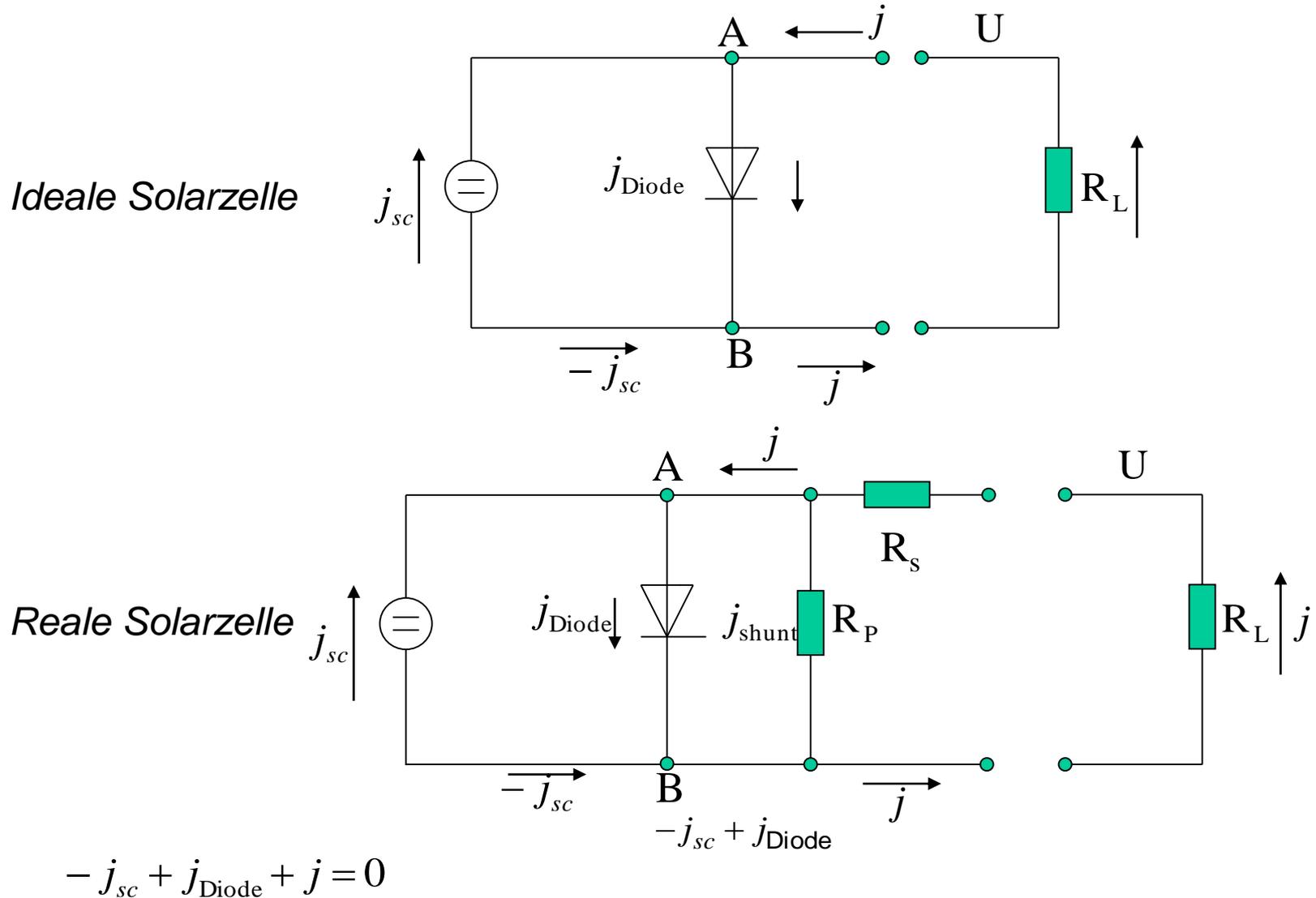


5. Solarzellen

5.1 Ersatzschaltbild für Solarzellen:



$$U_s = R_s \cdot j_s$$

$$U_{Diode} = U - R_s \cdot j$$

$$j = j_{Diode} + j_{shunt} - j_{sc}$$

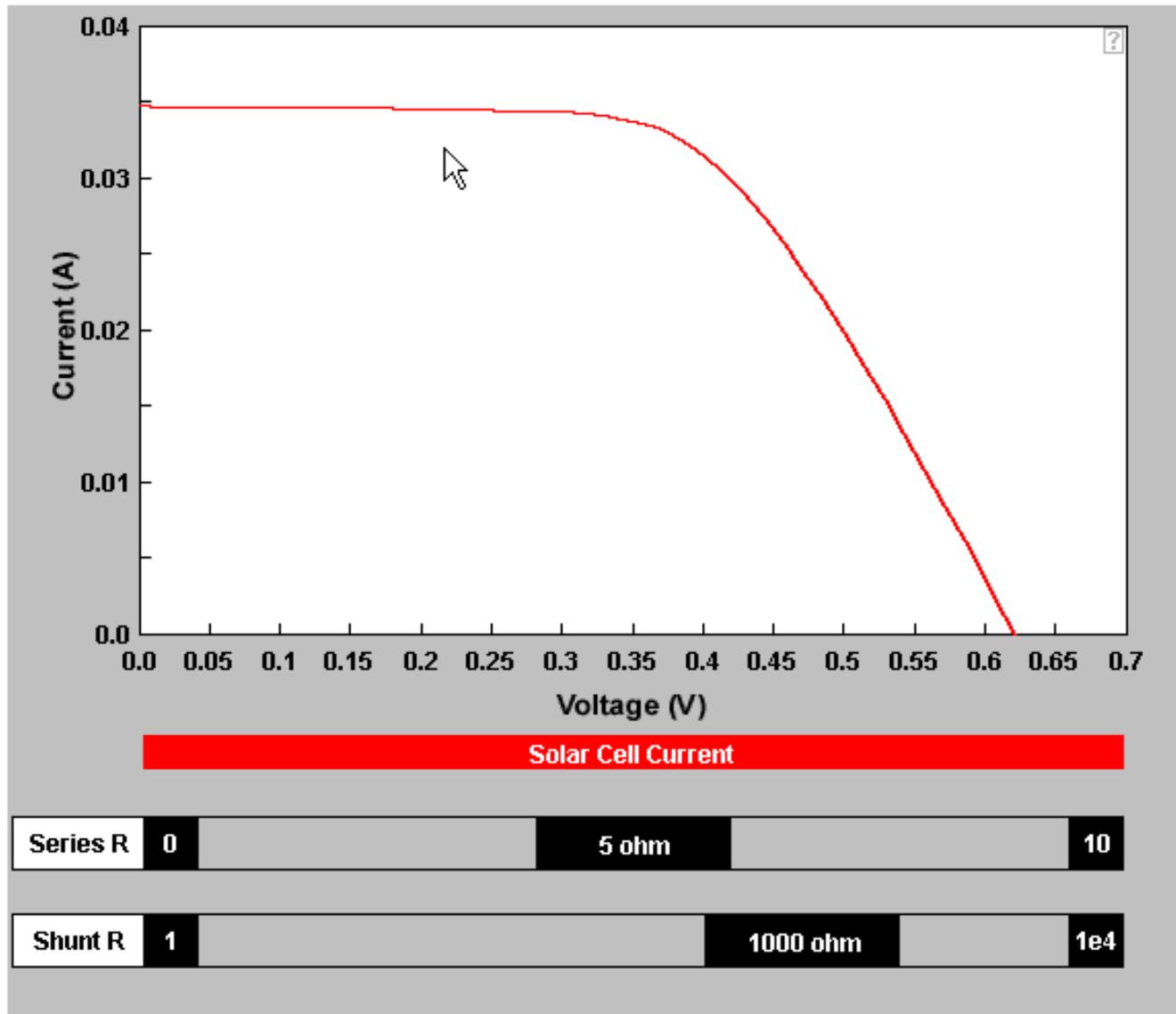
$$j = j_{Sp} \left(e^{\frac{q}{n_{id} \cdot kT} (U - R_s \cdot j)} - 1 \right) + \frac{U - jR_s}{R_p} - j_{sc}$$

Leerlaufspannung:

$$j = 0 \quad (\text{ideale Zelle } R_s = 0 ; R_p = \infty)$$

$$U_{OC} = n_{ideal} \cdot \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{j_{sc}}{j_{sp}} + 1 \right)$$

Optimale Dotierung → Auger, klein j_{sp}



Quelle: <http://pveducation.org/pvcdrom>

5.2 Solarzellenkenngrößen

Wirkungsgrad:

Maximaler elektrischer Energiestrom der Solarzelle im Verhältnis zum einfallenden optischen Energiestrom

$$j_Q \cdot U |_{\max} = j_{mp} \cdot U_{mp}$$

$$\eta = \frac{P_{el}}{\text{Einstrahlung} / \text{Fläche} \cdot \text{Fläche}} = \frac{j_{mp} \cdot U_{mp}}{P_{optisch}} = FF \cdot \frac{j_{sc} \cdot U_{oc}}{P_{opt.}}$$

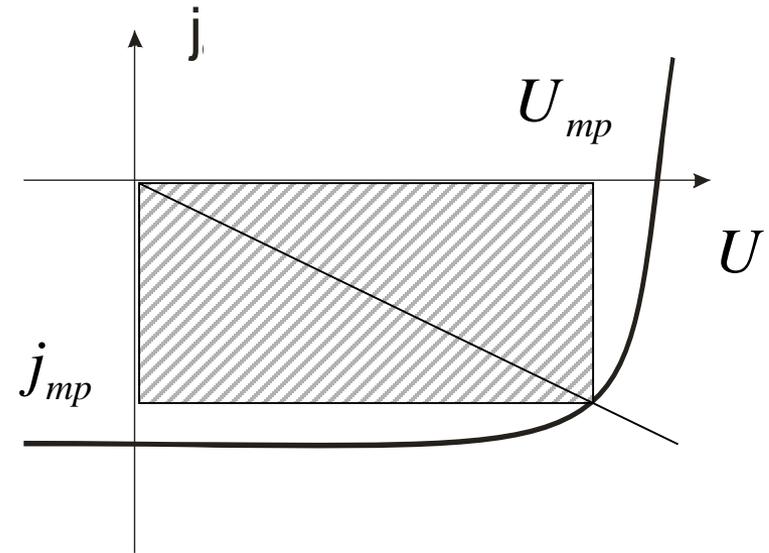

$$\int_0^{\infty} \hbar\omega \, dj_{\gamma, \text{Sonne}}(\hbar\omega) = \text{Sonnenspektrum!}$$

Definitionen:

- Flächenbezug (Solarzelle, inkl. aller Kontakte)
- El. Leistung DC, $P = V \times I$
- Lichtquelle = Sonne (standard test conditions (STC: 25°C 1000W/m², AM1.5))

„Maximum power point“

$$FF = \frac{j_{mp} \cdot U_{mp}}{j_{sc} \cdot U_{oc}} < 1$$



Wichtig:

Genau eine Strom/Spannungslage für den Wirkungsgrad optimal!

$$P_{\max} = FF \cdot j_{sc} \cdot U_{oc}$$

$$\eta = \frac{j_{sc} \cdot U_{oc}}{P_{in}} \cdot FF$$

FF Füllfaktor ist Maß für die Steilheit der Kurve

Nicht zu verwechseln mit dem Quantenwirkungsgrad

Spektrale Empfindlichkeit $S(\lambda)$ =

Kurzschlussstrom $j_{sc}(\lambda)$ / eingestrahlte Lichtleistung $E(\lambda)$

[A/W]

