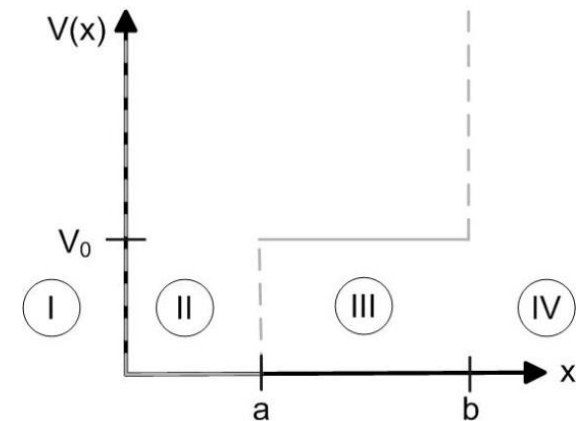
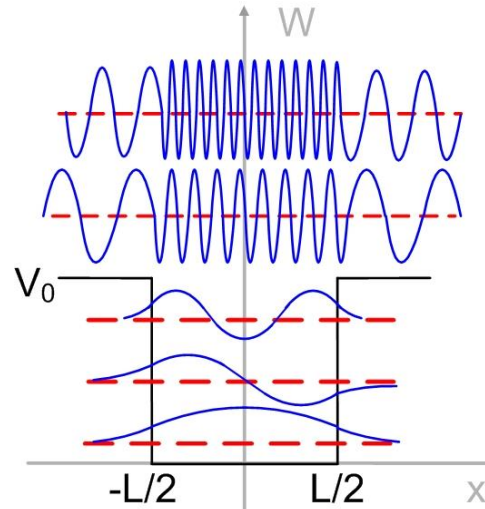
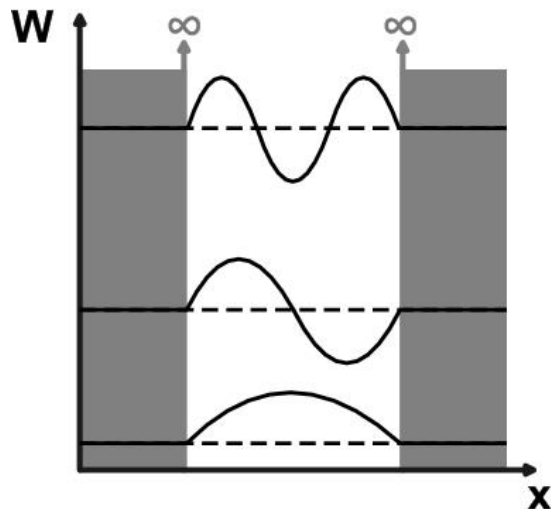


Quantenmechanische Erwartungswerte & Elektronische Zustände

2. Übung Festkörperelektronik

Lichttechnisches Institut (LTI)



Organisatorisches

Tag/Monat	April	Mai	Juni	Juli
1		Tag der Arbeit		
2			Tut 4	
3				VL 11, Ausgabe #7, IF
4				Ü 6
5		Tut 1	Ü 4	
6			VL 7	
7				Tut 6
8		VL 3, Ausgabe #3	Pfingstsonntag	
9		VL 4	Pfingstmontag	
10				VL 12
11				Ü 7
12		Tut 2	VL 8, Ausgabe #5	
13			VL 9	
14	Beginn VLZ			Tut 7
15		VL 5		
16		Ü 2		
17	VL 1, Ausgabe #1			VL 13
18	Karfreitag			Ende VLZ
19		Tut 3	Fronleichnam	
20				
21	Ostermontag			
22		VL 6, Ausgabe #4		
23		Ü 3, Gr.HS Geb. 10.50	Tut 5	
24	VL 2, Ausgabe #2			
25	Ü 1			
26			VL 10, Ausgabe #6	
27			Ü 5	
28				
29		Christi Himmelfahrt		
30				
31				

Frei
Vorlesung
Übung
Tutorium
IF: Institutsführung

Stand: 25.04.2014

alle Donnerstagstermine finden von 11.30 - 13.00 Uhr im MTI-Hörsaal statt

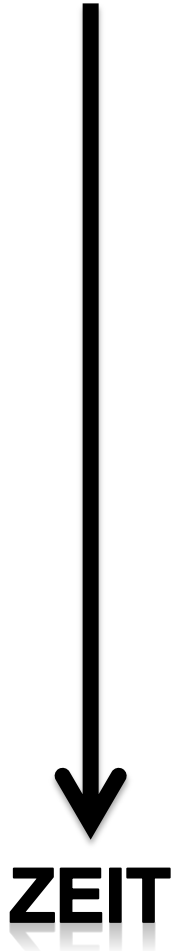
alle Freitagstermine finden von 11.30 - 13.00 Uhr im NTI-Hörsaal statt, außer am 23.05.2014 im Gr. HS, Geb. 10.50 (Baulng)

Organisatorisches

Relativ leere Tutorien:

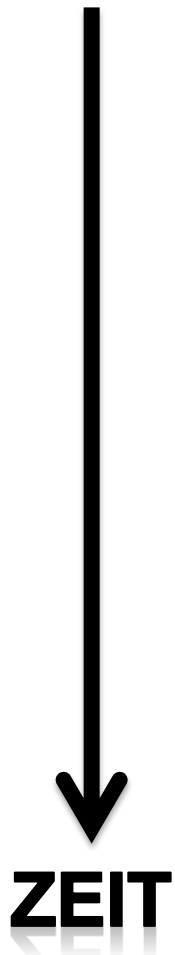
- Geb. 50.41, Raum -133, **Dienstags 8:00-09:30 Uhr**
- Geb. 50.41, Raum -109, **Mittwochs 14:00-15:30 Uhr**
- Geb. 30.22, Kl.HS.A, **Mittwochs, 15.45-17.15,**
- LTI, Seminarraum, **Donnerstags 15:45-17:15 Uhr**
- Geb. 50.41, Raum -109, **Donnerstags 15:45-17:15 Uhr**

Stand der Dinge



1. Grundlagen der Quantenphysik
2. Elektronische Zustände
3. Vom Wasserstoffatom zum Periodensystem der Elemente
4. Elektronen im Kristall
5. Halbleiter
6. Quantenstatistik für Ladungsträger
7. Dotierte Halbleiter
8. Ladungsträgerdynamik im Halbleiter
9. Der pn-Übergang

