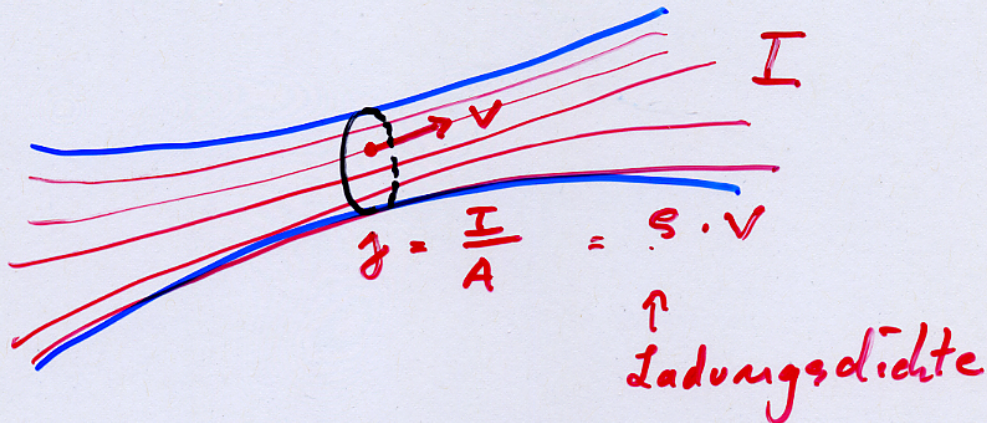


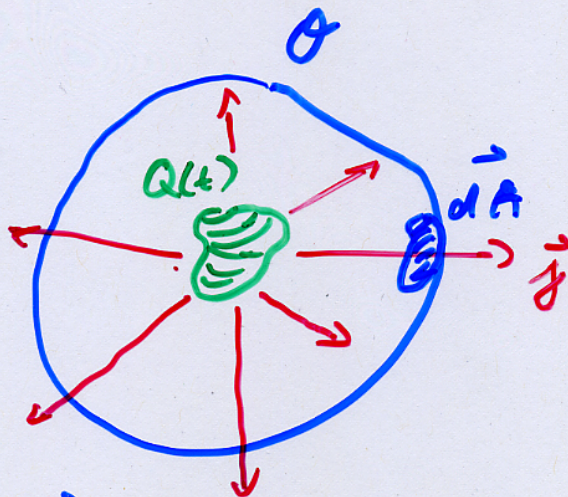
### 3. Elektrische Ströme und ihre Felder

$$I \equiv \frac{dQ}{dt} \quad \text{Strom} \quad [1A = 1 \frac{C}{s}]$$

$$j \equiv \frac{I}{A} \quad \text{Stromdichte}$$



#### 3.1 Die Kontinuitätsgleichung



$$I = \oint_S j \cdot d\vec{A}$$
$$= - \frac{dQ}{dt}$$

Erinnerung :

$$\begin{aligned}\phi &= \oint_{\sigma} \vec{E} d\vec{A} \\ &= \int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} d\mathcal{V}\end{aligned}$$

Analog:

$$\begin{aligned}\oint_{\sigma} \vec{j} d\vec{A} &= \int_{\mathcal{V}} \vec{\nabla} \cdot \vec{j} d\mathcal{V} \\ &= -\frac{d}{dt} Q = -\frac{d}{dt} \int_{\mathcal{V}} \rho d\mathcal{V}\end{aligned}$$

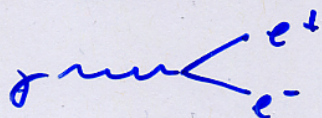
$$\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{j} = -\frac{d}{dt} \rho$$