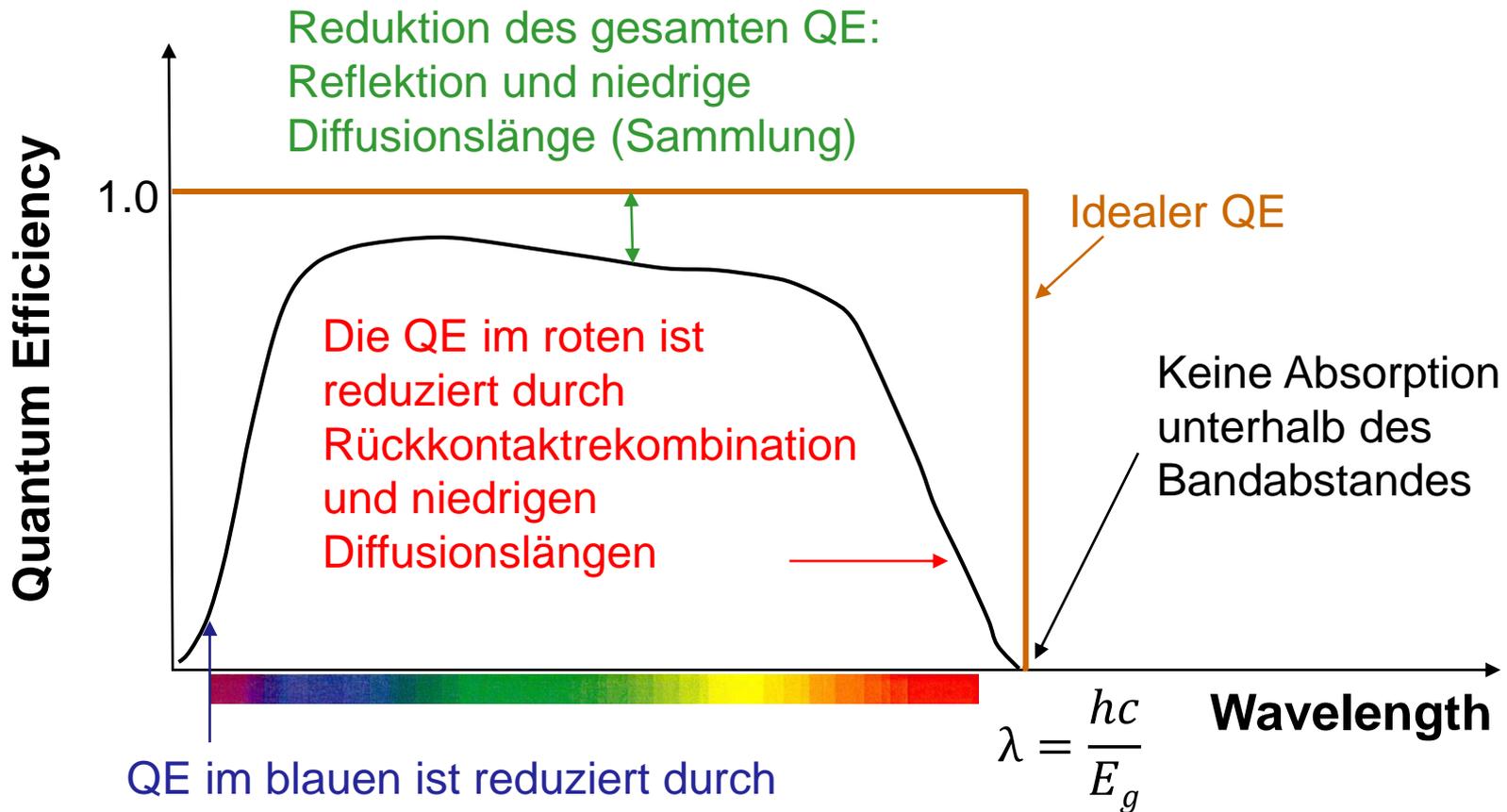
Externe Quantenausbeute $Q_{ext}(\lambda)$ =

ausgekoppelte Elektronen / einfallendem Photonen

(Bei der internen Quantenausbeute (IQE) werden die Reflektionsverluste rausgerechnet (1/(1-R)))

$$Q_{ext}(\lambda) = \frac{|j_{sc}(\lambda)|}{e} / \Phi^{ph}(\lambda) = \frac{|j_{sc}(\lambda)|}{e} \frac{h\nu}{E(\lambda)} = \frac{hc}{e\lambda} \frac{|j_{sc}(\lambda)|}{E(\lambda)} = \frac{hc}{e\lambda} S(\lambda)$$

Quantum Efficiency (QE)



QE im blauen ist reduziert durch Frontkontaktrekombination und parasitärerer Absorption in „Deckschichten“

$$j_{e,h} = q \int \Phi(\lambda) \{1 - R(\lambda)\} IQE d\lambda$$

Für eine ideale Zelle ($n_{id}=1$, $R_s=0$, $R_p = \text{unendlich}$) gilt aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs von j und U : \rightarrow FF hängt nur von U ab!

$$FF_0 = \frac{u_{OC} - \ln(u_{OC} + 0.72)}{u_{OC} + 1}$$

$$FF < 1$$

keine Serien und Shunt-Verluste

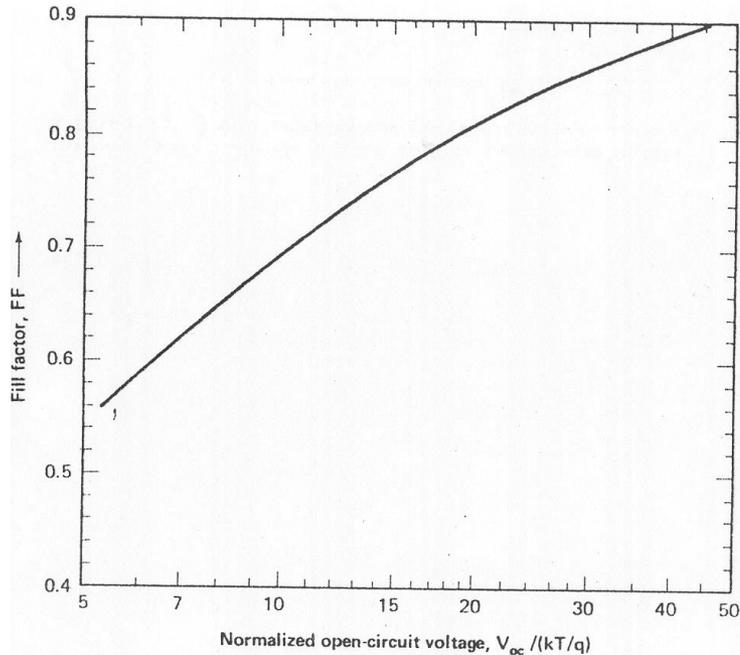


Figure 4.12. Ideal value of the fill factor as a function of the open-circuit voltage normalized to the thermal voltage, kT/q .

$$u_{OC} = \frac{U_{OC}}{n_{id} \cdot kT} \quad (\text{normalisierte } U_{oc})$$

$$q$$

für Si $U_{OC} \approx 700\text{mV}$

$$u_{OC} \approx 27$$

bei 300K ; $n_{id} = 1$

5.3 Die reale Solarzelle

U_{OC} : für $j = 0$

$$U_{OC} = n_{id} \cdot \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{j_{SC} - \frac{U_{OC}}{R_P}}{j_{sp}} + 1 \right)$$

$$R_s \approx 0.5 \Omega cm^2$$

$$R_P \approx 10^5 \Omega cm^2$$

$$u_{OC} = \frac{U_{OC}}{n_{id} \cdot \frac{kT}{q}}$$

normalisierte Spannung

- ! - R_s verschwindet in dieser Gleichung
- U_{OC} wird bestimmt von R_P und j_{sp}

Kurzschlussstrom

$$j|_{U=0} = j_{sp} \left(e^{\frac{q \cdot R_S \cdot j}{n_{id} \cdot kT}} - 1 \right) - \frac{j \cdot R_S}{R_P} - j_{SC}$$

$$j \cdot \left(1 + \frac{R_S}{R_P} \right) = j_{sp} \cdot e^{\frac{q \cdot R_S \cdot j}{n_{id} \cdot kT}} - j_{SC}$$

weil j_{sp} klein

$$j|_{U=0} = - \frac{j_{SC}}{1 + \frac{R_S}{R_P}}$$

Füllfaktor Verluste

nur Serienwiderstand

$$R_S=0 ; R_P = \infty$$

$$FF_{\text{serien}} = FF_0 \left(1 - \frac{R_S}{\frac{U_{OC}}{j_{SC}}} \right)$$

$$, FF_0 = \frac{u_{OC} - \ln(u_{OC} + 0.72)}{u_{OC} + 1}$$

zusätzlicher Parallelwiderstand

$$FF_{\text{Shunt}} = FF_{\text{serien}} \cdot \left(1 - \frac{u_{OC} + 0.7}{u_{OC}} \cdot \frac{FF_{\text{serien}}}{\frac{R_P}{U_{OC}/j_{SC}}} \right)$$

→ FF wird verringert durch R_S und R_P

Diskussion ; R_P , R_S

$$j = -j_{SC} + j_{SP} \left(e^{\frac{U - j \cdot R_S}{n_1 \cdot kT}} - 1 \right) + \frac{U - j \cdot R_S}{R_P}$$

$$R_S \ll R_P \text{ (vernünftig)}$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial j} \right|_{j=0} \approx R_S$$

$$\left. \frac{\partial U}{\partial j} \right|_{U=0} \approx R_S + R_P \approx R_P$$

Optimale Solarzelle:

hohes FF : $R_S = 0, R_P = \infty$

hohes U_{OC} \longrightarrow Sperrsättigungsstrom klein ! Schwierig

hohes j_{SC} \longrightarrow Optimierung der optischen Eigenschaften

Einfluss R_S

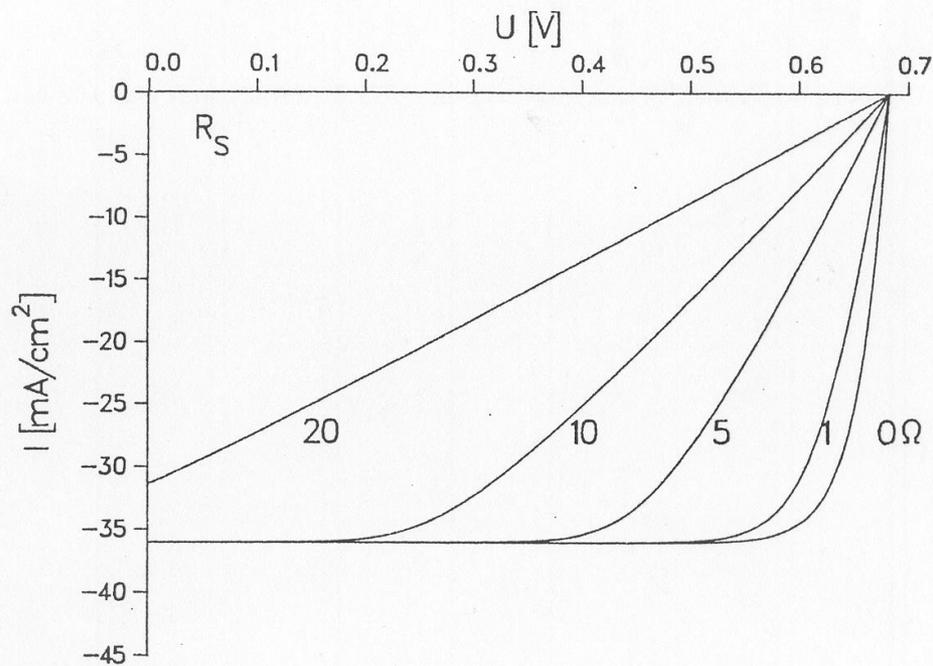


Abb. 13a I-V Kennlinie einer realen Solarzelle für verschiedene Serienwiderstände

