



**Physik der
Kondensierten Materie 2**

Rudolf Gross

SS 2021

Teil 7

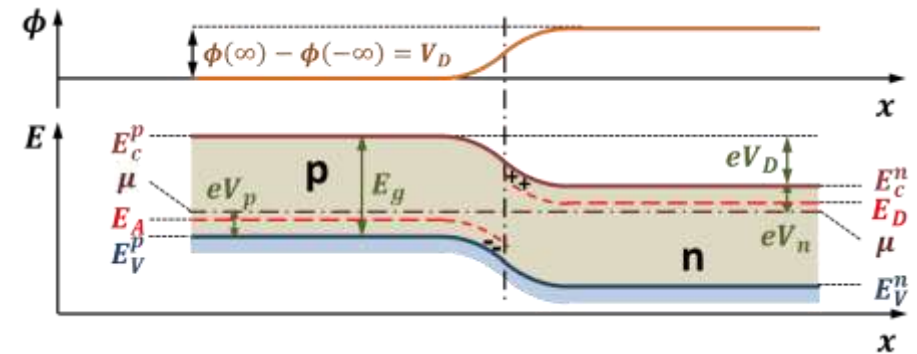
Vorlesungsstunde: 20.04.2021-1

• **pn-Übergang im thermischen Gleichgewicht** → Kompensation von Diffusions- und Driftströmen

– Diffusionsspannung: $eV_D = k_B T \ln\left(\frac{n_n p_p}{n_i^2}\right)$

– Einstein-Relationen: $D_n = \frac{k_B T}{e} \mu_n$ $D_p = \frac{k_B T}{e} \mu_p$

– lok. LT-Dichte: $n(x) = n_c^{\text{eff}} \exp\left(-\frac{\tilde{E}_c(x) - \mu}{k_B T}\right)$ $\tilde{E}_c(x) = E_c(\infty) - \phi(x)$



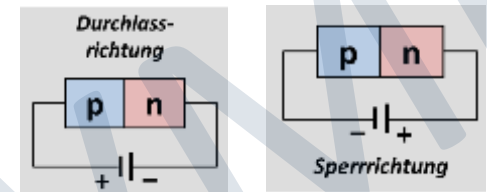
• **Schottky-Modell zur Berechnung von phi(x)**

$$-\epsilon \epsilon_0 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \rho(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < -d_p \\ -en_A & \text{für } -d_p \leq x \leq 0 \\ +en_D & \text{für } 0 \leq x \leq d_n \\ 0 & \text{für } x > d_n \end{cases} \xrightarrow[\text{Randbed.}]{\text{Integration}} \phi(x) = \begin{cases} \phi(-\infty) & \text{für } x < -d_p \\ \phi(-\infty) + \frac{en_A}{2\epsilon\epsilon_0} (d_p + x)^2 & \text{für } -d_p \leq x \leq 0 \\ \phi(+\infty) + \frac{en_D}{2\epsilon\epsilon_0} (d_n - x)^2 & \text{für } 0 \leq x \leq d_n \\ \phi(+\infty) & \text{für } x > d_n \end{cases}$$

• **pn-Übergang mit angelegter Spannung**

$\phi(+\infty) - \phi(-\infty) = V_D - U \xrightarrow{\text{IVC}} J(U) = (J_p^{\text{gen}} + J_n^{\text{gen}}) (e^{eU/k_B T} - 1)$

Sättigungsstrom: von U unabhängiger Minoritäts-LT-Strom



• **Breite der Raumladungszone**

$U = 0$

$$d_n = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_D}{e} \frac{n_A/n_D}{n_A + n_D}\right)^{1/2}$$

$$d_p = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_D}{e} \frac{n_D/n_A}{n_A + n_D}\right)^{1/2}$$

$U \neq 0$

$$d_n = d_n(U=0) \left(1 - \frac{U}{V_D}\right)^{1/2}$$

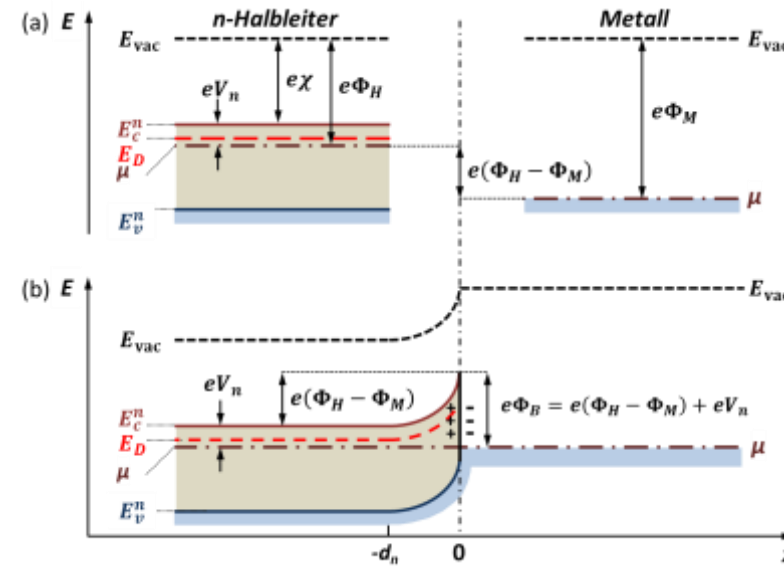
$$d_p = d_p(U=0) \left(1 - \frac{U}{V_D}\right)^{1/2}$$

- Ladung: $\delta Q_{RL} = en_D A \left.\frac{\partial d_n}{\partial U}\right|_{U_0} \delta U + en_A A \left.\frac{\partial d_p}{\partial U}\right|_{U_0} \delta U$

- Kapazität: $C_{RL}(U_0) = \left.\frac{\delta Q_{RL}}{\delta U}\right|_{U_0} = A \left[\frac{n_A n_D}{n_A + n_D} \frac{e\epsilon\epsilon_0}{(V_D - U_0)}\right]^{1/2}$

• Schottky-Kontakt

- unterschiedliche Austrittsarbeit von Metall und HL
→ chemische Potentiale sind um $\Phi_M - \Phi_H$ verschoben
- Behandlung äquivalent zu pn -Übergang
→ $\Phi_M - \Phi_H$ entspricht V_D



• Schottky-Modell zur Berechnung von $\phi(x)$

$$\rho(x) = \begin{cases} en_D & \text{für } -d_n \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \xrightarrow[\text{Randbed.}]{\text{Integration}} \phi(x) = \begin{cases} (\Phi_M - \Phi_H) - \frac{en_D}{2\epsilon\epsilon_0} (d_n + x)^2 & \text{für } -d_n \leq x \leq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

entspricht Diffusionsspannung bei pn -Kontakt

• Breite der Raumladungszone

$$U = 0 \quad d_n = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0}{en_D} (\Phi_M - \Phi_H) \right)^{1/2}$$

$$U \neq 0 \quad d_n = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0}{en_D} (\Phi_M - \Phi_H - U) \right)^{1/2}$$

• Bauelemente basierend auf pn -Übergang

- Zener-Diode, Rückwärtsdiode, Esaki-Diode

10.3.3 Solarzelle

- Solarzelle ist *pn*-Kontakt, in dessen RL-Zone durch Lichteinstrahlung Elektron-Loch-Paare erzeugt werden
 - erstmalige Realisierung durch **Chapin, Fuller und Pearson** (1954)
 - große wirtschaftliche Bedeutung (erneuerbare Energien)



- Aufbau und prinzipielle Funktionsweise

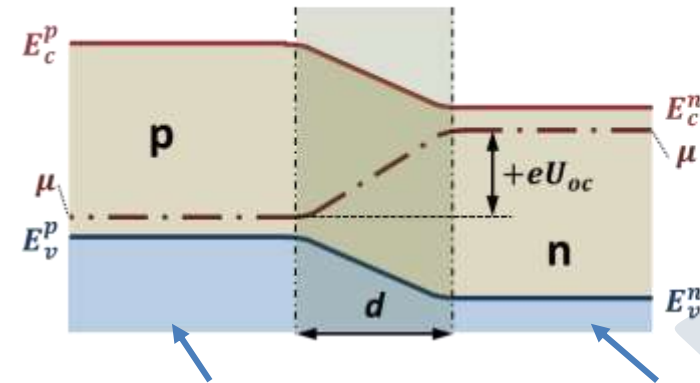
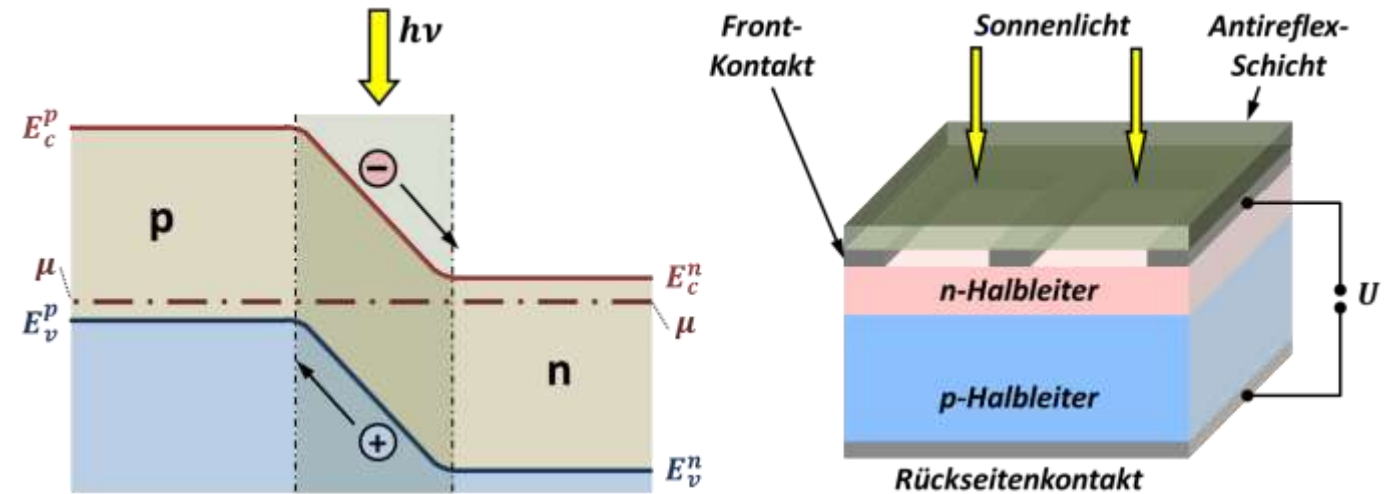
typischer Aufbau einer Si-Solarzelle

