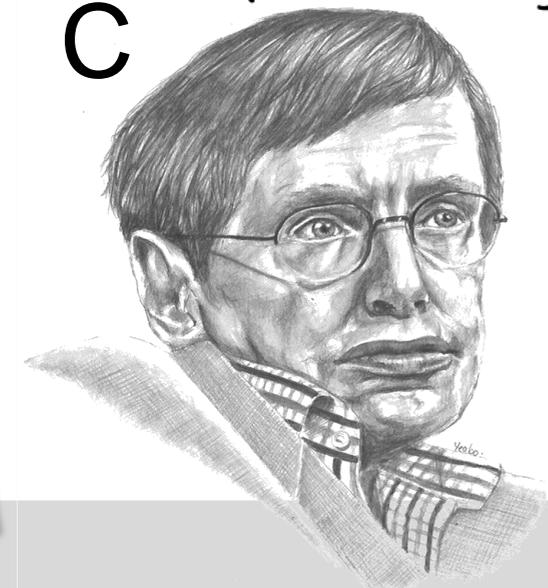
B

When I hear of Schrödinger's cat, I reach for my  Stephen Hawking

C



A





"ACTUALLY I STARTED OUT IN QUANTUM MECHANICS, BUT SOMEWHERE ALONG THE WAY I TOOK A WRONG TURN."

# Buchempfehlungen zur Interpretation der QM

