

Leibniz
Universität
Hannover

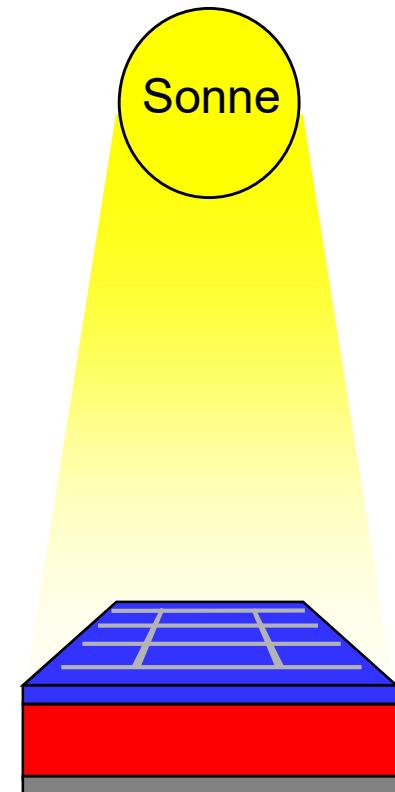
Solarzellen

H. Jörg Osten

**Institut für Materialien und Bauelemente
der Elektronik**

- MBE -

**Leibniz Universität Hannover
Schneiderberg 32, 30167 Hannover**



nur für den LUH-internen Gebrauch

Solarelektrik/Solarthermie

- **Solar** (lat.) : die Sonne betreffend, von der Sonne kommend
- **Solarelektrik (Photovoltaik)**: beschäftigt sich mit der Umwandlung von Sonnenstrahlung (-energie) in elektrische Energie
Die Umwandlung findet mit Hilfe sog. Solarzellen statt
- **Solarthermie**: beschäftigt sich mit der Umwandlung von Sonnenstrahlung in direkt nutzbare Wärme
Teilgebiete sind die passive Solarnutzung beim solaren Bauen, die Standard-Solartechnik zum Erwärmen von Brauchwasser und zur Raumheizung

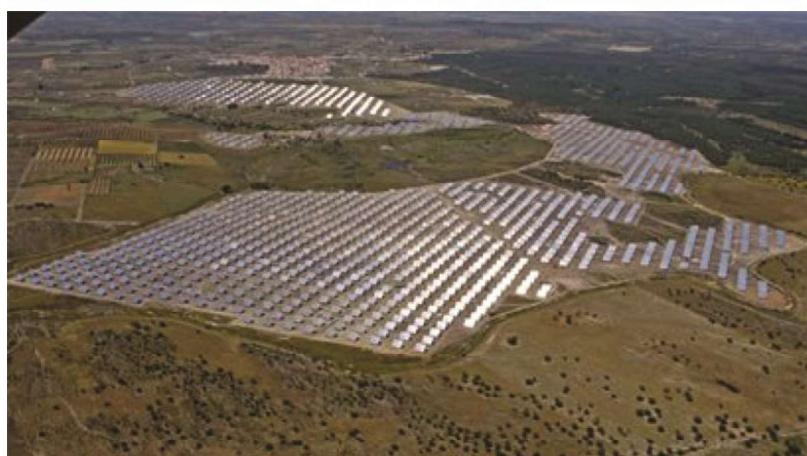
Bekannte Anwendungen der Photovoltaik



Photovoltaik



Olmedilla (Spanien):
60 MW /180 ha



Moura (Portugal)
46 MW /250 ha

Solarkraftwerk Alt Daber in Brandenburg: 28 MW



Solarkraftwerk in Freiberg/Sachsen



Beispiel: Andasol 1 in der spanischen Provinz Granada/Andalusien

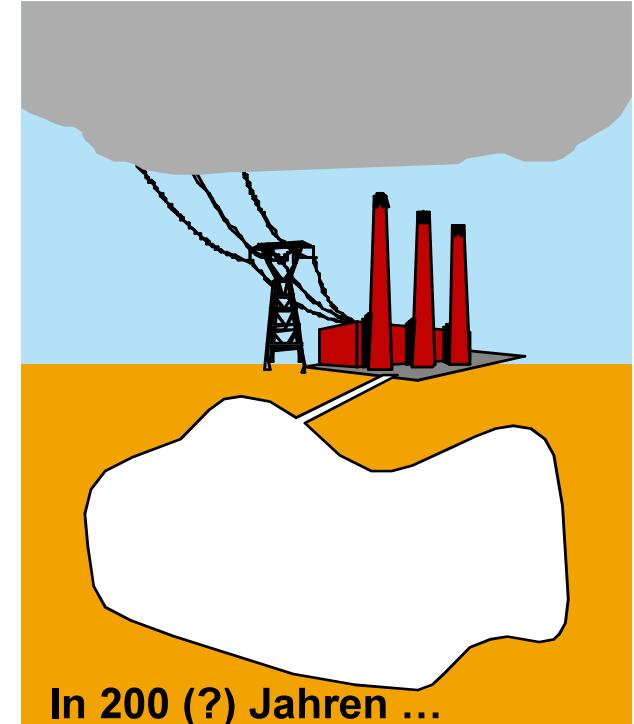
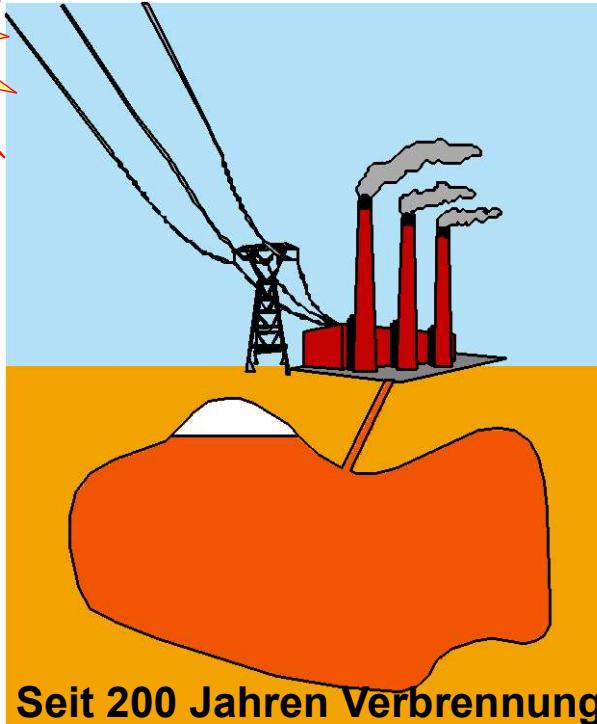
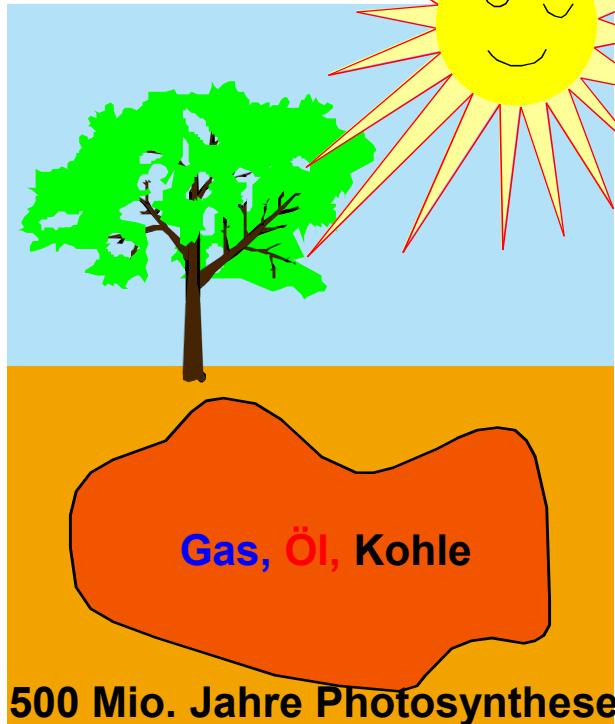
Dabei wird so genanntes Thermo-Öl auf knapp 400 Grad erhitzt. Die gesammelte Wärme wird benutzt um Dampf mit hoher Temperatur und Druck zu erzeugen.

Wie in konventionellen Kraftwerken wird dieser Dampf einer Turbine zugeführt, die - gekoppelt an einen Generator - Strom erzeugt.



Regenerative Energien

Bildung...



...und Erschöpfung

**Keine Zeit für
Regeneration!**

Energie-Reserven der Welt

Zeitspanne für die bei aktuellem Verbrauch die weltweit bekannten und wirtschaftlich förderbaren Vorkommen eines nichterneuerbaren Rohstoffs noch reichen werden

Kohle **112 Jahre**

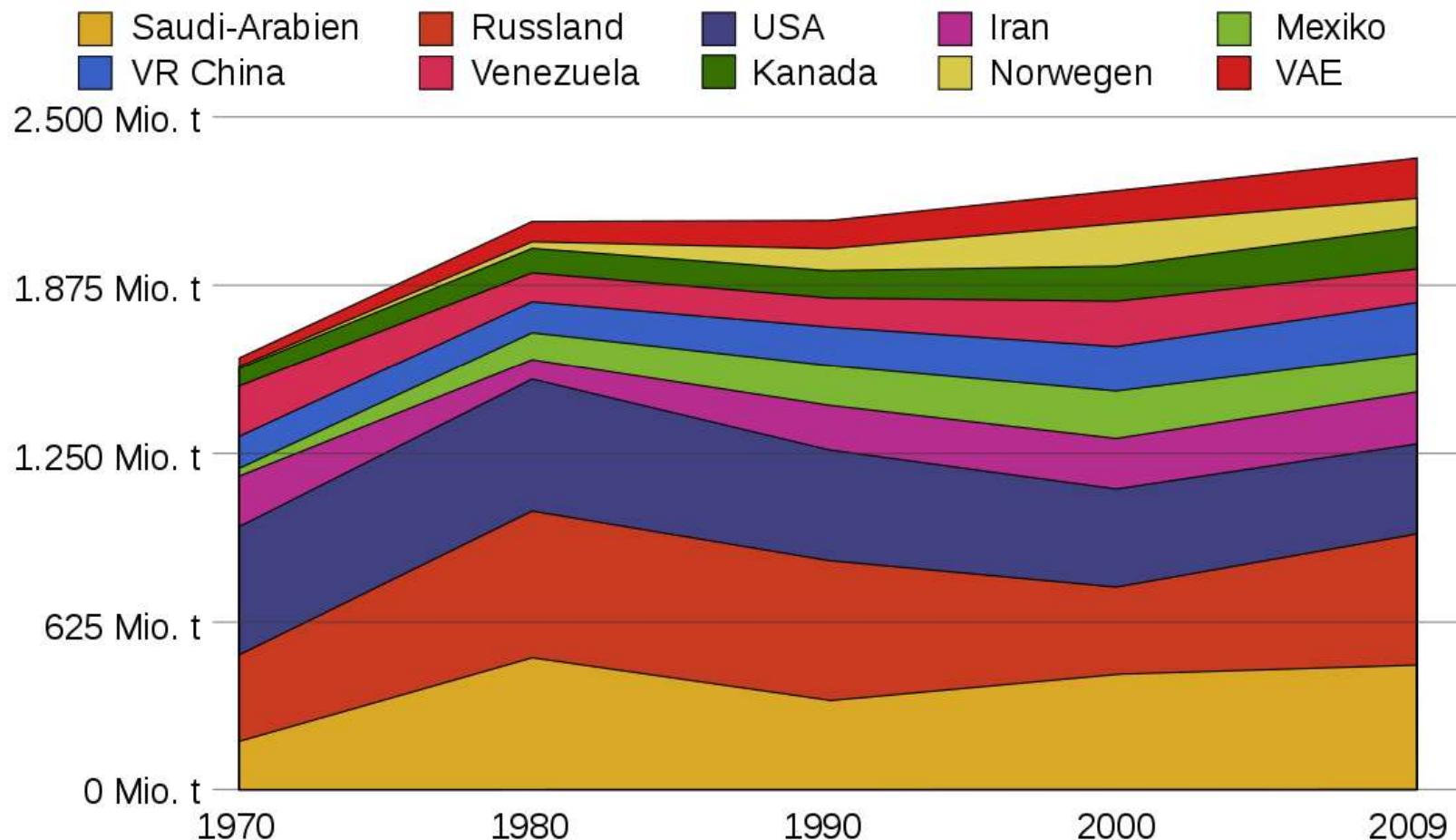
Erdgas **64 Jahre**

Erdöl **54 Jahre**

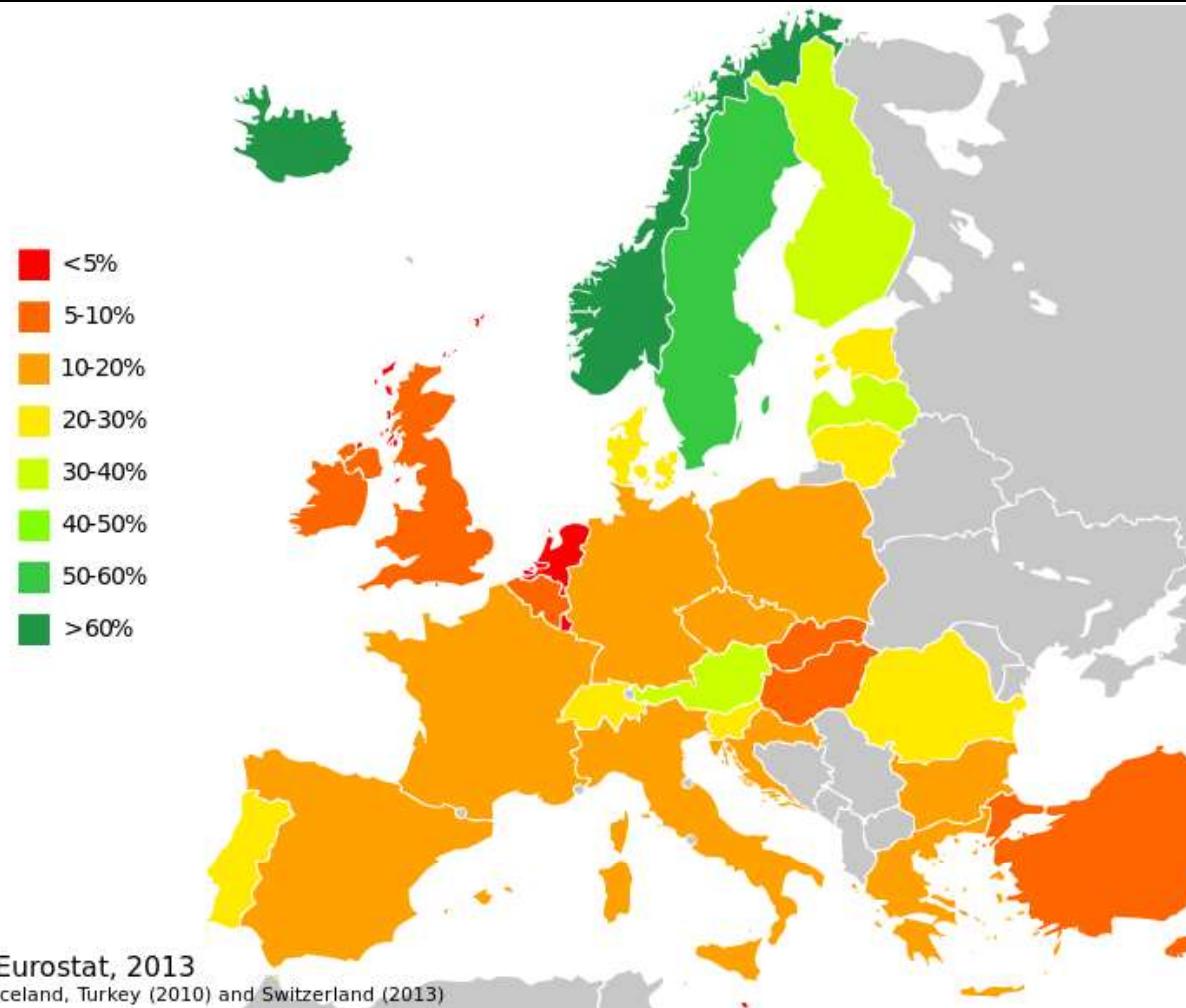
Uran **~70 Jahre**

Quelle: BP Statistical Review 2012

Ölfördermengen

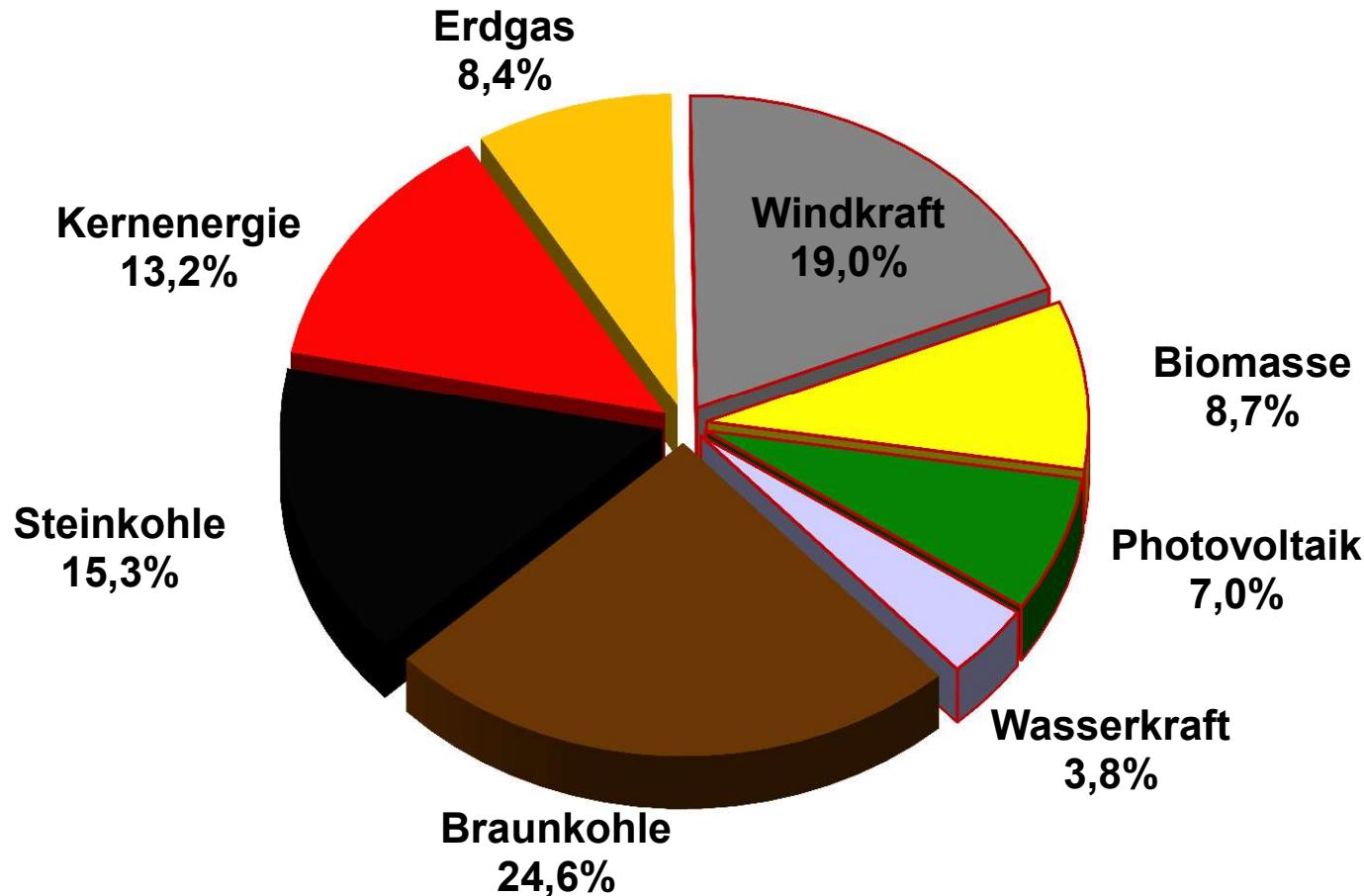


Anteil erneuerbarer Energien in Europa: 2013



Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch in Europa 2013

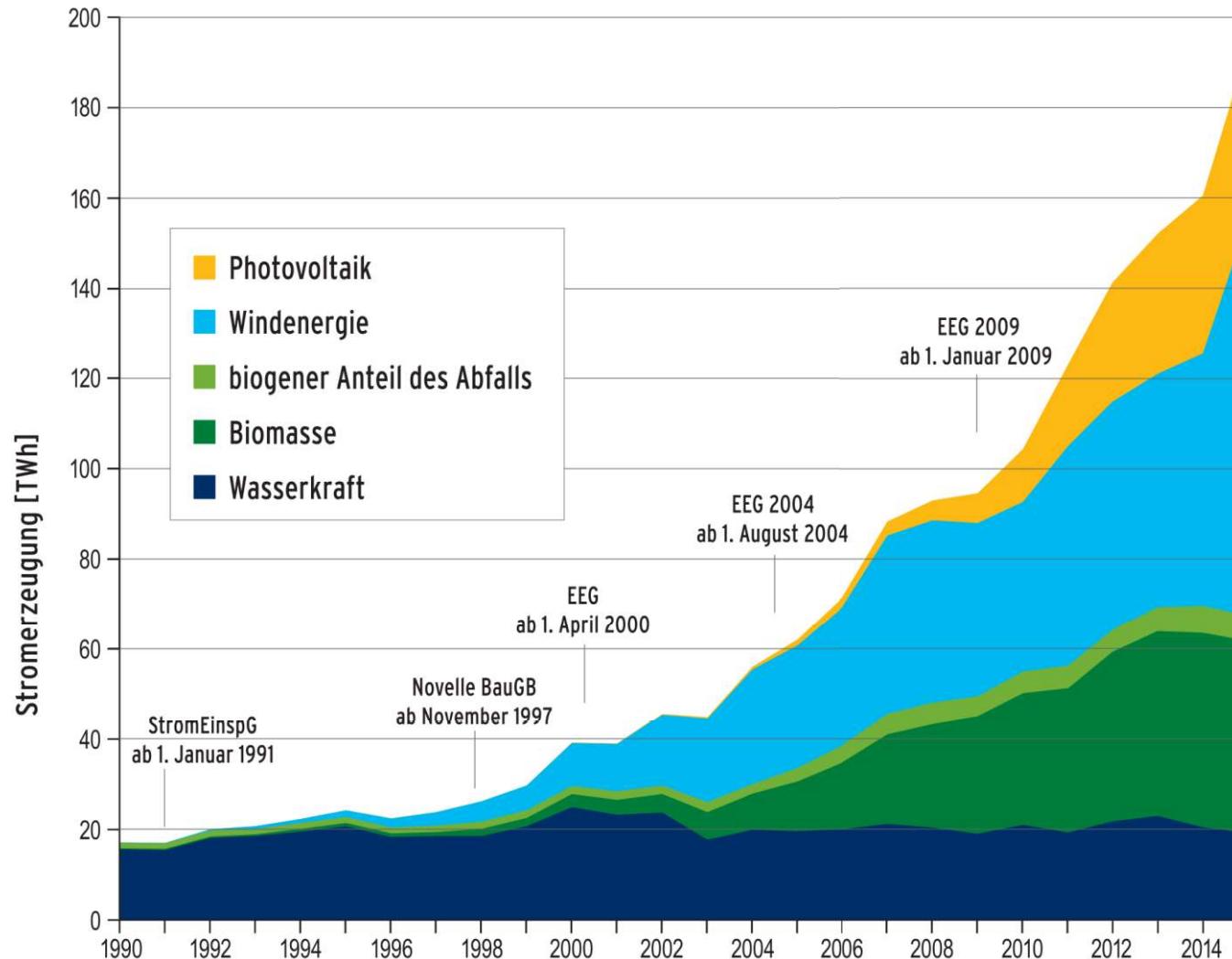
Strommix in Deutschland 2017: 548 Mrd kWh