Stand der Dinge



1 Grundlagen der Quantenmechanik

- 1.1 Einleitung
- 1.2 Historisches
- 1.3 Die Schrödinger-Gleichung
- 1.4 Das freie quantenmechanische Elektron
- 1.5 Quantenmechanische Erwartungswerte

Ü-Blatt 1

2 Elektronische Zustände

- 2.1 Die zeitunabhängige Schrödingergleichung
- 2.2 Der unendlich hohe Potentialtopf
- 2.3 Der endliche Potentialtopf
- 2.4 Potentialbarrieren
- 2.5 Eigentliche und uneigentliche Zustände
- 2.6 Quantenmechanische Messungen

Ü-Blatt 2

Wiederholung

- Welle-Teilchen-Dualismus

- de Broglie Beziehung

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

- Unschärferelation

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

- Zeitabhängige Schrödinger-Gleichung

$$j\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) \right) \Psi(x, t)$$

A2 a) Das freie Elektron

In einem Elektronenmikroskop werden Elektronen mit einer de-Broglie Wellenlänge von $\lambda = 10^{-11}\text{m}$ verwendet. Welche kinetische Energie besitzt ein einzelnes Elektron? Die nicht-relativistische Näherung sei gültig!

- Ansatz: Impuls des Elektrons über de Broglie-Beziehung bestimmen.

$$W = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{(h/\lambda)^2}{2m_e} = 2,41 \text{ fJ} = 15.04 \text{ keV}$$

A2 b) Das freie Elektron

Berechnen sie die Phasengeschwindigkeit v_{ph} und die Gruppengeschwindigkeit v_{g} für Photonen und Elektronen.

■ Ansatz:
$$v_{\text{g}} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad \& \quad v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k}$$

■ Photonen:

$$\omega_{\text{Photon}}(k) = ck \quad \rightarrow \quad v_{\text{ph}} = v_{\text{g}} = c$$

■ Elektronen:

$$\omega_{\text{Elektron}}(k) = \frac{\hbar k^2}{2m_e} \quad \rightarrow \quad v_{\text{ph}} = \frac{\hbar k}{2m_e} \quad \& \quad v_{\text{g}} = \frac{\hbar k}{m_e}$$

[http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/spektroskopie/theorie/dispersi
on.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/spektroskopie/theorie/dispersion/disp6.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/13/vlu/spektroskopie/theorie/dispersi
on.vlu/Page/vsc/de/ch/13/pc/spektroskopie/theorie/dispersion/disp6.vscml.html)

A2 c) Das freie Elektron

Berechnen Sie mit Hilfe des Impulsoperators den Impulserwartungswert $\langle \hat{p}(t) \rangle$ und das Impulserwartungswertquadrat $\langle \hat{p}^2(t) \rangle$ für ein freies Elektron. Bestimmen Sie damit die Unschärfe des Impulses

$$\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2}.$$

Was folgt daraus über die Unschärferelation für die Ortsunschärfe Δx ?

Einschub: Quantenmechanischer Operator

- Physikalische Messgrößen (Observablen) werden in der QM durch einen hermiteschen Operatoren beschrieben

- Beispiele:

Ortsoperator:

$$\hat{x} = x$$

Impulsoperator:

$$\hat{p} = -j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

- Der Erwartungswert eines Operators $\hat{A}$ berechnet sich zu:

$$\langle \hat{A} \rangle = \frac{\int \Psi^*(x, t) \hat{A} \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx}$$

A2 c) Das freie Elektron

Berechnen Sie mit Hilfe des Impulsoperators den Impulserwartungswert $\langle \hat{p}(t) \rangle$ und das Impulserwartungswertquadrat $\langle \hat{p}^2(t) \rangle$ für ein freies Elektron. Bestimmen Sie damit die Unschärfe des Impulses

$$\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2}.$$

Was folgt daraus über die Unschärferelation für die Ortsunschärfe Δx ?

■ Wellenfunktion eines freien Elektrons:

Ebene Welle $\rightarrow$

$$\Psi(x, t) = A \exp(j(kx - \omega t))$$

■ Impulsoperator:

$$\hat{p} = -j\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

A2 c) Das freie Elektron

- 1. Berechnen von $\langle \hat{p} \rangle$:

$$\langle \hat{p} \rangle = \frac{\int \Psi^*(x, t) \hat{p} \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx} = \frac{\int \Psi^*(x, t) \left(-j\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx}$$

- Ableitung von Ψ nach x :

$$\frac{\partial}{\partial x} A \exp(j(kx - \omega t)) = jk A \exp(j(kx - \omega t)) = jk \Psi(x, t)$$

$$\rightarrow \langle \hat{p} \rangle = \frac{\int \Psi^*(x, t) (-j^2 \hbar k) \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx} = \hbar k \frac{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx} = \hbar k$$

A2 c) Das freie Elektron

- 2. Berechnen von $\langle \hat{p}^2 \rangle$:

$$\langle \hat{p}^2 \rangle = \frac{\int \Psi^*(x, t) \hat{p}^2 \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx} = \frac{\int \Psi^*(x, t) \left(-\hbar^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx}$$

- 2fache Ableitung von Ψ nach x :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A \exp(j(kx - \omega t)) = -k^2 A \exp(j(kx - \omega t)) = -k^2 \Psi(x, t)$$

$$\rightarrow \langle \hat{p}^2 \rangle = \hbar^2 k^2 \frac{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx}{\int \Psi^*(x, t) \Psi(x, t) dx} = \hbar^2 k^2$$

A2 c) Das freie Elektron

- 3. Berechnen von Δp :

$$\Delta p = \sqrt{\langle \hat{p}^2(t) \rangle - \langle \hat{p}(t) \rangle^2} = \sqrt{\hbar^2 k^2 - (\hbar k)^2} = 0$$

- Unschärferelation:

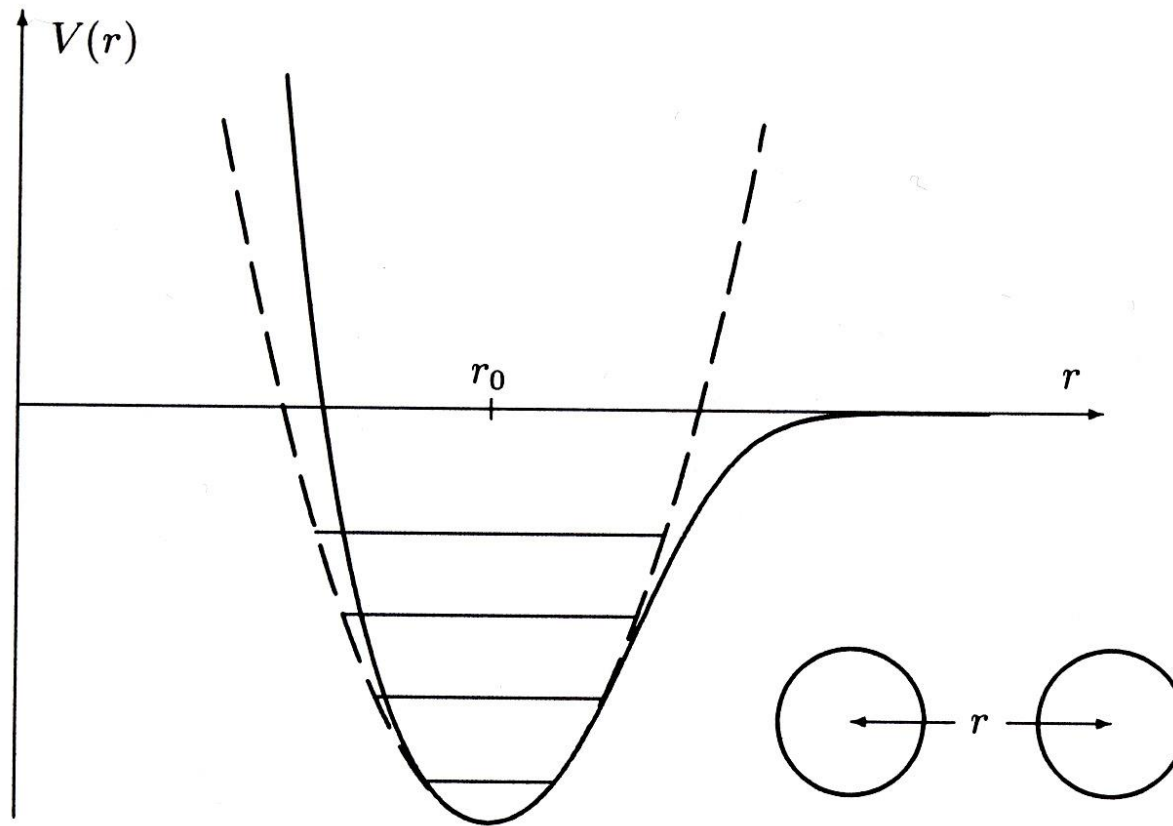
$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$$

→

$$\Delta x \rightarrow \infty$$

A4 Parabolisches Potential

■ Beispiel: Lennard-Jones Potential



A4 a) Parabolisches Potential

■ Zeitunabhängige Schrödingergleichung:

$$\hat{H}\Psi(x, t) = \left(\underbrace{-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}_{\text{Operator kinetische Energie}} + \underbrace{V(x)}_{\text{Operator potentielle Energie}} \right) \Psi(x, t) = \underbrace{W}_{\text{Energie-Eigenwert}} \Psi(x, t)$$

■ Potentielle Energie:

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

A4 a) Parabolisches Potential

■ Eigenfunktionen:

$$\psi_n = \frac{c_n}{\sqrt{b}} H_n\left(\frac{x}{b}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2b^2}\right)$$

Hermiteische Polynome

$$\psi_0 = \frac{c_0}{\sqrt{b}} \exp\left(-\frac{x^2}{2b^2}\right)$$

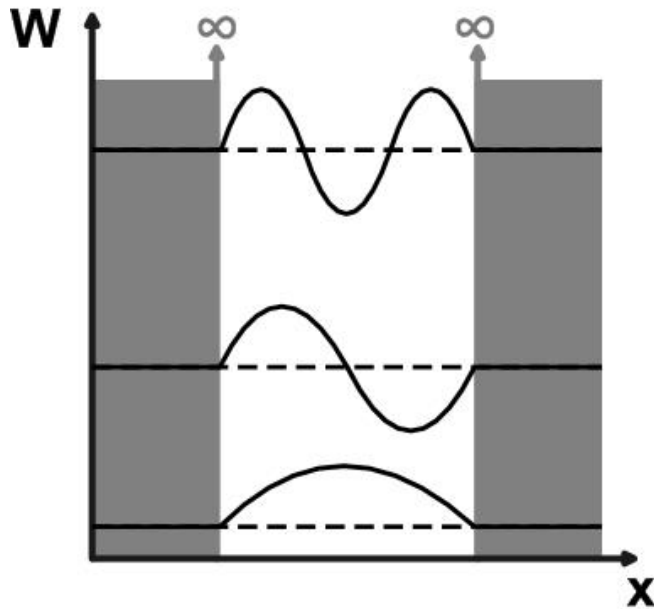
$$\psi_1 = \frac{c_1}{\sqrt{b}} 2 \frac{x}{b} \exp\left(-\frac{x^2}{2b^2}\right)$$

mit $b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$

■ Eigenwerte:

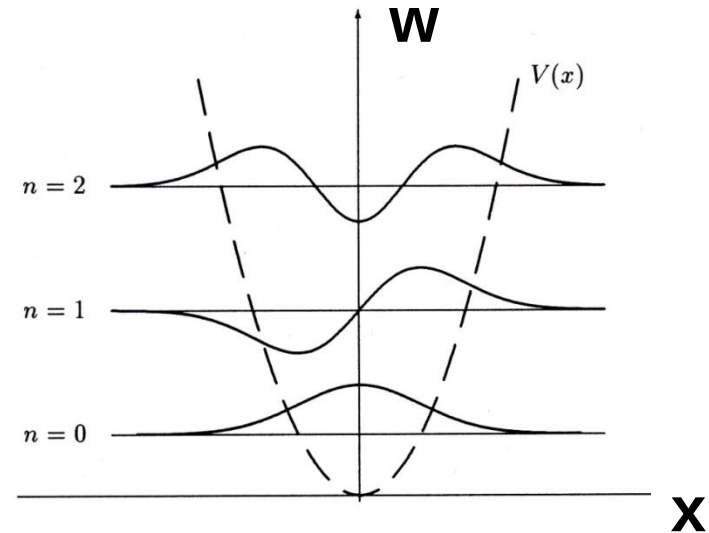
$$W_n = \hbar\omega \left(n + \frac{1}{2}\right)$$