Einfluss R_P

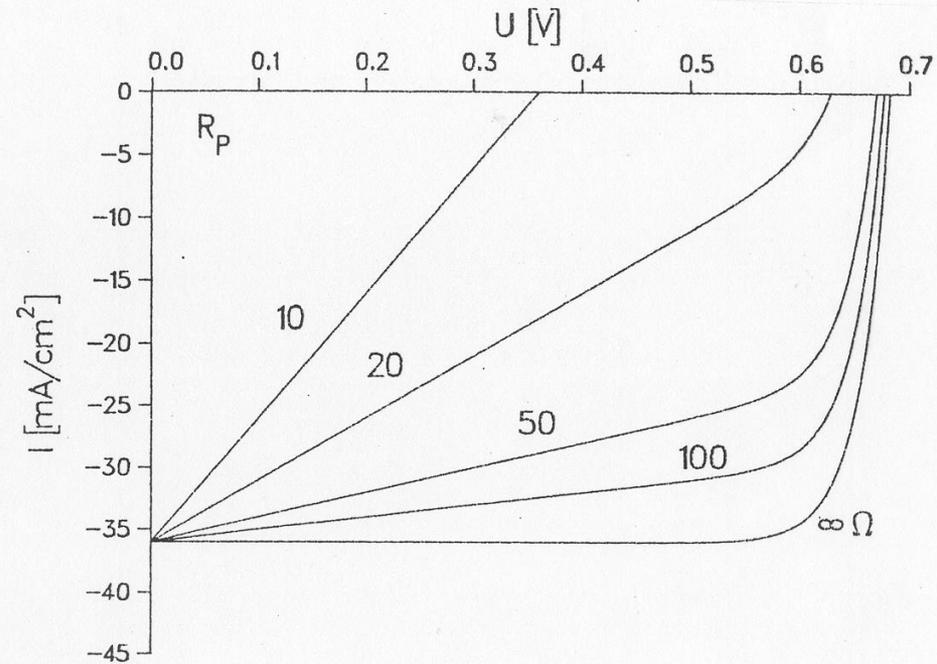
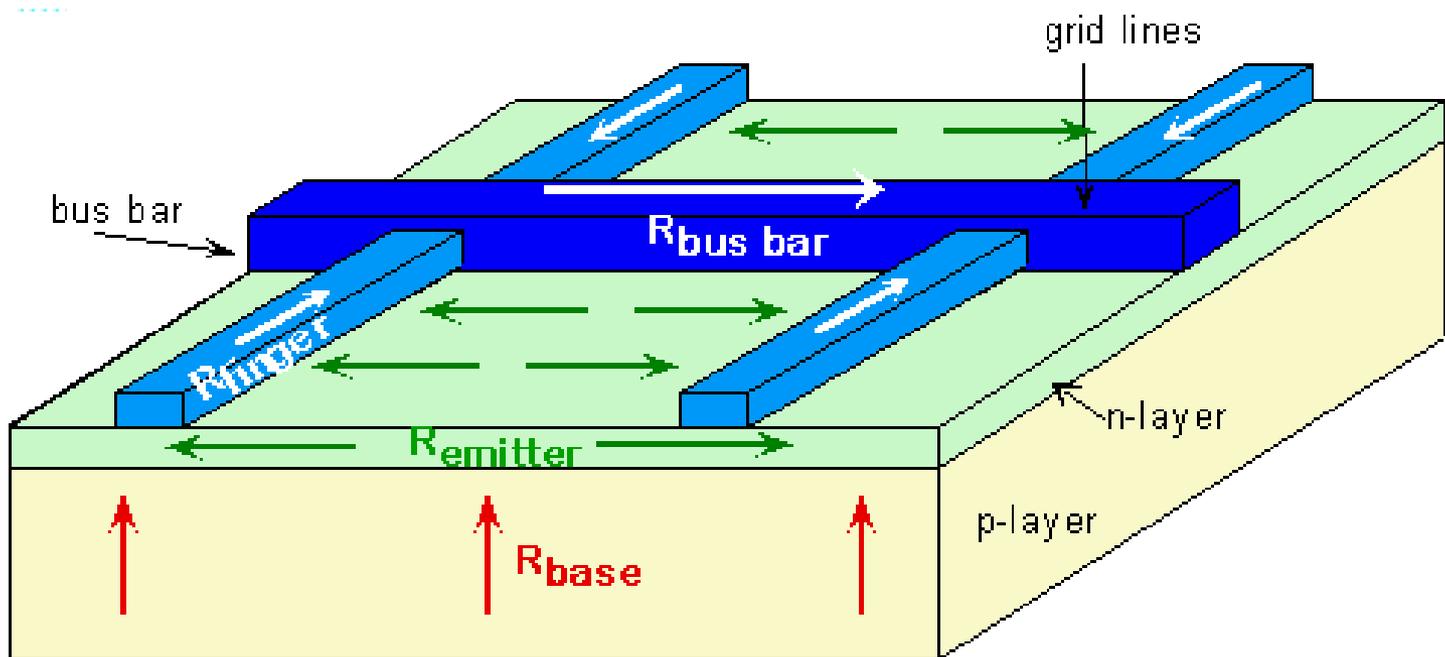
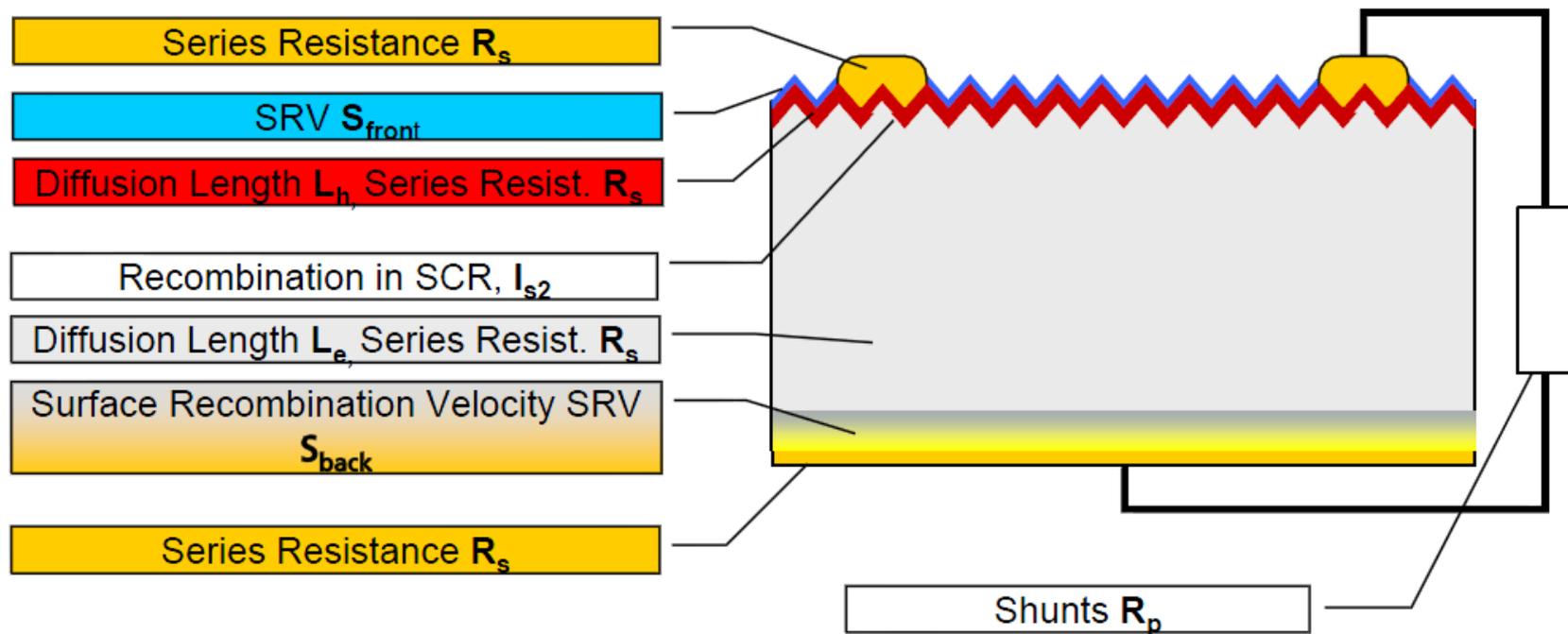


Abb. 13b I-V Kennlinie einer realen Solarzelle für verschiedene Parallelwiderstände