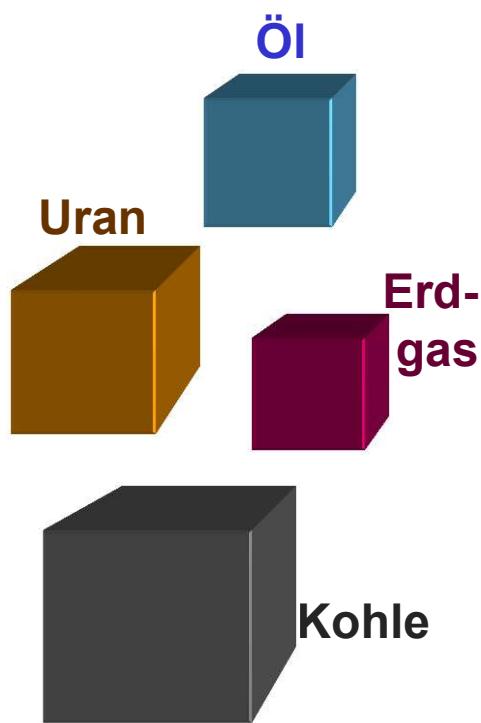
→ 38,5 % Strom aus regenerativen Energien

www.Strom-Report.de

Strom aus regenerativen Energien in Deutschland

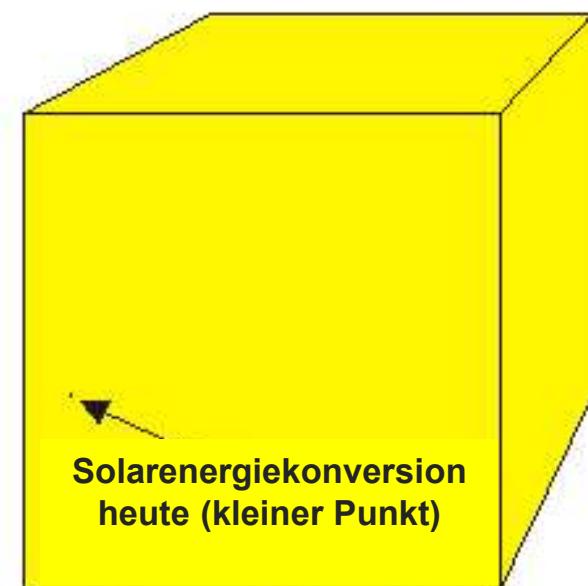


Globale Energie-Ressourcen



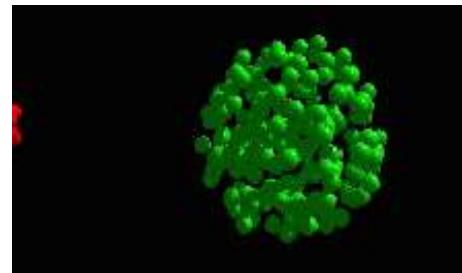
Jährlicher
Energie-
verbrauch

Jährliche Energie der Solarstrahlung

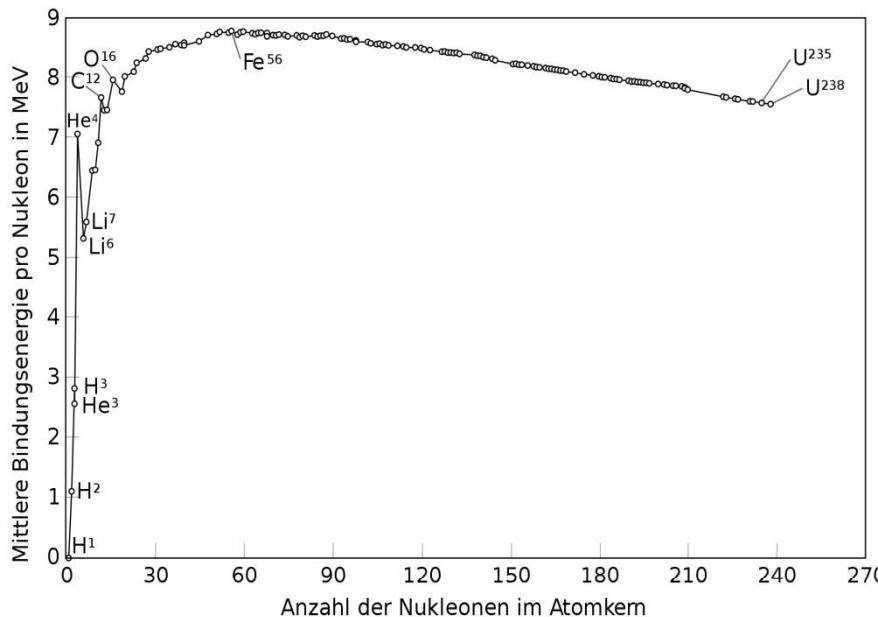


Massendefekt

- Einstein: liefert die Beziehung zwischen Masse und Energie $E = m c^2$ (c – Lichtgeschwindigkeit)
- Massendefekt = Bindungsenergie
- Das Nuklid mit dem höchsten Massendefekt ist ^{62}Ni , gefolgt von den Eisenisotopen ^{58}Fe und ^{56}Fe
- Bindungsenergie kann bei Kernumwandlungen freigesetzt werden → $E = \Delta m c^2$
 - Kernfusion für schwereren Elemente energetisch unmöglich
 - Kernspaltung setzt nur für schwerere Elemente Energie frei

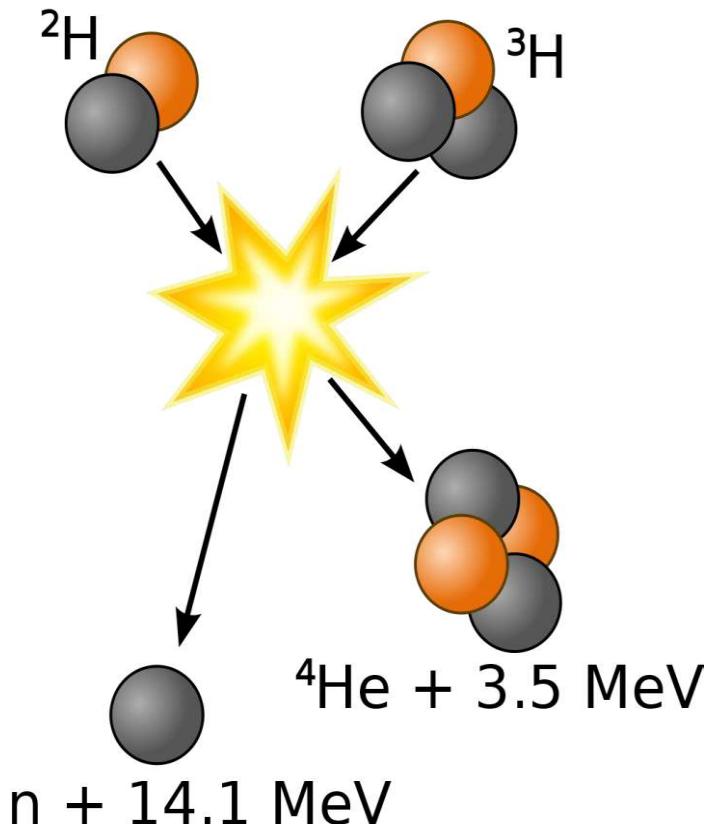


Thermonukleare Reaktion (Kernfusion)



- Fusionsreaktionen sind, vom leichtesten Element Wasserstoff ausgehend, nur bis zur Bildung von Eisen exotherm (d. h. energie-liefernd)
- durch diesen Prozess können nur Elemente bis zum Eisen entstehen (hauptsächlich Helium, Kohlenstoff, Sauerstoff, Neon, Silizium und Eisen)

Kernfusion: Beispiel



Deuterium und Tritium verschmelzen zu einem Heliumkern unter Freisetzung eines Neutrons.

Diese Fusionsreaktion

- ist eine Quelle für schnelle Neutronen
- findet in Wasserstoffbomben statt
- soll in Kernfusionsreaktoren kontrolliert ablaufen

Die Umsetzung von nur einem Gramm Deuterium/Tritium-Gemisch in einem Kernfusionsreaktor würde eine thermische Energie von rund 100 Megawattstunden (MWh) freisetzen

Kernfusion von Wasserstoff zu Helium



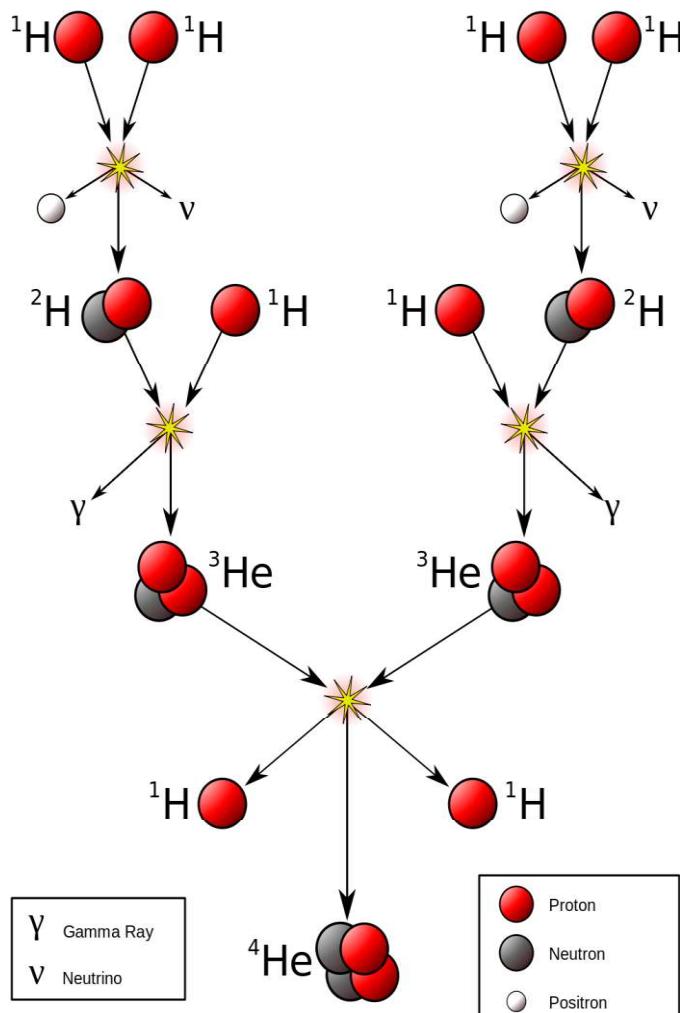
Oberflächentemperatur:

ca. 5800 K

Strahlungsleistung an der
Oberfläche:

63 MW/m²

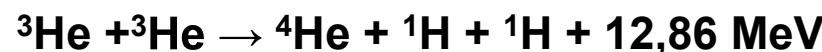
Wie funktioniert unsere Sonne?



Energiebetrachtungen



Neutrinoenergie $\sim 0,26 \text{ MeV}$



Nettoenergie
(abzüglich der Neutrinoenergie)

$$2 \times (0,42 \text{ MeV} + 1,022 \text{ MeV} + 5,49 \text{ MeV} - 0,26 \text{ MeV}) + 12,86 \text{ MeV}$$

= 26,204 MeV (aus 2 Wasserstoffatomen!)

Solarenergie

Nutzung der Sonnenenergie: Geschichte

- 1836 Entdeckung des Photoeffektes durch Becquerel
Stromfluss zwischen verdunkelter und belichteter Seite einer chem. Lösung in denen zwei Elektroden eingetaucht waren
konnte es jedoch noch nicht erklären
- 1891 erstes Patent für Solaranlage
Clarence Kemp aus Baltimore - Wärmekollektor für Warmwasser
- 1954 erste Solarzelle in den Laboratorien der amerikanischen Firma Bell gebaut
Wirkungsgrad von 4% - 6% - glücklicher Zufall bei Versuchen mit Gleichrichter auf Siliziumbasis unter Sonnenbestrahlung
- 1958 Tests mit Solarzellen auf Satelliten
günstig, da kein Tag-Nacht-Rhythmus und keine Verluste durch Erdatmosphäre oder Wolkendecke
- 1976: Gründung des DOE in den USA
Solarzellen auch für terrestrische Energieversorgung

Solarzellen in der Raumfahrt

- Die Raumfahrt erkannte sehr schnell den Nutzen der Solartechnik und rüstete 1958 zum ersten Mal einen Satelliten mit Solarzellen aus
- *Vanguard 1* startete am 17. März 1958 und war erst der vierte Satellit überhaupt.

Er besaß ein Solarpanel, welches mit 108 Silizium-Solarzellen ausgestattet war

Diese dienten nur als Ladestation der Akkus und nicht zur direkten Stromversorgung

Dabei wurde errechnet, dass die Zellen einen Wirkungsgrad von 10,5 % besaßen

Die Konstrukteure hatten eine geringere Energieausbeute und eine kürzere Lebensdauer angenommen, so dass man diesen Satelliten nicht mit einem „Ausschalter“ versehen hatte

Erst nach acht Jahren stellte der Satellit aufgrund von Strahlenschäden seinen Betrieb ein.

Vanguard 1 (deutsch: „Vortrupp“)



Durchmesser von 16,5 cm, Masse von etwa 1,47 kg

erste Satellit, der mit Solarzellen ausgestattet wurde

Dank dieser Energiequelle konnte man sieben Jahre lang, bis 1964, über die von ihm gesendeten Signale seine Flugbahn verfolgen und daraus Erkenntnisse über die Erdform ableiten; auf diese Weise wurde die Abplattung der Erde an ihren Polen entdeckt.

Er erreichte eine Umlaufbahn zwischen 654 und 3969 km Höhe bei $34,25^\circ$ Bahnneigung.

Durch den Strahlungsdruck wurde Vanguard 1 binnen 28 Monaten um 1600 m aus seiner Bahn verschoben.

Auch heute befindet er sich noch auf einer stabilen Umlaufbahn.



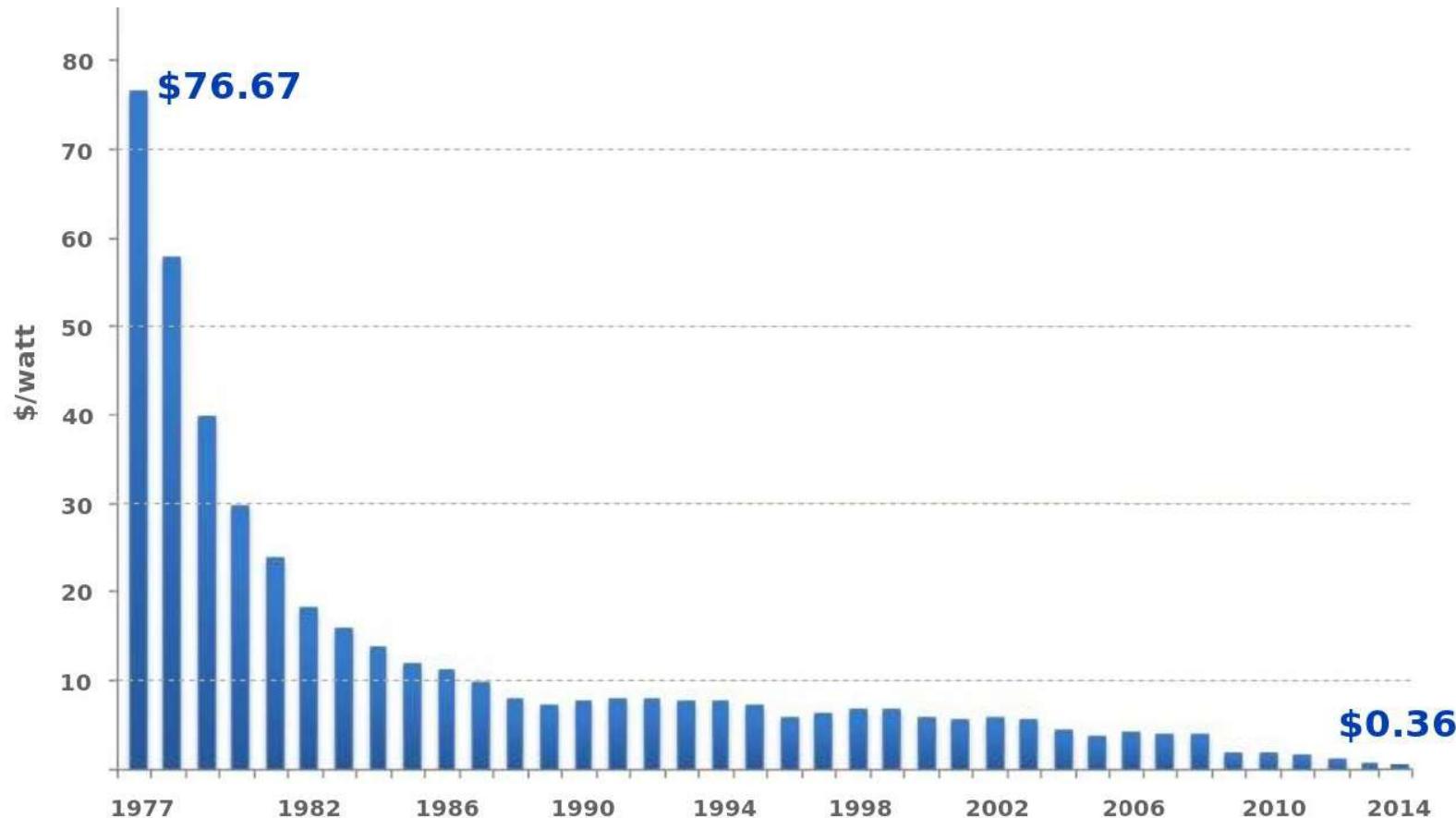
Vorteile von Solarenergie

- **Solarenergie ist im Gegensatz zu fossilen Energieträgern unbegrenzt verfügbar**
- **Es kommt zu keiner Freisetzung von Feinstaub, Treibhausgasen oder CO₂,**
- **Wegfall von eventuellen Preiskartellen großer Energieerzeuger, was zu freier Preisbildung und damit niedrigeren Energiepreisen führen könnte**
- **Wegfall der Notwendigkeit großer Reservekapazitäten**
- **Reduzierung energiepolitischer Abhängigkeiten von möglichen Krisenherden und internationalen Konflikten, wie etwa in der Nahostregion**
- **Energiebilanz heute: Die zur Herstellung von Solarzellen benötigte Energie wird in 2 – 3 Jahren wieder erzeugt**

Nachteile von Solarenergie

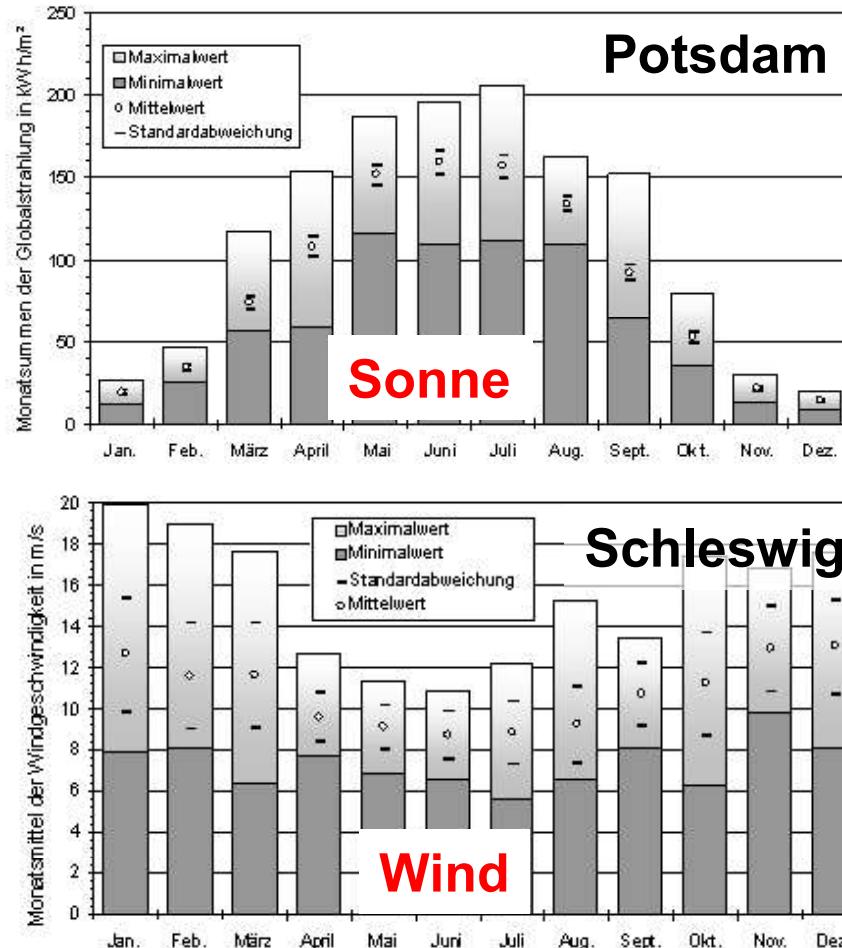
- Aufgrund der wetter-, Tages- und Jahreszeitabhängigen Sonneneinstrahlung ist ohne zusätzliche Speichertechnologie keine konstante Energieversorgung möglich.
- Die Energieerzeugung durch Photovoltaikzellen ist nach einer kompletten ökologischen Bilanz betrachtet nicht emissionsfrei, da die Herstellung der Anlagen bedeutende Mengen an Energie, Frischwasser und Chemikalien verbraucht.
- Als derzeit größter Nachteil werden die immensen Kosten betrachtet
In Deutschland trägt diese Kosten die Allgemeinheit der Stromverbraucher, denn das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz legt fest, dass die Mehrkosten für Solarstrom auf alle Verbraucher verteilt werden.