- dünne hochdotierte ($\approx 10^{19} \text{cm}^{-3}$) n -Schicht
- dicke niedrigdotierte p -Schicht (RL sollte breiter als Absorptionslänge sein)
- Anti-Reflexionsschicht
- Vorder- und Rückseitenkontakt

Funktionsweise

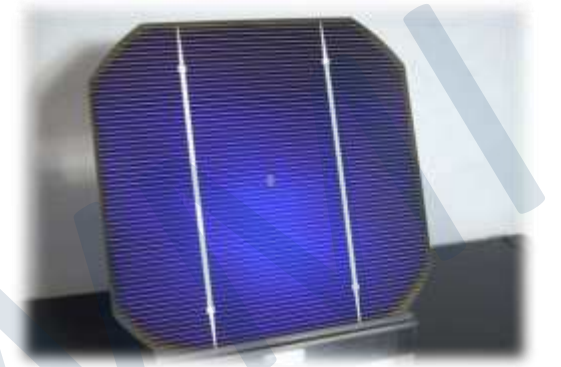
- Erzeugung von e - h -Paaren in RL-Zone
- Trennung von e und h durch E -Feld in RL-Zone \rightarrow zusätzlicher Driftstrom I_L von Minoritäts-LT
- angesammelte Ladung führt zu Potenzialdifferenz eU_{oc} ohne externe Last (open circuit Spannung)

positive Spannung U_{oc} über pn -Kontakt



positiv aufgeladen:
 E_{pot} der Elektronen um $(-e)(+U)$ abgesenkt

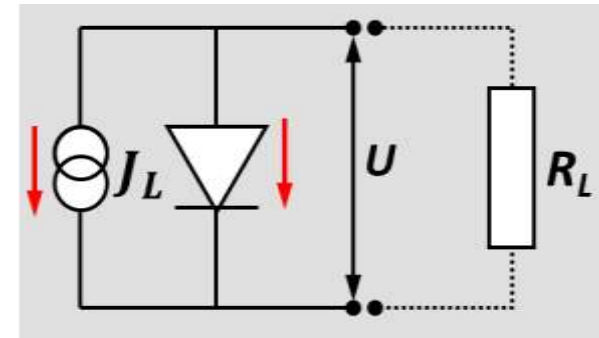
negativ aufgeladen:
 E_{pot} der Elektronen um $(-e)(-U)$ angehoben



10.3.3 Solarzelle

- **Strom-Spannungs-Kennlinie**

- Ersatzschaltbild: *pn*-Kontakt mit zusätzlicher Stromquelle J_L ,
 J_L = Stromdichte durch lichtinduzierte LT



Strom-Spannungs-Kennlinie

$$J(U) = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] - J_L$$

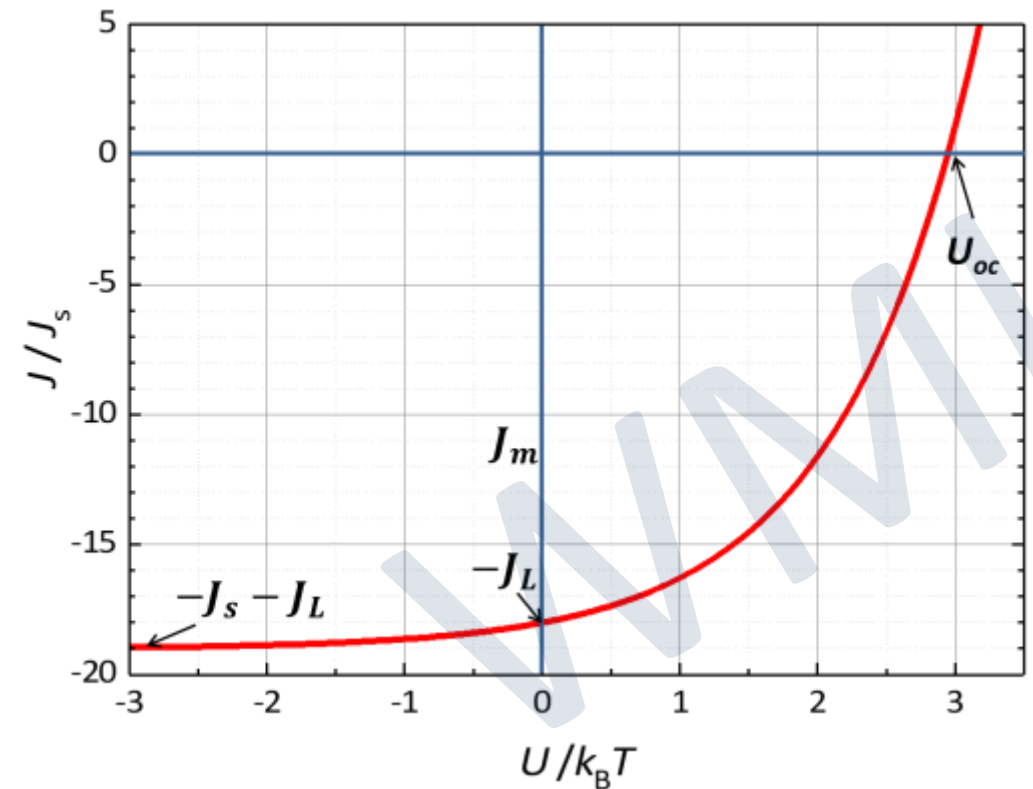
- Solarzelle ohne Last (open circuit): $J(U_{oc}) = 0$

Auflösen nach U_{oc} :

$$U_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_s} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_s}\right) \quad \text{da meist } J_L \gg J_s$$

- kurzgeschlossene Solarzelle : $U = 0$

$$J = -J_L$$



10.3.3 Solarzelle

- Elektrotechnik: Welchen Arbeitspunkt muss ich verwenden, um die maximale Leistung zu entnehmen?

IVC unter Beleuchtung:

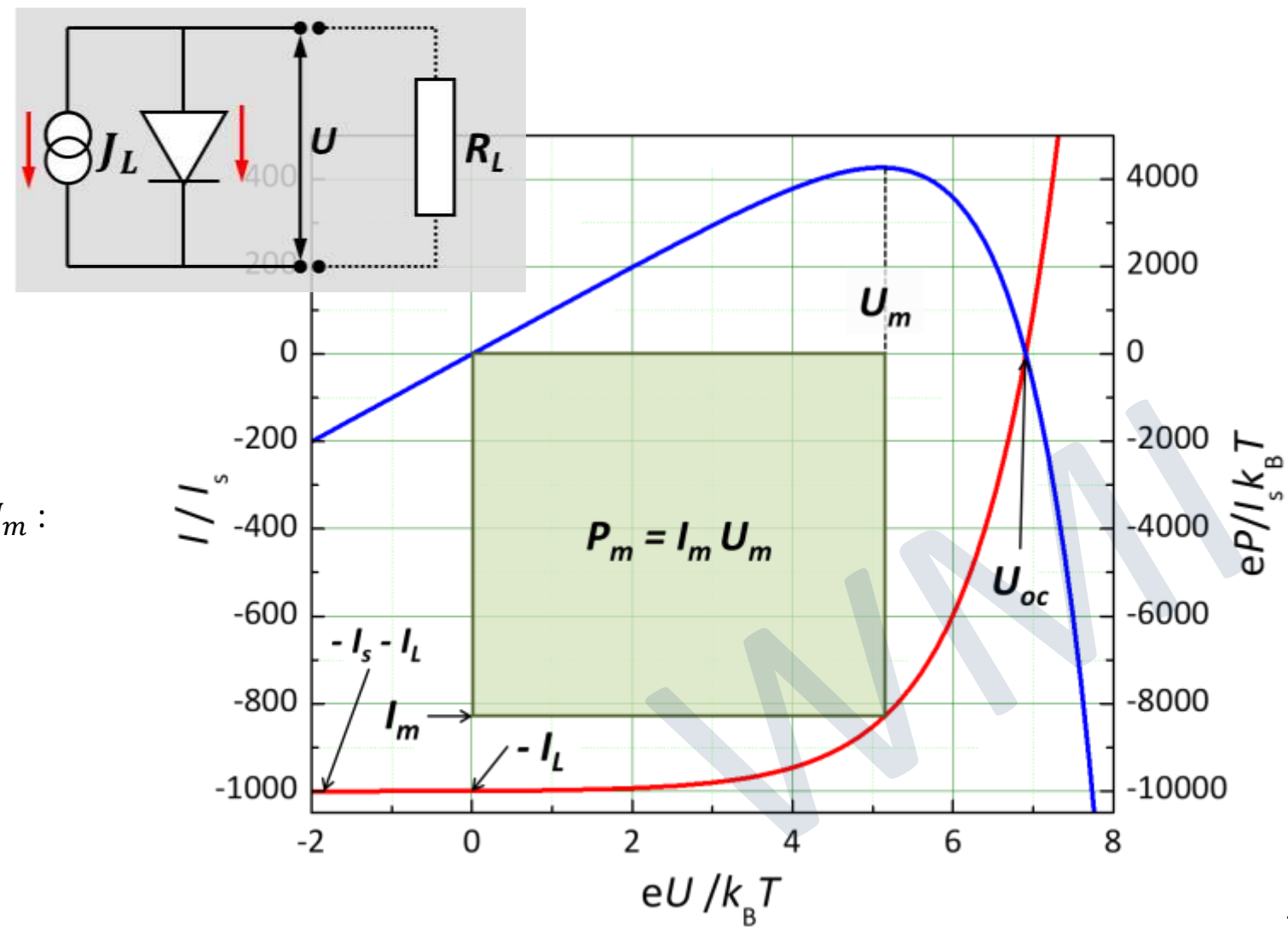
$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] - J_L$$