Kontinuitätsgleichung

Es kann keine Ladung erzeugt  
oder vernichtet werden; Ladungs-  
änderungen führen zu Strömen

nb: Aus Energie kann Ruhemasse erzeugt

werden:



$$m = m_{e^+} + m_{e^-}$$

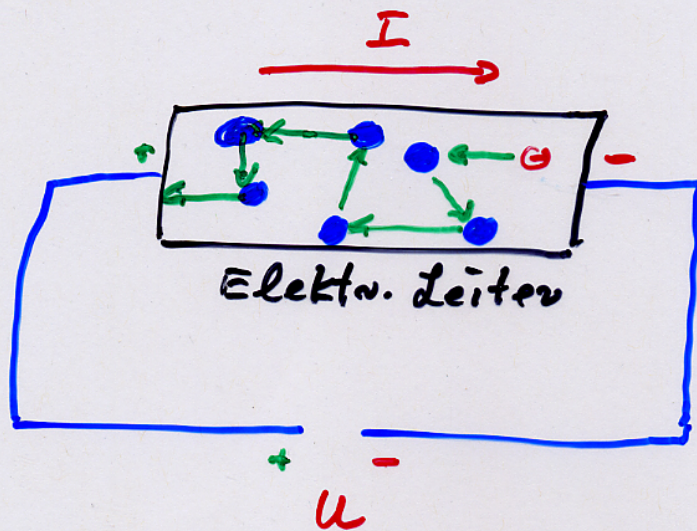
$$\sum q_i = 0 !$$

$$Q = q_{e^+} + q_{e^-} = 0$$

## 3.2. Ströme und Schaltkreise

### 3.2.1 Das Ohmsche Gesetz

#### a) Elektronenstrom

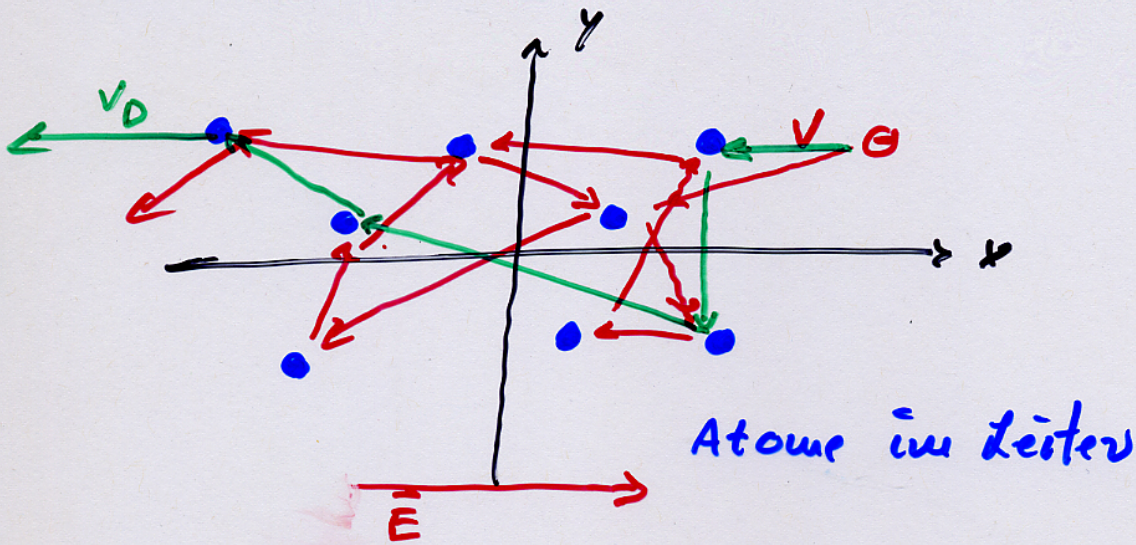


Bewegung von Elektronen im Leiter:  
Streuung an Atomkernen

b) Ionenstrom: Bewegung von pos. oder neg. Ionen durch Medium  
(Bsp.: Elektrolyse)

c) Plasmastrom: Bewegung von el., Ionen durch ein Gas  
(z.B. Blitze)