Preise von Si-Solarzellen in \$ pro Watt



Source: Bloomberg, New Energy Finance & pv.energytrend.com

Komplementarität von Sonnen- und Windenergie

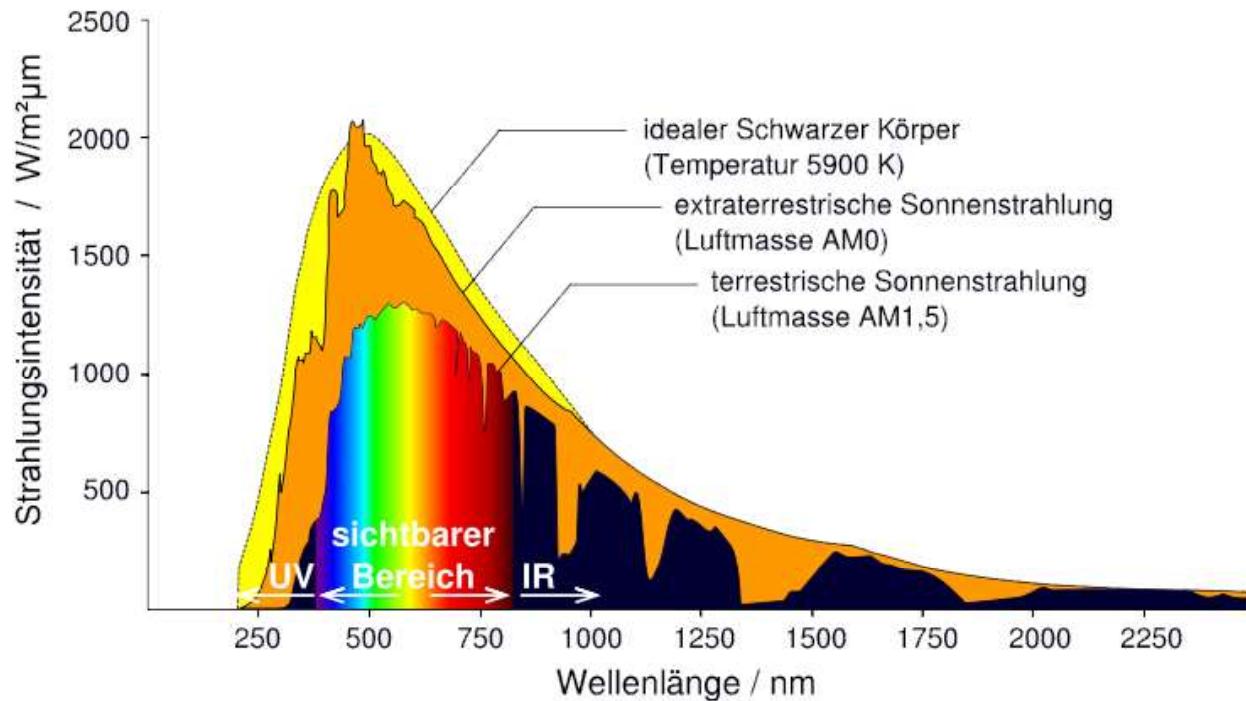


<http://www.volker-quaschning.de/klima2000/Kapitel4.html>

Nutzung der sinkenden und schließlich geringen Kosten der erneuerbaren Stromerzeugung erfordert Management der Schwankungen (Volatilität):

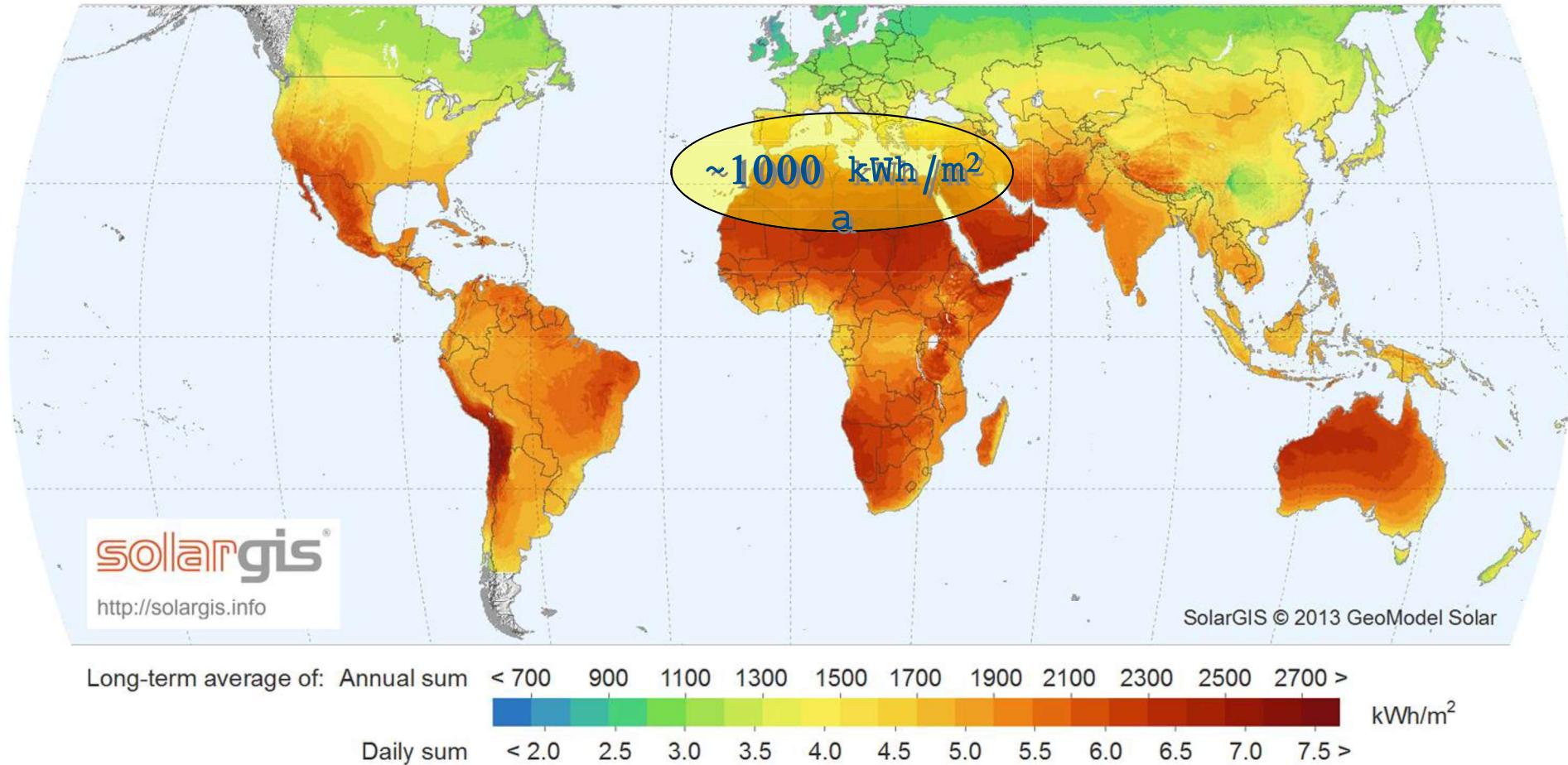
- Komplementarität ausnutzen
- Sonne und Wind nicht gegeneinander ausspielen
- Verteilung des Stromes zur Minderung der Volatilität
- “Rest” speichern, zum Beispiel in bestehender Infrastruktur:
“Power-to-Gas” für Deutschlands Gasnetz-System

Einleitung: Sonneneinstrahlung



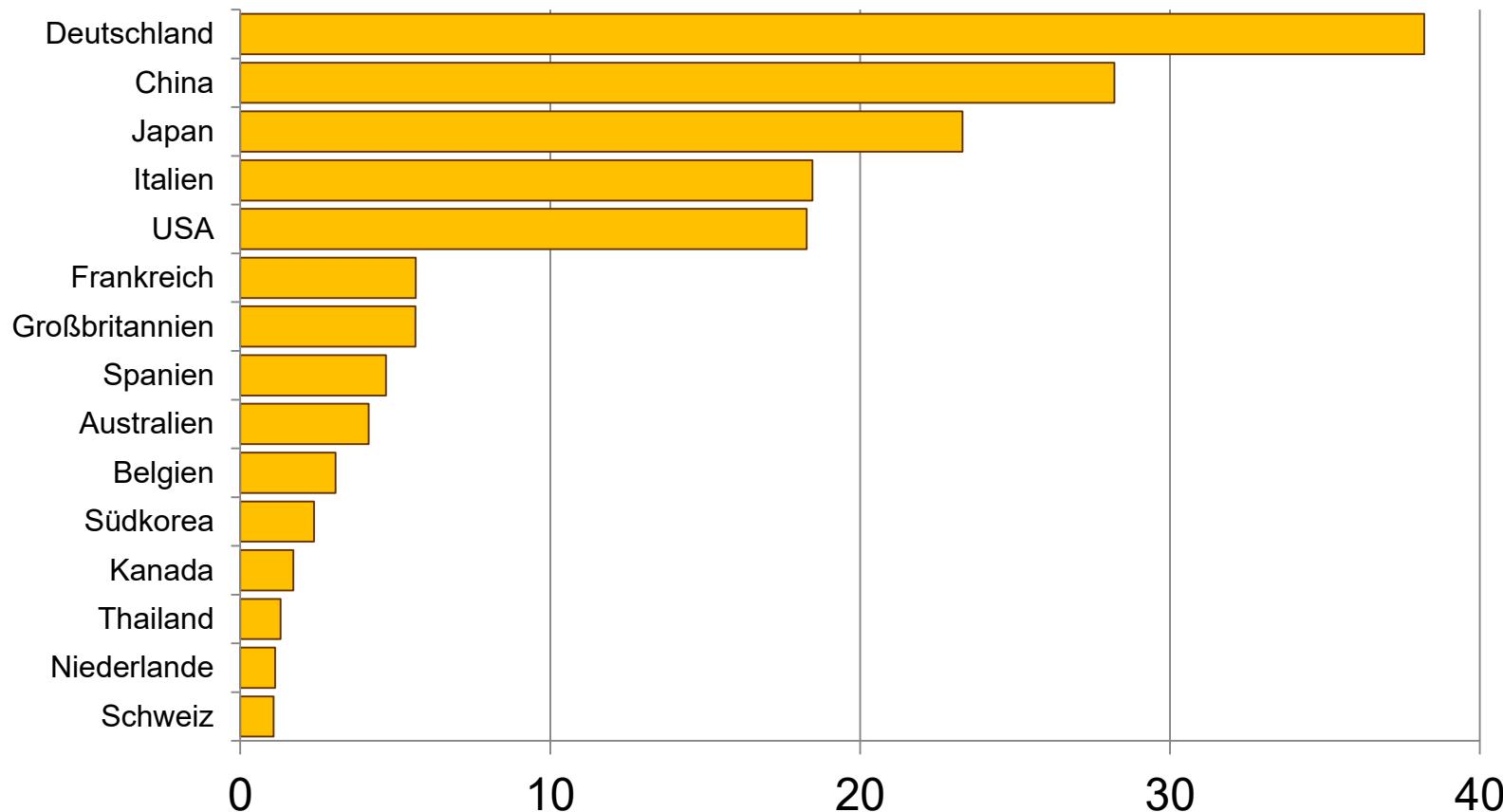
- Gesamte eingestrahlte Leistung auf Erde: 170 000 TW
(= 13000x momentaner Stromverbrauch)
- Absorption von Licht in Atmosphäre ist abhängig vom zurückgelegten Weg („air mass AMx“)

Strahlungskarte der Erde



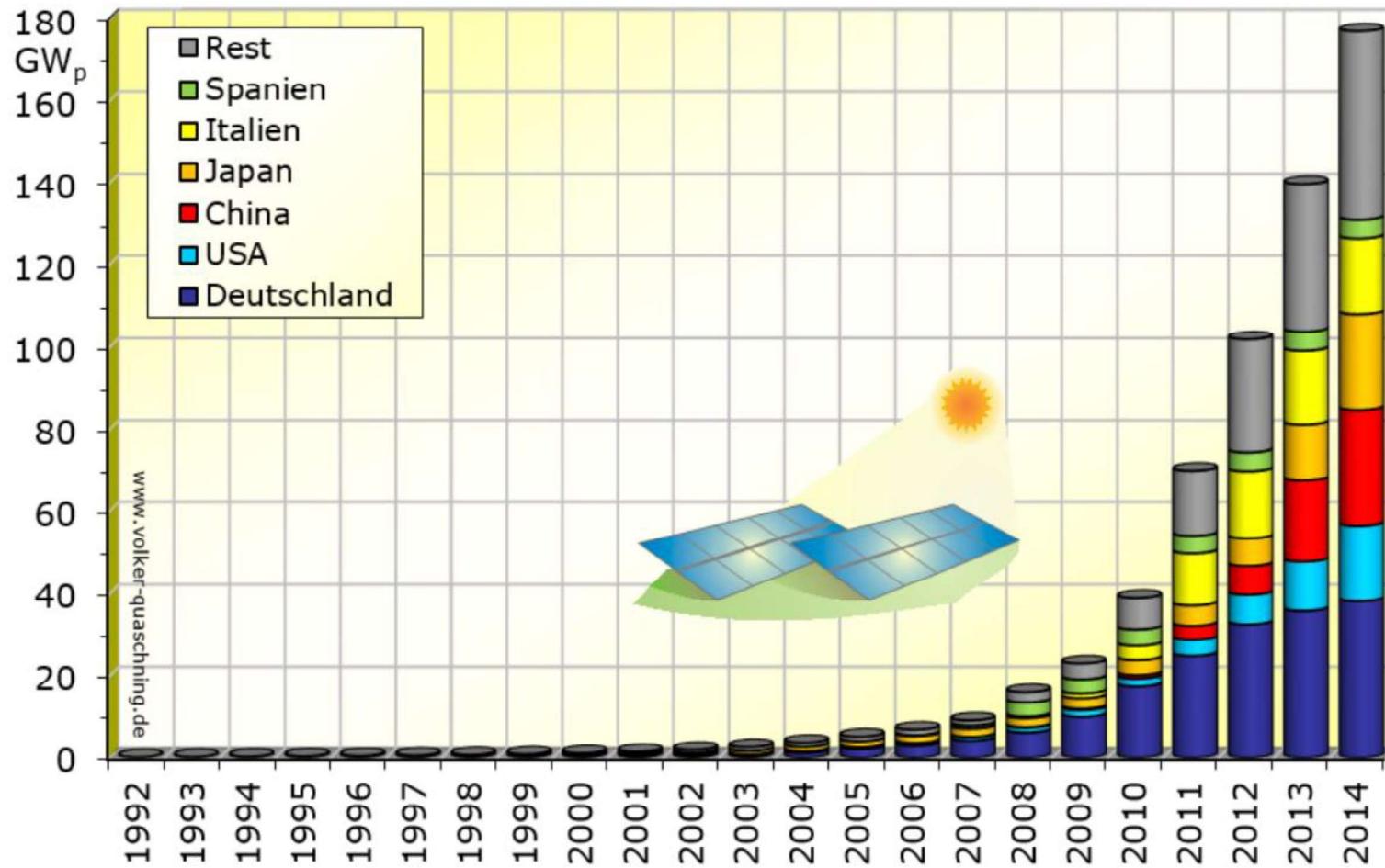
Weltweit installierte Photovoltaikleistungen

Installierte Leistung in GW (Stand Dez. 2014)