Beispiel für die Ursache von Serienwiderständen



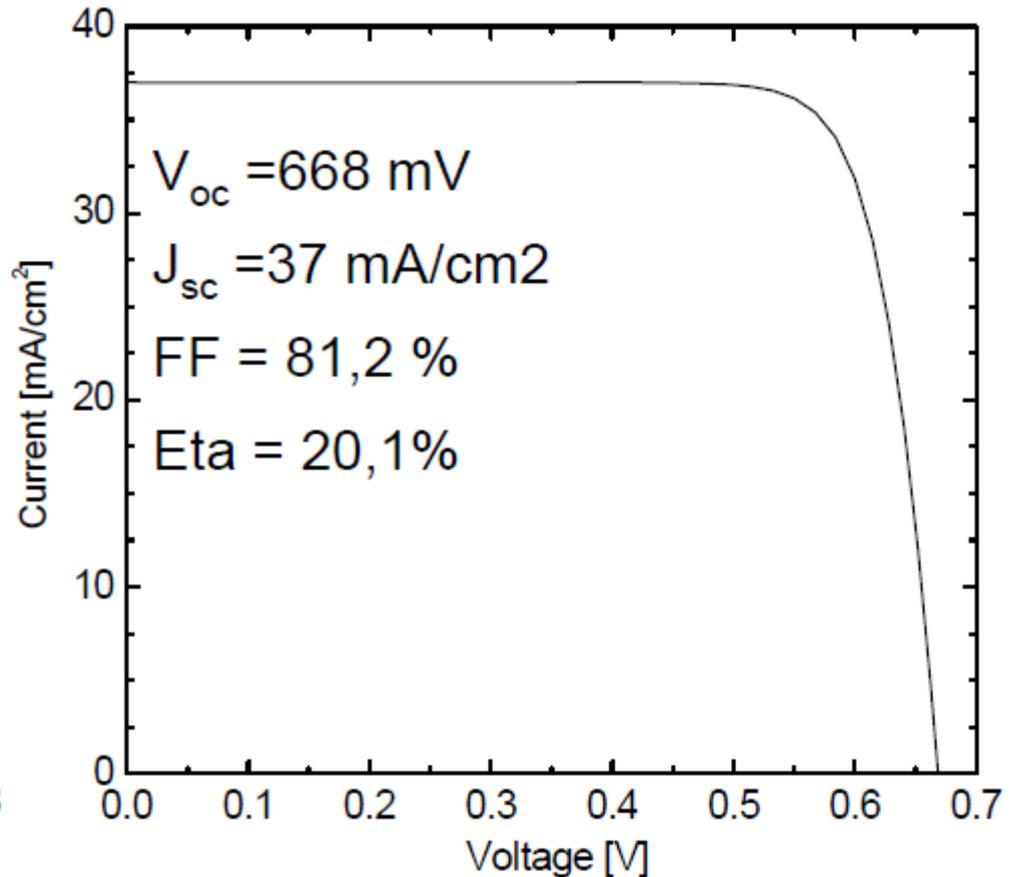
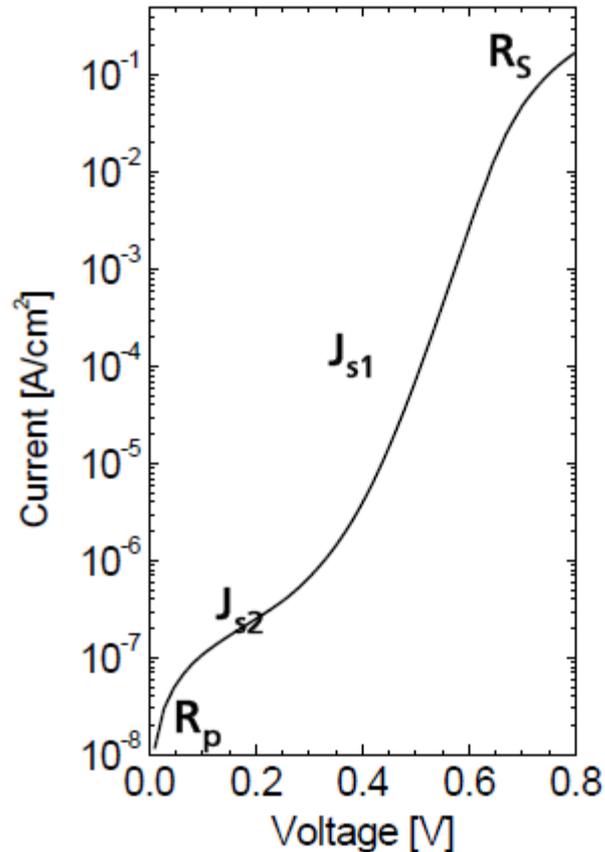
Beispiel: Si Solarzelle – Rekombination und elektrische Verluste



Logarithmischen Auftragung des Dunkelstroms:

- der exponentielle Teil der Kurve ist linear
- Einflüsse der Widerstände sind besser sichtbar.

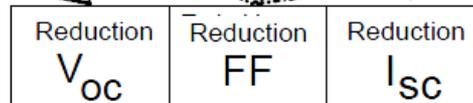
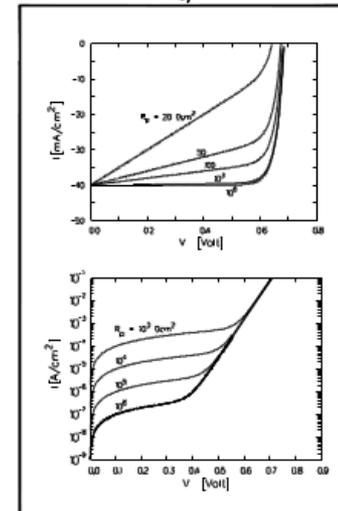
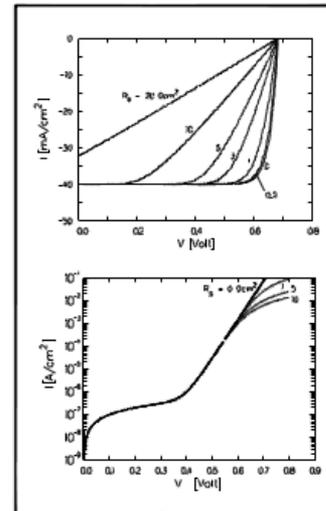
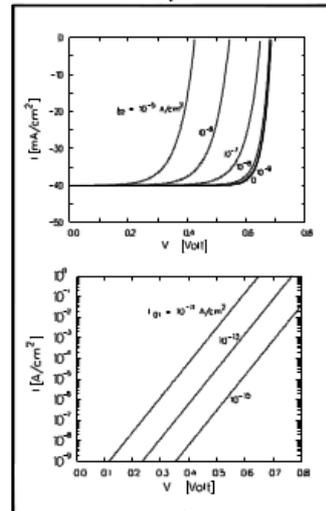
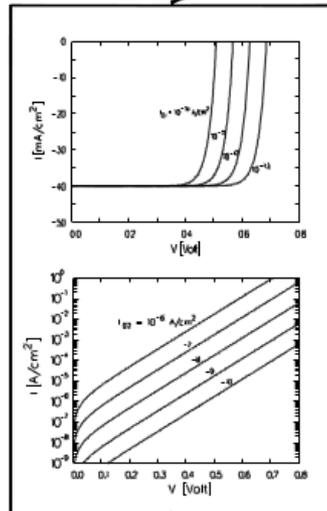
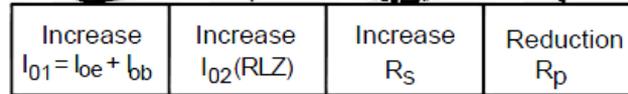
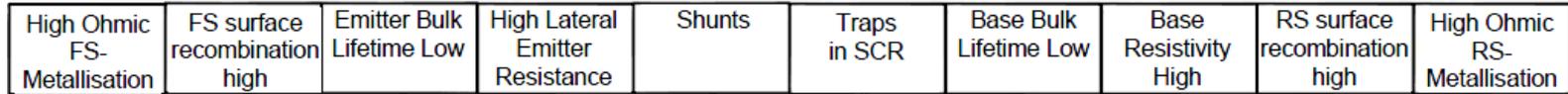
Beispiel: Reale Kennlinie Si – guter Wirkungsgrad



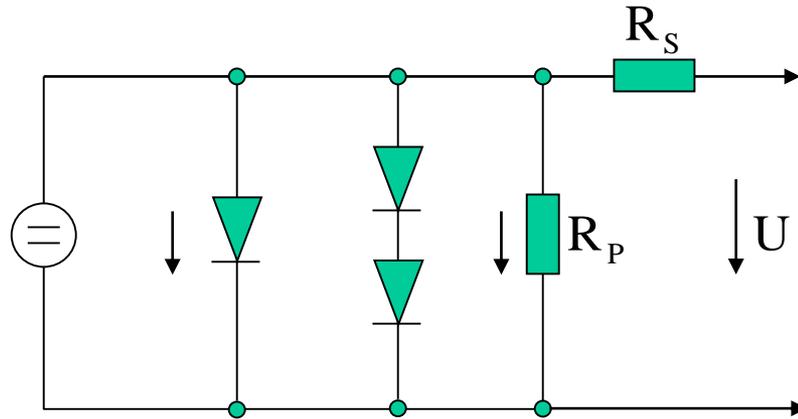
Logarithmischen Auftragung des Dunkelstroms:

- der exponentielle Teil der Kurve ist linear
- Einflüsse der Widerstände sind besser sichtbar.

Ursachen- Wirkung: Zusammenhänge für sie Si Zelle



Das 2-Diodenmodell



$$j = -j_{sc} + j_{Sp_1} \left(\underbrace{e^{\frac{U-j \cdot R_S}{n_1 \cdot kT}} - 1}_{\text{Band-Band-Rekombination}} \right) - j_{Sp_2} \left(\underbrace{e^{\frac{U-j \cdot R_S}{n_2 \cdot kT}} - 1}_{\text{Störstellenrekombination (in RLZ)}} \right) + \frac{U - j \cdot R_S}{R_P}$$

Band-Band-Rekombination Störstellenrekombination (in RLZ) maximal wenn $\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_{F,e} + \varepsilon_{F,h}}{2}$

$n_1 \rightarrow 1$

$n_2 \rightarrow 2$

↑
überwiegt bei großem U

Störstellenrekombination hat einen zusätzlichen Ladungsstrom zur Folge

↑
überwiegt bei kleinem U

5.4 Temperaturabhängigkeit

$$U_{OC} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{j_{SC}}{j_{sp}}$$

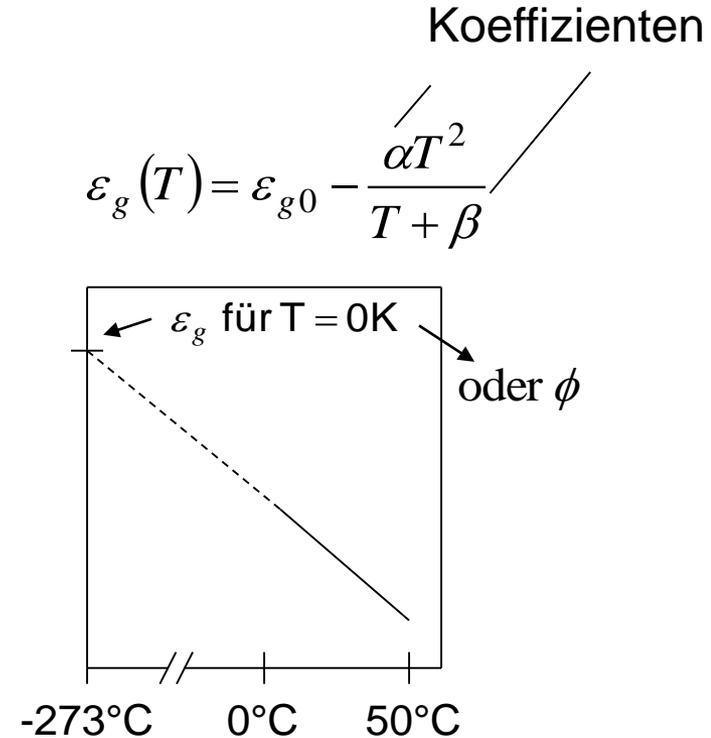
Hier T-Abhängigkeit

$$j_{sp} = \sqrt{\frac{D}{\tau}} \cdot \frac{n_i^2}{N_A} = B \cdot T^3 \sqrt{\frac{D}{\tau}} \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Temperaturunabhängige Teile

$$U_{OC} = \frac{E_g}{q} - \frac{kT}{q} \cdot \ln \left[\underbrace{\sqrt{\frac{D}{\tau}} \cdot T^3 \cdot \frac{B}{j_{SC}}}_{>0 ; \text{schwache T-Abhängigkeit}} \right]$$

>0 ; schwache T-Abhängigkeit



Beispielwerte für Si:

$$\frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \approx 0.0006 \text{ per } ^\circ\text{C for Si}$$