A4 b) Parabolisches Potential



Unendlicher Potentialtopf

- abwechselnd gerade-ungerade
- Grundzustand gerade
- Knoten an Rändern



Harmonischer Oszillator

- abwechselnd gerade-ungerade
- Grundzustand gerade
- Keine Knoten an Rändern

A4 b) Parabolisches Potential

Unendlicher Potentialtopf

- $W_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 n^2$

- diskret

- Abstand proportional zu $(2n+1)$

- Grundzustandsenergie:

$$W_1 = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 > 0$$

Harmonischer Oszillator

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

- diskret

- äquidistant $\Delta W = \hbar\omega$

- Grundzustandsenergie:

$$W_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega > 0$$

A4 c) Parabolisches Potential

- Löst Ψ_0 die Schrödinger-Gleichung?

$$\hat{H}\Psi_0(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) \left(\frac{c_0}{\sqrt{b}} \exp \left(-\frac{x^2}{2b^2} \right) \right)$$

- 2fache Ableitung von Ψ_0 nach x :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi_0(x, t) = \left(-\frac{1}{b^2} + \frac{x^2}{b^4} \right) \Psi_0(x, t) \quad b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$$

- Lösen:

$$\hat{H}\Psi_0(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \left(-\frac{m\omega}{\hbar} + \frac{m^2 \omega^2 x^2}{\hbar^2} \right) + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) \Psi_0(x, t) = \underbrace{\frac{\hbar\omega}{2}} \Psi_0(x, t)$$

Energie-Eigenwert

A4 c) Parabolisches Potential

- Löst Ψ_1 die Schrödinger-Gleichung?

$$\hat{H}\Psi_1(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) \left(\frac{c_0}{\sqrt{b}} 2 \frac{x}{b} \exp \left(-\frac{x^2}{2b^2} \right) \right)$$

- 2fache Ableitung von Ψ_1 nach x :

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \Psi_1(x, t) = \left(-\frac{3}{b^2} + \frac{x^2}{b^4} \right) \Psi_1(x, t)$$

$$b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$$

- Lösen:

$$\hat{H}\Psi_1(x, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \left(-\frac{3m\omega}{\hbar} + \frac{m^2 \omega^2 x^2}{\hbar^2} \right) + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) \Psi_1(x, t) = \underbrace{\frac{3\hbar\omega}{2}} \Psi_1(x, t)$$

Energie-Eigenwert

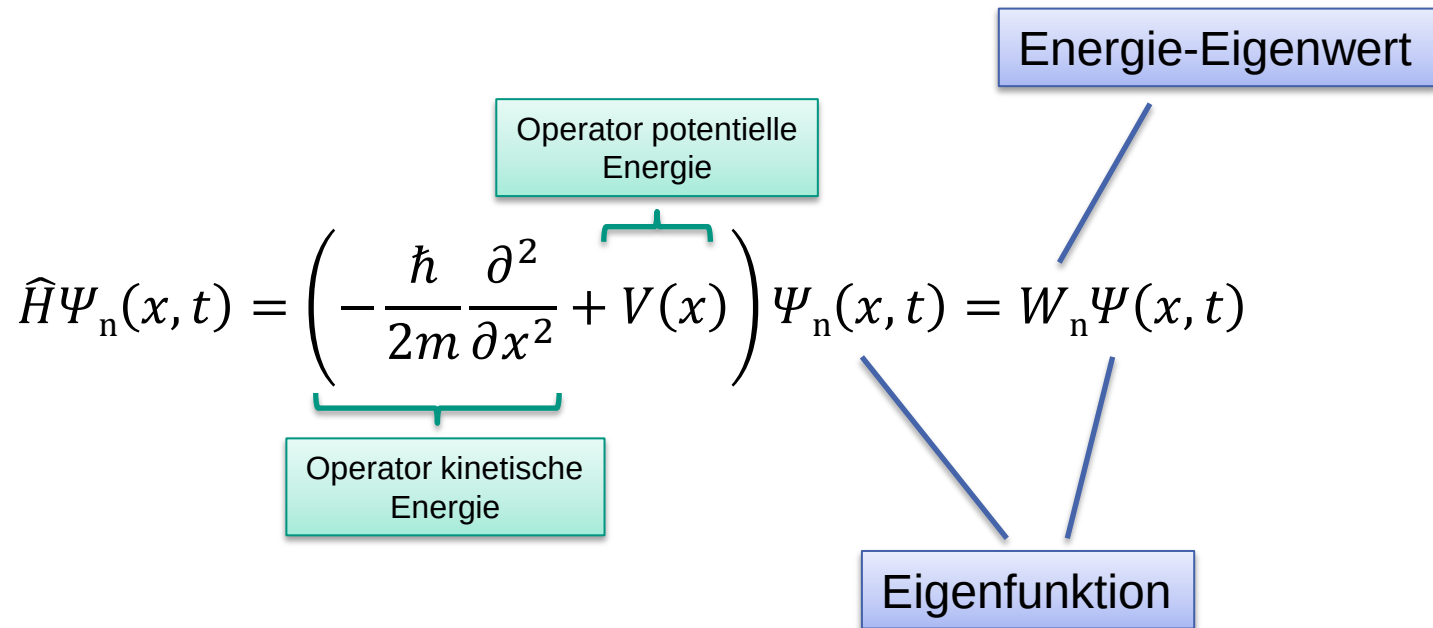
A4 c) Parabolisches Potential

■ Allgemeines Vorgehen:

$$\hat{H}\Psi_n(x, t) = \left(\underbrace{-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}}_{\text{Operator kinetische Energie}} + \underbrace{V(x)}_{\text{Operator potentielle Energie}} \right) \Psi_n(x, t) = W_n \Psi(x, t)$$

Energie-Eigenwert

Eigenfunktion



A4 d) Parabolisches Potential

Berechnen Sie den Erwartungswert der kin. Energie im Grundzustand.