# Elektronenstrom



→ Bewegung durch Stöße, ohne Feld

→ " " " " im Feld

$v_D$  Driftgeschwindigkeit

$\langle v \rangle$  Mittlere Geschwindigkeit zw. zwei Stößen

$\Lambda$  Mittlere freie Weglänge für Elektronen

$\tau$  Mittlere Zeit zw. zwei Stößen

Bsp: Cu ( $20^\circ\text{C}$ )

$$\Lambda = 400 \cdot R_{\text{Atom}}^*$$

$$\langle v \rangle = 10^8 \text{ cm/s}$$

$$v_D = 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$R_{\text{Atom}} \text{ typ } \approx (10^{-10} \text{ m})$$

Für ein  $e^-$ :

$$a = \frac{v_D}{\tau} = \frac{e \cdot E}{m_{e^-}}$$

$$\Rightarrow v_D = \frac{e \cdot E}{m_e} \cdot \tau$$

$$\Rightarrow j = n \cdot e \cdot v_D \quad n: \frac{\text{Zahl der } e^-}{m^3}$$

$$= \frac{n \cdot e \cdot \tau}{m_e} \cdot e \cdot E$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\sigma_e}$  Elektr. Leitfähigkeit

$$= \sigma_e \cdot E$$

$$j = \sigma_e \cdot E$$

Ohmsches Gesetz

Mit  $I = j \cdot A$

$$= \sigma_e \cdot E \cdot A$$

$$= \frac{\sigma_e \cdot A}{d} \cdot U$$

$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

$R$ : Elektr. Widerstand  $[R] = 1 \Omega$

Auch:  $\rho = R \cdot \frac{A}{d}$  Spezifischer  
Widerstand

$$[\rho] = 1 \Omega \text{ m}$$

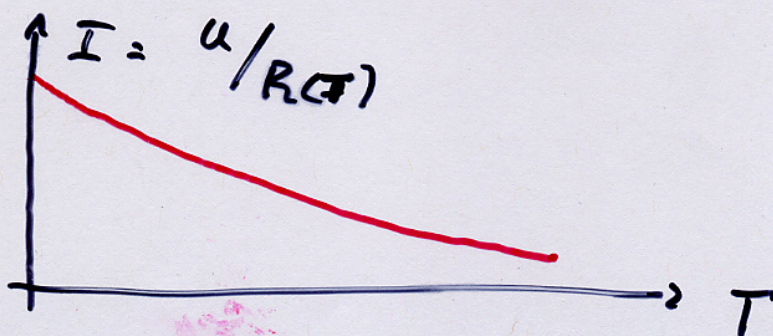
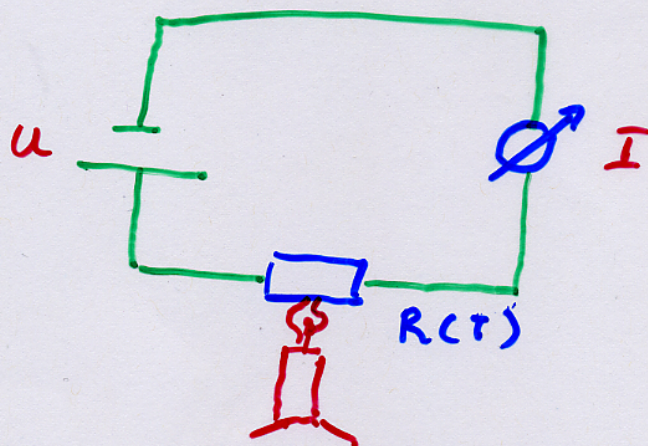
Bs:	Ag	$\rho = 0,016 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$	} Leiter
	Cu	0,017 "	
	Fe	0,1 "	
	C	14 "	
	Ge	0,6 $\Omega \text{ m}$	} Halbleiter
	Si	2000 "	
	Glas	$7 \cdot 10^{17}$ "	} Isolator

### 3.3.2 Temperaturabhängigkeit von Widerständen

Temperatur: thermische Bewegung von Atomen

Erwarte:  $\Lambda$  nimmt ab  
 $\Rightarrow S$  nimmt zu mit  $T$

Metall:  $S = S_0 (1 + \alpha T)$ ,  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$   
 $\uparrow$   
Temperaturkoeffiz.