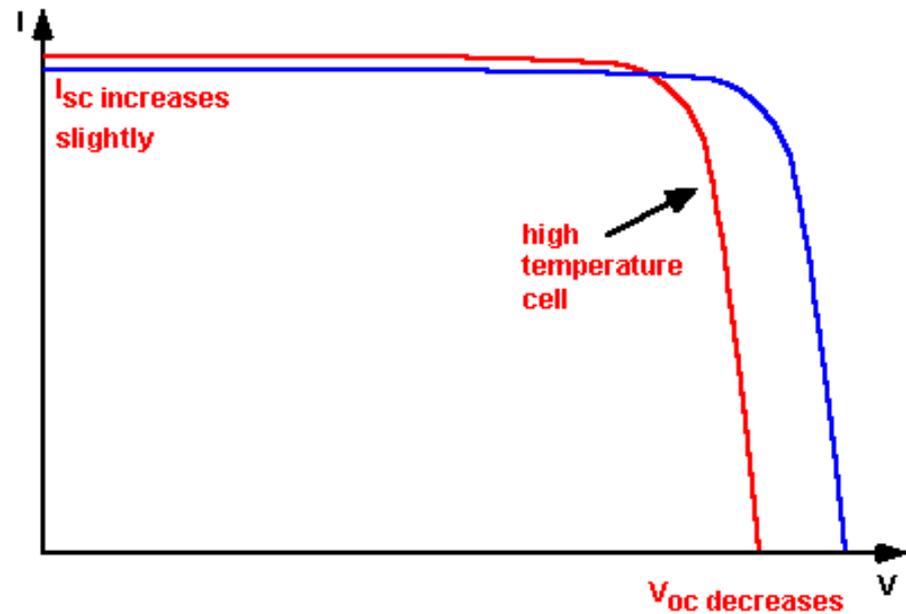
$$\text{für Si } \frac{dU}{dT} = -1.7 \text{ mVK}^{-1}$$

$$\frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} \approx \left[\frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{1}{T} \right] / 6 \approx -0.0015 \text{ per } ^\circ\text{C for Si}$$

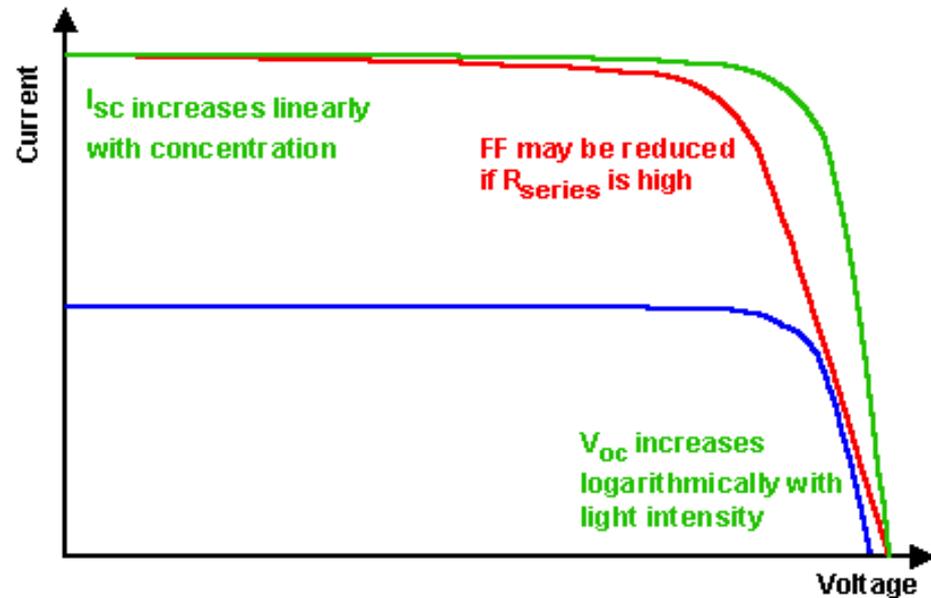
$$P_{mvar} = \frac{1}{P_m} \frac{dP_m}{dT} = \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{1}{FF} \frac{dFF}{dT} + \frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT}$$

$$\frac{1}{P_m} \frac{dP_m}{dT} \approx -(0.004 \text{ to } 0.005) \text{ per } ^\circ\text{C for Si}$$

Temperatureffekt



Lichtintensität

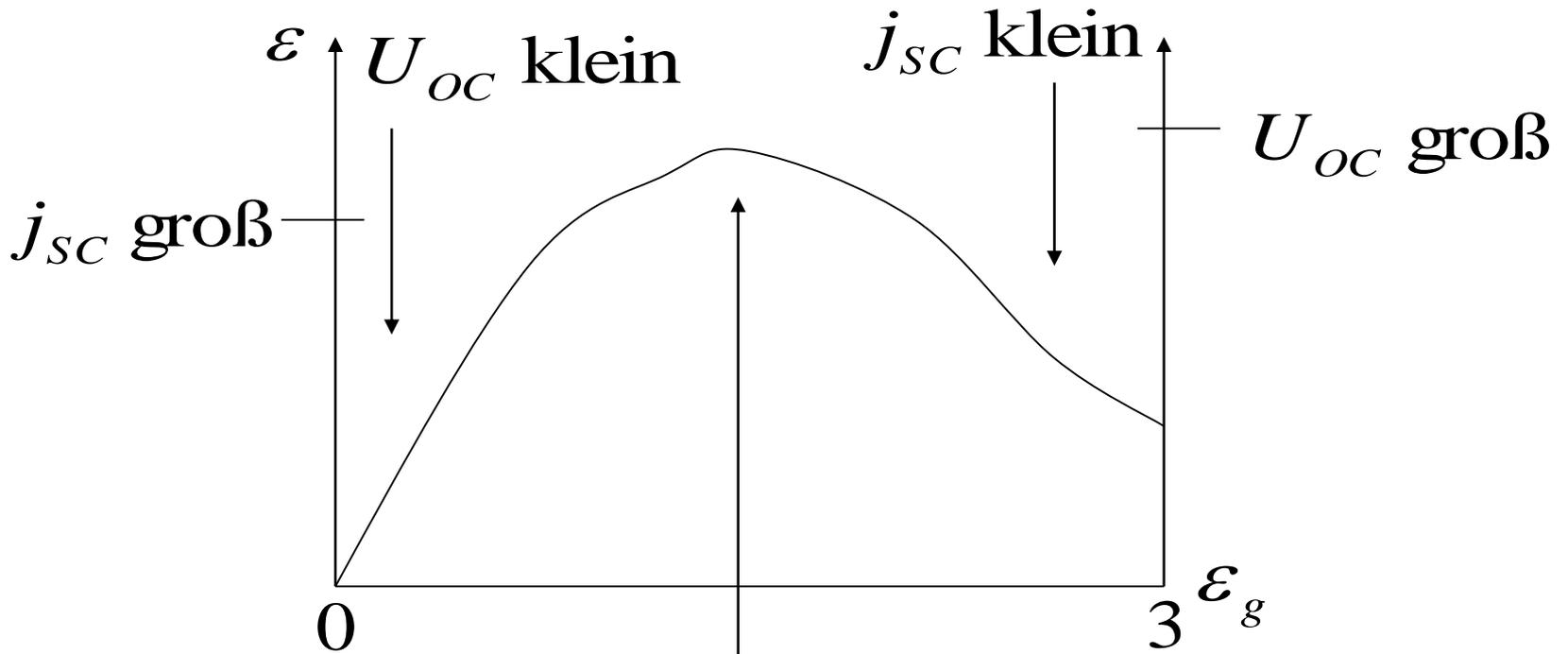


Hohe Intensität: Konzentratoren \rightarrow R_s wichtig
Niedrige Intensität: z.B. indoor \rightarrow R_p wichtig

Vergleich verschiedener Solarzellen

	a-Si	CdTe	CIS	c-Si
FF	0,56 bis 0,61	0,47 bis 0,64	0,64 bis 0,7	0,75 bis 0,85
Temperaturkoeffizient				
V _{OC}	-0,19 bis -0,5%/°C	-0,22 bis -0,43%/°C	-0,26 bis -0,5%/°C	-0,25 bis -0,55%/°C
I _{SC}	+0,01 bis +0,1%/°C	+0,02 bis +0,08%/°C	+0,01 bis +0,1%/°C	+0,02 bis +0,08%/°C
MPP (STC)	-0,1 bis -0,3%/°C	-0,18 bis -0,36%/°C	-0,33 bis -0,6%/°C	-0,37 bis -0,52%/°C

5.5 Der optimale Bandabstand



Es muss ein Maximum existieren

→ Maximaler Wirkungsgrad

Annahme und Näherungen

1. Spannungsabfall an Transportwiderständen vernachlässigbar
2. Strom der h zum n und e zu p-Seite nicht berücksichtigt

Vollständige Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie

$$eU = (\varepsilon_{F,e} - \varepsilon_{F,h}) = (\mu_e - \mu_h)$$

- ein Material mit einem ε_g
- $\hbar\omega < \varepsilon_g$ werden nicht absorbiert $\alpha(\hbar\omega < \varepsilon_g) = 0$
- $\hbar\omega \geq \varepsilon_g$ werden absorbiert und alle gesammelt $\alpha(\hbar\omega > \varepsilon_g) = 1$
- keine Rekombination (außer strahlend)
- j/U – ist exponentiell (Emission der Photonen hängt exponentiell von Spannung ab.)
- $U_{OC} \leq \varepsilon_g / q$ ($U_{OC} = \varepsilon_g / q$ für $T=0K$)