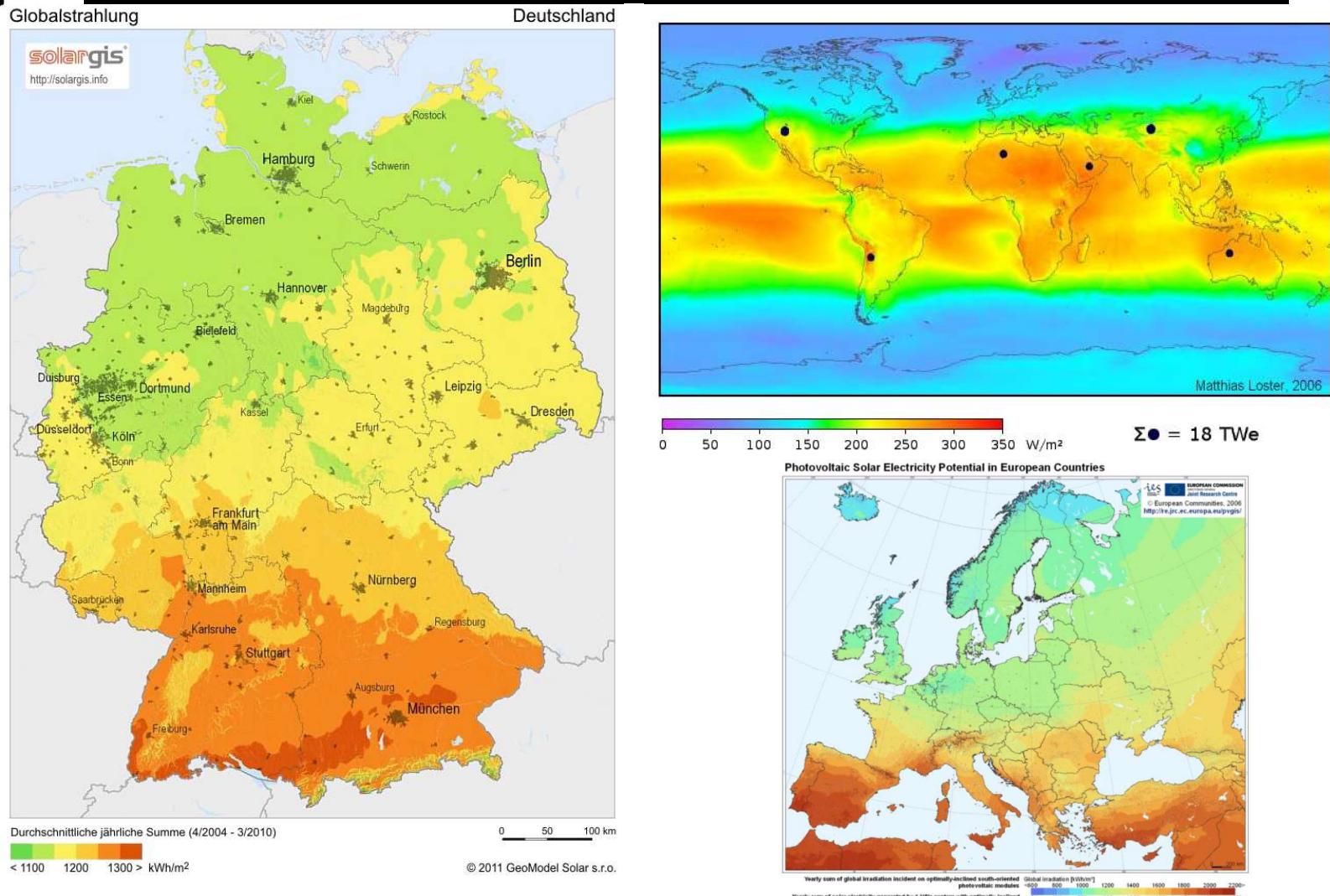


Quelle: <http://www.volker-quaschning.de/datserv/pv-welt>

Weltweit installierte Photovoltaikleistung

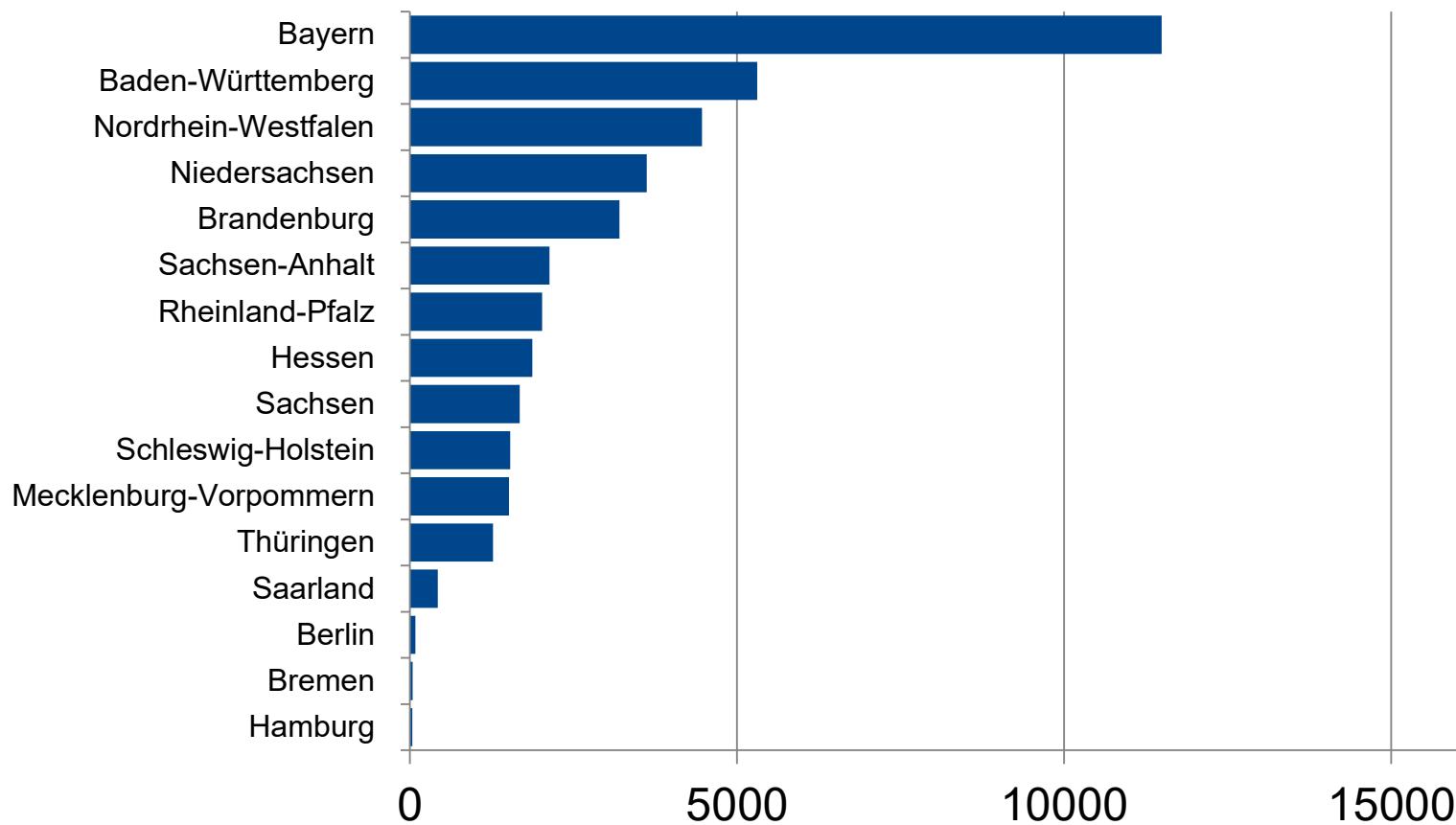


Sonneneinstrahlung



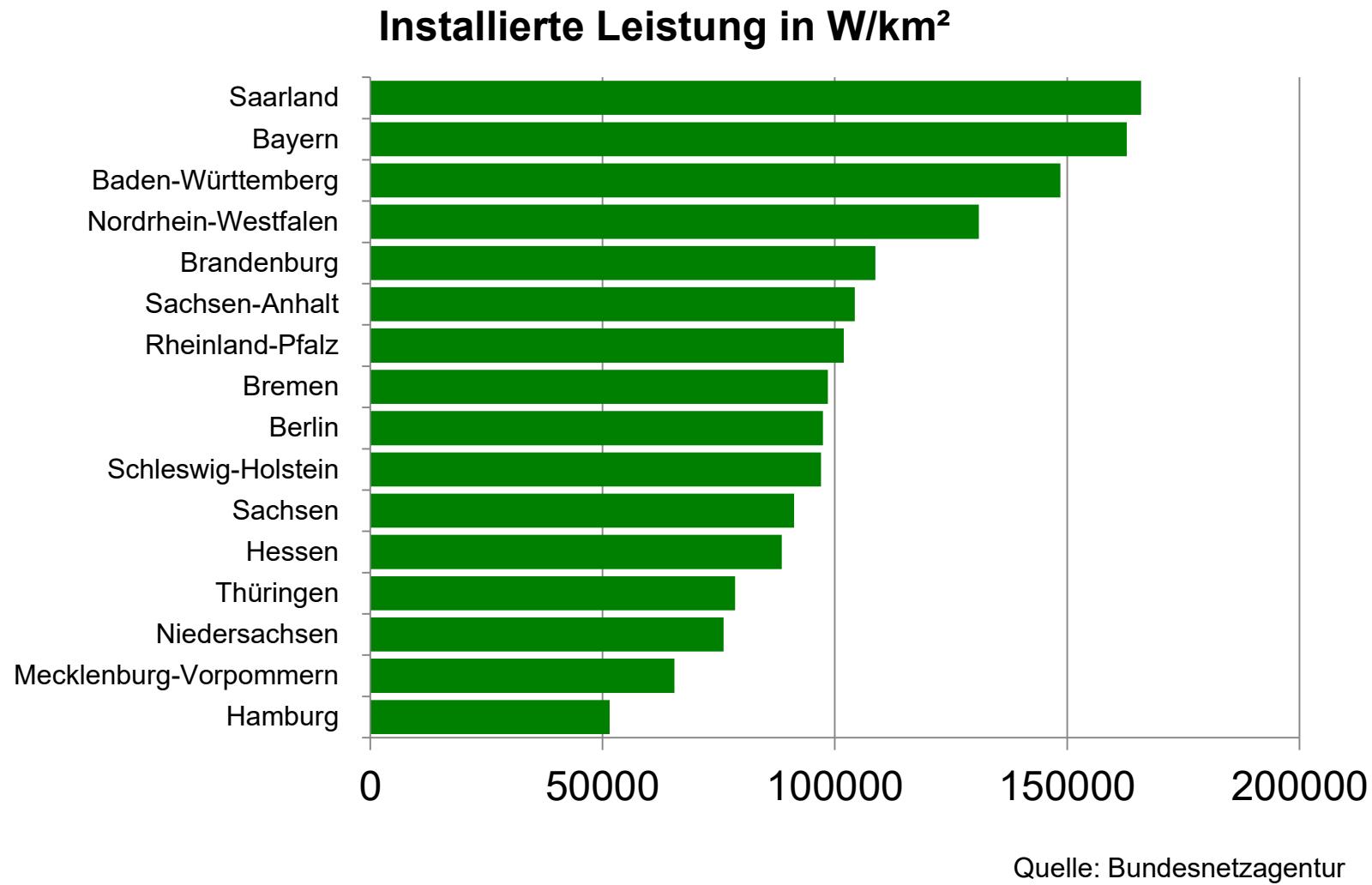
Die Bundesländer 12/2016 (absolut)

Installierte Leistung in MW

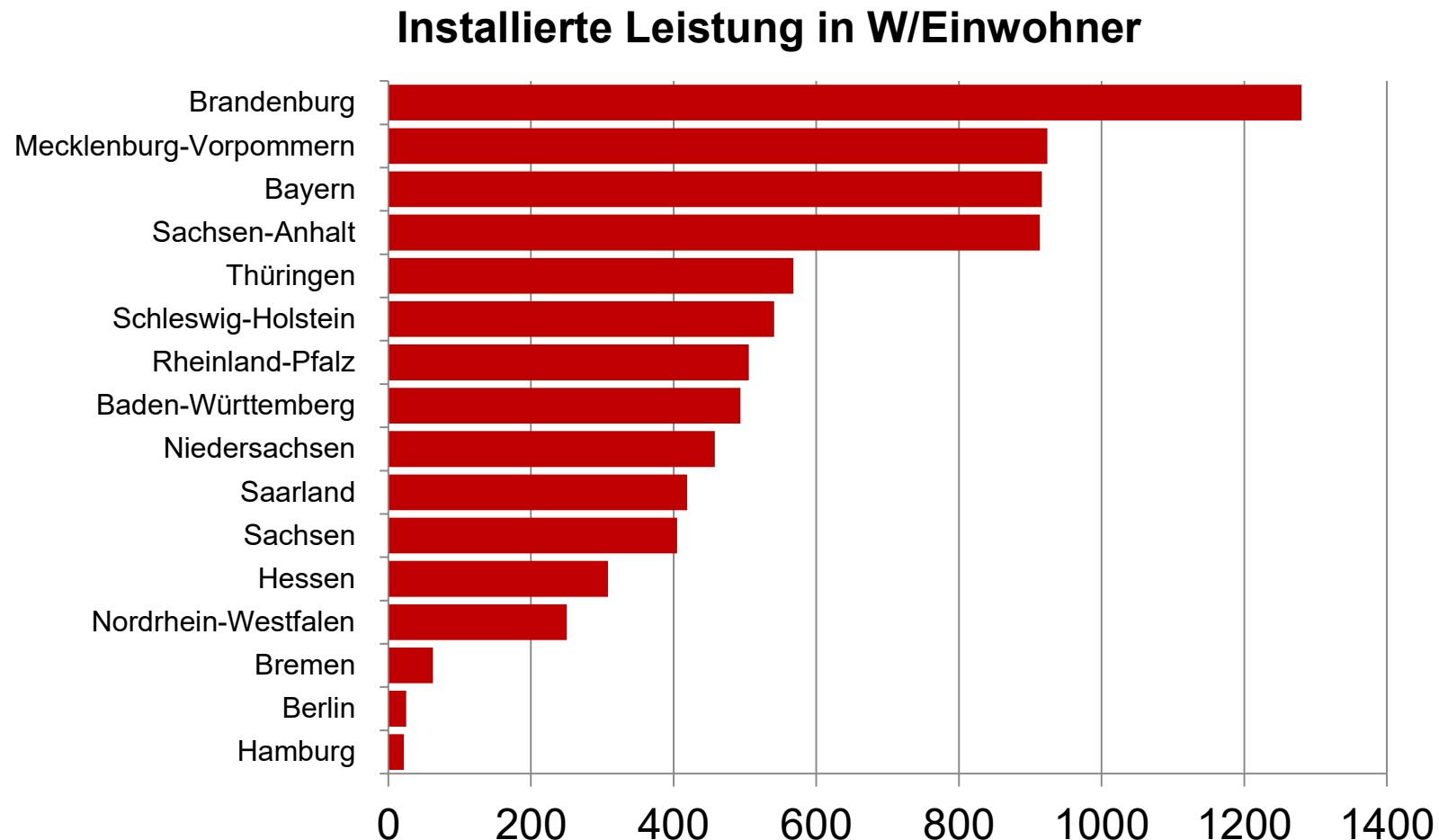


Quelle: Bundesnetzagentur

Die Bundesländer 12/2016 (pro km²)



Die Bundesländer 12/2016 (pro Einwohner)

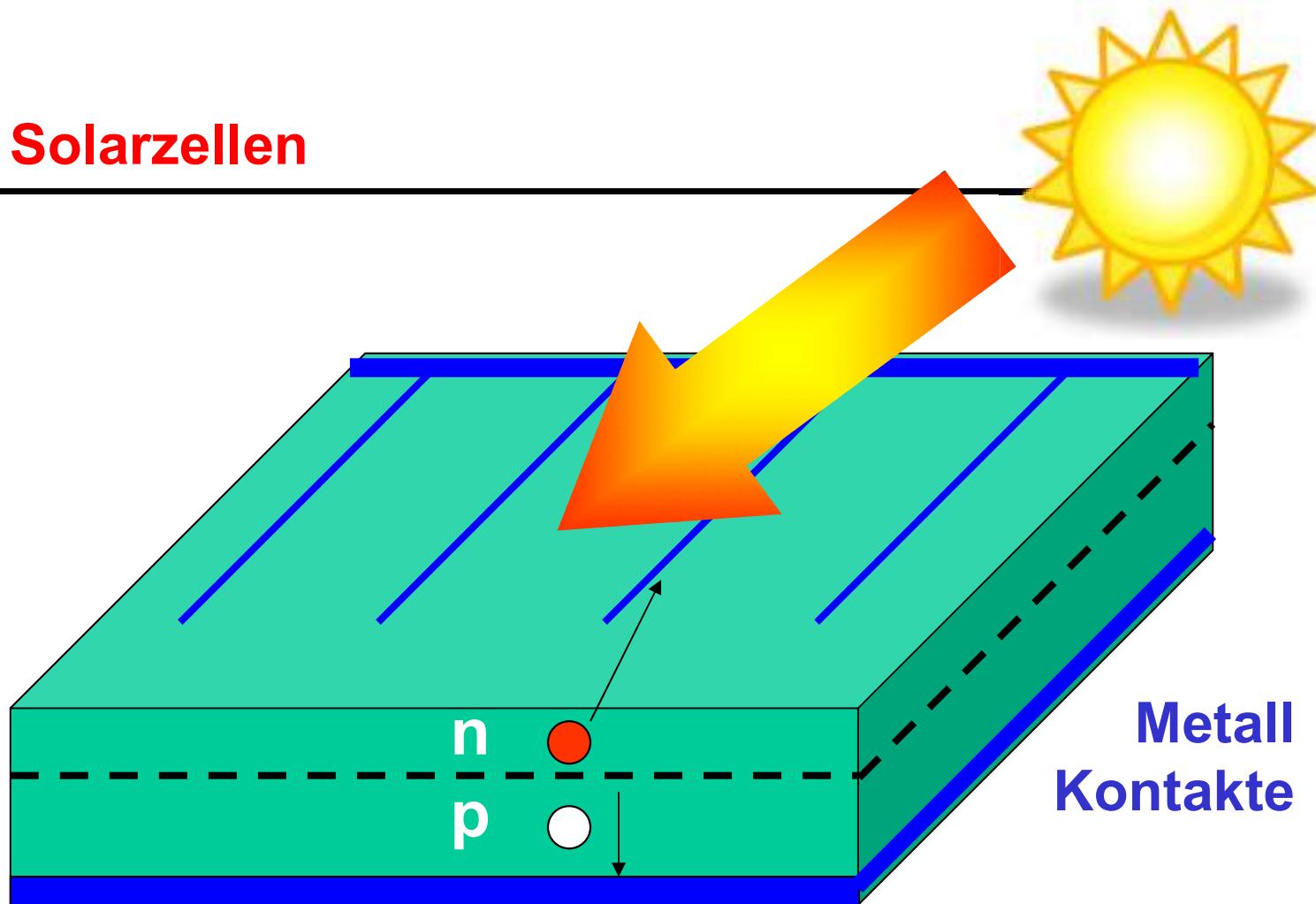


Quelle: Bundesnetzagentur

Solarzellen

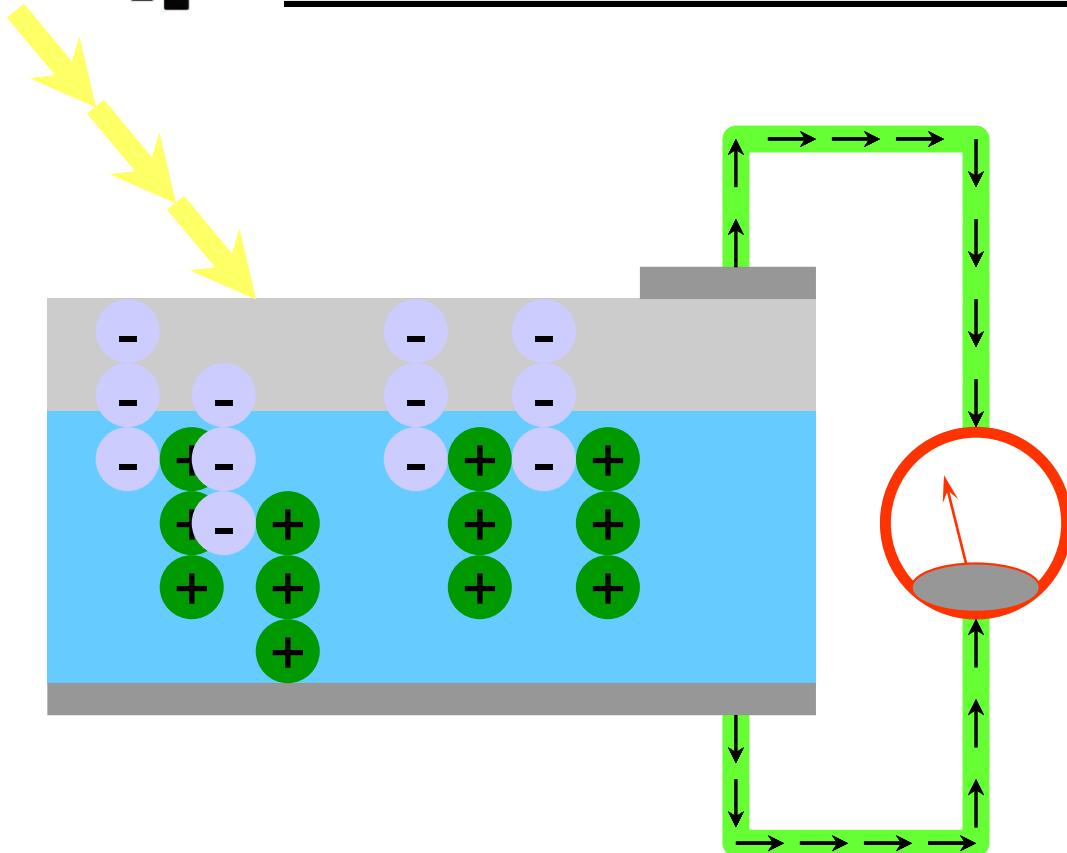
Was ist eine Solarzelle ?

- Umwandlung von Sonnenenergie in elektrische Energie
- Besteht in der Regel aus Halbleitern
Über 95% aller Solarzellen weltweit bestehen aus Silizium
- Bei Anschluss eines Verbrauchers fließt Gleichstrom



Input: 1 kW/m²

Wie funktioniert eine Solarzelle ?

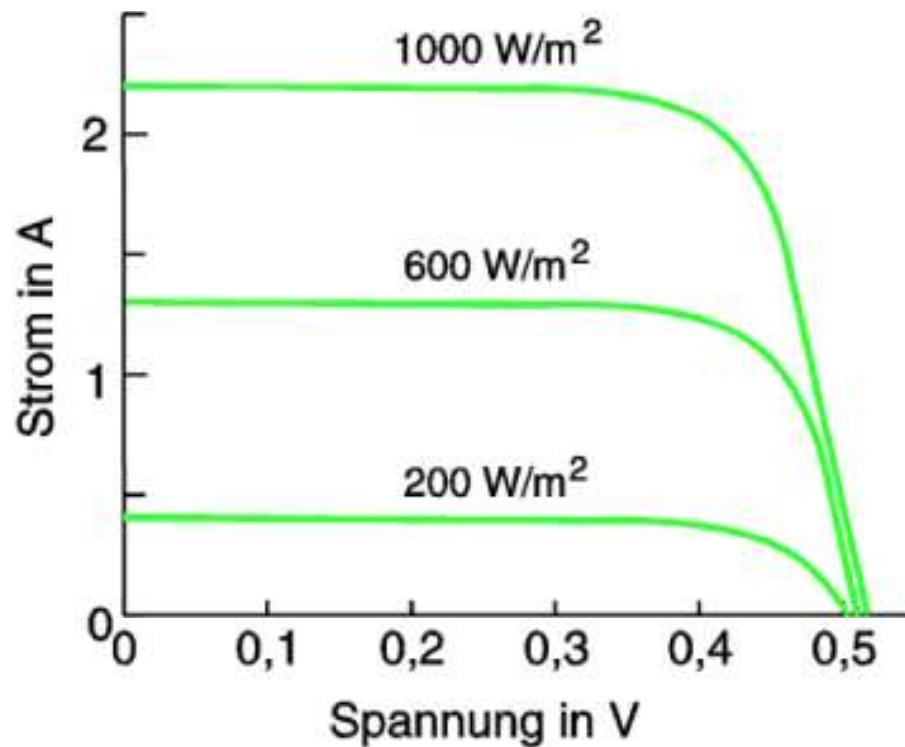


Solarzellen wandeln Licht direkt, ohne bewegte Teile, in elektrischen Strom um.

Trifft Licht auf eine Solarzelle, wandern Elektronen in die n-Schicht und Löcher in die p-Schicht. Die Ladung der beiden Schichten wird dadurch unterschiedlich.

An den Kontakten kann die elektrische Spannung abgegriffen werden.

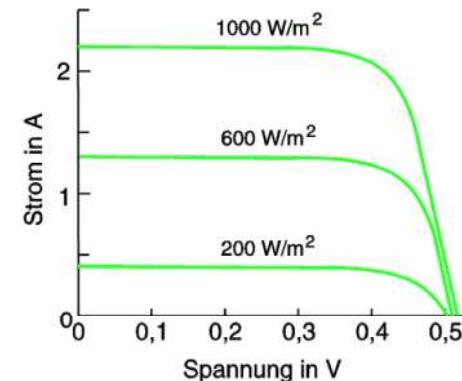
Strom-Spannungs-Diagramm einer Si-Solarzelle



→ Die Stromstärke steigt bei mit der Beleuchtungsstärke an



- Abgreifbare Spannung hängt vom Halbleitermaterial ab
ca. 0,5V bei Silizium
- Klemmspannung nur schwach von Beleuchtungsstärke abhängig
- Stromstärke steigt mit zunehmender Beleuchtung
ca. 2A bei 100cm² großer Siliziumzelle und max.
Bestrahlung von 1000W/m²
- Leistung ist temperaturabhängig
(geringerer Wirkungsgrad bei hohen Temperaturen)



Solarzelle: Aufbau und Funktion:

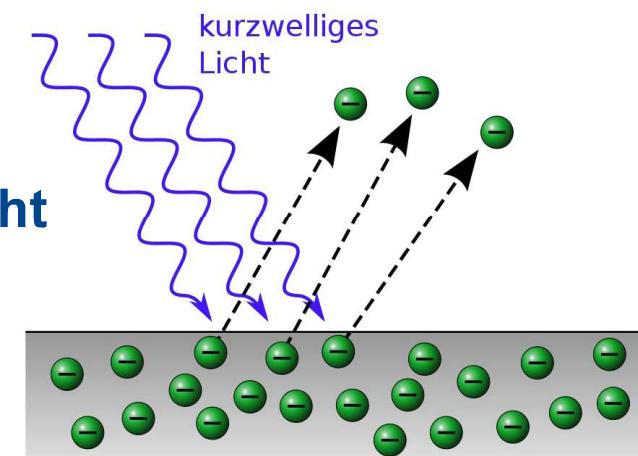


- Aufbau wie Halbleiterdiode
- p-Schicht liegt an Oberfläche und ist sehr dünn, so dass Sonnenlicht bis in pn-Übergang gelangt
- Elektron-Lochpaare werden durch Lichteinstrahlung generiert und müssen vor der Rekombination getrennt werden
 - Entstehung einer Spannungsquelle durch diese Ladungstrennung
- bei ausreichendem Lichteinfall kann ein Strom von ca. 20 mA fließen, ohne dass die Spannung von etwa 0,5 Volt einbricht
- positive Energiebilanz
 - Herstellungskosten für Si-Zellen nach ca. 2-3 Jahren getilgt

Physik: äußerer photoelektrischer Effekt

- 1887 von Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs beobachtet
- manche unoxidierte Metalle geben im aufgeladenen Zustand Elektronen ab, wenn ihre Oberfläche durch Licht bestrahlt wird
- kinetische Energie der Elektronen hängt von Wellenlänge des Lichtes ab, nicht von Lichtstärke
- herausgeschlagene Elektronen erzeugen Ladungstrennung (Spannung), die von Wellenlänge abhängt

→ Der äußere photoelektrische Effekt ist für die Solarzelle nicht relevant!!