an Last abgegebene Flächenleistung P :

$$P = J \cdot U$$

Bestimmung des Maximums von $P_m = J_m \cdot U_m$:

$$\frac{dP}{dU} = 0$$



10.3.3 Solarzelle

- Berechnung von U_m

$$P = UJ_s \left[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] - UJ_L \quad \longrightarrow \quad \frac{dP}{dU} = 0 = J_s \exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) + \frac{eU_m J_s}{k_B T} \exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) - J_s - J_L$$

- ausklammern von $\exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right)$: $0 = \exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) \left[J_s + \frac{U_m J_s e}{k_B T} \right] - J_s - J_L$

- teilen durch J_s : $0 = \exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) \left[1 + \frac{U_m e}{k_B T} \right] - 1 - \frac{J_L}{J_s}$

- umformen: $1 + \frac{J_L}{J_s} = \exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) \left[1 + \frac{U_m e}{k_B T} \right]$

- logarithmieren und umformen: $U_m = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{\frac{J_L}{J_s} + 1}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1}\right)$

$$U_m = \underbrace{\frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_s} + 1\right)}_{U_{oc}} - \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1\right) \quad \longrightarrow \quad U_m = U_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1\right)$$

10.3.3 Solarzelle

- Berechnung von J_m

$$J_m = J_s \left[\exp\left(\frac{eU_m}{k_B T}\right) - 1 \right] - J_L \quad \text{mit} \quad U_m = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{\frac{J_L}{J_s} + 1}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1}\right)$$

einsetzen von U_m ergibt: $J_m = J_s \left(\frac{\frac{J_L}{J_s} + 1}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1} - 1 \right) - J_L$

ausklammern von $\frac{J_L}{J_s}$: $J_m = -J_L \left(\frac{J_s}{J_L} - \frac{1 + \frac{J_s}{J_L}}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1} \right) - J_L$

umformen in: $J_m = -J_L \left(1 - \frac{1 + \frac{J_s}{J_L} - \frac{J_s}{J_L} \left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1 \right)}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1} \right)$

$$\rightarrow J_m = -J_L \left(1 - \frac{1 - \frac{J_s}{J_L} \frac{eU_m}{k_B T}}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1} \right)$$

meistens gilt $J_L \gg J_s$,
 $eU_m \gg k_B T$

$$\rightarrow J_m \approx -J_L \left(1 - \frac{1}{eU_m/k_B T} \right)$$

10.3.3 Solarzelle

- Berechnung von $E_m = \frac{P_m}{J_L/e}$: pro erzeugtem Ladungsträger am Lastwiderstand im Mittel abgegebene Energie

wir verwenden:

$$U_m = U_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1 \right)$$

$$J_m \approx -J_L \left(1 - \frac{1}{eU_m/k_B T} \right) \quad \text{für } J_L \gg J_s, \quad eU_m \gg k_B T$$

$$E_m = \frac{P_m}{J_L/e} = \frac{-U_m J_m}{J_L/e} = -eU_m \frac{J_m}{J_L}$$

einsetzen von J_m ergibt:

$$E_m = eU_m \left(1 - \frac{1}{eU_m/k_B T} \right) = eU_m - k_B T$$

einsetzen U_m ergibt:

$$E_m = e \left[U_{oc} - \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1 \right) \right] - k_B T$$

$$E_m = eU_{oc} - k_B T \left[\ln \left(\frac{eU_m}{k_B T} + 1 \right) + 1 \right]$$

um E_m groß zu machen, sollte $U_{oc} \approx \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{J_L}{J_s} \right)$ groß sein

- $J_L \gg J_s$:
- hohes J_L durch Konzentratorzellen
 - kleines J_s durch T -Erniedrigung
($J_s \approx 10^{-15} \text{ cm}^{-2}$ für Si @ 300 K)

- Wirkungsgrad von Solarzellen

- Definition des Wirkungsgrads/der Konversionseffizienz:

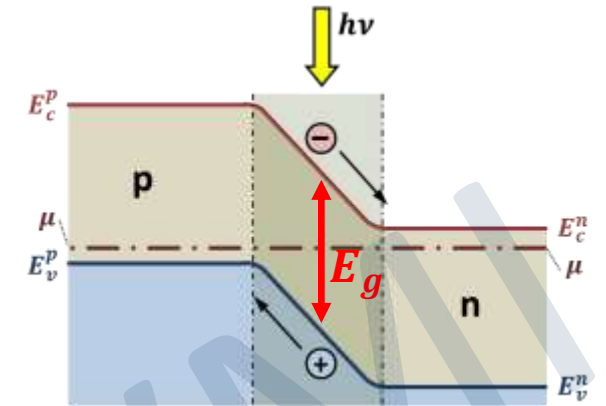
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{\text{maximal gelieferte elektrische Leistung}}{\text{ankommende Strahlungsleistung}}$$

Welcher Anteil der Lichtleistung kann maximal in elektrische Leistung umgewandelt werden?

- zusätzlich zu der pro erzeugtem LT an Last abgegebenen Energie E_m müssen wir noch wissen, welche mittlere Strahlungsenergie zur Erzeugung eines LT notwendig ist

Verlustprozesse bei der Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie

- Photonen mit $h\nu < E_g$ können keine e-h Paare anregen
- Photonen mit $h\nu > E_g$ regen e-h Paare an, die aber einen Teil ihrer Energie durch Relaxation an Bandkante verlieren
- ein Teil der Photonen wird an Oberfläche der Solarzelle reflektiert
- durch Kontaktierungsschichten wird ein Teil der Oberfläche abgedeckt: Reduktion der effektiven Zellfläche
- Flächenbedarf von Halterungen/Befestigungen
-



10.3.3 Solarzelle

- Zusammenhang zwischen einfallendem Photonenfluss J_{ph} und erzeugter elektrischer Stromdichte J_L

Annahme: Jedes einfallende Photon mit Energie $h\nu > h\nu_g = E_g$ kann e-h Paar erzeugen

➔ **lichtinduzierte elektrische Stromdichte**

$$J_L(\nu_g) = e J_{ph}(\nu_g) = e \int_{\nu=\nu_g}^{\infty} \left(\frac{dJ_{ph}(\nu)}{d\nu} \right) d\nu$$

spektraler Photonenfluss:

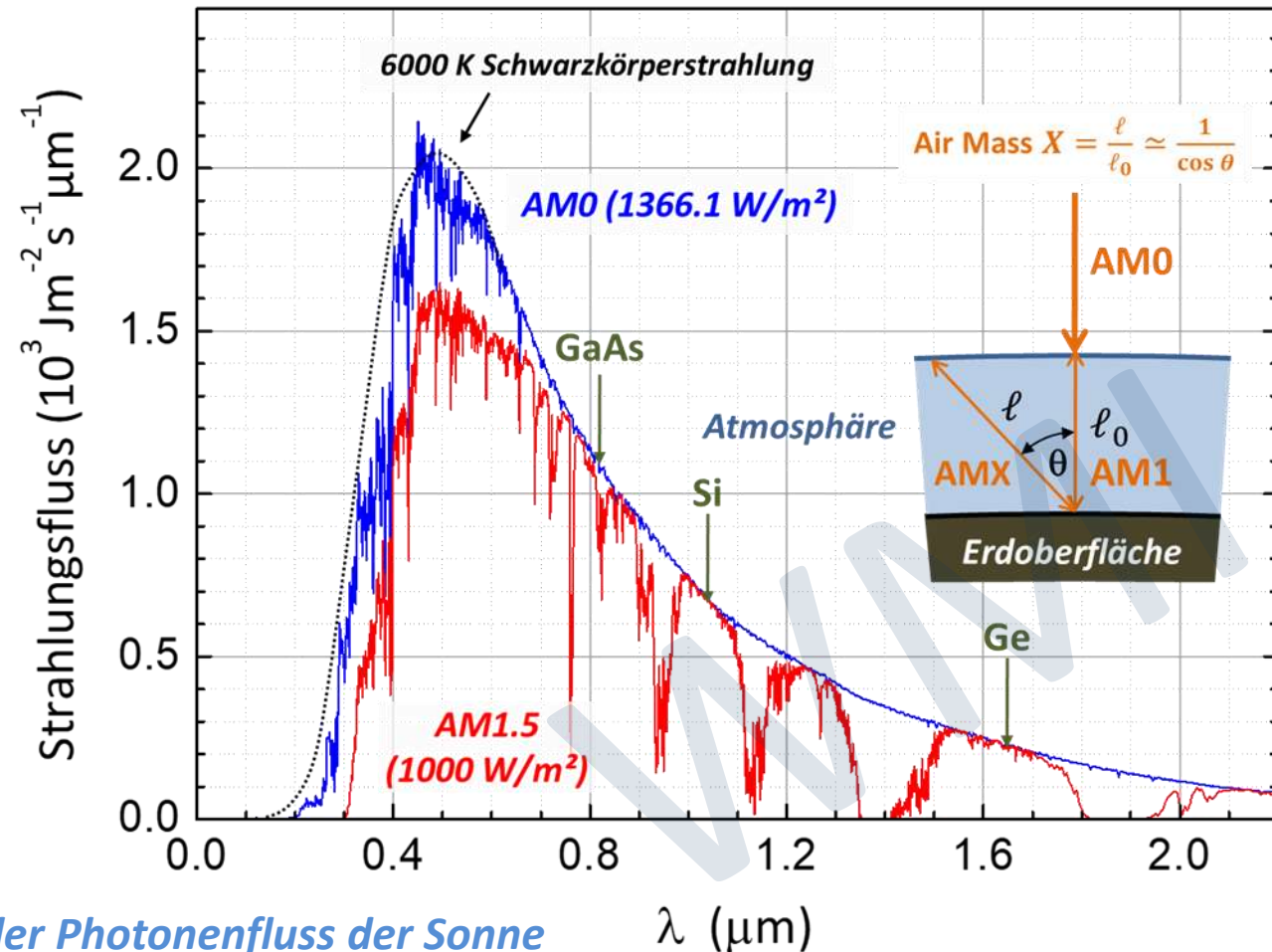
Photonen/Fläche·Zeit·Frequenzintervall

➔ **maximale elektrische Leistung pro Fläche**

$$P_m = J_L \cdot E_m / e$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_L E_m / e}{P_{in}}$$

Fläche unter Strahlungsfluss-Kurve



spektraler Photonenfluss der Sonne

10.3.3 Solarzelle

- Photonenfluss J_{ph} und zugehörige elektrische Stromdichte J_L für AM 1.5 als Funktion von $E_g = h\nu_g$

schrattierte Fläche = $J_L(E_g) \cdot E_g / e$:

Flächenleistung, falls alle erzeugten LT die Energie E_g abgeben könnten

rote Fläche :

reduzierte Flächenleistung, da $E_m < E_g$

Wirkungsgrad :

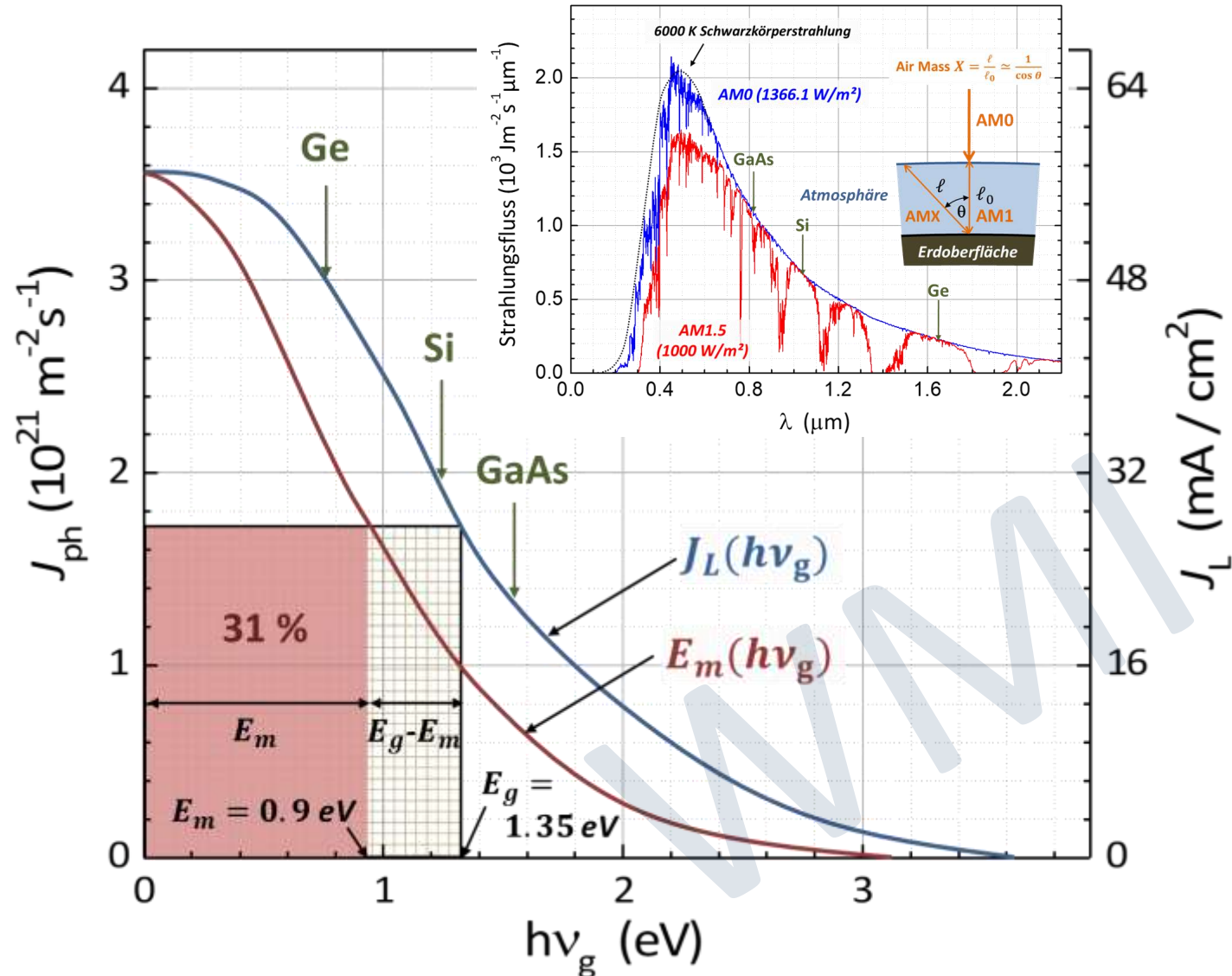
$$\eta = \frac{\text{rote Fläche}}{\text{Fläche unter Strahlungsfluss – Kurve}}$$

$$\eta_{\max} \approx 31\% \text{ für } E_g = 1.35 \text{ eV}$$

Grenzfälle:

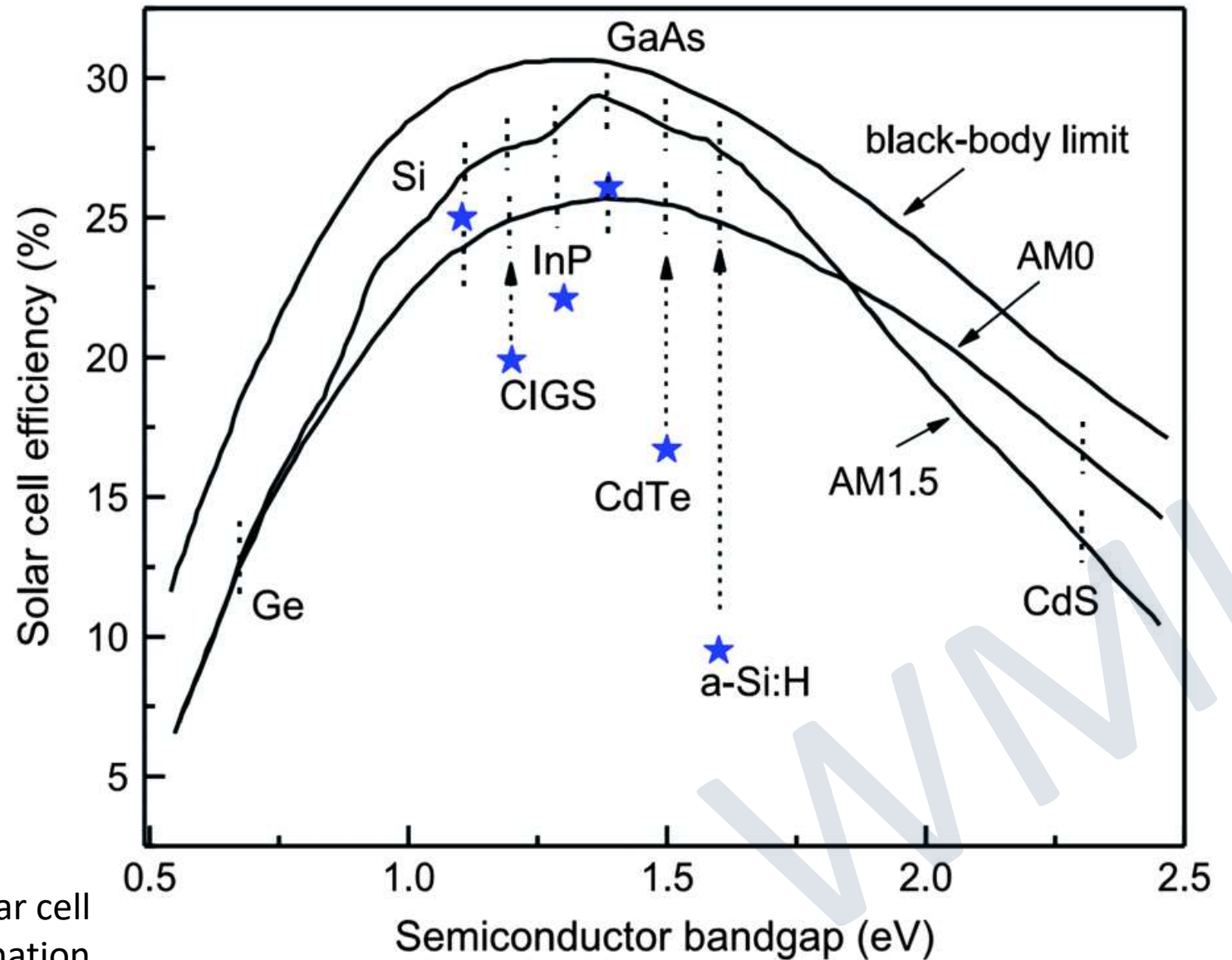
$$\eta \rightarrow 0 \text{ für } E_g \rightarrow 0: J_L = \max, \text{ aber } E_m \rightarrow 0$$