Der thermodynamisch maximale Wirkungsgrad

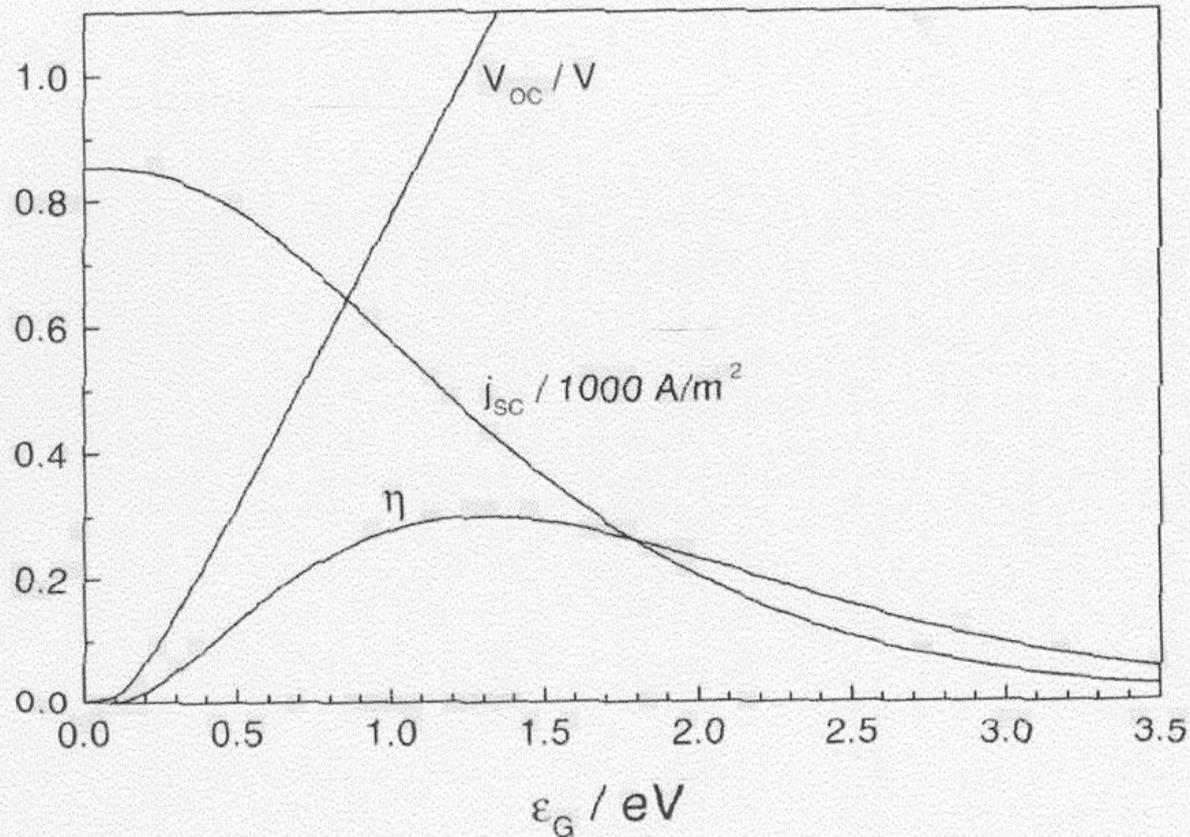
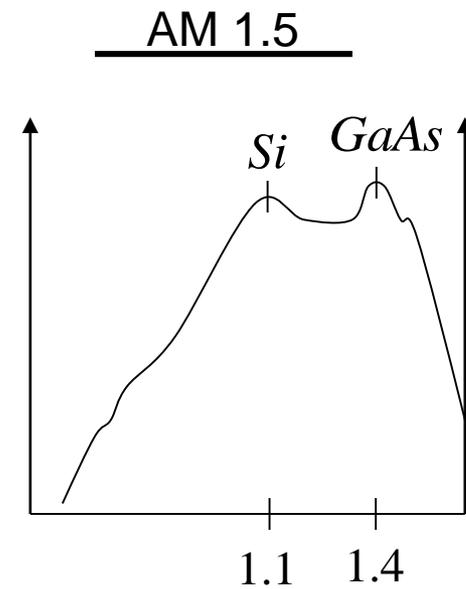
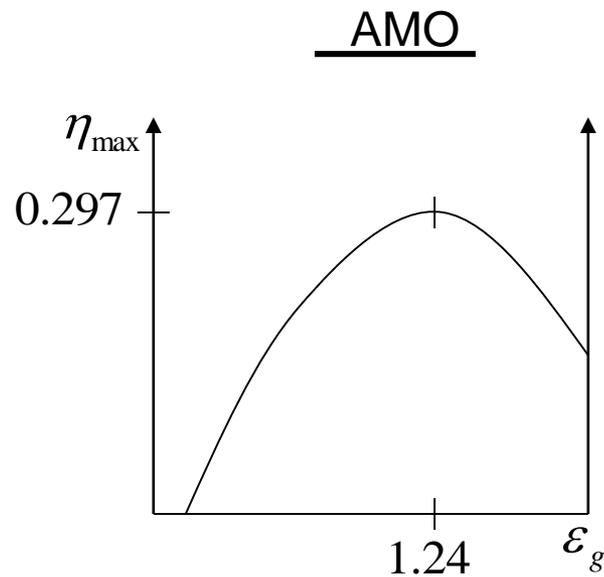


Fig. 4.8. Efficiency η , open-circuit voltage V_{oc} , and short-circuit current density j_{sc} as a function of the band gap ϵ_G of a 2-band system illuminated by blackbody radiation at 5800 K with an incident energy current density of 1.39 kW/m^2



⇒ Optimum $\epsilon_g = 1.24$ eV : für AMO $\eta_{\max} = 30\%$

⇒ Optimum $\epsilon_g = 1.15, \epsilon_g = 1.35$ eV für AM 1.5 $\eta_{\max} = 33\%$

Shockley-Queisser-Limit

$$j(U) = j_{\text{Gen}} - j_{\text{Rek}}(U)$$

detailed-balance (nur strahlende Rekombination)

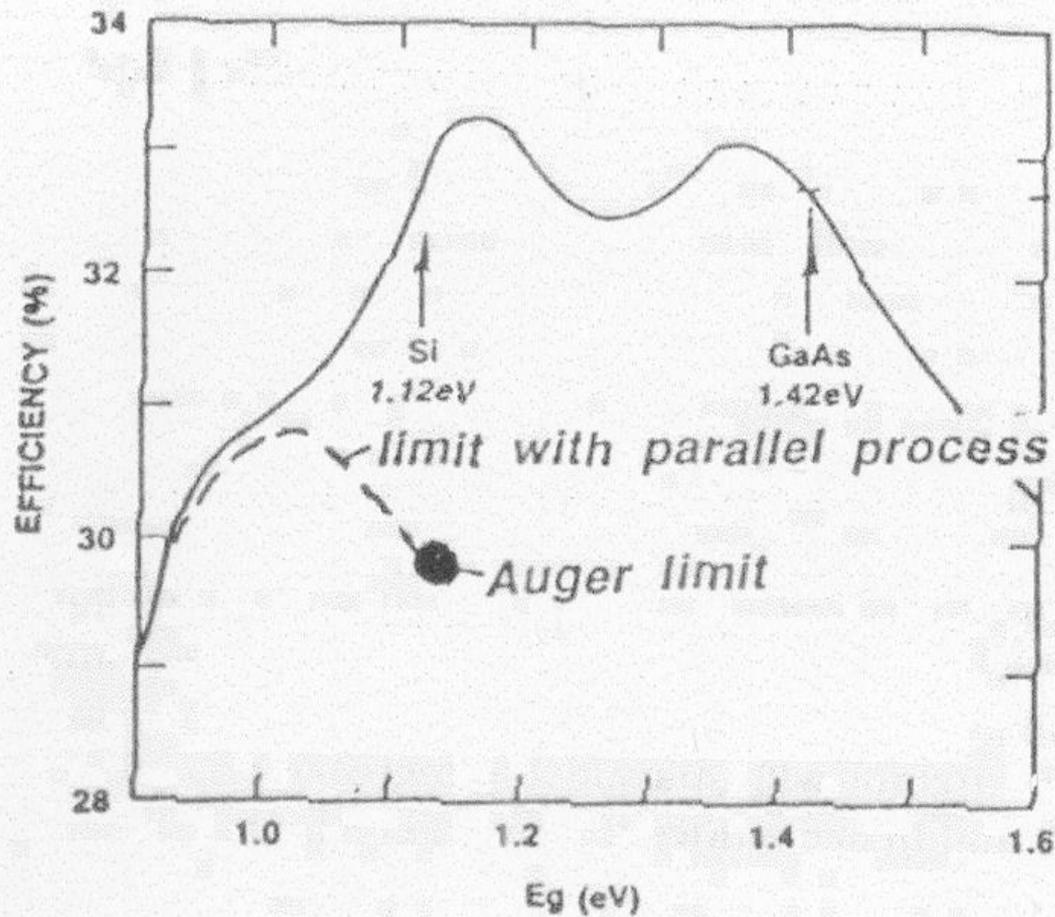
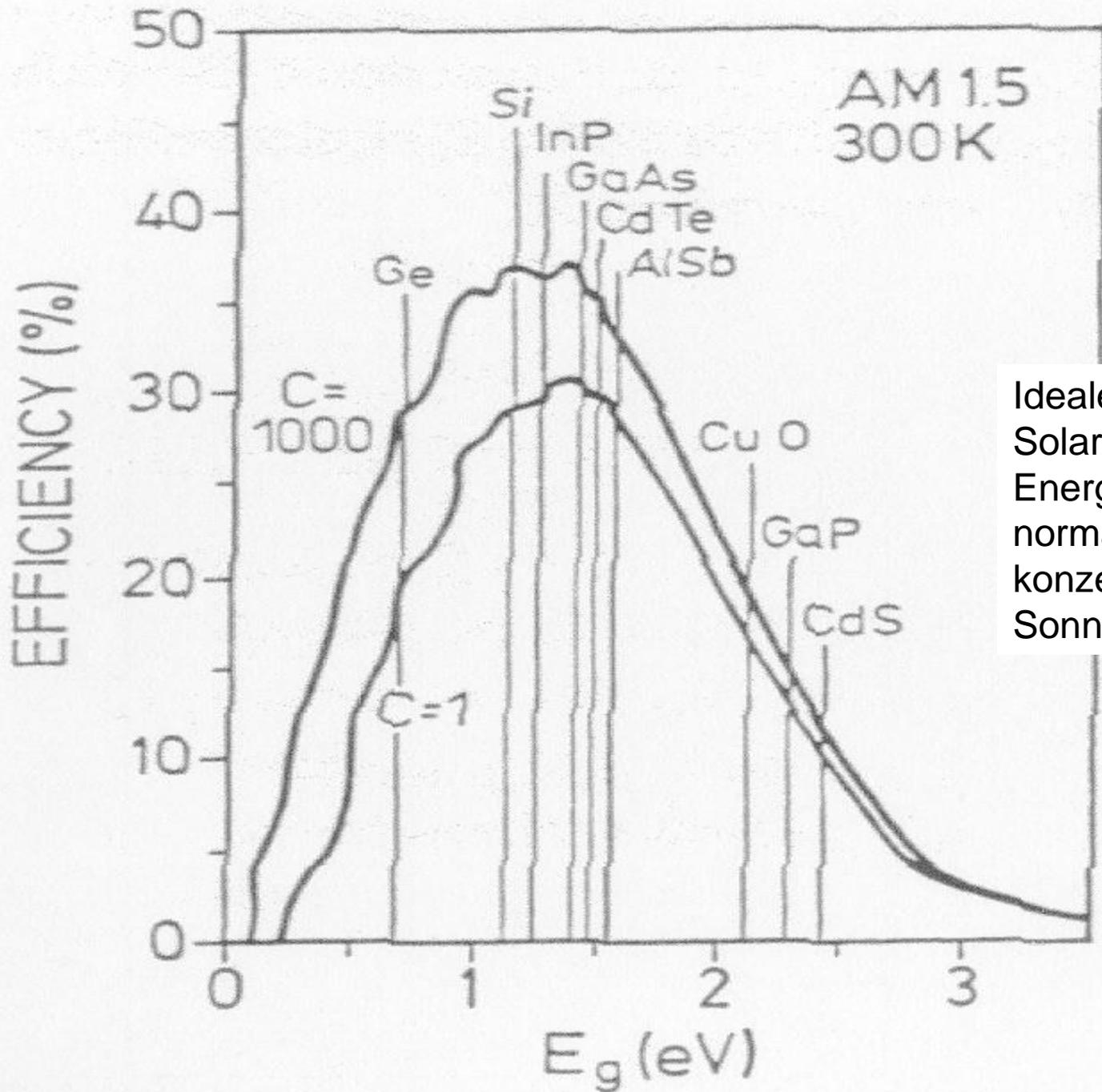


Figure 8.1: Detailed balance limit of efficiency of solar cells as a function of threshold energy. Also shown is the Auger limit for silicon together with (dashed line) the limiting efficiency for a radiatively efficient process of lower threshold energy incorporated into a silicon cell (adapted from [8.6]).