photovoltaischer Effekt

- innerer photoelektrischer Effekt
 - beobachtbar in Festkörpern bei denen die Elektronen im nicht leitenden Valenzband sind
 - schwache elektrische Leitung
 - Photonen heben Elektronen in energetisch höher gelegene Leitungsband
 - bessere Leitung unter Beleuchtung
- Photovoltaik basiert auf innerem photoelektrischen Effekt
 - an einem zusätzlichen pn-Übergang findet Ladungstrennung statt
 - Wandlung von Solarenergie in elektrische Energie

Elektronenverteilung bei Beleuchtung

Betrachte p -Typ Silizium mit Dotierung N_A unter Beleuchtung

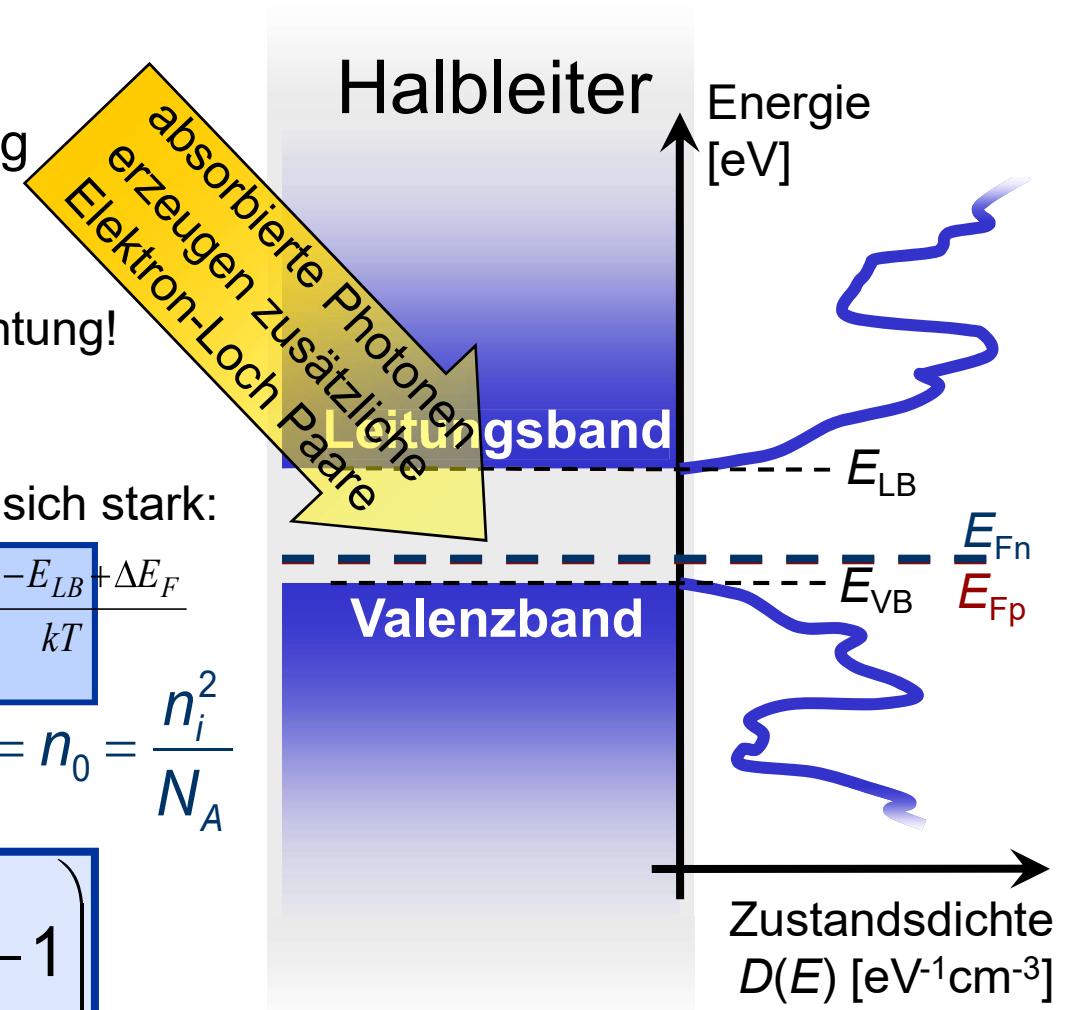
Lochkonzentration $p_0 = N_A$ ist groß:
 → p ändert sich kaum bei Beleuchtung!
 → ($E_{F,VB} \approx \text{konst.}$)

Elektronenkonzentration n ändert sich stark:

$$n = N_{LB} e^{\frac{E_{Fn} - E_{LB}}{kT}} = N_{LB} e^{\frac{E_{Fp} - E_{LB} + \Delta E_F}{kT}} = n_0 = \frac{n_i^2}{N_A}$$

„Überschuss“-Elektronen:

$$\Delta n = n - n_0 = \frac{n_i^2}{N_A} \times \left(e^{\frac{\Delta E_F}{kT}} - 1 \right)$$



Rekombination R und Lebensdauer τ (p-Si)

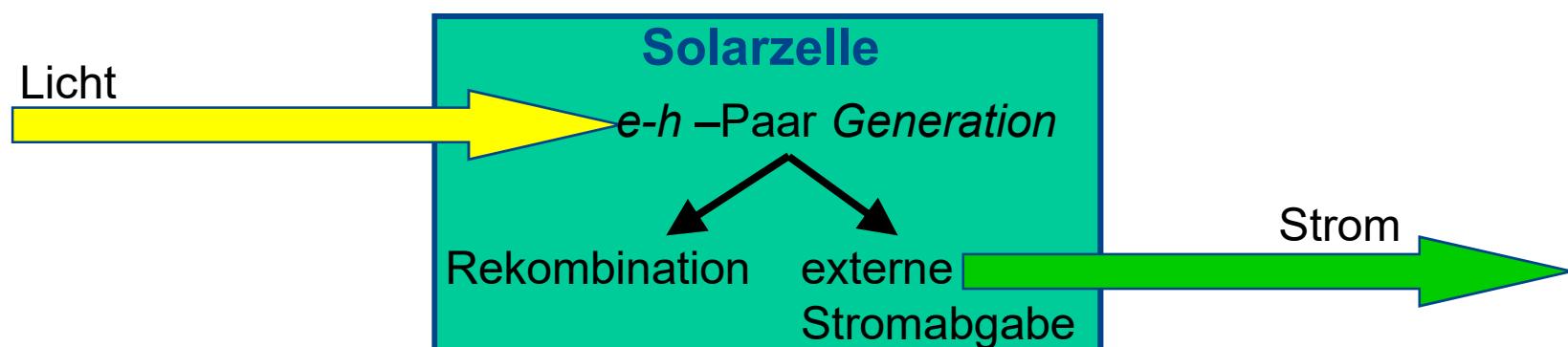
- Überschuss-Ladungsträger Δn rekombinieren im Mittel nach Ablauf ihrer Lebensdauer τ .

- Rekombinations-Rate

$$R = \frac{\Delta n}{\tau} = \frac{n_i^2}{\tau N_A} \left(e^{\frac{\Delta E_F}{kT}} - 1 \right)$$

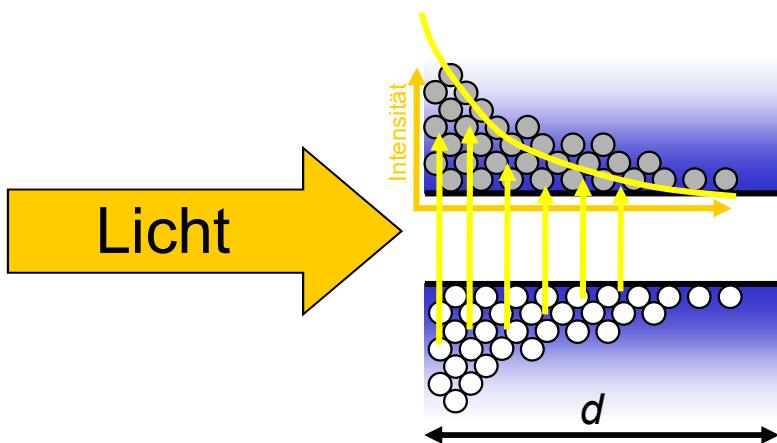
$= E_{Fn} - E_{Fp}$

Überlegung:



Idealisierte Solarzelle

- Idealisierter Ladungsträger-Transport: $\mu_n, \mu_p \rightarrow \infty$
→ konstante (quasi-) Fermilevel

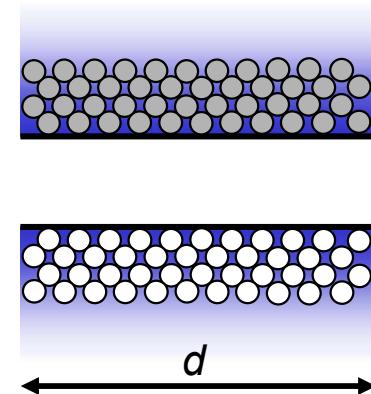


Vereinfachung:
 $\mu_n, \mu_p = \infty \rightarrow E_{F,n/p} = \text{konst.}$
 $\rightarrow n, p = \text{konst.}$

Mittlere Photogenerationsrate G pro Fläche

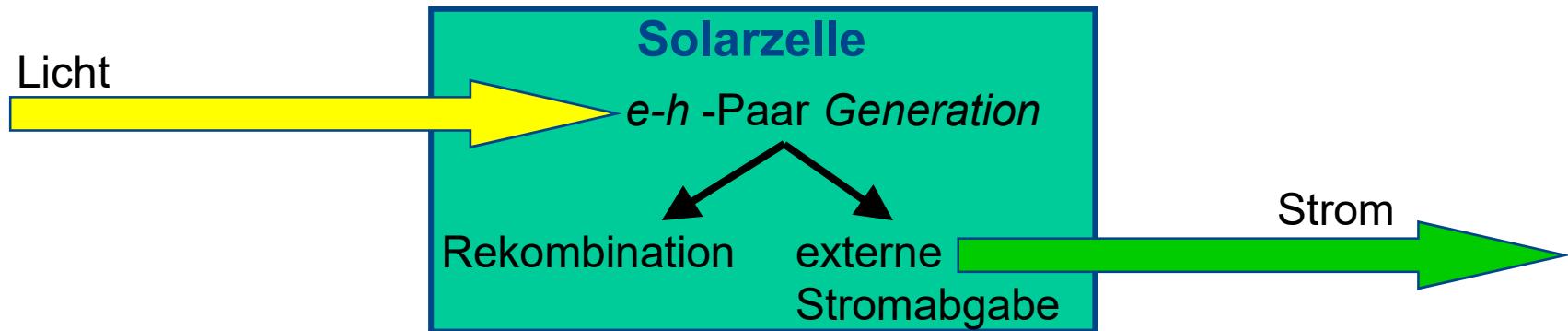
$$n = \text{konst.}, \quad p = \text{konst.}$$

$$\Delta n = \text{konst.}, \quad \Delta p = \text{konst.}$$



- Gesamt-Generationsrate pro Solarzellenfläche = $G d$
→ $q G d$ = Maximale extrahierbare photogenerierte Stromdichte
- Gesamt-Rekombinationsrate pro Solarzellenfläche = $(\Delta n / \tau) d$

Prinzip der idealisierten Solarzelle



Stromabgabe = Generation - Rekombination „implizierte Spannung“

$$J(\Delta E_F) = q \cdot d \cdot G - q \cdot d \cdot \frac{n_i^2}{\tau N_A} \left(e^{\frac{\Delta E_F}{kT}} - 1 \right)$$

„Kurzschluss-Stromdichte“

Stromdichte $[A/cm^{-2}]$

Dicke der Solarzelle $[cm]$

Generationsrate $[cm^{-3}]$

$= E_{Fn} - E_{Fp}$

„Sättigungs-Stromdichte“

Gleichung der idealisierten Solarzelle

Stromabgabe = Generation - Rekombination

„implizierte
Spannung“ V

$$J(\Delta E_F) = q \cdot d \cdot G - q \cdot d \cdot \frac{n_i^2}{\tau N_A} \left(e^{\frac{\Delta E_F}{kT}} - 1 \right)$$

↑
Generationsrate [cm⁻³]

Stromdichte [A/cm⁻²] → „Kurzschluss-
Stromdichte“ J_{SC}

Dicke der Solarzelle [cm] → „Sättigungs-Stromdichte“ J_0
 $= E_{Fn} - E_{Fp}$

$$J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Gleichung der idealisierten Solarzelle

Stromabgabe = Generation - Rekombination

$$J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

- Keine Annahme über einen *pn*-Übergang für Herleitung benötigt
- (Exponential-)Kurvenform ist Folge der Fermi-Verteilung
- Rekombination (Verlust) ist gleich „Dunkel-Diodenstrom“ = $J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$
- Beeinflussbare Parameter in der idealisierten Gleichung sind:

J_{SC} → Optik

J_0 → τ : Materialqualität, Prozessqualität, Passivierung
→ d, N_{dop} : Zellendesign

Gleichung der idealisierten Solarzelle

$$J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

- Keine Annahme über einen *pn*-Übergang für Herleitung benötigt

... wenn
das alles
so ist:

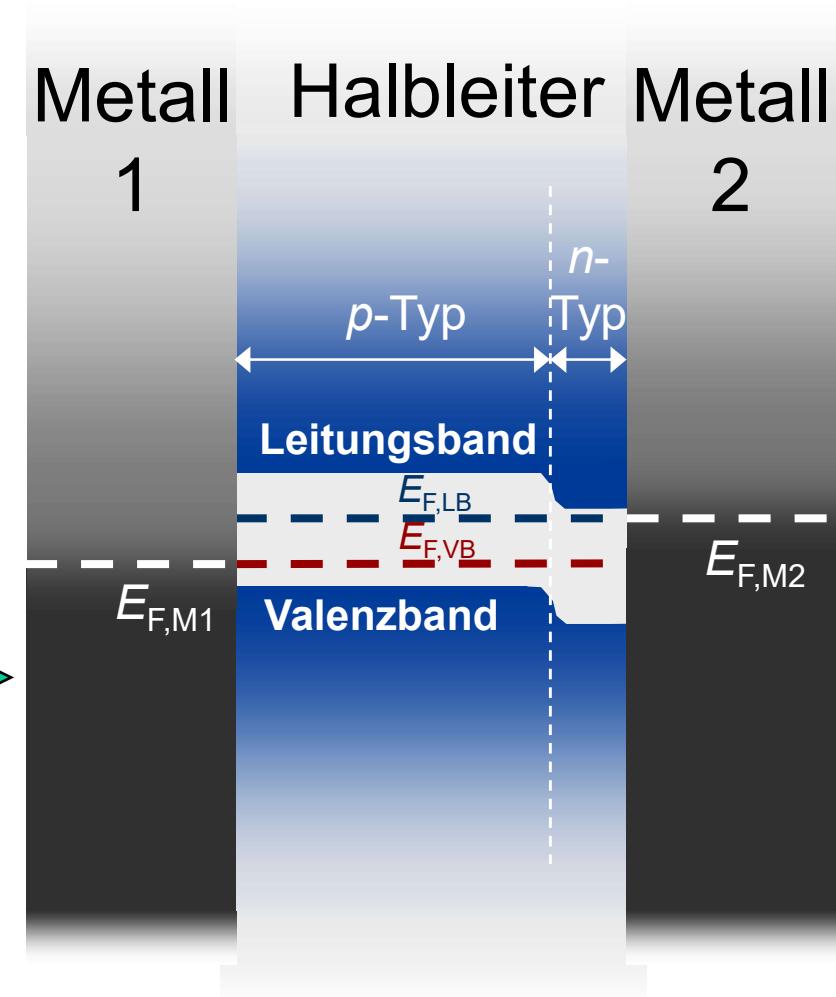
Warum bestehen Solarzellen aus *pn*-Übergängen?

Wie sollen die Fermilevel von Leitungs- und Valenzband kontaktiert werden, so dass die Spannung $V = (E_{Fn} - E_{Fp})/q$ auch abgegriffen werden kann?

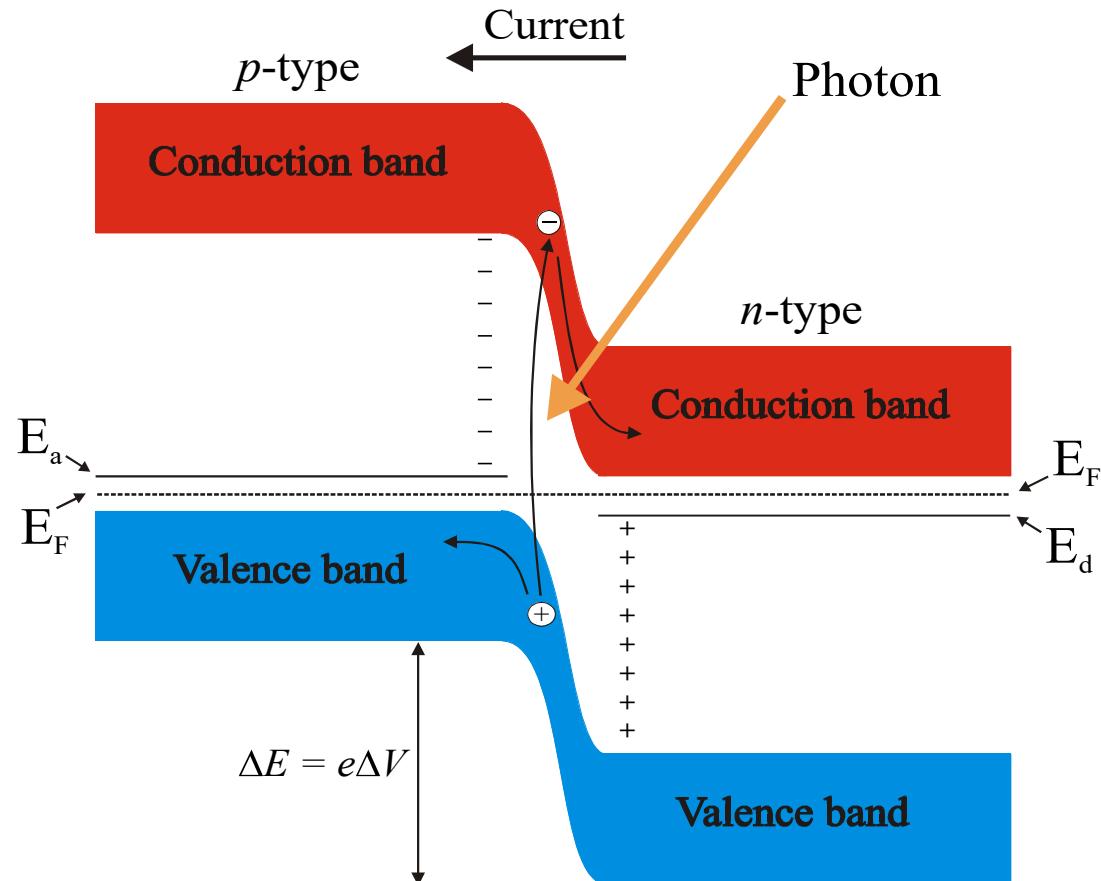
Schlussfolgerungen:

1. Fermi-Level des Metallkontaktees richtet sich nach dem der angrenzenden Majoritäten
2. Zur Kontaktierung der Leitungsband-Elektronen werden *n*-Typ Bereiche benötigt.
3. Zur Kontaktierung der Valenzband-“Löcher” werden *p*-Typ Bereiche benötigt.
4. Die Solarzelle benötigt daher einen *pn*-Übergang!