B<sub>9</sub> : Silber :  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} / \text{K}$

Kupfer : "

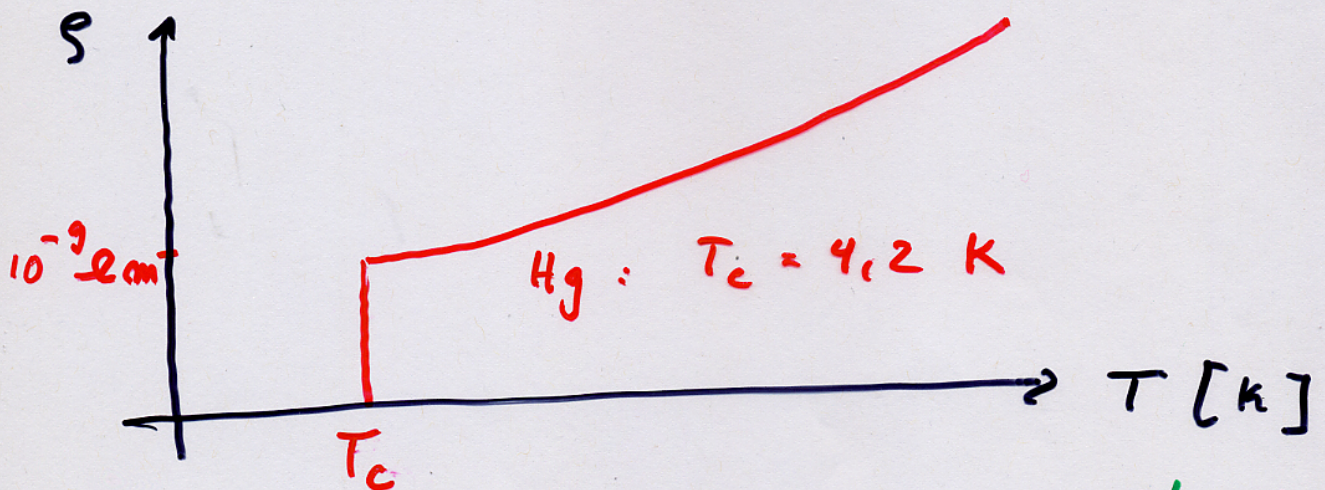
Wolfram:  $5 \cdot 10^{-3} / \text{K}$

Konstantan  
(Ni Cu Zn)  $2 \cdot 10^{-4} / \text{K}$

---

Sonderfall : 1) Supraleitung

1911 : Kamerlingh Onnes (Leiden)



Erklärung durch Bardeen, Cooper, Schrieffer:

Elektrostat. Felder im Gitter  $\Rightarrow$  2 Elektronen bilden ein „Cooper“-Paar.

Cooper-Paare spüren keine thermischen Stöße  $\rightarrow$  elektr. Widerstand = 0



# Bs. Supraleiter

Element/stoff	$T_c$ [K]
Nb	9,4
Pb	7,2
Hg	4,2
Jn	0,14
-----	
La Ba Cu O	85
Ti Ca B Cu O	125
⋮	