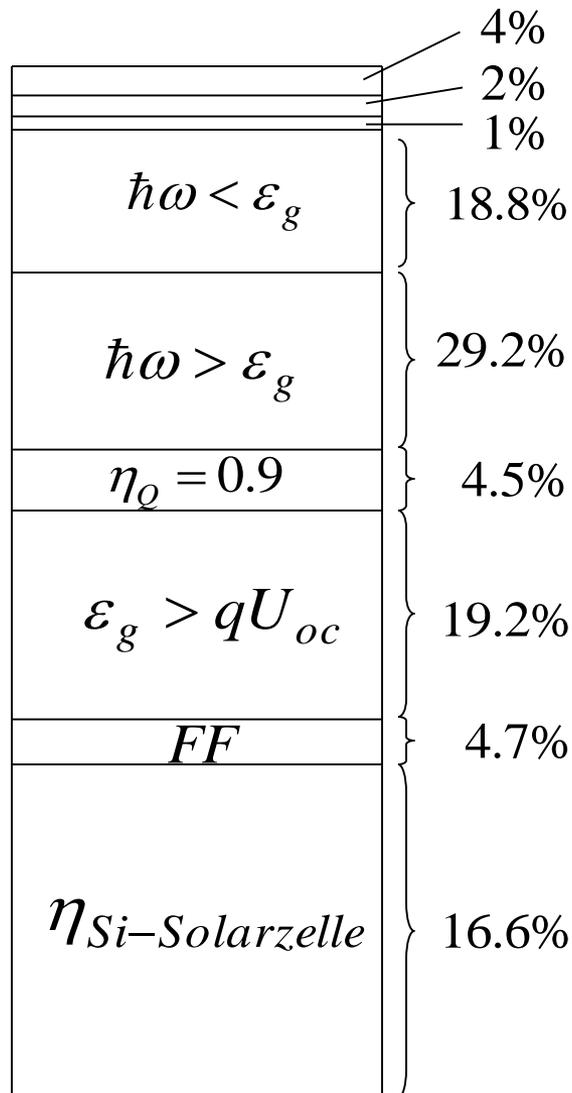


Idealer Wirkungsgrad von Solarzellen als Funktion der Energielücke für normales (1 Sonne) und konzentriertes (1000 Sonnen) Sonnenlicht.

5.6 Verlustanalyse

V E R L U S T	-optisch	- Reflektion	
		- Abschattung	
		- schlechte Absorption	
	-elektrisch	- R_S, R_P	
		- Abgabe Emitter	
		- Kontakte	
		- Grids, Anschlüsse	
	-elektronisch	Rekombination	} am schwierigsten zu vermeiden
		- bulk	
		- Oberfläche	
	- Kontakte		

Bsp. für Si und AM1.5



$A = 1$; $j_{sp} = 5 \cdot 10^{-12} \text{ Acm}^{-2}$ angenommen

Abdeckung durch Grid

Reflektion

Absorption im AR-coating, in Defekten

niederenergetische Photonen

Thermalisierung „heißer“ Ladungsträger

Sammlungswirkungsgrad für photogenerated Ladungsträger } thermodynamische Begrenzung

{ Diodenparameter
Thermalisierung an Potenzialbarriere

{ Verluste durch Diode vorgespannt U_{mpp}
(max. elektrische Energiestrom \rightarrow chem. Energiestrom)

5.7 Auswahlkriterien für Solarzellenmaterialien

1. Physikalisch (Definition von Absorber <-> Fenster)

- Halbleiter, bestehend aus ungiftigen und leicht verfügbaren Elementen dotierte HL, die mit einem „Fenstermaterial“ kombinierbar sind, Dotierbarkeit,
- HL mit geeigneter Bandlücke und hoher Absorption in einem weiten Spektralbereich; Subbandabsorption gering
- Rekombination - egal welche - soweit vermeidbar
- Stabilität (Langzeit), vor allem auch der Kontaktstrukturen

2. Technologisch (teilweise Standortabhängig)

Aufteilung der Kostenarten: Material, Investitionen, Personal, Sonstiges

- Material:

- Mengen und Ausbeute
- Bewirtschaftbarkeit

- Investitionen (Prozess)

- Kosten → Abschreibungsdauer (CAPEX)
- Prozess: Ausbeute und Durchsatz, Batch <-> in-line
- Verfügbarkeit, Up-time, Wartung

- Personal

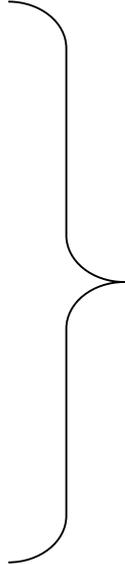
- Automatisierungsgrad
- Qualifizierung

- Sonstiges

- Raumkapazität und optimale Fabrikgröße
- Logistik
- Reinheitsanforderungen (Reinraum -> Fabrikhalle)
- Prozesstechnologie vorhanden, Integrationsfähigkeit
- Produkte und verschiedene Märkte (μ W bis MW)

3. Ökobilanz, Rechtliche, ganzheitlich; LCA

- Primärenergieeinsatz
- Umweltrelevanz -> CO₂, saurer Regen, Toxizitätspotenziale
- Ressourcenschonung
- Recycling



Zurückverfolgung
zu Ausgangssubstanzen

Kriterien für Rohstoffverfügbarkeit (nach Prof. Faulstich, TU München):

1. Reichweite in Jahren, 2. Länder (<3), 3. Unternehmen (>3), 4. Substituierbarkeit

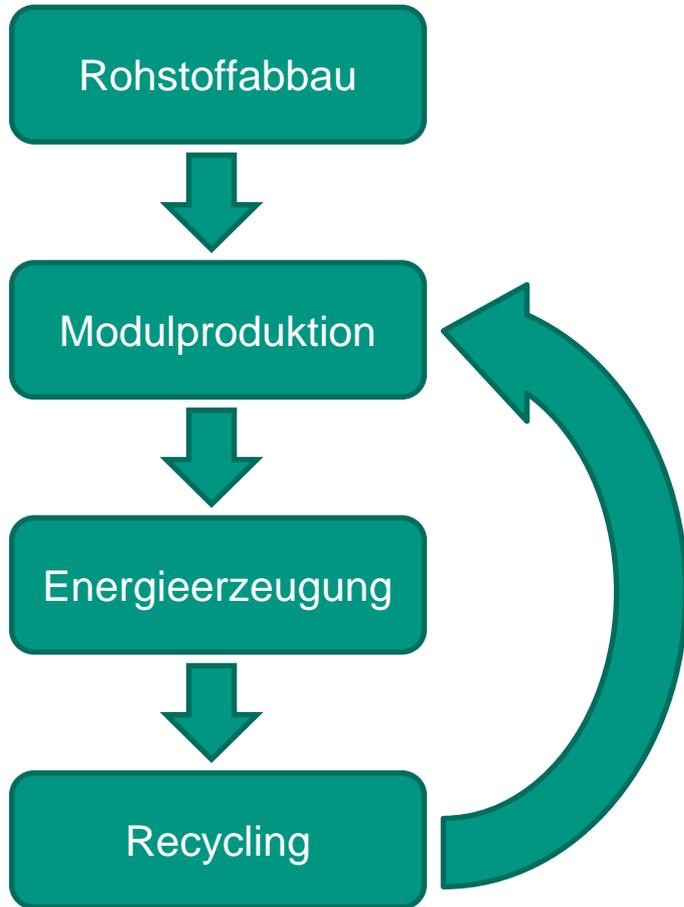
EU Regulierung: Verursacher zahlt!

1. Abfall vermeiden → hohe Stabilität der Produkte
2. Wiederverwendung → Reparaturmöglichkeit
3. Recycling → Demontage etc.
4. Abfallendlagerung → vermeiden

	c-Si (kristalline Siliziumzellen)	a-Si (amorphe Siliziumzellen)	CIS (Kupfer-Indium- Diselenid-Zellen)	CdTe (Cadmium- Tellurid-Zellen)
<i>Anteil in %</i>				
Glas	74	90	85	95
Aluminium	10	10	12	< 0,01
Silizium	ca. 3	< 0,1		
Polymere	ca. 6,5	10	6	3,5
Zink	0,12	< 0,1	0,12	0,01
Blei	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,01
Kupfer (Kabel)	0,6		0,85	1,0
Indium			0,02	
Selen			0,03	
Tellur				0,07
Cadmium				0,07
Silber	< 0,006			< 0,01

Quelle: Recycling von Solarmodulen – Potential und Anspruch eines zukünftigen Stoffstroms / PV CYCLE Studie 2007

Lebenszyklus eines Solarmoduls

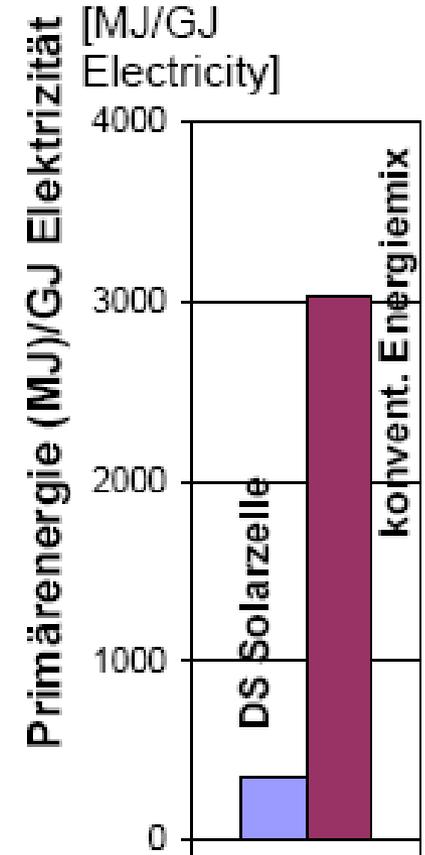
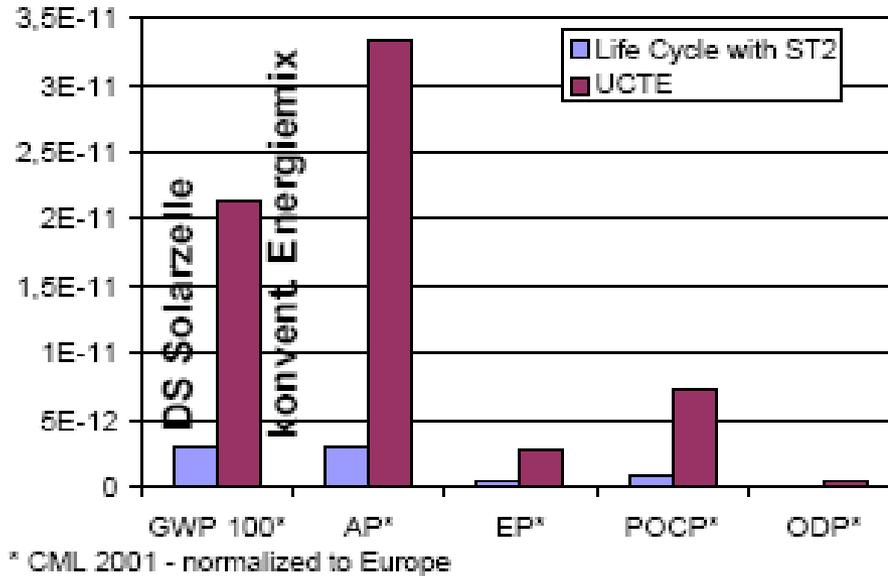


- Industrievereinigung
- Repräsentiert 85% der europäischen PV-Industrie
- Errichten von Sammelstellen
- SolarWorld Recycling von Siliziummodulen
- FirstSolar Recycling von CdTe-Modulen

Energierücklaufzeit (Standort und Technologie abhängig)

Umwelteinfluss im Vergleich CIS/c-Si mit einem konventionellen Kraftwerkmix

Eingesetzte Primärenergie
CIS/c-Si



Verschiedene Umweltindikatoren der Ökobilanz:

- Treibhauseffekt (Global Warming Potential (GWP))
- Photochemische Oxidation (Photoch. Oxi. Pot. (POCP))
- Versauerung (Acidification Potential (AP))
- Überdüngung (Eutrophication Potential (EP))
- Ozonverarmung (Ozone Depletion Potential (ODP))
- Giftwirkung auf Menschen (Uman Toxicity Potential (HTP))