...weitergehende Beschreibung der Solarzelle erfordert Betrachtung des elektronischen Transports.
→ Vorlesung Dr. Krügener



Solarzellen = pn-Übergang

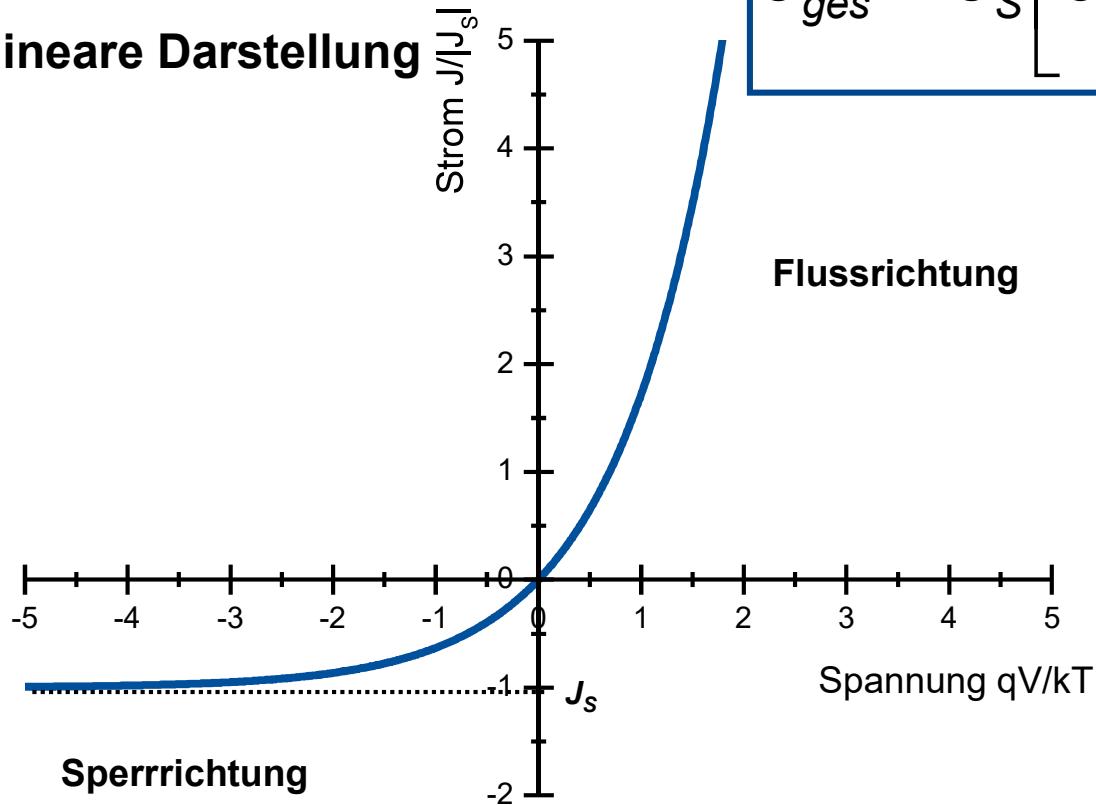


Zusammenfassung: Funktionsweise

- Fermiverteilung beschreibt Besetzungswahrscheinlichkeit von Elektronen-Energieniveaus im Halbleiter
- Fermilevel kann als „Füllstand“ des mit Elektronen aufgefüllten Halbleiters angesehen werden
- Gradient des Fermilevels gibt Stromfluss-Richtung an
- Bei nicht-thermischer Anregung können die Elektronen in Leitungs- und Valenzband durch zwei unterschiedliche Quasi-Fermilevel E_{Fn} und E_{Fp} beschrieben werden.
- Der Energieunterschied $\Delta E_F = E_{Fn} - E_{Fp}$ impliziert eine Spannung $V = \Delta E_F / q$
- *n*-Typ Bereiche eignen sich zum Potentialabgriff E_{Fn}
- ...und *p*-Typ Bereiche zum Potentialabgriff E_{Fp}

Zur Erinnerung: Idealisierte Diodenkennlinie

lineare Darstellung



$$J_{\text{ges}} = J_S \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Diode

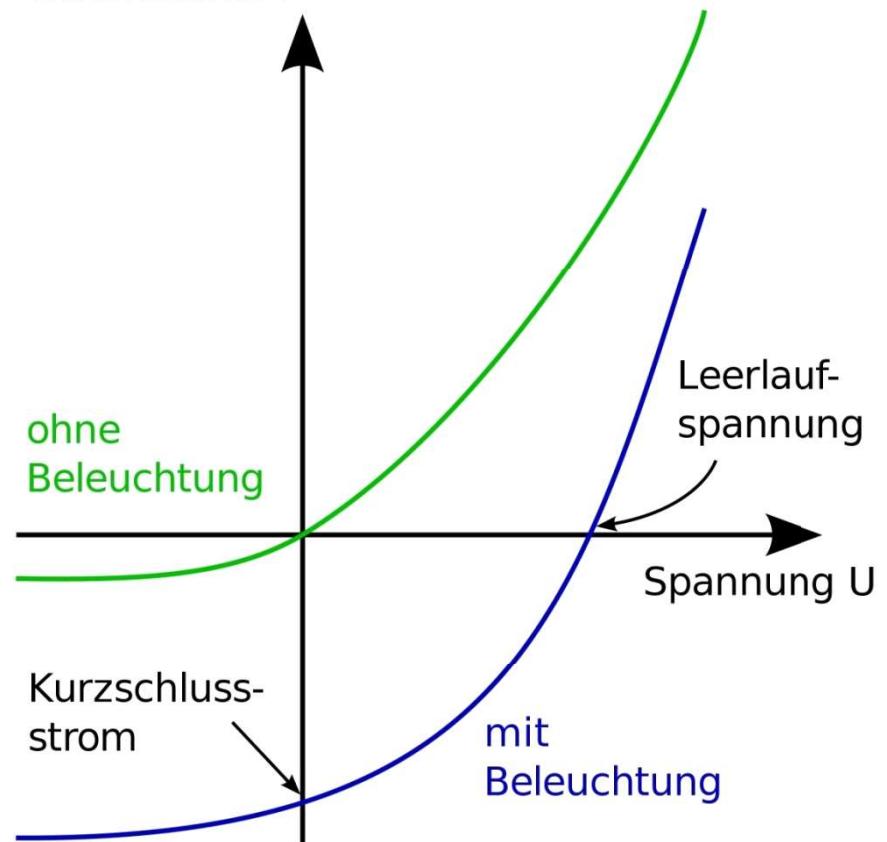
$$J_{ges} = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

Solarzelle

$$J(V) = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) - J_{SC}$$

nichtlineare Kennlinie einer Solarzelle

Stromstärke I



Idealitätsfaktor

- **Solarzellengleichung:** $J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$
- **Ist die Lebensdauer $\tau = \tau(\Delta n)$ eine Funktion von Δn , dann ist die Sättigungsstromdichte $J_0 = J_0(V)$ auch eine Funktion von V**
 Die Abhängigkeit $J_0(V)$ von der Spannung wird oft aus der Sättigungsstromdichte J_0 „ausgeklammert“ und dem Exponentialterm zugeschrieben
 → Idealitätsfaktor m, der wiederum eine Funktion von V sein kann:

$$J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{m kT}} - 1 \right)$$

(Streng genommen gilt aber im Fall von nicht-konstantem $\tau = \tau(\Delta n)$ die Herleitung nicht mehr und eine numerische Berechnung ist erforderlich).

- **Solarzellengleichung:**

$$J(V) = J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

J_0 : Sättigungsstromdichte
 J_{SC} : Kurzschluss-Stromdichte

- „Open-Circuit“-Bedingung liegt vor, wenn kein äußerer Strom fließt: $J(V) = 0$

$$0 = J_0 \left(e^{\frac{q(V=V_{OC})}{kT}} - 1 \right) - J_{SC} \quad \Leftrightarrow \quad V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{J_{SC}}{J_0} \right]$$

$$\text{bzw. } V_{OC} = m \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{J_{SC}}{J_0} \right]$$

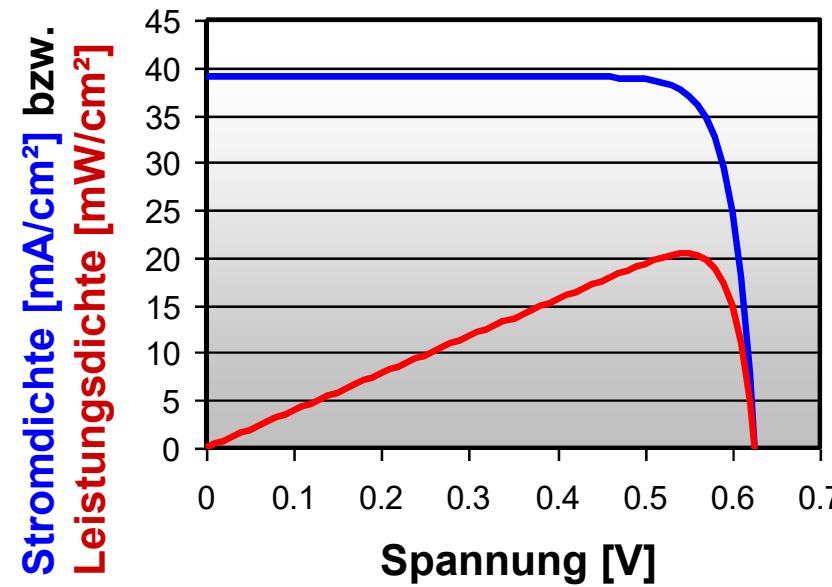
- V_{OC} wird als **Klemmspannung** bezeichnet

Elektrische Leistungsabgabe einer Solarzelle

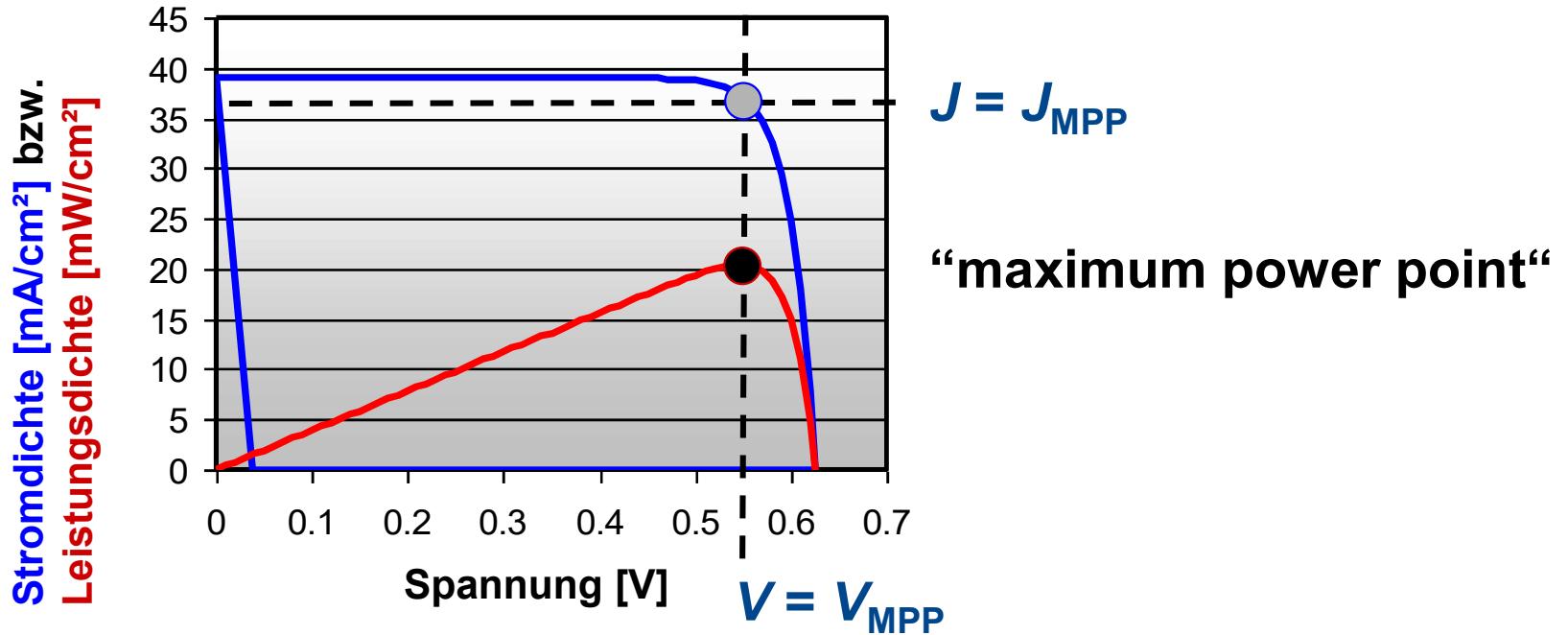
- **Leistungsdichte P = Stromdichte J x Spannung V :**

$$P(V) = J(V) \cdot V = \left(J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \right) \cdot V$$

- **Stromdichte-Spannungs-Kurve und Leistungsdichte-Spannungskurve:**



Elektrische Leistungsabgabe einer Solarzelle



Definition des „Füll-Faktors“ FF :

$$FF = P_{max} / (J_{sc} V_{oc})$$

$$= J_{MPP} V_{MPP} / (J_{sc} V_{oc})$$

Elektrische Leistungsabgabe einer Solarzelle

Maximale Leistung:

$$P_{max} = P(V_{MPP}) \Rightarrow 0 = \frac{\partial}{\partial V} \left(J_{SC} - J_0 \left(e^{\frac{qV}{m kT}} - 1 \right) \right) \cdot V$$

$$\Rightarrow \frac{J_{SC}}{J_0} = \left(e^{\frac{qV}{m kT}} \left(\frac{qV}{m kT} + 1 \right) - 1 \right) \approx \frac{qV}{m kT} e^{\frac{qV}{m kT}}$$

...wenn V hinreichend viel größer ist als $m kT/q$

$$\Rightarrow V_{MPP} \approx \frac{mkT}{q} W\left(\frac{J_{SC}}{J_0}\right)$$

$W(x) = \text{Lambertfunktion}$

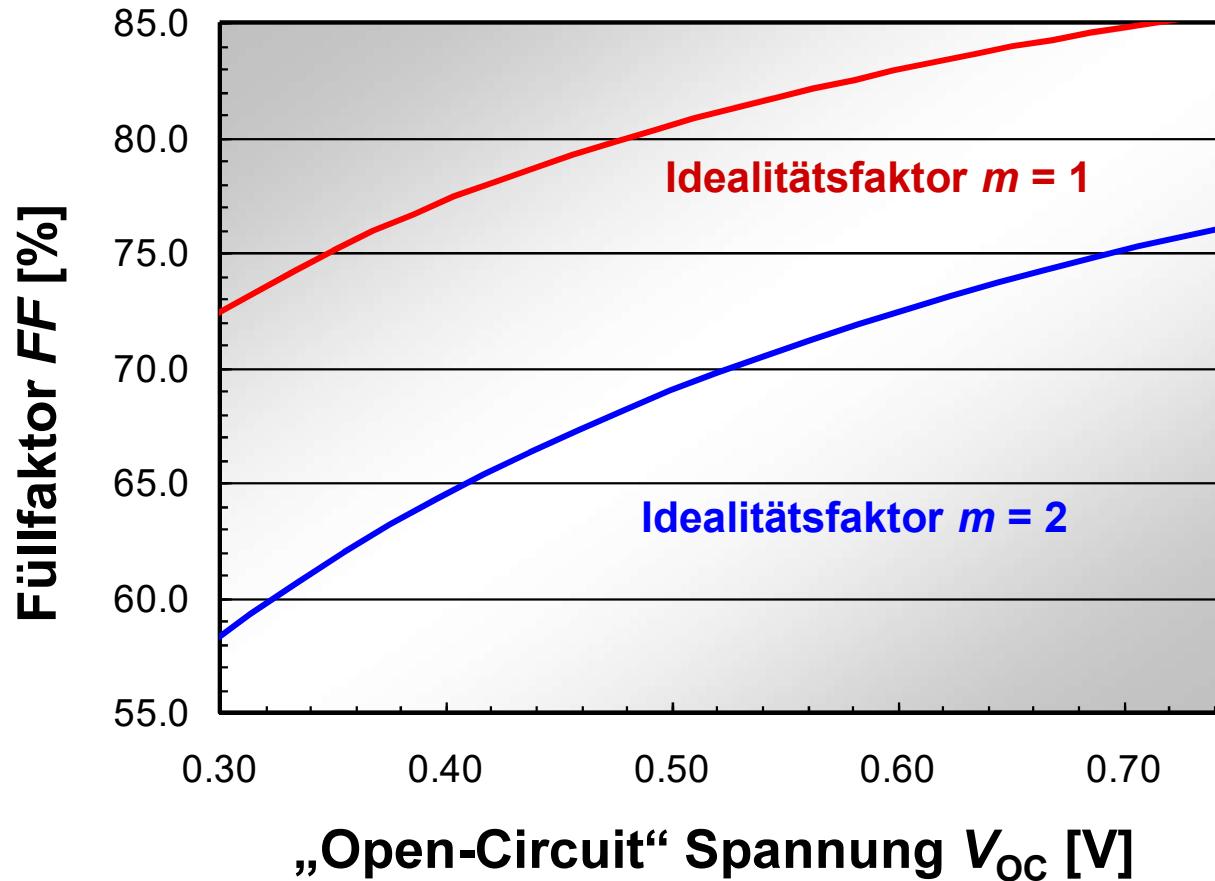
Maximum Power Point

- V_{MPP} ist im eine Funktion von J_{SC}/J_0
- Bei Variation der elektrischen Eigenschaften (Lebensdauer τ , Rekombinationsgeschwindigkeit) variiert J_0 viel stärker als J_{SC}
- V_{MPP} ist im Wesentlichen eine Funktion von J_0 , und damit von V_{OC}

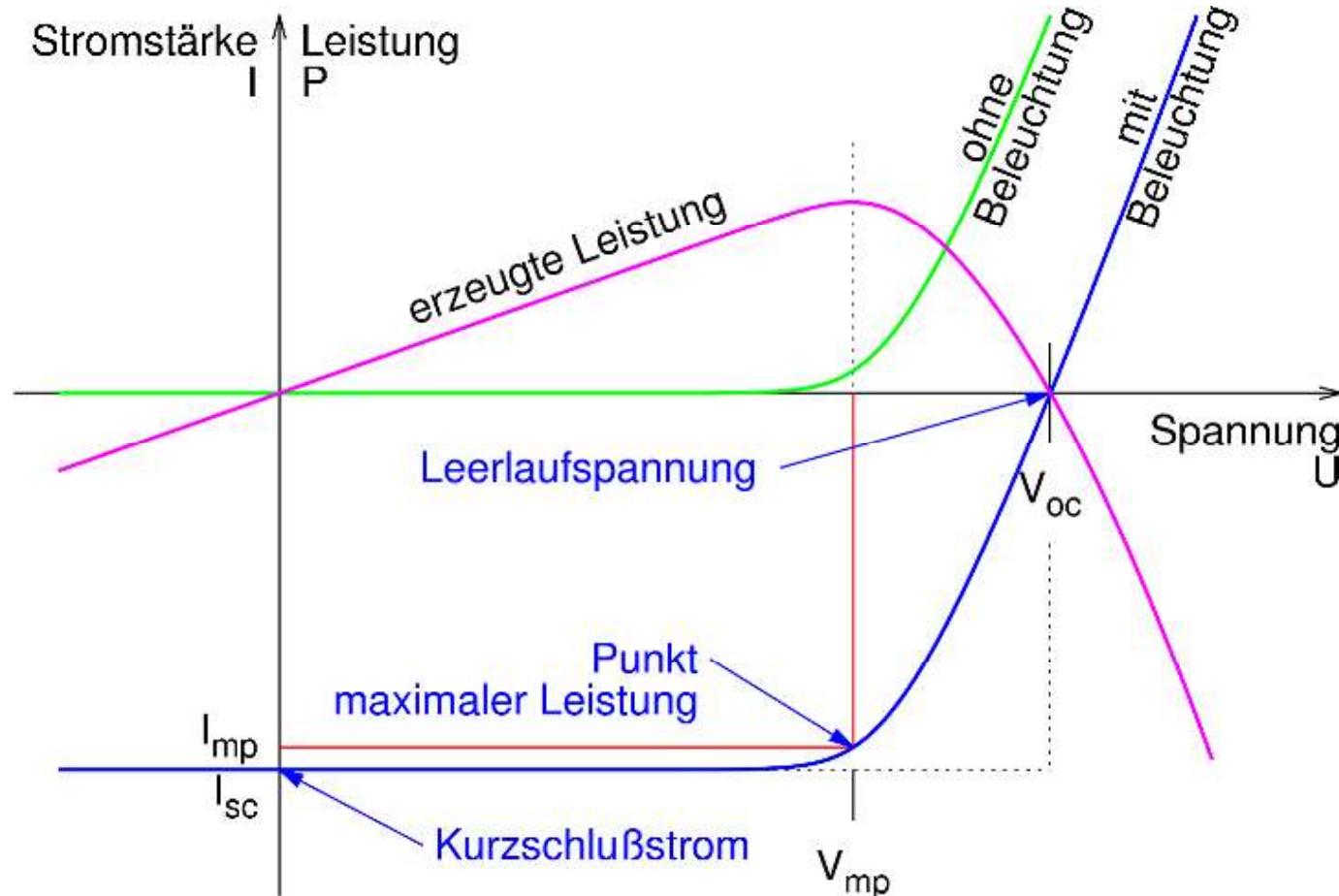
$$V_{OC} = m \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{J_{SC}}{J_0} \right]$$

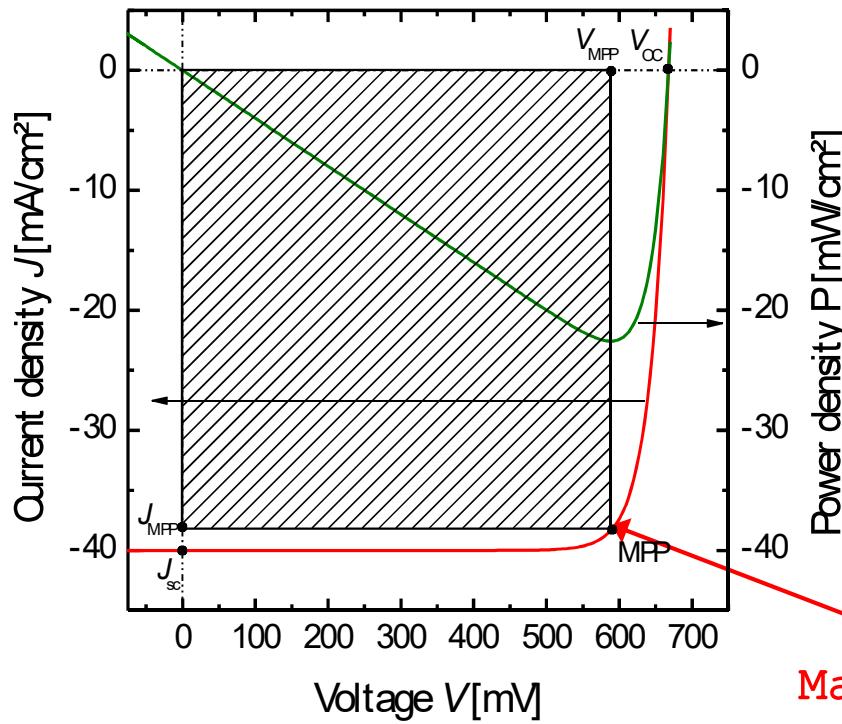
- J_{SC} -Variation bei Beibehaltung von J_{SC}/J_0 lässt V_{OC} unberührt (konstant)
- Auch der Füllfaktor bleibt unter J_{SC} -Variation konstant, wenn J_{SC}/J_0 festgehalten ist.

→ Der Füllfaktor ist eine Funktion von V_{OC} !