■ Normierter Grundzustand: $\Psi_0 = \frac{1}{\sqrt{b}\sqrt{\pi^{1/2}}} \exp\left(-\frac{x^2}{2b^2}\right)$ mit $b = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$

■ Operator der kinetischen Energie: $\hat{W}_{\text{kin}} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$

■ Erwartungswert der kinetischen Energie:

$$\langle \hat{W}_{\text{kin}} \rangle = \frac{\int \Psi_0^*(x, t) \hat{W} \Psi_0(x, t) dx}{\int \Psi_0^*(x, t) \Psi_0(x, t) dx} = \int \Psi_0^*(x, t) \hat{W} \Psi_0(x, t) dx = \frac{1}{4} \hbar \omega$$

A4 e) Parabolisches Potential

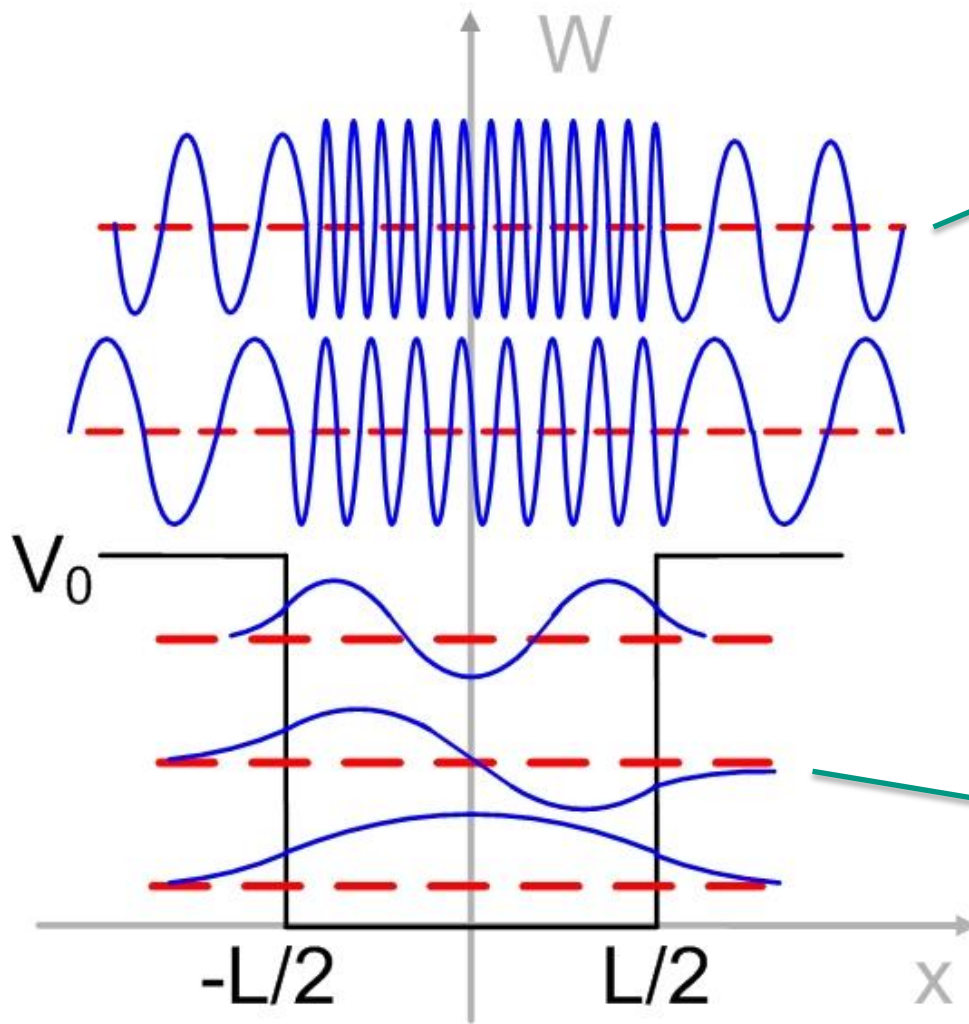
Berechnen Sie den Erwartungswert der pot. Energie im Grundzustand.

- Gesamtenergie berechnet sich aus der Summer der kinetischen und der potentiellen Energie:

- Kinetischen Energie: $\langle \hat{W}_{\text{kin}} \rangle = \frac{1}{4} \hbar \omega$; Gesamtenergie: $\langle \hat{W} \rangle = \frac{1}{2} \hbar \omega$

→ potentielle Energie: $\langle \hat{W}_{\text{pot}} \rangle = \frac{1}{4} \hbar \omega$

A6 a)+b) Potentialtopf mit endlich hohen Wänden



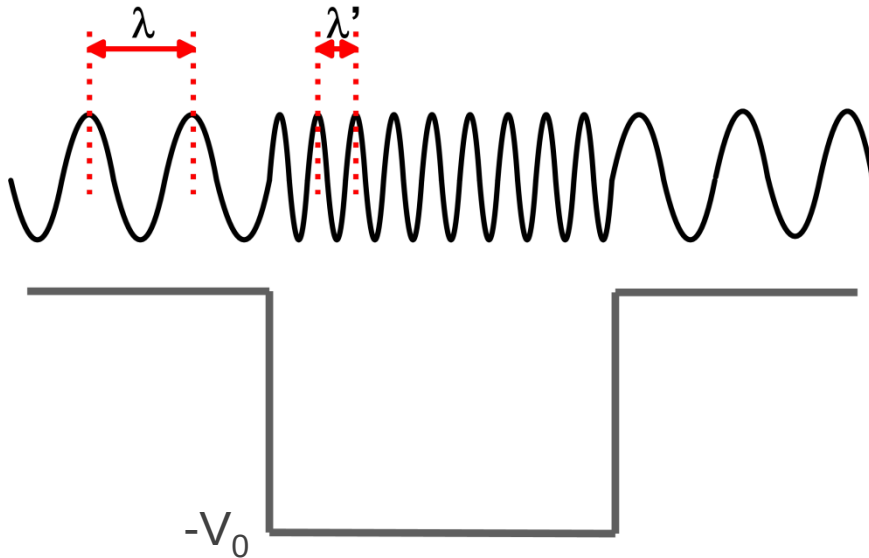
Ungebundene Zustände:

- kontinuierliche Energien
- unendlich ausgedehnt

Gebundene Zustände:

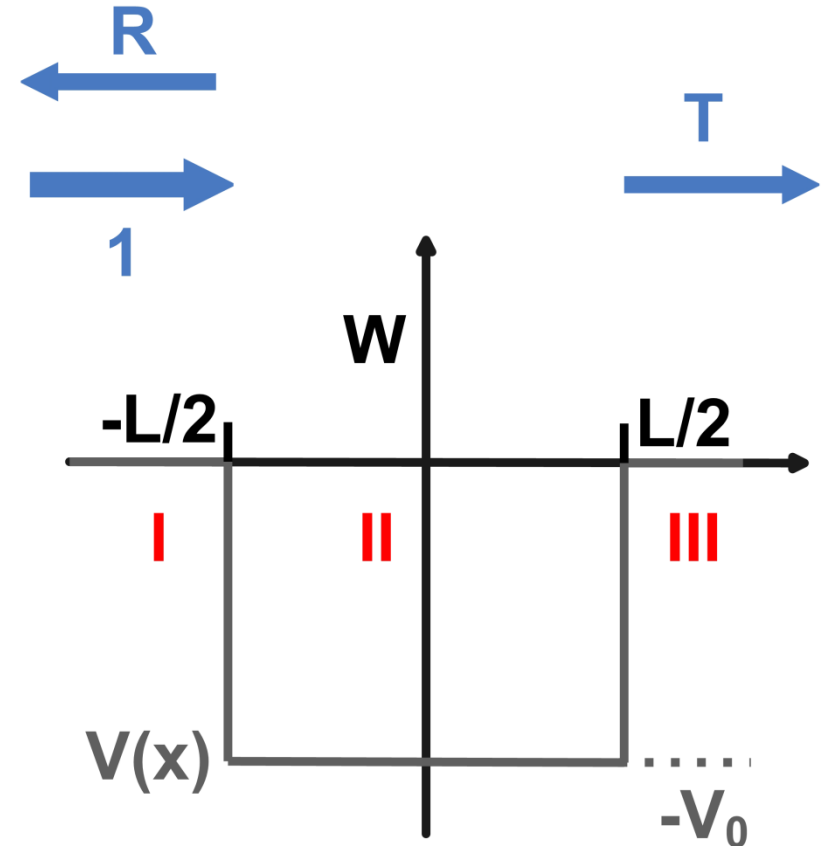
- diskrete Energien
- räumlich begrenzt

A6 a)+b) Potentialtopf mit endlich hohen Wänden

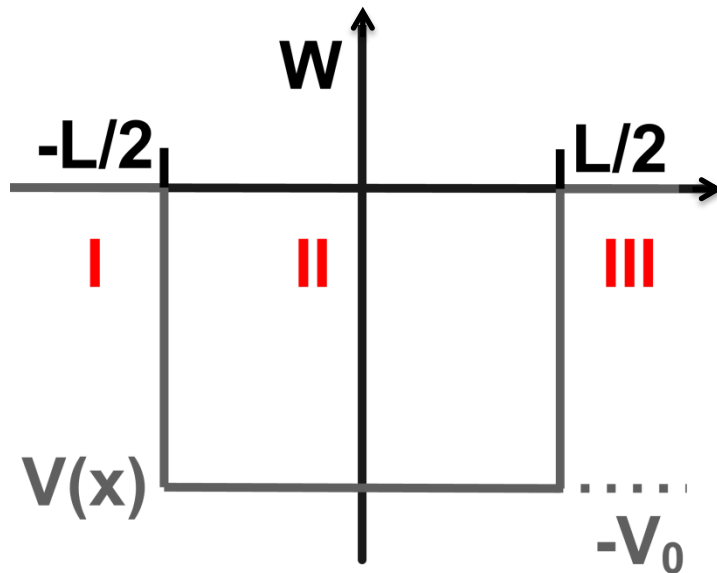


$$\Psi(x) = A^+ e^{jkx} + A^- e^{-jkx}$$

$$k = \sqrt{\frac{2m(W + V_0)}{\hbar^2}}$$



A6 c) Potentialtopf mit endlich hohen Wänden



$$\Psi_1(x) = A e^{\cancel{\kappa_1} x} + B e^{\kappa_1 x}$$

$$\Psi_2(x) = C e^{-j k_2 x} + D e^{j k_2 x}$$

$$\Psi_3(x) = E e^{-\kappa_3 x} + F e^{\cancel{\kappa_3} x}$$

■ Randbedingungen:

$$A = F = 0$$

$$\Psi_1(-L/2) = \Psi_2(-L/2)$$

$$\Psi_2(L/2) = \Psi_3(L/2)$$

$$\Psi'_1(-L/2) = \Psi'_2(-L/2)$$

$$\Psi'_2(L/2) = \Psi'_3(L/2)$$

A6 c) Potentialtopf mit endlich hohen Wänden

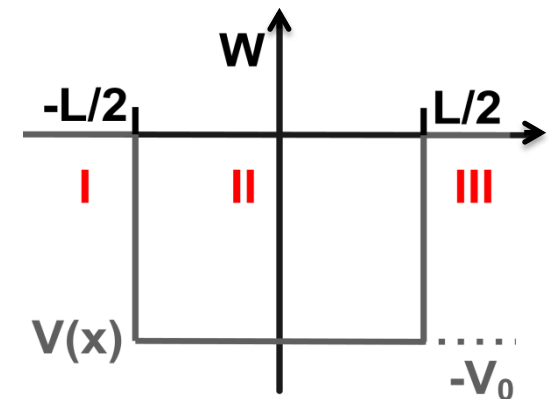
$$Be^{-\kappa_1 L/2} = Ce^{jk_2 L/2} + De^{-jk_2 L/2}$$

$$B\kappa_1 e^{-\kappa_1 L/2} = -Cjk_2 e^{jk_2 L/2} + Djk_2 e^{-jk_2 L/2}$$

$$Ce^{-jk_2 L/2} + De^{jk_2 L/2} = Ee^{-\kappa_3 L/2}$$

$$-Cjk_2 e^{-jk_2 L/2} + Djk_2 e^{jk_2 L/2} = -E\kappa_3 e^{-\kappa_3 L/2}$$

- 4 unabhängige Gleichung & 4 Konstanten:
→ lösbares Gleichungssystem



<http://phet.colorado.edu/en/simulation/bound-states>

A7 a) Stückweise konstantes Potential

■ Gegeben sei das Potential:

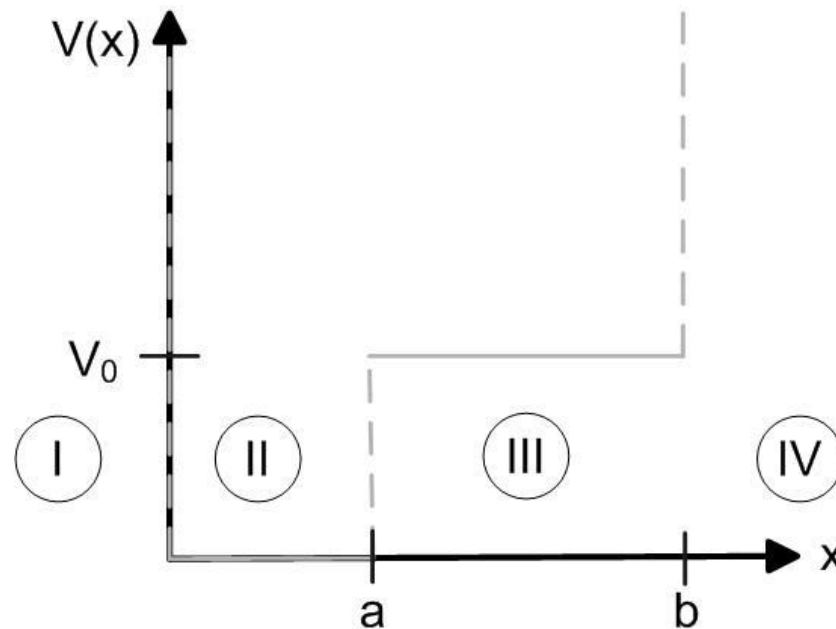
$$V_0(x) = \begin{cases} \infty & : x < 0 & \text{Bereich I} \\ 0 & : 0 \leq x < a & \text{Bereich II} \\ V_0 & : a \leq x < b & \text{Bereich III} \\ \infty & : x \geq b & \text{Bereich IV} \end{cases}$$

Skizzieren Sie den Potentialverlauf!

A7 a) Stückweise konstantes Potential

■ Gegeben sei das Potential:

$$V_0(x) = \begin{cases} \infty & : x < 0 & \text{Bereich I} \\ 0 & : 0 \leq x < a & \text{Bereich II} \\ V_0 & : a \leq x < b & \text{Bereich III} \\ \infty & : x \geq b & \text{Bereich IV} \end{cases}$$



A7 b) Stückweise konstantes Potential

Bestimmen Sie die Energie-EW eines Teilchens mit der Energie $W > V_0$

■ Bereich I & IV

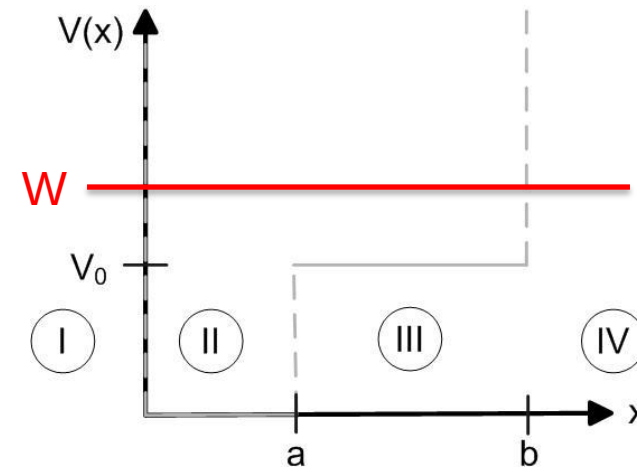
$$\Psi_1(x) = \Psi_4(x) = 0$$

■ Bereich II

$$\Psi_2(x) = Ae^{jk_2x} + Be^{-jk_2x}$$

■ Bereich III

$$\Psi_3(x) = Ce^{jk_3x} + De^{-jk_3x}$$



$$k_2 = \sqrt{2mW/\hbar^2}$$

$$k_3 = \sqrt{2m(W - V_0)/\hbar^2}$$

A7 b) Stückweise konstantes Potential

Bestimmen Sie die Energie-EW eines Teilchens mit der Energie $W > V_0$

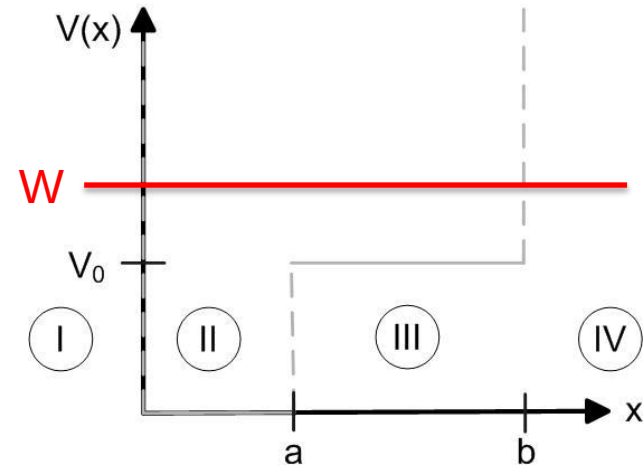
■ Randbedingungen:

$$\psi_2(0) = 0$$

$$\psi_2(a) = \psi_3(a)$$

$$\psi'_2(a) = \psi'_3(a)$$

$$\psi_3(b) = 0$$



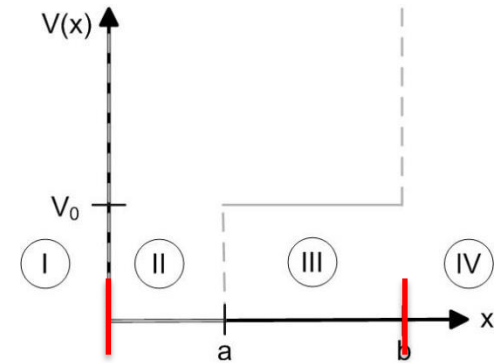
■ 4 unabhängige Gleichung & 4 Konstanten:
→ lösbares Gleichungssystem