$$\eta \rightarrow 0 \text{ für } E_g \rightarrow \infty: E_m = \max, \text{ aber } J_L \rightarrow 0$$



10.3.3 Solarzelle

- maximale Konversionseffizienz



Asterisks show the best confirmed solar cell efficiencies under AM 1.5 illumination

10.3.3 Solarzelle

Halbleitermaterial	Kristallinität/ Schichtstruktur	Wirkungsgrad Labor (%)	Wirkungsgrad Produktion (%)
Si	amorph	13	5–8
	polykristallin	20	13–16
	monokristallin	25	14–17
GaAs	Einschicht	25	15–22
GaAs/GaInP/GaInAs	Mehrschicht	40	20–28
Cu(In,Ga)Se ₂	Einschicht	20	13–15
CdTe	Einschicht	16.5	5–12
Organische Halbleiter	Einschicht	6.5	—

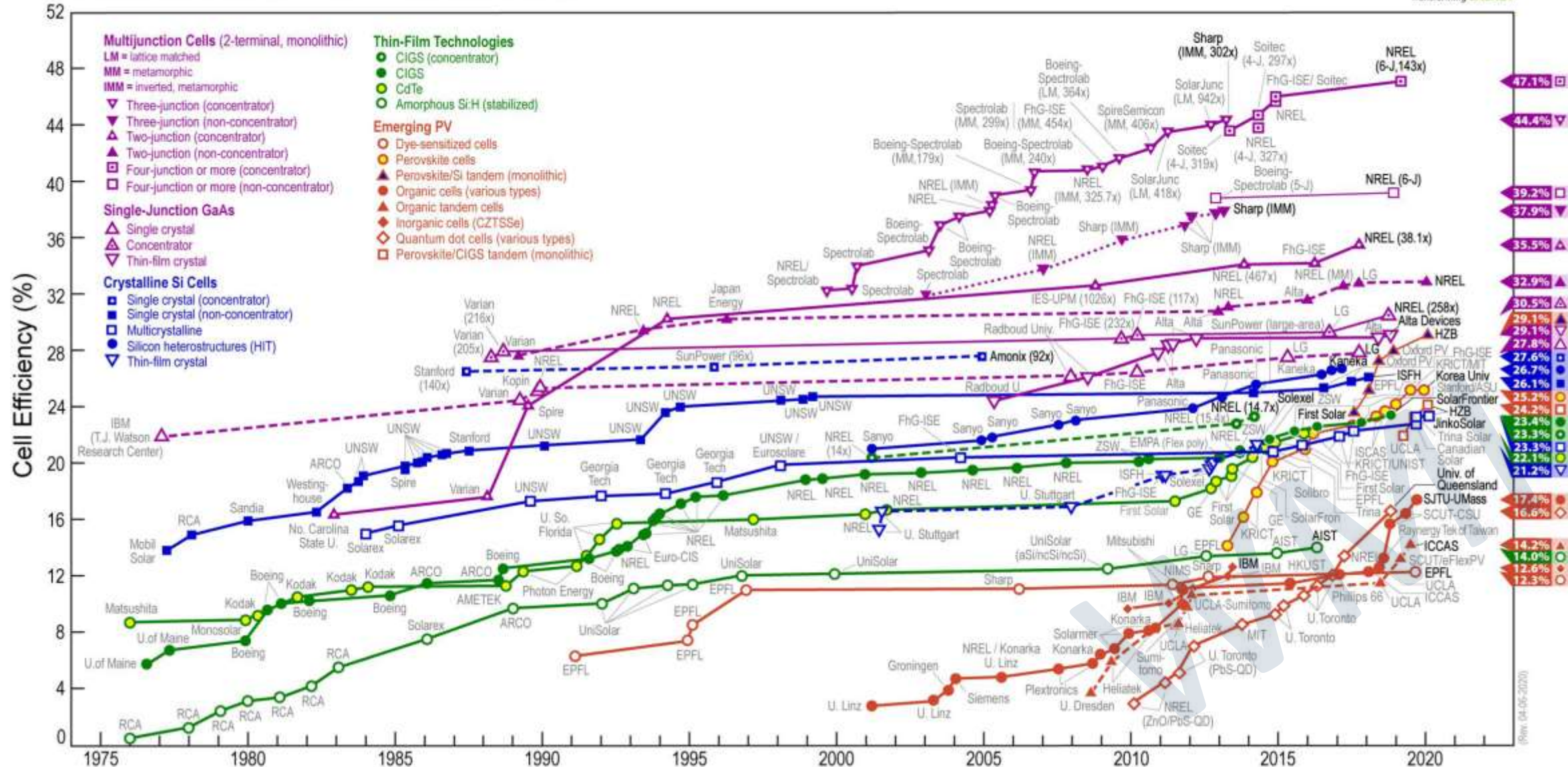
← mehrere HL-Materialien mit unterschiedlichem E_g werden gestapelt



10.3.3 Solarzelle

Best Research-Cell Efficiencies

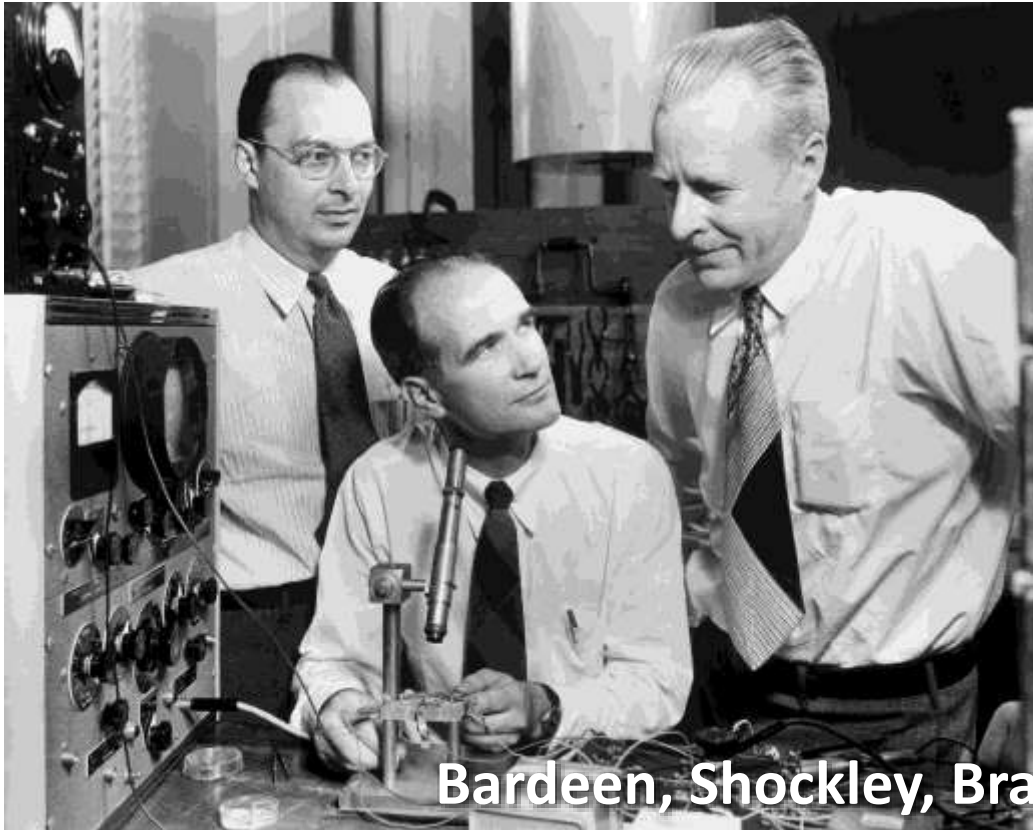
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>