Kennlinien





$$\eta = \frac{\text{output power}}{\text{input (light) power}} [\%]$$

$$\eta = \frac{J_{mpp} \cdot V_{mpp}}{100 \text{ mW/cm}^2}$$

standard 1-sun

Maximum power point

Wirkungsgrad

- **Wirkungsgrad:** $\eta = P_{max} / \Phi$
 $P_{max} = FF J_{SC} V_{oc}$ Φ : Lichtintensität
- Erhöhung der Lichtintensität Φ erhöht proportional den Kurzschluss-Strom : $J_{SC} = K \Phi$
- Erhöhtes J_{SC} → erhöhte „open-circuit“-Spannung V_{oc}
- Erhöhtes V_{oc} → erhöhter Füllfaktor FF !
- Wirkungsgrad $\eta = P_{max} / \Phi = FF V_{oc} K \Phi / \Phi = FF V_{oc} K$
→ unabhängig von der Lichtintensität

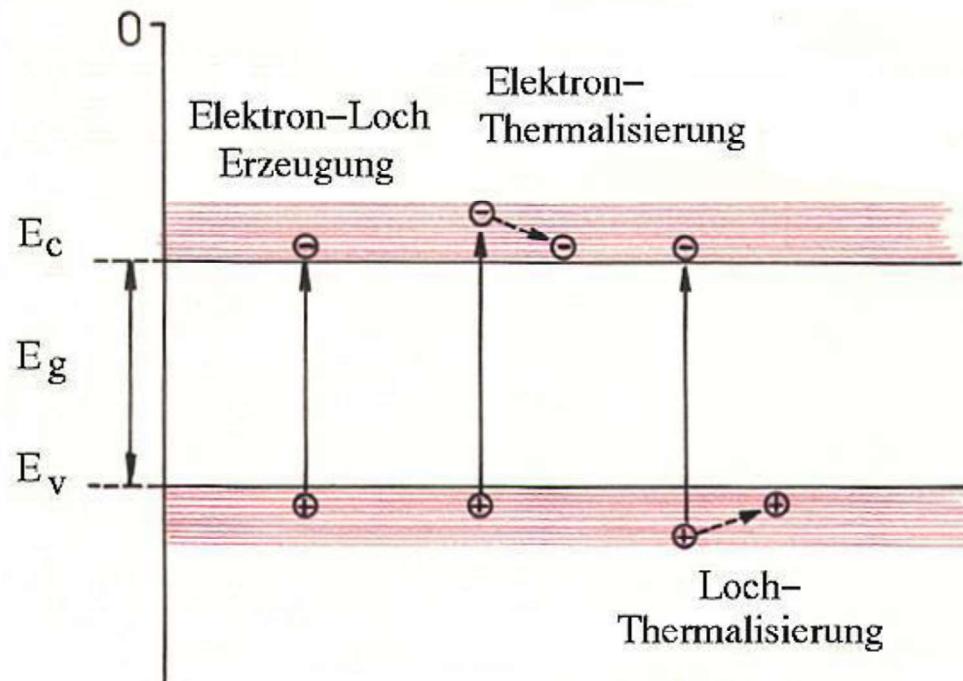
$$V_{oc} = m \frac{kT}{q} \ln \left[1 + \frac{J_{SC}}{J_0} \right]$$

→ Effizienzsteigerung durch Erhöhung von V_{oc} und FF !

Solarzellen: Grenzen beim Wirkungsgrad

- bestimmter Anteil der Strahlungsenergie kann nicht genutzt werden, da Photonen nicht energiereich genug sind ($h\nu < E_g$)
- Bei $h\nu > E_g$ wird die Photonenüberschussenergie in Wärme umgewandelt (Thermalisierung)

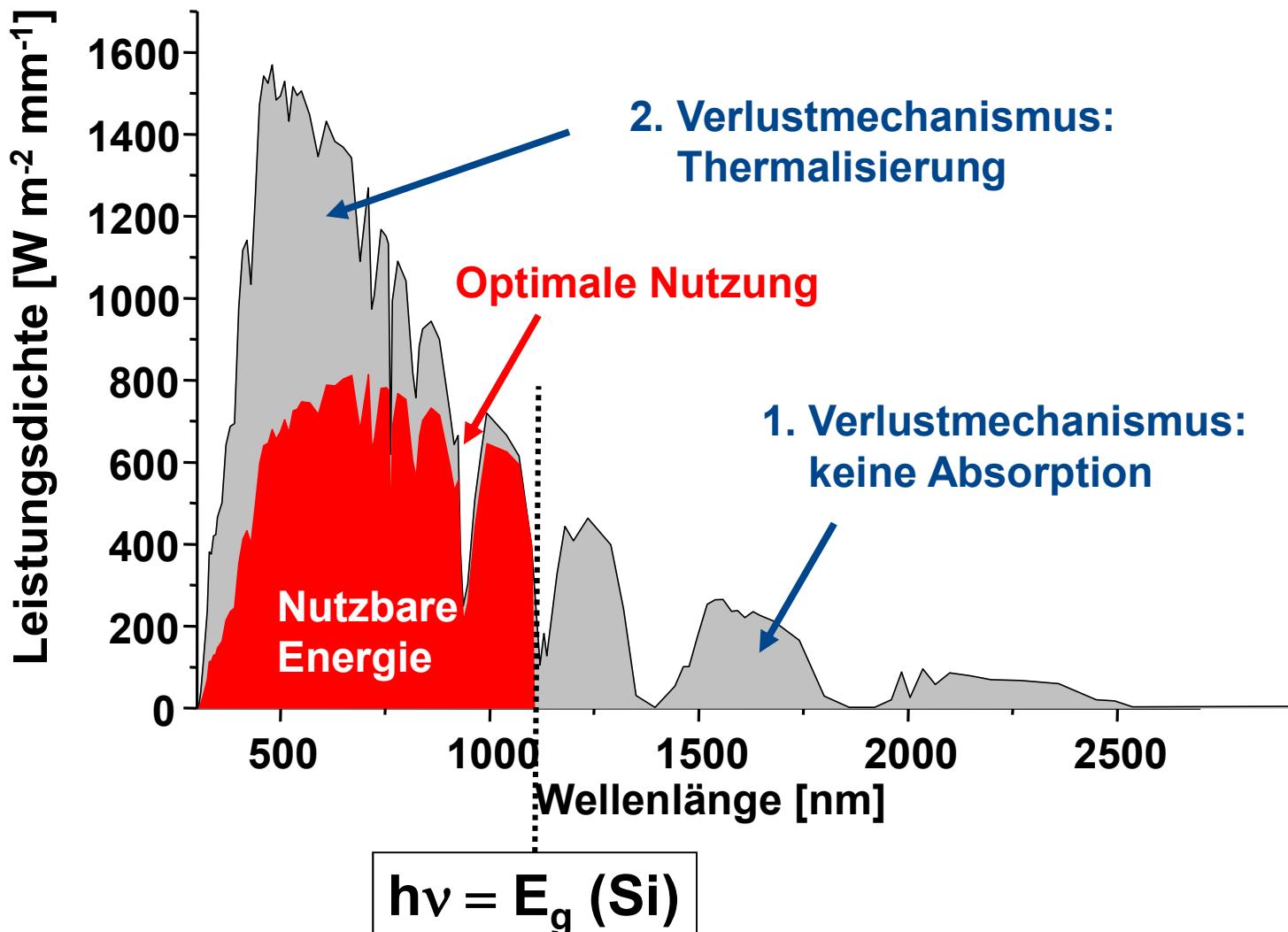
Photogeneration - Thermalisierung



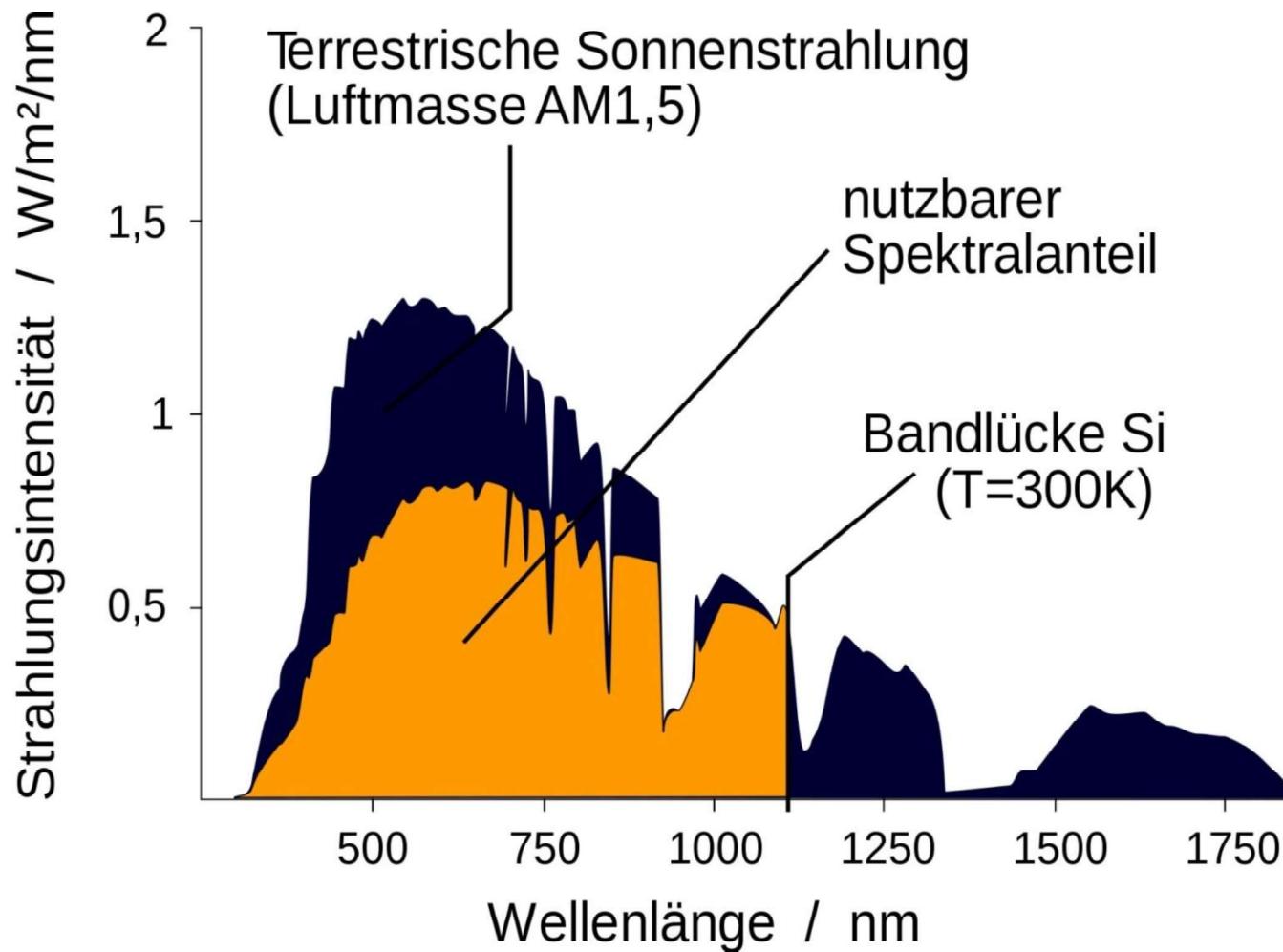
$$E = h\nu > E_g$$

→ bei höheren Photonenenergien als E_g wird der Energieüberschuss in Wärme umgewandelt (Thermalisierung)

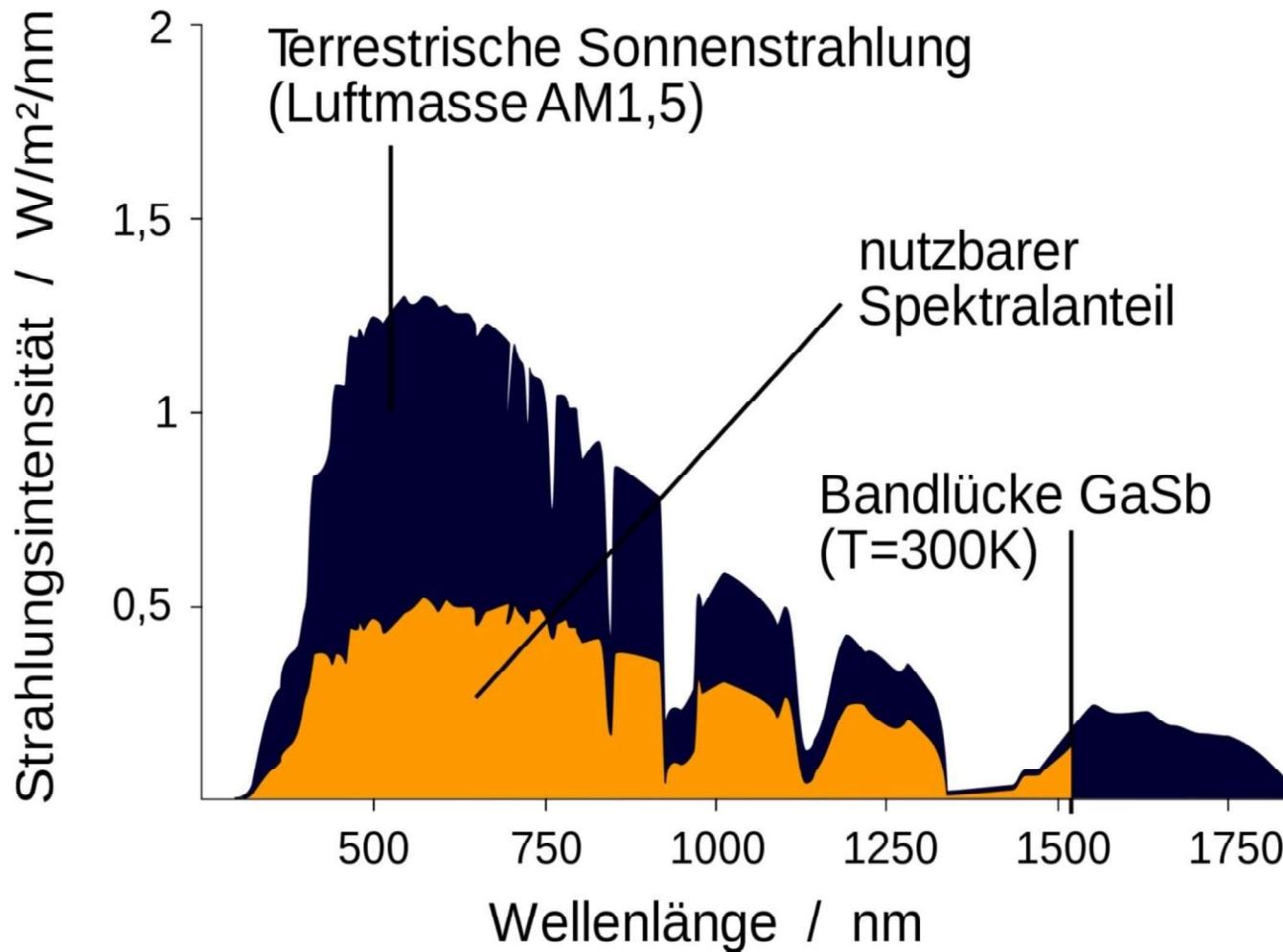
Nutzbares Sonnenspektrum



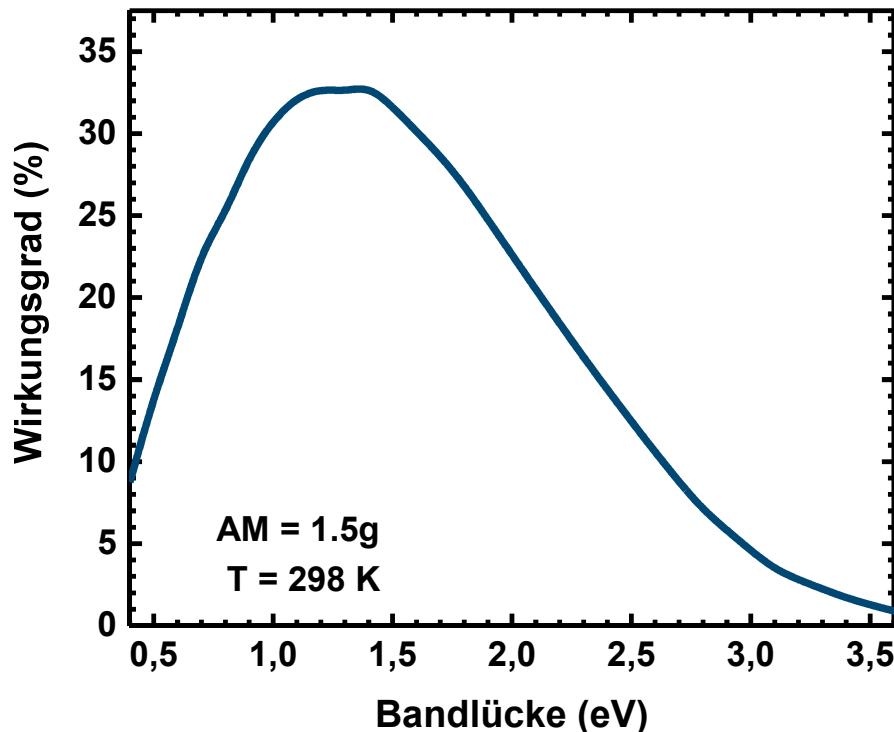
Ausnutzung der Sonnenstrahlung durch Silizium



Ausnutzung der Sonnenstrahlung durch GaSb



Maximal erreichbarer Wirkungsgrad



- Grenze des Wirkungsgrades für Solarzellen aus einem Halbleiter
- Annahme:
Alle Photonen mit $h\nu > E_g$ werden alle absorbiert
- Die genannten Verlustmechanismen begrenzen den Wirkungsgrad auf $\eta < 33\%$
→ „Shockley-Queisser-Limit“

William Shockley, Hans-Joachim Queisser: *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*, Journal of Applied Physics 32 (1961) 510–519

Sven Rühle: *Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells*, Solar Energy 130 (2016) 139-147.

Wirkungsgrad für Si-Zellen

- **Prinzipielle Verluste:**

Bandlücke: 1,12 eV (entspricht $\lambda = 1,1 \mu\text{m}$)

bestimmter Anteil der Strahlungsenergie kann nicht genutzt werden, da Photonen nicht energiereich genug sind

**Photonenüberschussenergie wird in Wärme umgewandelt
(Thermalisierung)**

→ Shockley-Queisser-Limit liefert für Si: $\eta = 32,2 \%$

- **Weitere prinzipielle nichtstrahlende Verluste:**

Auger-Rekombination

Bandgap Narrowing

Free carrier absorption (FCA)

**→ theoretisch höchster Wirkungsgrad für kristalline
Si-Zellen bei etwa 29,4%**

Armin Richter, Martin Hermle, Stefan W. Glunz: *Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells*,
IEEE Journal of Photovoltaics 3 (2013) 1184-1191

Forscherteam entwickelt Solarzelle mit Rekordwirkungsgrad

Erfolgreiche Zusammenarbeit des ISFH und der Leibniz Universität Hannover

Rekord: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Instituts für Solarenergieforschung (ISFH) und des Instituts für Materialien und Bauelemente der Elektronik (MBE) der Leibniz Universität Hannover ist es gelungen, eine neuartige Solarzelle zu entwickeln, die mit einem Wirkungsgrad von **26,1** Prozent deutlich effizienter arbeitet als die bisherigen Solarzellen auf Basis des von in der Industrie üblicherweise verwendeten Bor-dotierten Siliziums. Die praktische Realisierung eines Wirkungsgrades von mehr als 26 Prozent mit Bor-dotiertem Silizium galt bislang nahezu unerreichbar.

Solarzellen: Grenzen beim Wirkungsgrad

- **Prinzipielle Verluste:**
bestimmter Anteil der Strahlungsenergie kann nicht genutzt werden, da Photonen nicht energiereich genug sind
Photonenüberschussenergie wird in Wärme umgewandelt (Thermalisierung)
- **Weitere (optimierbare) Verluste:**
optische Verluste: Abschattung durch Kontakte, Reflexion einfallender Strahlung an Zelloberfläche
elektrische Widerstandsverluste im Halbleiter und den Anschlussleitungen

→theoretisch höchster Wirkungsgrad für kristalline Si-Zellen bei etwa 29,4%

Armin Richter, Martin Hermle, Stefan W. Glunz: *Reassessment of the Limiting Efficiency for Crystalline Silicon Solar Cells*,
IEEE Journal of Photovoltaics 3 (2013) 1184-1191

Verschiedene Zellen

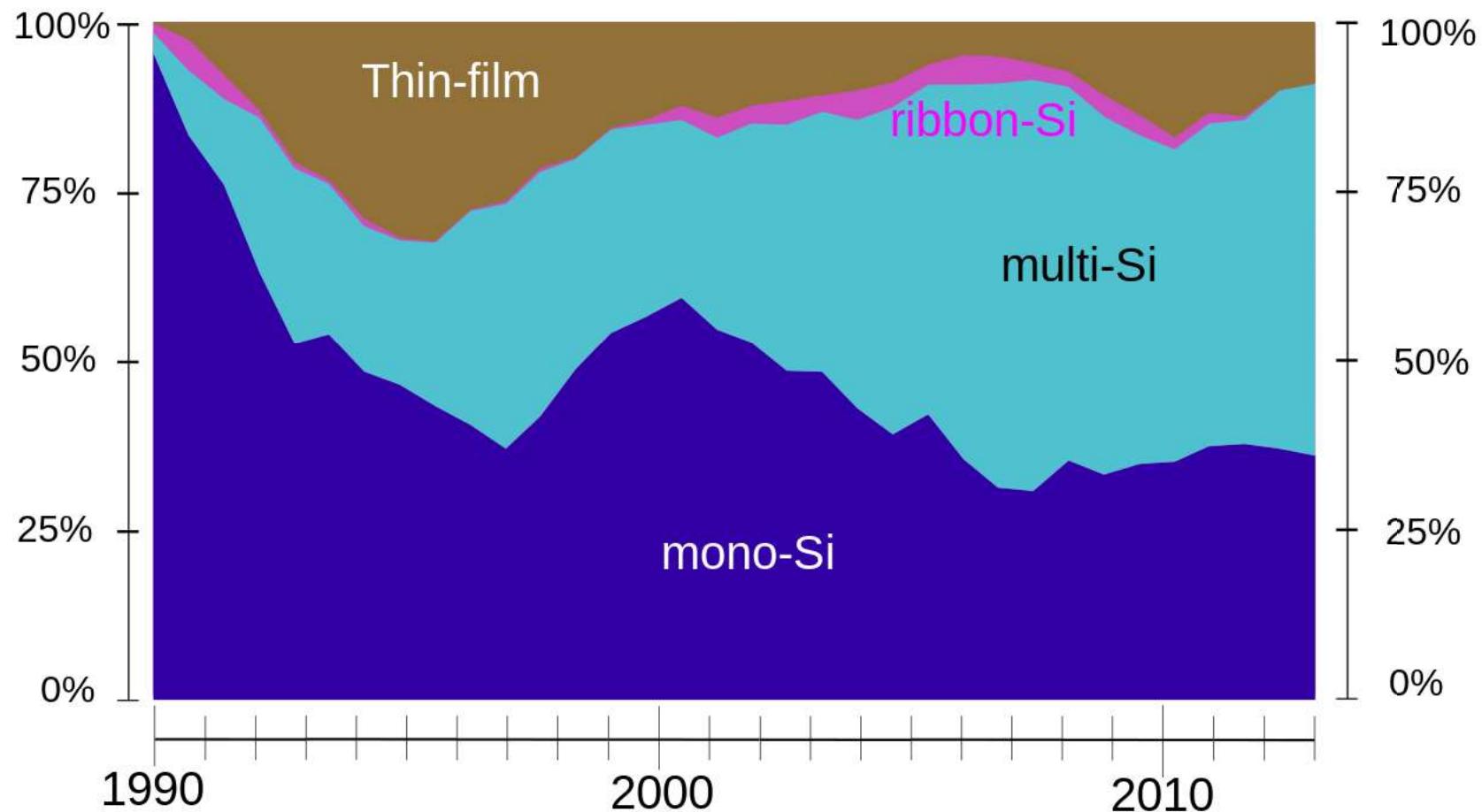
Silizium-Solarzelle: verschiedene Zelltypen

- Unterscheidung: monokristallines, polykristallines und amorphes Silizium
- monokristallines Silizium – hochreiner Einkristall in Scheiben geschnitten → hoher Wirkungsgrad, teuer!
- kostengünstiger polykristalline Zellen
flüssiges Silizium in Blöcke gegossen und anschließend in Scheiben geschnitten
 - Korngrenzen, Randdefekte → geringer Wirkungsgrad
- auf Glas oder anderes Substratmaterial aufgedampfte Schicht erzeugt Dünnschichtzellen oder amorphe Zellen
- Schichtdicken weniger als 1 µm
 - geringere Produktionskosten
 - aber: sehr geringe Wirkungsgrade, Anwendung im Kleinleistungsbereich (Uhren, Taschenrechner)

Wirkungsgrade heutiger *kommerzieller* Solarzellen

Solarzellentyp	Kristallin/Dünnschicht	Typischer Wirkungsgrad
Monokristallines Silizium	Kristallin	16 - 22%
Polykristallines Silizium	Kristallin	15 - 16%
Amorphes Silizium	Dünnschicht	6 - 8%
Cadmium-Tellurid, CIS, Sonstige	Dünnschicht	6 - 12%

Globale PV-Marktanteile nach Materialien



Dickschichtzellen

- **Monokristalline Zellen (c-Si)**
großtechnisch Wirkungsgrad über 20 %
Experimentell bis zu 25 %
gut beherrschte Technik
allerdings erfordert die Herstellung einen sehr hohen Energieeinsatz, der sich negativ auf die Energierücklaufzeit auswirkt.
- **Multikristalline Zellen (mc-Si)**
großtechnisch Wirkungsgrade bis 16 % möglich
relativ kurze Energierücklaufzeiten
derzeit die Zelle mit dem günstigsten Preis-Leistungs-Verhältnis
Experimentelle Zellen erreichen bis zu 20 % Wirkungsgrad.