Energierücklaufzeit (Technologieabhängigkeit)

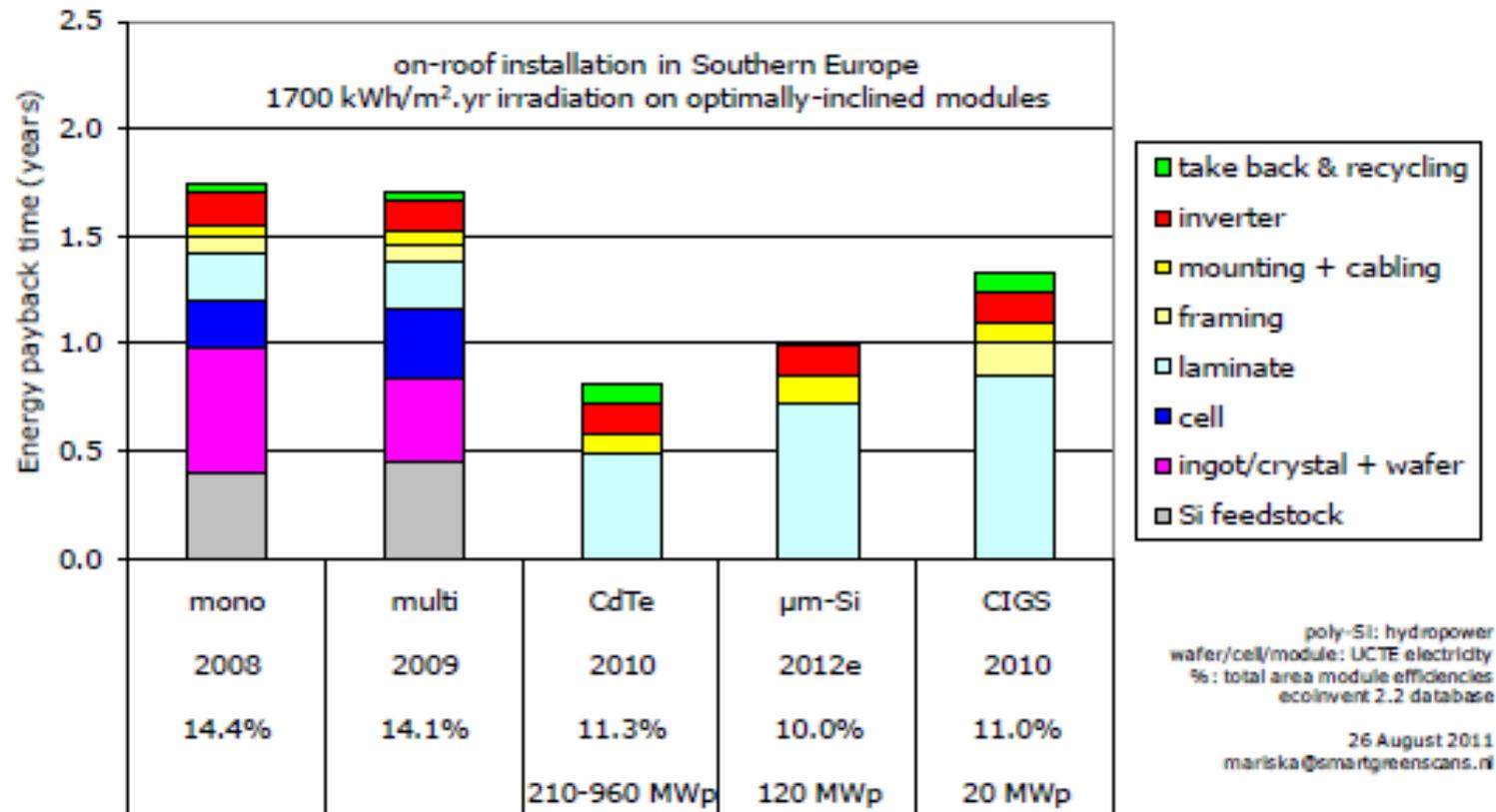
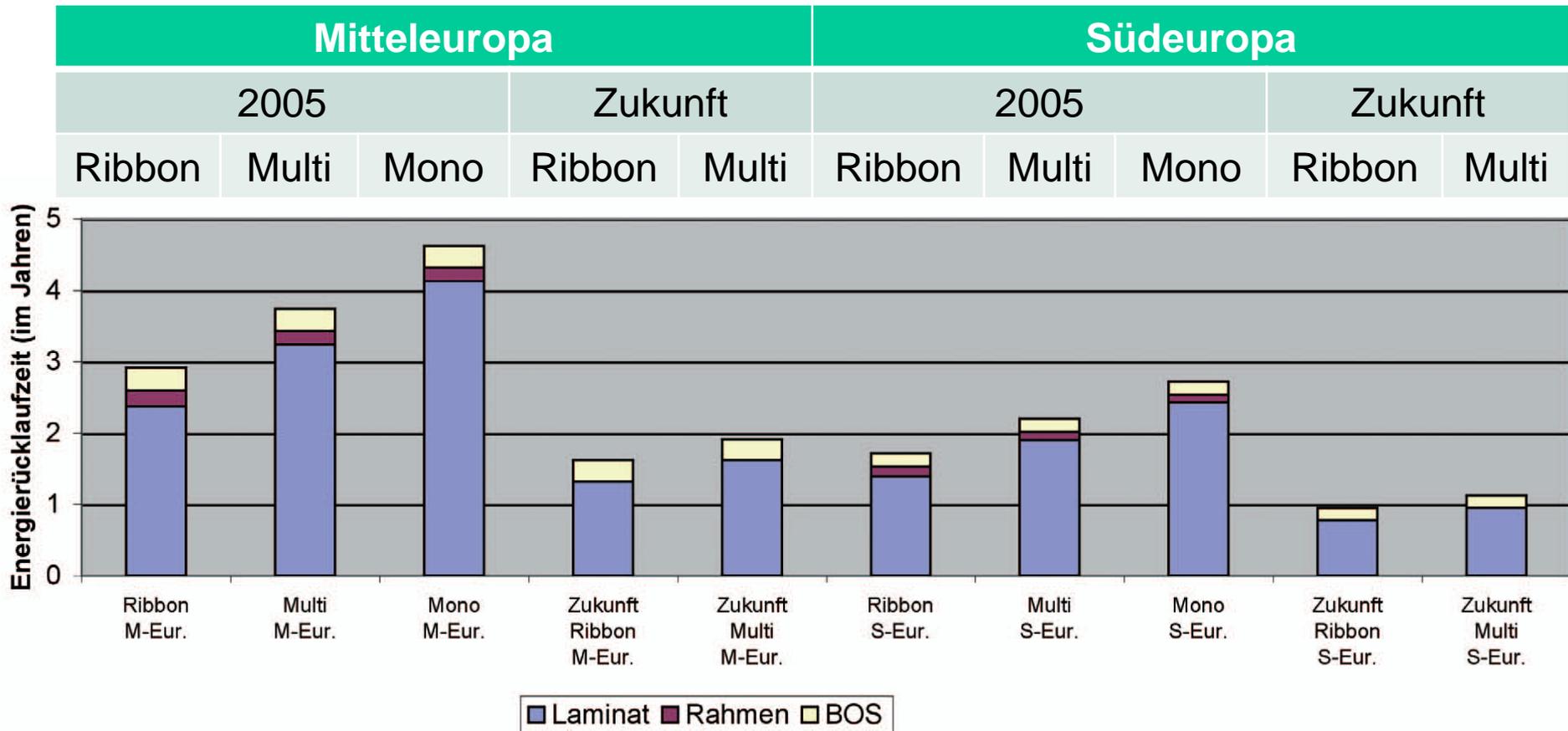


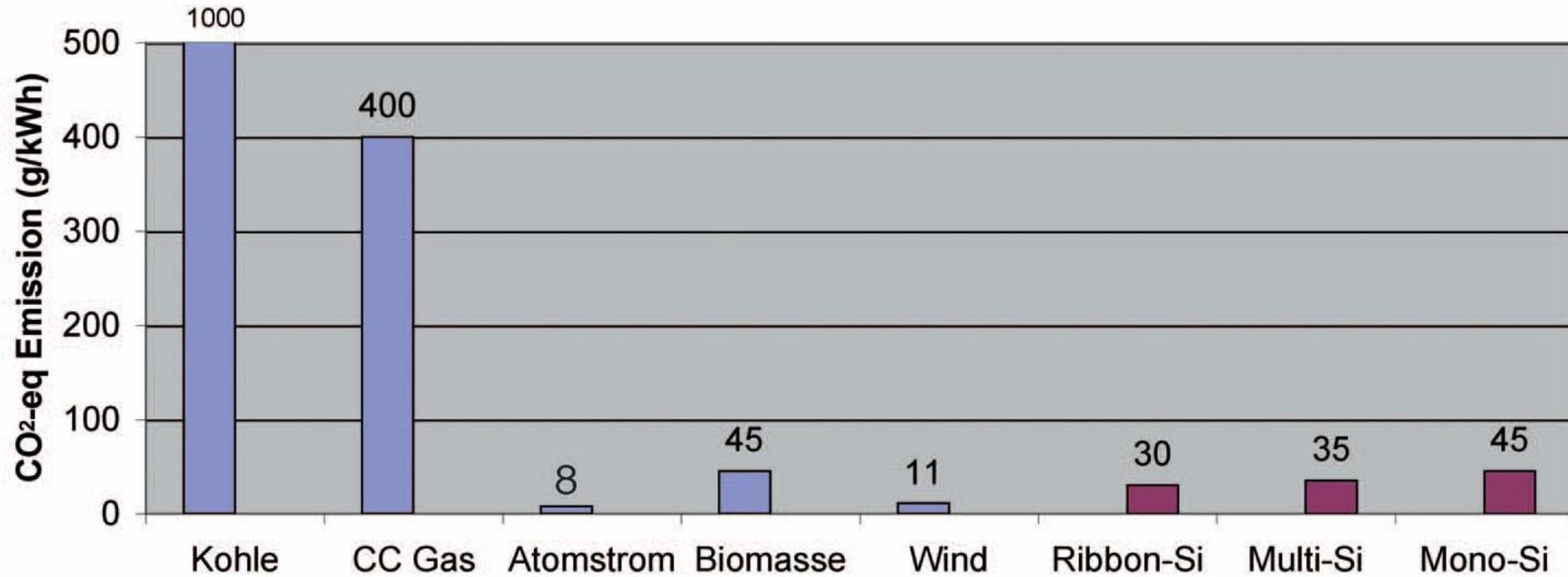
Figure 5: Energy payback time of commercial PV systems installed on roof-top at irradiation of 1700 kWh/m².year on optimally-inclined modules. The data for micromorphous silicon PV modules are estimates.

Energierücklaufzeit (Standort und Technologie abhängig)



Quelle: Erneuerbare Energie 9/2006

Treibhausgasemission



Quelle: Erneuerbare Energie 9/2006

4. Können wir von anderen Technologien lernen? „cross fertilization“

Sind Produktionstechniken vielfach einsetzbar?
Abschreibung von Entwicklungen auf größere Umsätze
möglich?

Solarzellentechnologie	Produktionstechnologie
Siliziumtechnologie	Halbleitertechnologie
III/V Technologie	LED
a-Si	Flachbildschirmtechnik
CIS, CdTe	Architekturglasbeschichtung
Organische PV	Organische Elektronik
Flexible PV	Verpackungsindustrie, Drucken