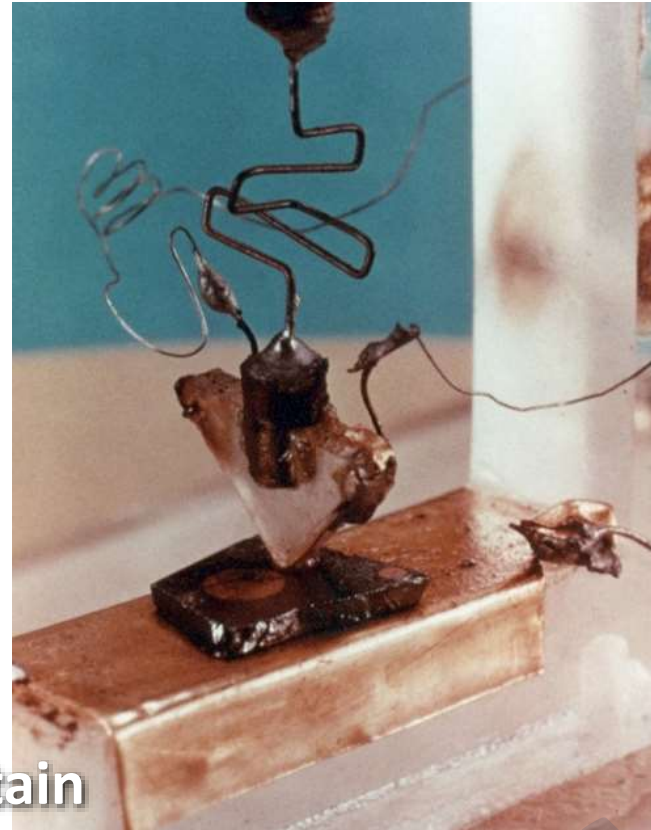
(Rev. 04-06-2020)

10.3.4 Bipolarer Transistor

- Entwicklung im Jahr 1947 durch Bardeen, Brattain und Shockley bei AT&T Bell Labs.



Bardeen, Shockley, Brattain



John **Bardeen**,
Walter **Brattain**,
William **Shockley**

Nobelpreis für Physik 1956:
„für ihre Untersuchungen über Halbleiter und ihre Entdeckung des Transistoreffekts“

- sehr breite Anwendung in Analog- und Digitalelektronik
- bereits im Jahr 2002 wurden mehr als 1 Trillion Transistoren produziert

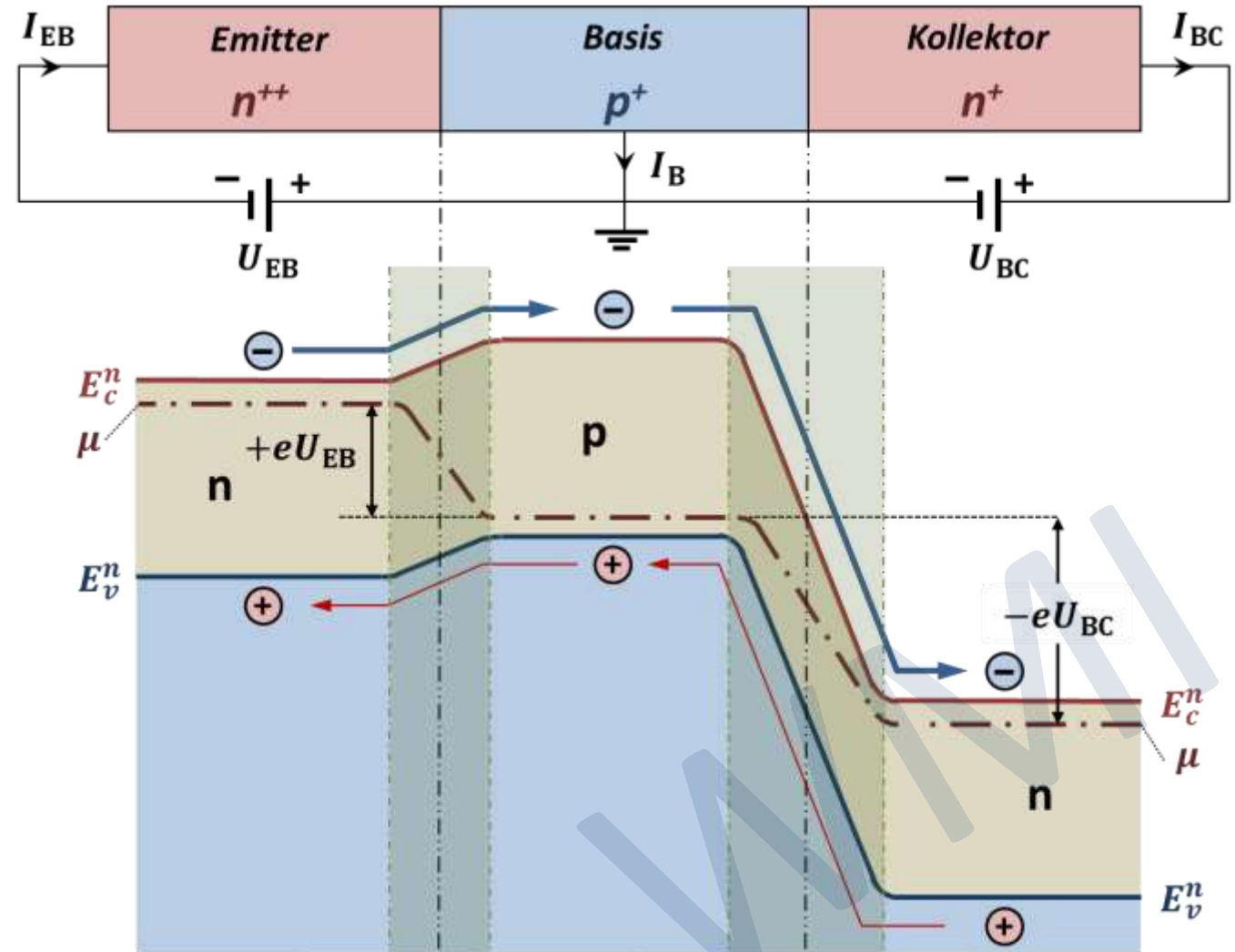
10.3.4 Bipolarer Transistor

• Bandverlauf im *npn*-Transistor

- zwei hintereinandergeschaltete *pn*-Übergänge
 - Emitter-Basis (EB): Durchlassrichtung
 - Basis-Kollektor (BC): Sperrrichtung

- Elektronen, die über EB-Kontakt fließen, sollten alle durch U_{BC} in Kollektor abgesaugt werden
 - $I_{EB} \approx I_{BC} \Rightarrow I_B \approx 0$
 - ➔ Leistung im EB-Kreis: $P_{EB} = I_B U_{EB} \approx 0$
 - ➔ Leistung im BC-Kreis: $P_{EB} = I_{BC} U_{BC} \gg 0$
 - dünne Basis, da sonst $I_{EB} > 0$ wegen Rekombination

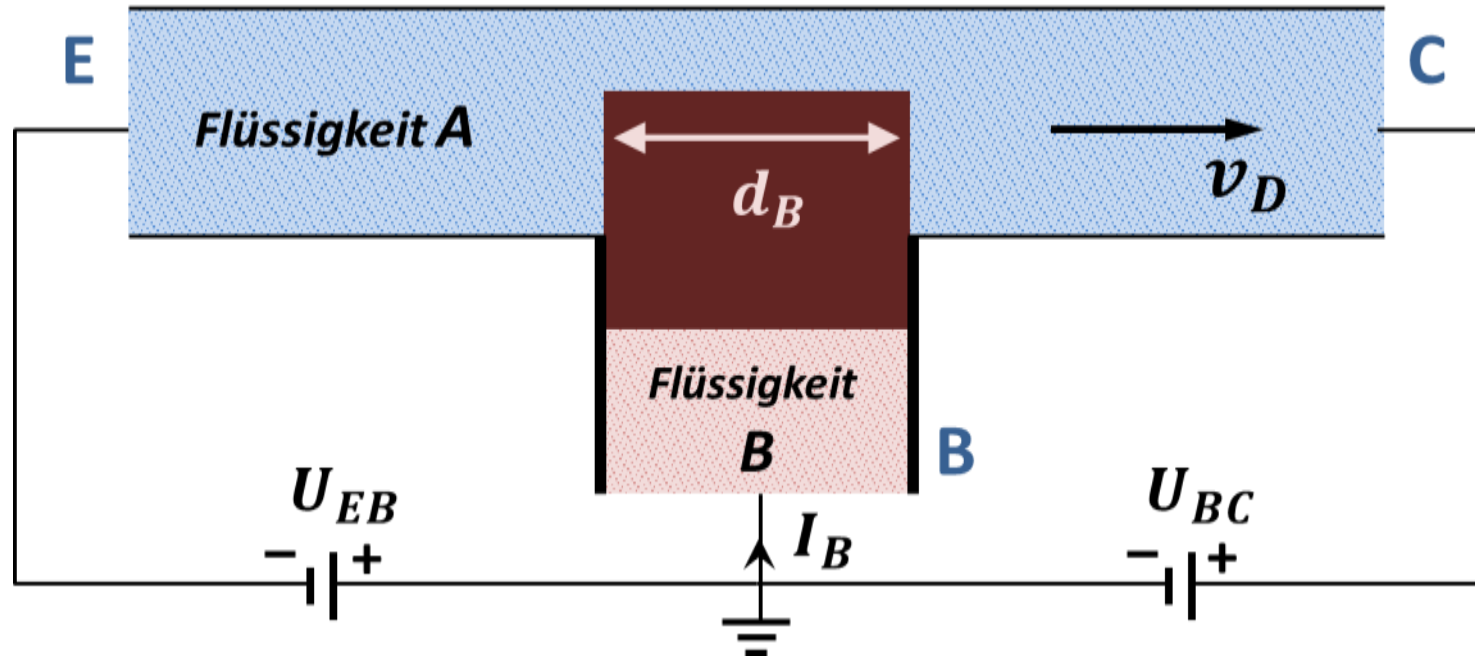
➔ **Verstärkendes Bauelement:**
 kleines δU_{EB} resultiert in großem $P_{BC} = I_{BC} U_{BC}$ im Ausgangskreis



$$I_{EB} \approx I_{BC} \Rightarrow I_B \approx 0 \quad \rightarrow \quad P_{EB} = I_B U_{EB} \approx 0 \quad \rightarrow \quad P_{BC} = I_{BC} U_{BC} \gg 0$$