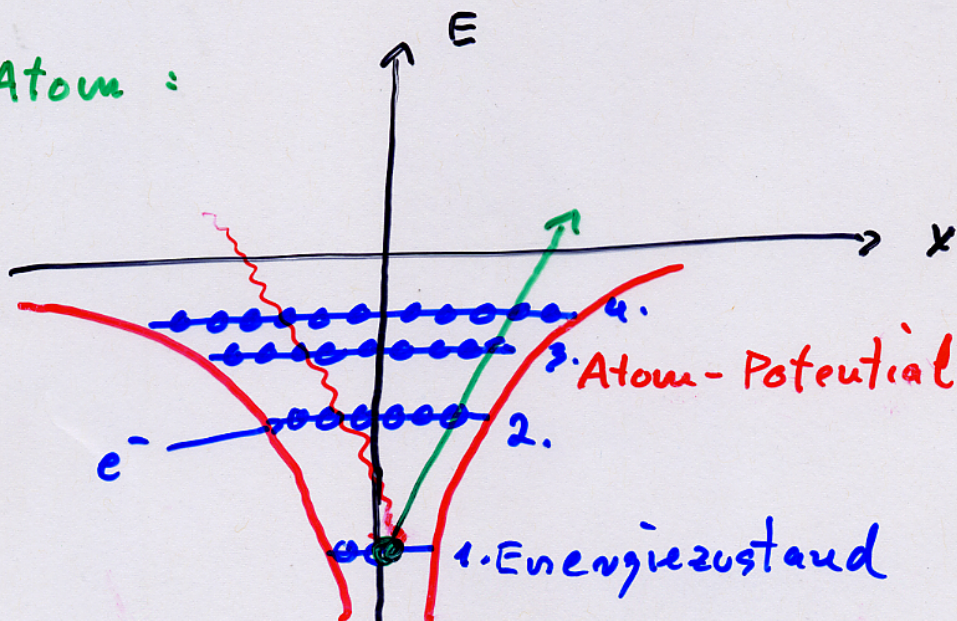
„Hoch-Temperatur-SL“

Kuprate

## Sonderfall 2) Halbleiter

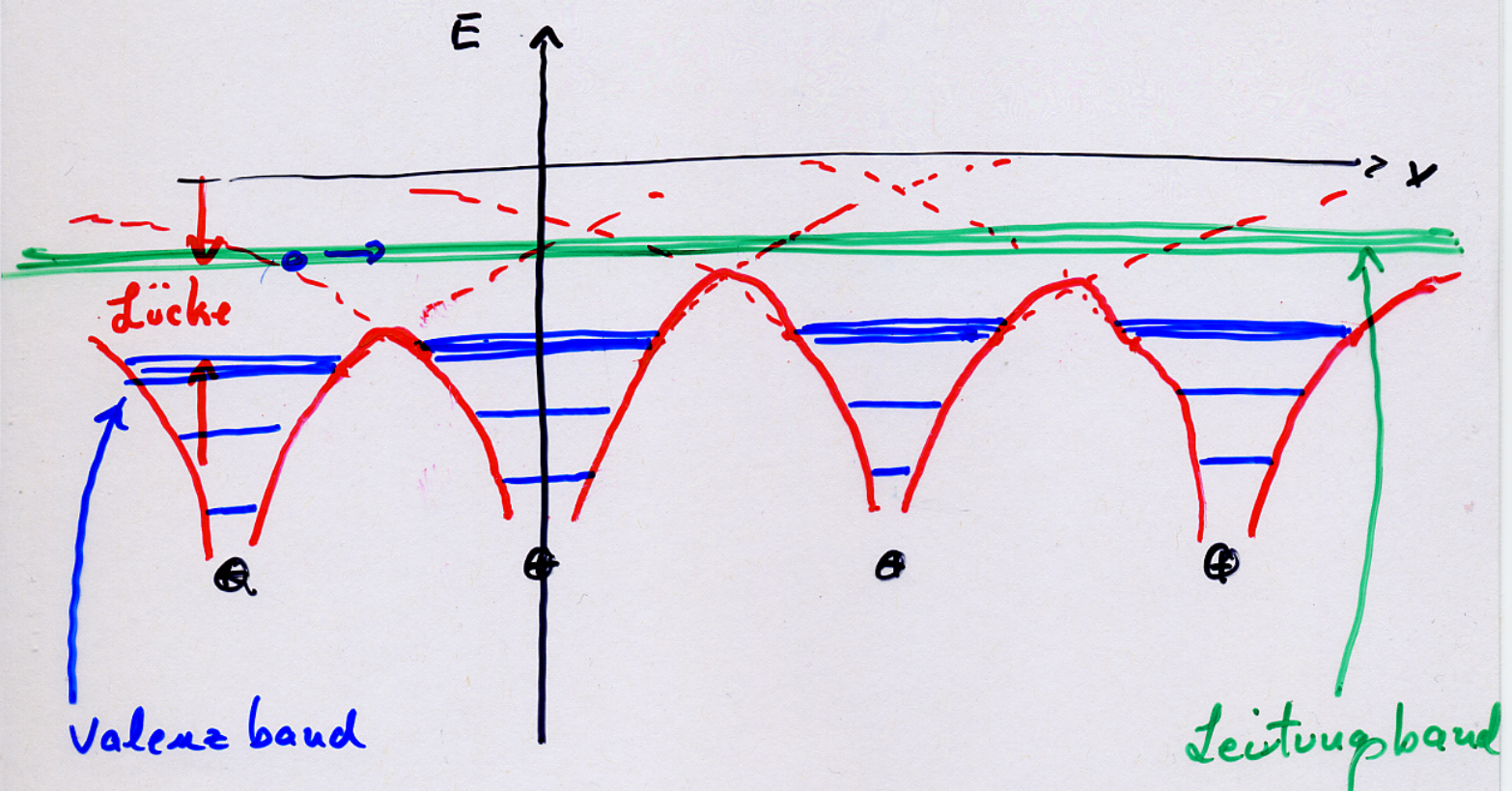
Funktion.