A7 b) Stückweise konstantes Potential

$$\Psi_2(0) = 0 = Ae^{jk_2 0} + Be^{-jk_2 0} = A + B \rightarrow B = -A$$

$$\rightarrow \Psi_2(x) = A(e^{jk_2 x} - e^{-jk_2 x}) = 2jA \sin(k_2 x)$$

K_2



$$\Psi_3(b) = 0 = Ce^{jk_3 b} + De^{-jk_3 b} \rightarrow D = -Ce^{j2k_3 b}$$

$$\rightarrow \Psi_3(x) = C(e^{jk_3 x} - e^{j2k_3 b} e^{-jk_3 x})$$

$$\Psi_3(x) = Ce^{jk_3 b} (e^{jk_3(x-b)} - e^{-jk_3(x-b)}) = 2jCe^{jk_3 b} \sin(k_3(x-b))$$

K_3

A7 b) Stückweise konstantes Potential

$$\Psi_2(x) = K_2 \sin(k_2 x)$$

$$\Psi_3(x) = K_3 \sin(k_3(x - b))$$

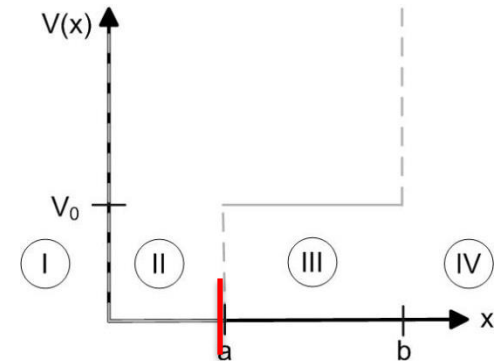
$$\Psi_2(a) = \Psi_3(a) \rightarrow$$

$$K_2 \sin(k_2 a) = K_3 \sin(k_3(a - b))$$

$$\Psi'_2(a) = \Psi'_3(a) \rightarrow$$

$$K_2 k_2 \cos(k_2 a) = K_3 k_3 \cos(k_3(a - b))$$

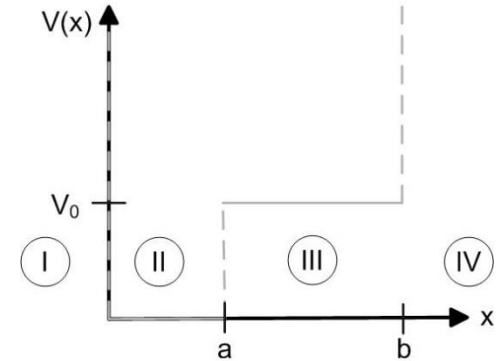
$$\frac{1}{k_2} \tan(k_2 a) = \frac{1}{k_3} \tan(k_3(a - b))$$



A7 b) Stückweise konstantes Potential

$$\frac{1}{k_2} \tan(k_2 a) = \frac{1}{k_3} \tan(k_3(a - b))$$

$$\rightarrow \frac{k_2}{k_3} = \frac{\tan(k_2 a)}{\tan(k_3(a - b))}$$



■ Mit $k_2 = \sqrt{2mW/\hbar^2}$ und $k_3 = \sqrt{2m(W - V_0)/\hbar^2}$

$$\sqrt{\frac{W}{(W - V_0)}} = \frac{\tan(\sqrt{2mW/\hbar^2} a)}{\tan(\sqrt{2m(W - V_0)/\hbar^2} (a - b))}$$

■ Nicht analytisch lösbar!

Aufgabentypen/Lösungsmethoden in der QM

Lösungen der zeitunabhängigen Schrödingergleichung

1. Aufstellen/Auswerten des Ausdrucks für das Potential $V(x)$
2. Das Problem in **verschiedene Gebiete** mit jeweils konstantem Potential aufteilen
3. Für jeden Bereich **ebenen Wellen** ansetzen:

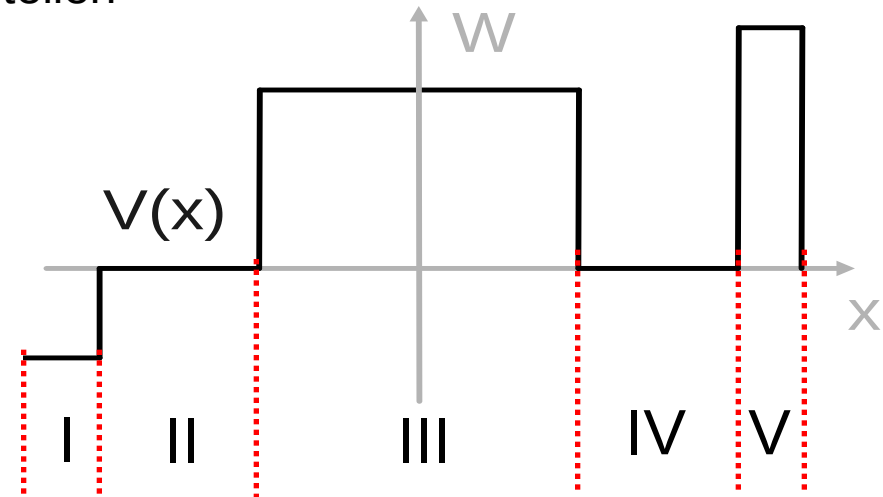
$$\begin{aligned}\psi_i(x) &= A^+ \exp(+jk_i x) + A^- \exp(-jk_i x) \quad , \\ \psi_{i+1}(x) &= B^+ \exp(+jk_{i+1} x) + B^- \exp(-jk_{i+1} x) \quad , \text{ etc.}\end{aligned}$$

4. **Rand- und Nebenbedingungen** aufstellen

1. Im Unendlichen
2. An endlichen Sprüngen gelten die Stetigkeitsbedingungen

$$\begin{aligned}\psi_i(x_0) &= \psi_{i+1}(x_0) \\ \psi'_i(x_0) &= \psi'_{i+1}(x_0)\end{aligned}$$

5. **Einsetzen und Auswerten** der Rand- und Nebenbedingungen
6. Erhaltenes **Gleichungssystem lösen**



Zusammenfassende Fragen

- Was sind Operatoren in der Quantenmechanik? Welche kennen Sie?
- Wie berechnet man einen quantenmechanischen Erwartungswert?
- Warum ist der unendliche Potentialtopf ein hilfreiches Modell?
- Was sind Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Lösung des unendlichen Potentialtopfs und des Potentials eines harmonischen Oszillators?
- Welche wichtigen Aspekte der Quantenmechanik zeigen sich am Modellsystem des endlichen Potentialtopfs?
- Wie löst man Probleme mit stückweise konstanten Potentialen?