10.3.4 Dreitor-Bauelemente

- Bipolarer und Feldeffekt-Transistor gehören zu den sogenannten Dreitor-Bauelementen



Landauersches Flüssigkeitsmodell

→ **Allgemeines Prinzip:**

Fluss einer Flüssigkeit A (z.B. Elektronen) wird über einen Kolben durch zweite Flüssigkeit B möglichst leistungslos gesteuert

→ **Grenzfrequenz:**

$f_{\text{grenz}} = v_{\text{fl}}/d_B$ → hohe Grenzfrequenz erfordert kurze Kanallänge und hohe Fließgeschwindigkeit
 z.B. Photonen: Lichtgeschw. c , Fluxonen bei Rapid Single Flux Quantum Logik : etwa $c/10$)

10.3.4 Dreitor-Bauelemente



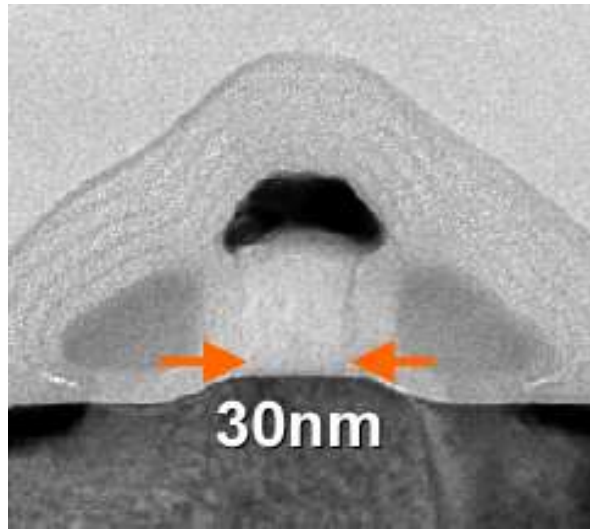
Rolf Landauer

Born: February 4, 1927, Stuttgart

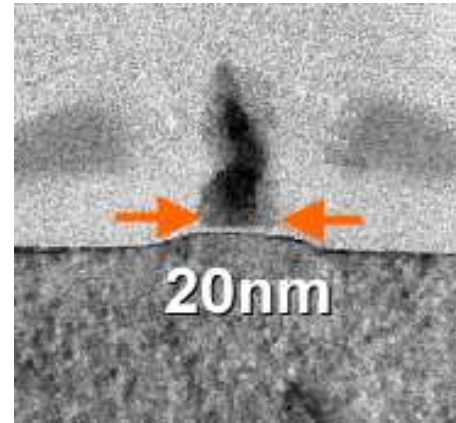
Died: April 27, 1999, Briarcliff Manor, New York, United States

10.3.4 Dreitor-Bauelemente

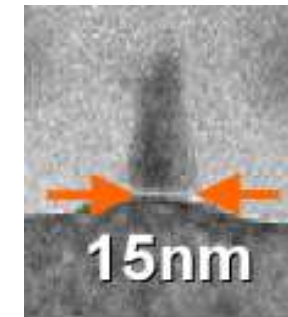
- Entwicklung der Kanallänge von Feldeffekt-Transistoren



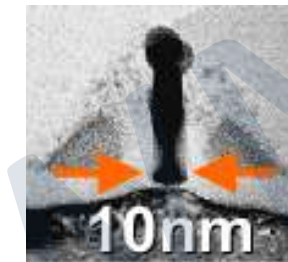
65 nm process
2005



45 nm process
2007



32 nm
2009



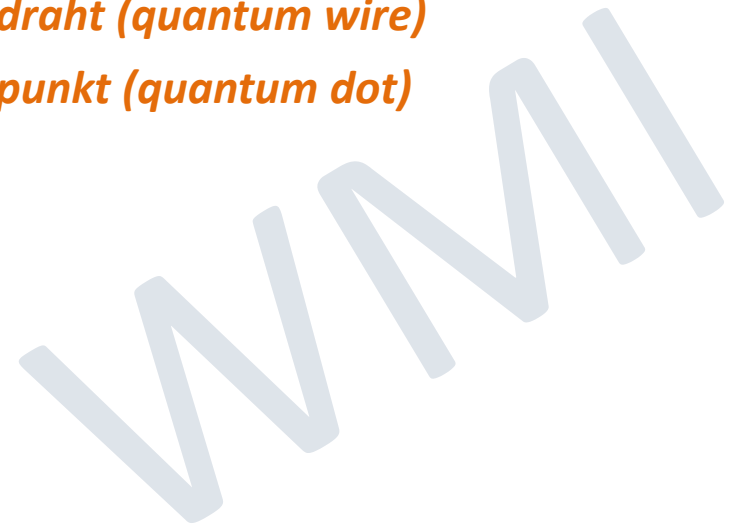
22 nm
2011

Quelle: Intel

10.4 Niedrigdimensionale Elektronengassysteme

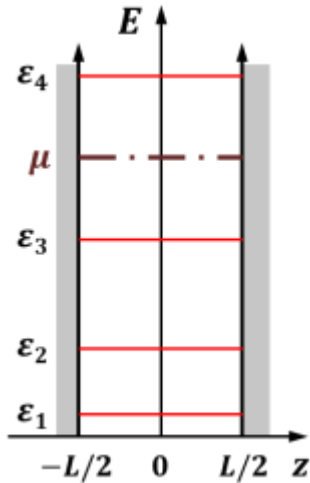
- Räumliche Einschränkung von HL-Systemen durch Potenzialwälle erlaubt Reduktion der Dimensionalität
 - relevante Längenskala: **Fermi-Wellenlänge** $\lambda_F \propto n^{-1/3}$

Metalle:	$\lambda_F \lesssim 1 \text{ nm}$ da $n \gtrsim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	→ Realisierung schwierig
Halbleiter:	$\lambda_F \gtrsim 10 \text{ nm}$ da $n \lesssim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	→ Realisierung einfach
 - **Nomenklatur:**
 - 2D: zweidimensionales Elektronengas (2DEG)
 - 1D: eindimensionales Elektronengas (1DEG) → **Quantendraht (quantum wire)**
 - 0D: nulldimensionales Elektronengas (0DEG) → **Quantenpunkt (quantum dot)**



10.4 Niedrigdimensionale Elektronengassysteme

- zweidimensionales Elektronengas (Wiederholung)



- Einschränkung in eine Raumrichtung (z) führt zu 2DEG

- Verschwinden der Wellenfunktion bei $z = \pm L/2$ führt zu Einschränkung der möglichen Wellenzahlen

$$k_{z,n} = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{\pi}{L} n \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- diskrete Eigenenergien

$$\varepsilon_{z,n} = \frac{\hbar^2 k_{z,n}^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m L^2} n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- Gesamtenergie

$$E_n = E_{||} + \varepsilon_{z,n} = \underbrace{\frac{\hbar^2 k_{||}^2}{2m}}_{\text{freie Bewegung in } xy\text{-Ebene (parabolische Subbänder)}} + \underbrace{\frac{\hbar^2 \pi^2}{2m L^2} n^2}_{\text{diskrete Energien durch Confinement in } z\text{-Richtung}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

freie Bewegung in xy -Ebene (parabolische **Subbänder**) diskrete Energien durch Confinement in z -Richtung

Confinement-Energie

$$\varepsilon_{z,1} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m L^2} > 0$$