a) 1 Atom:



Freisetzung eines gebundenen Elektrons  
 → Beschleunigung im El. Feld

## b) Viele Atome :



Bandlücke:  $\Delta E$  zwischen Leitungsband und Valenzband

Bs: Isolator:  $\Delta E > 6 \text{ eV}$

Halbleiter:  $1 - 3 \text{ eV}$

Metall:  $0$

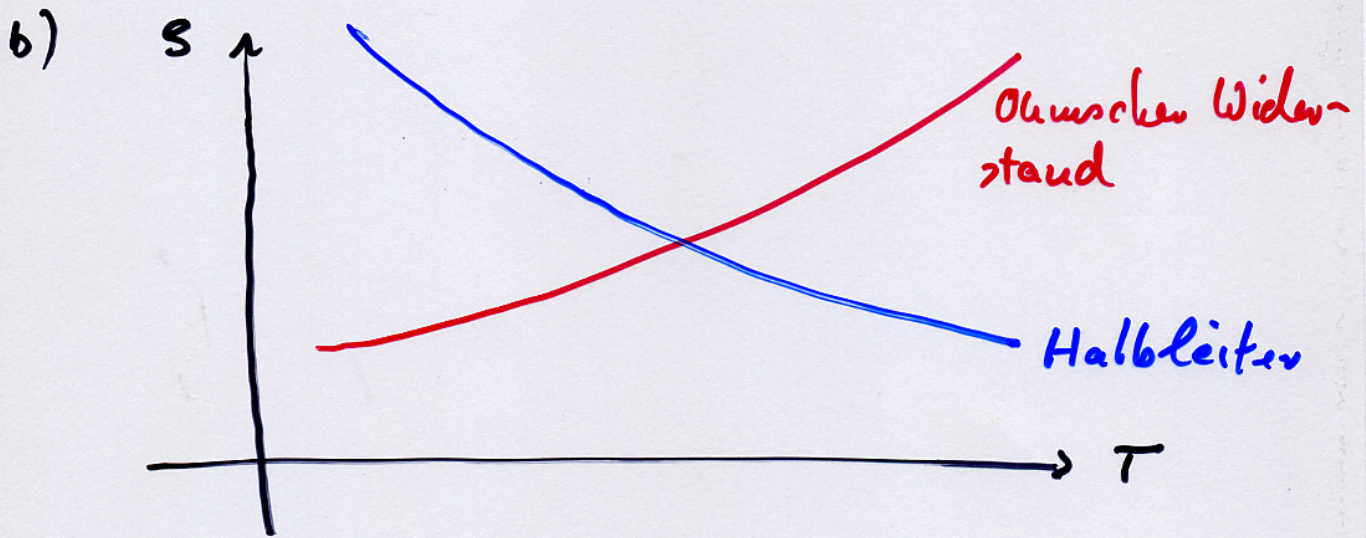
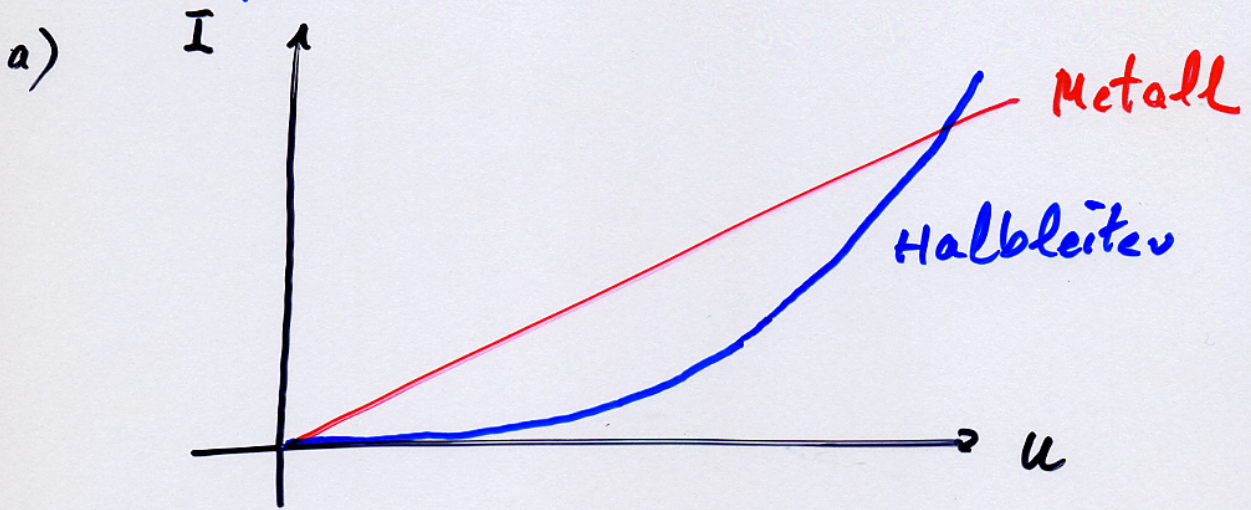
- Freie Bewegung im Leitungsband

- Besetzung im Leitungsband:

$$n_e(T) = n_0 \cdot e^{-\Delta E / kT}$$

Je mehr Elektronen im Leitungsband, desto besser elektr. Leitung

Konsequenz:



### 3.2.3 Stromleistung und Energie

- Leistung: Arbeit / Zeit

$$P \equiv \frac{dW}{dt}$$

Mit  $W = q \cdot U$

$$P = \frac{dW}{dt} = U \cdot \frac{dq}{dt} = U \cdot I$$

$$[P] = 1 \text{ VA} = 1 \text{ W (att)}$$

- Energie

$$W = \int_{t_1}^{t_2} P dt$$

Für konstanten Strom:  $W = U \cdot I \cdot \Delta t$

$$[W] = 1 \text{ VAs} = 1 \text{ Ws}$$

Energieverbrauch:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}$$

$$W = \frac{U^2}{R} \Delta t$$

Bs: 1 100 W Lampe eine Nacht an:  
 $W = 100 \text{ W} \cdot 8 \cdot 3600 \text{ s} \approx 1 \text{ kWst} \hat{=} 28 \text{ €}$