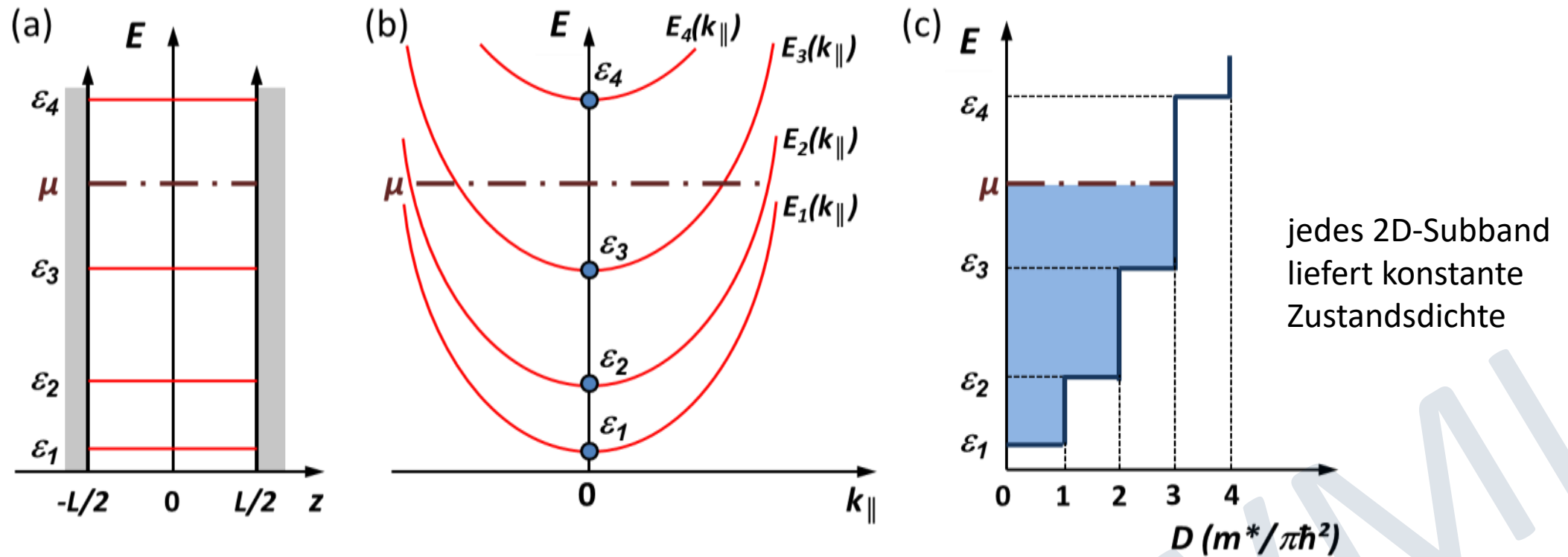
Ursache: Unschärferelation

$$V(z) = \begin{cases} 0 & \text{für } -\frac{L}{2} < z < +\frac{L}{2} \\ \infty & \text{für } z \geq \frac{L}{2} \end{cases}$$

- Einschränkung in weitere Raumrichtungen führt zu 1D und 0D Elektronengas

10.4 Niedrigdimensionale Elektronengassysteme

- zweidimensionales Elektronengas



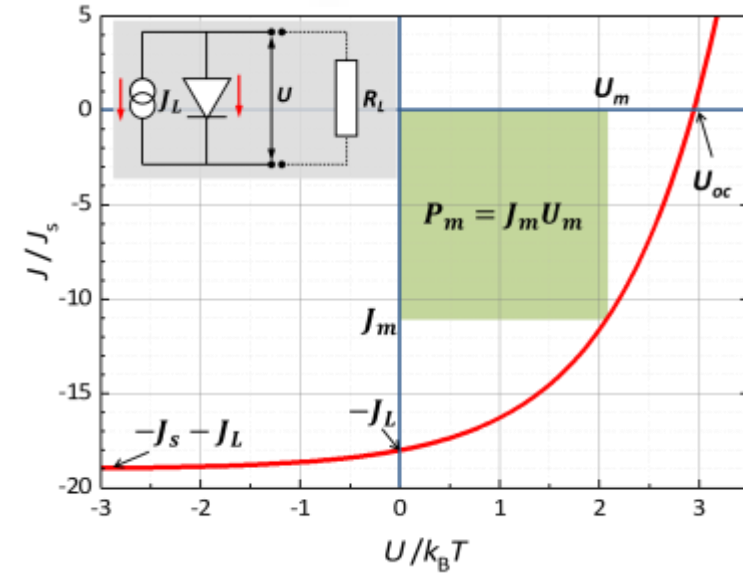
$$E_n = E_{\parallel} + \epsilon_{z,n} = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m L^2} n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

• **Solarzelle** IVC: $J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] - J_L$

$U = 0 \Rightarrow J_{sc} = -J_L$

$I = 0 \Rightarrow U_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_s} + 1\right)$

← zusätzlicher Driftstrom durch Beleuchtung



maximale Flächenleistung: aus $dP/dU = 0$ folgt

$$U_m = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L/J_s + 1}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1}\right) \quad J_m = -J_L \left(1 - \frac{1 - \frac{J_s}{J_L} \frac{eU_m}{k_B T}}{\frac{eU_m}{k_B T} + 1}\right)$$

$P_m = -J_m U_m = \frac{J_L}{e} \cdot E_m$

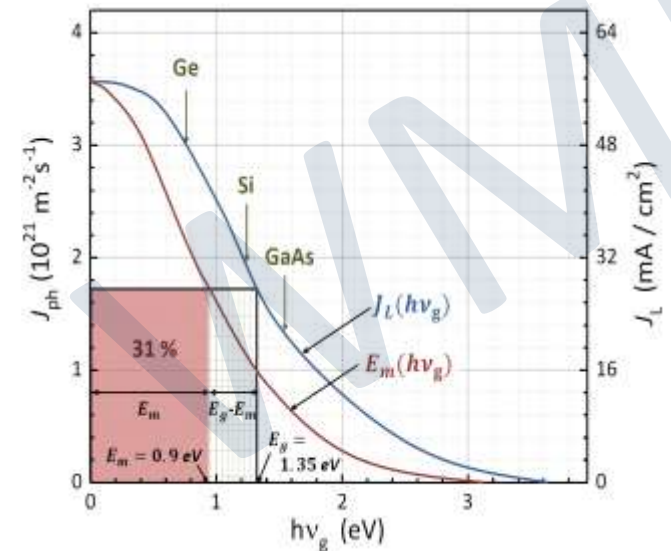
Konversionseffizienz: max. Ausgangsleistung/einfallende Strahlungsleistung

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{J_L E_m / e}{P_{in}} \quad \text{maximal 31\% bei } E_g \approx 1.35 \text{ eV}$$

$$J_L(v_g) = e J_{ph}(v_g) = e \int_{v=v_g}^{\infty} \frac{dJ_{ph}(v)}{dv} dv \quad \text{durch Photonenstromdichte } J_{ph} \text{ erzeugte elektrische Stromdichte } J_L$$

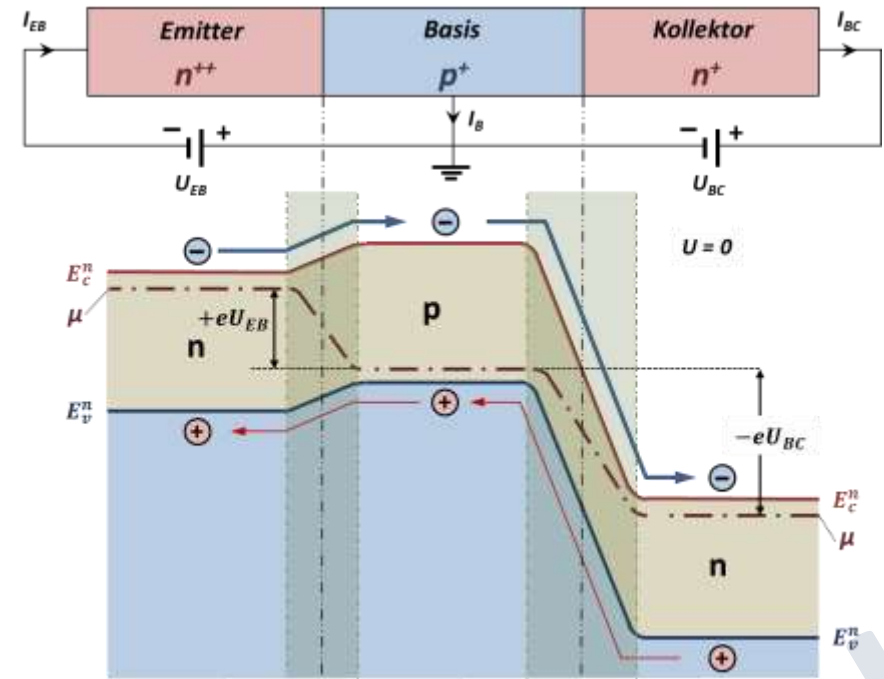
Wirkungsgrad: limitierende Faktoren

- (i) Photonen mit $h\nu < E_g$ tragen nicht bei
- (ii) für Photonen mit $h\nu > E_g$ wird nur $E_m < h\nu$ abgegeben
- (iii) Reflexion an Oberfläche, effektive Fläche < 100%, etc.
- (iv) Optimierung des Arbeitspunktes



• bipolarer Transistor

- zwei pn -Kontakte:
 Emitter-Basis-Kontakt in Durchlassrichtung
 Basis-Kollektor-Kontakt in Sperrrichtung
- Elektronen, die über EB-Kontakt in Basis fließen,
 werden durch BC-Potenzial abgesaugt
 - $I_{EB} \approx I_{BC} \Rightarrow I_B \approx 0$
 - $P_{EB} = I_B U_{EB} \approx 0$
 - $P_{BC} = I_{BC} U_{BC} \gg 0$



• niedrigdimensionale Elektronengassysteme

- Einschluss von Elektronengas auf Längenskala $L < \lambda_{\text{Fermi}}$
- 0D: **Quantenpunkt**, 1D: **Quantendraht**, 2D: **2D-Elektronengas**

Beispiel: 2D-Elektronengas

$$E_n = E_{\parallel} + \epsilon_n = \frac{\hbar^2 k_{\parallel}^2}{2m} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m L^2} n^2$$