Dünnschichtzellen

- Amorphes Silizium (a-Si)
 - höchster Marktanteil bei den Dünnschichtzellen
 - Modulwirkungsgrade zwischen 6 und 8 %
 - keine Material-Engpässe bei Produktion
- Kristallines Silizium, z. B. mikrokristallines Silizium (μ c-Si) in Kombination mit amorphem Silizium
 - höhere Wirkungsgrade bis 10 %
 - Herstellung ähnlich zu amorphem Silizium
- Si Wire Array (Laborstadium)
 - Durch Bestücken einer Oberfläche mit dünnsten Drähten ist diese neue Solarzelle biegsam und benötigt nur 1 % der Siliziummenge verglichen mit herkömmlichen Solarzellen

III-V-Halbleiter-Solarzellen

- **GaAs-Zellen**
 - hohe Wirkungsgrade (im Labor bis zu 26 %)**
 - sehr temperaturbeständig**
 - geringerer Leistungsabfall bei Erwärmung als kristalline Siliziumzellen**
 - robust gegenüber UV-Strahlung**
 - sehr teuer in der Herstellung**
 - werden häufig in der Raumfahrt eingesetzt**

Materialien für Solarzellen: Verbindungs-HL

- II-VI-Halbleiter-Solarzellen
 - CdTe-Zellen
 - sind großtechnisch durch *Chemical Bath Deposition* oder *Chemische Gasphasenabscheidung* sehr günstig herstellbar
 - finden Verwendung in Dünnschichtsolarzellen
 - für eine Laborsolarzelle sind schon fast 19 % erreicht worden; Modul-Wirkungsgrade inzwischen bei 10 %
 - Langzeitverhalten noch nicht bekannt (Problem: Recycling)
- I-III-VI-Halbleiter-Solarzellen
 - CIS-, CIGS-Solarzellen (Chalkopyrite)
 - steht für Kupfer-Indium-Disulfid bzw. Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
 - Material findet Anwendung in Dünnschichtsolarzellen
 - CIGS ist das leistungsstärkste Material mit Laborwirkungsgraden von über 20 %
 - Modul-Wirkungsgrad beträgt 10–12 %.

Materialien für Solarzellen: andere

- Organische Solarzellen (OPV)
Die organische Chemie liefert Werkstoffe, die möglicherweise eine kostengünstige Fertigung von Solarzellen erlauben
Bisheriger Nachteil ist ihr deutlich schlechterer Wirkungsgrad von ca. 10% und die recht kurze Lebensdauer (max. 5000 h) der Zellen.
- Farbstoffzellen oder auch Grätzel-Zellen
nutzen organische Farbstoffe zur Umwandlung von Licht in elektrische Energie; ein Vorgang, der an die Photosynthese anlehnt.
Diese Zellen liefern den besten Wirkungsgrad aller organischen Solarzellen von über 14 %, haben jedoch aufgrund aggressiver Elektrolyte eine begrenzte Lebensdauer.
- Halbleiter-Elektrolytzellen, z. B. Kupferoxid/NaCl-Lösung.
Sehr einfach herstellbare Zelle, jedoch in Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit limitiert.

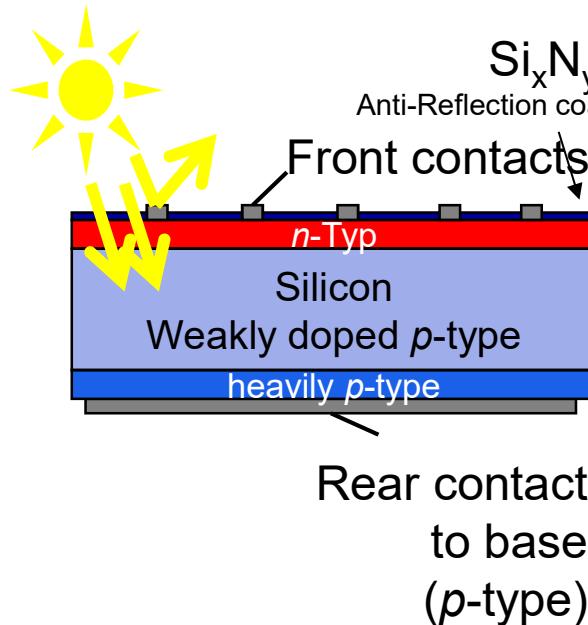
Neue Wege

Maximale Wirkungsgrade von Solarzellen

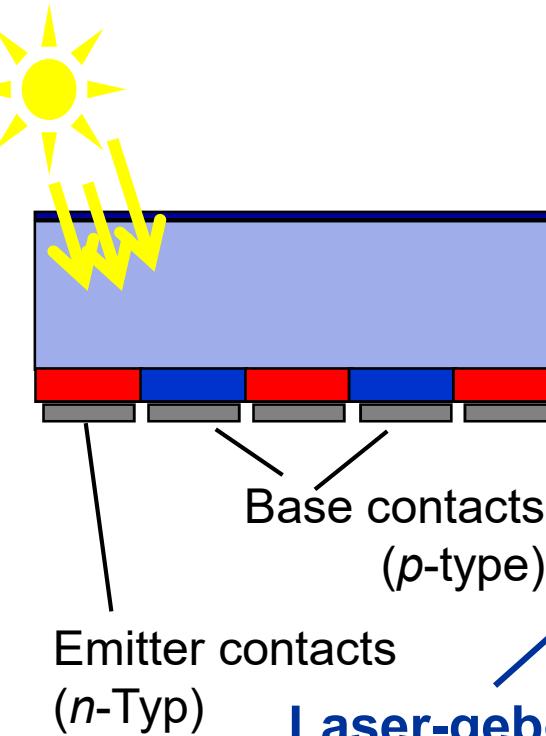
- ...steigerbar durch:
 - Zelldesign
 - Lichtausnutzung
 - Mehrfachzellen (Tandemzellen)
 - Spektren-Anpassung
(up-conversion, down-conversion)
 - Hot-Carrier Collection
 - Carrier-Multiplication (impact ionization)

...

Front-Junction

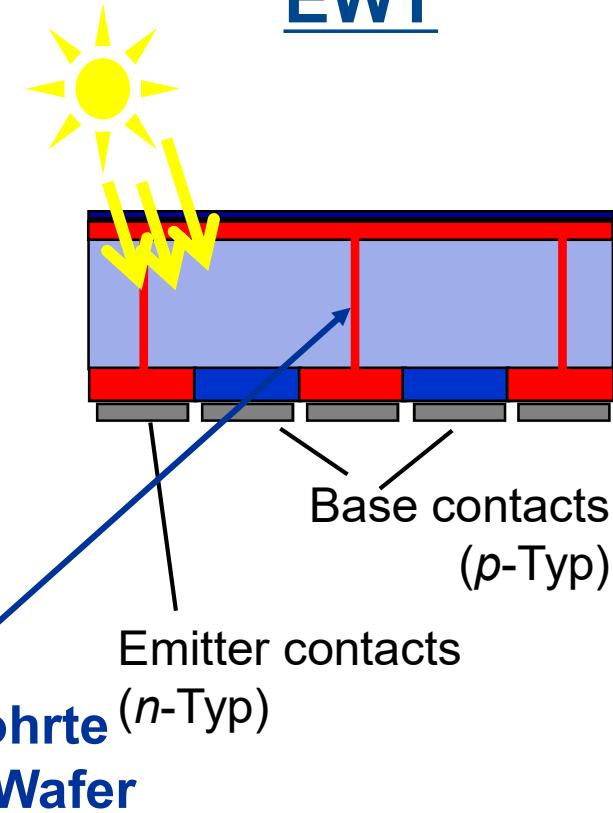


Rear-Junction

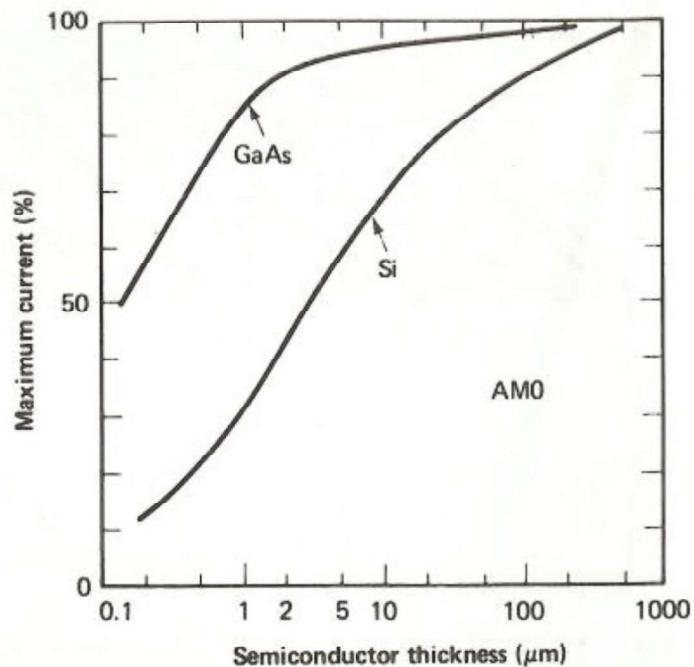


Front+Rear-Junction

Emitter-Wrap-Through EWT

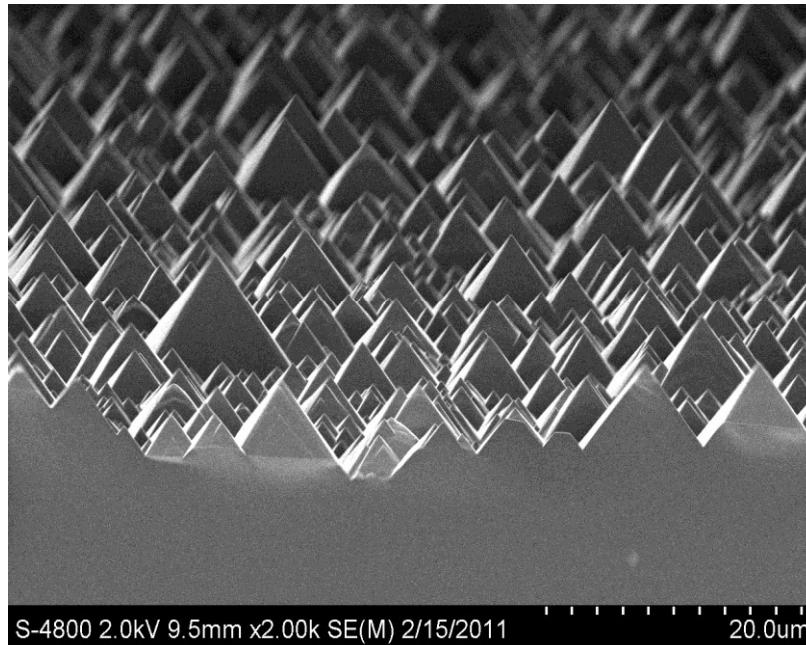


Absorptions-Eigenschaften



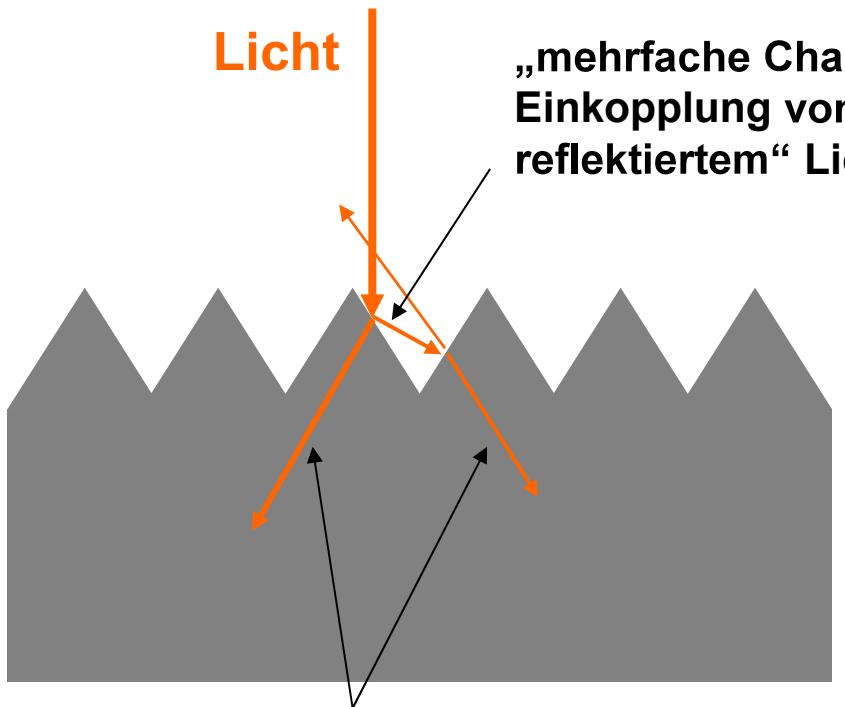
- **Direkte Halbleiter, wie GaAs, absorbieren Licht stärker als indirekte Halbleiter, wie Silizium.**
- **Solarzellen aus direkten Halbleitern können daher aus geringerer Dicke größere Ströme erzeugen.**
- **Für indirekte Halbleiter sind daher Lichtfallen-Effekte („Light-Trapping“) von besonderer Bedeutung.**

- Oberflächenstrukturierung (Texturierung) zur Verminderung von Reflexionsverlusten

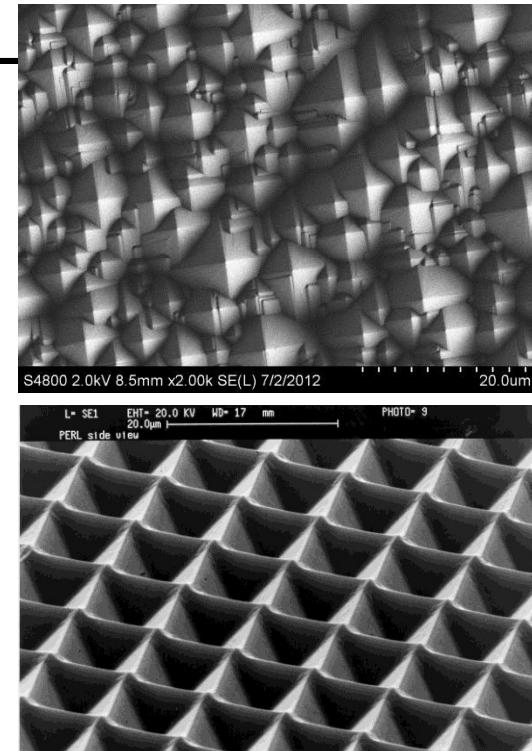


- n-Basismaterial
Längere Lebensdauern möglich

Nutzen der Textur



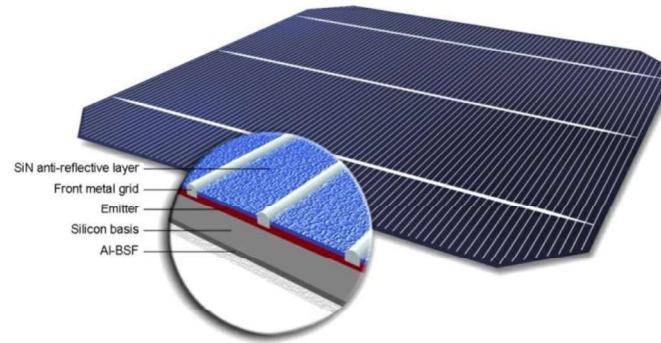
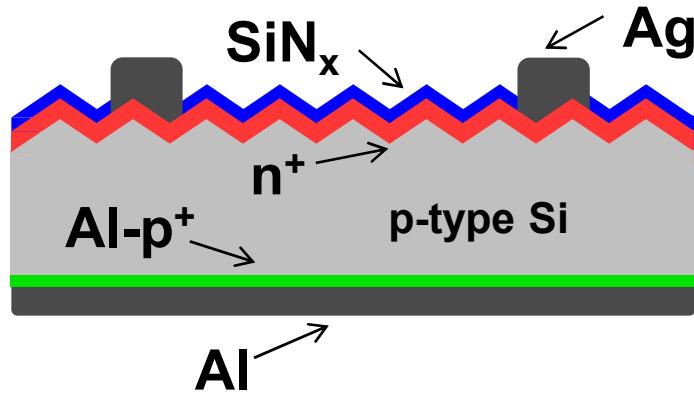
„mehrfache Chance“ der Einkopplung von „zunächst reflektiertem“ Licht.



„schräge“ (nicht-senkrechte) Einkopplung des einfallenden Lichtes:

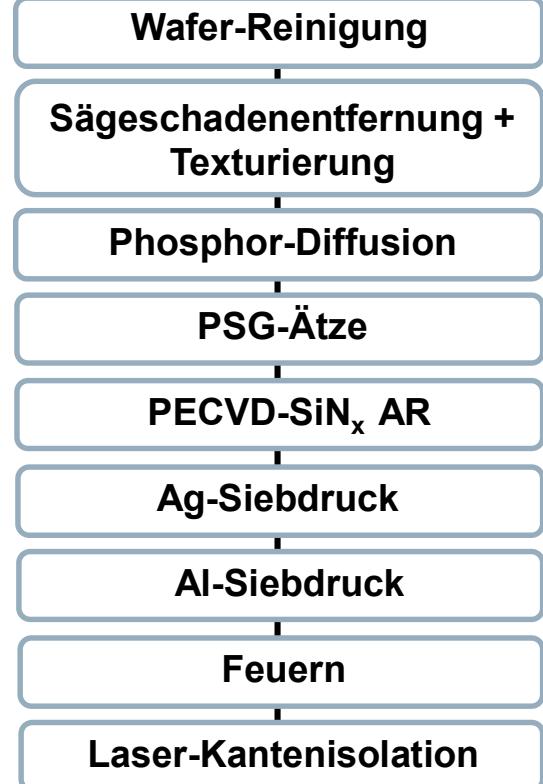
- Vergrößerte Weglänge bis zur Waferrückseite
- Vergrößerte Absorption für schwach absorbiertes langwelliges Licht

Eine aktuelle Standardzelle



V_{oc} (mV)	649
J_{sc} (mA/cm ²)	38.8
FF (%)	79.1
η (%)	19.9

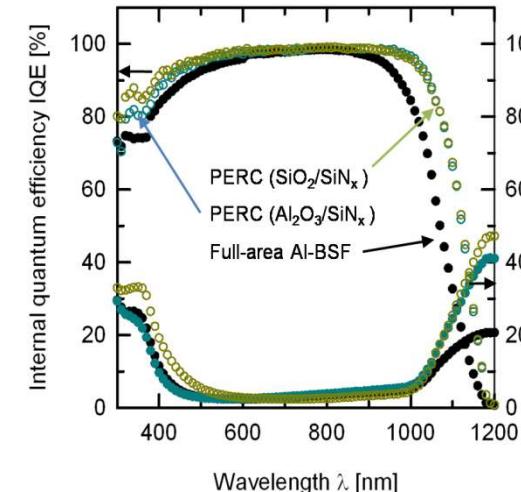
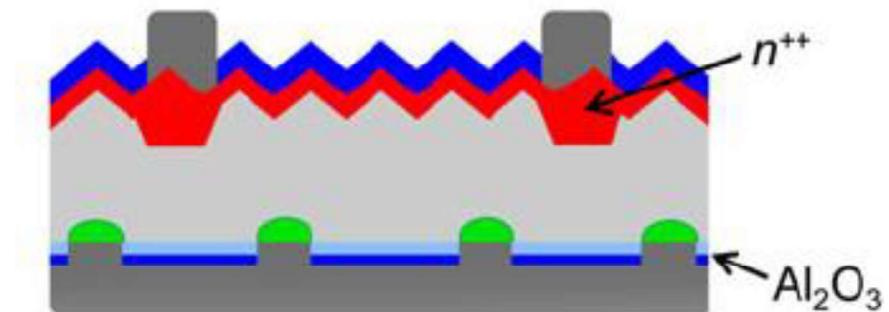
<http://www.centrotherm.de/uploads/pics/Standard.jpg>



Passivated Emitter and Rear Cell - PERC

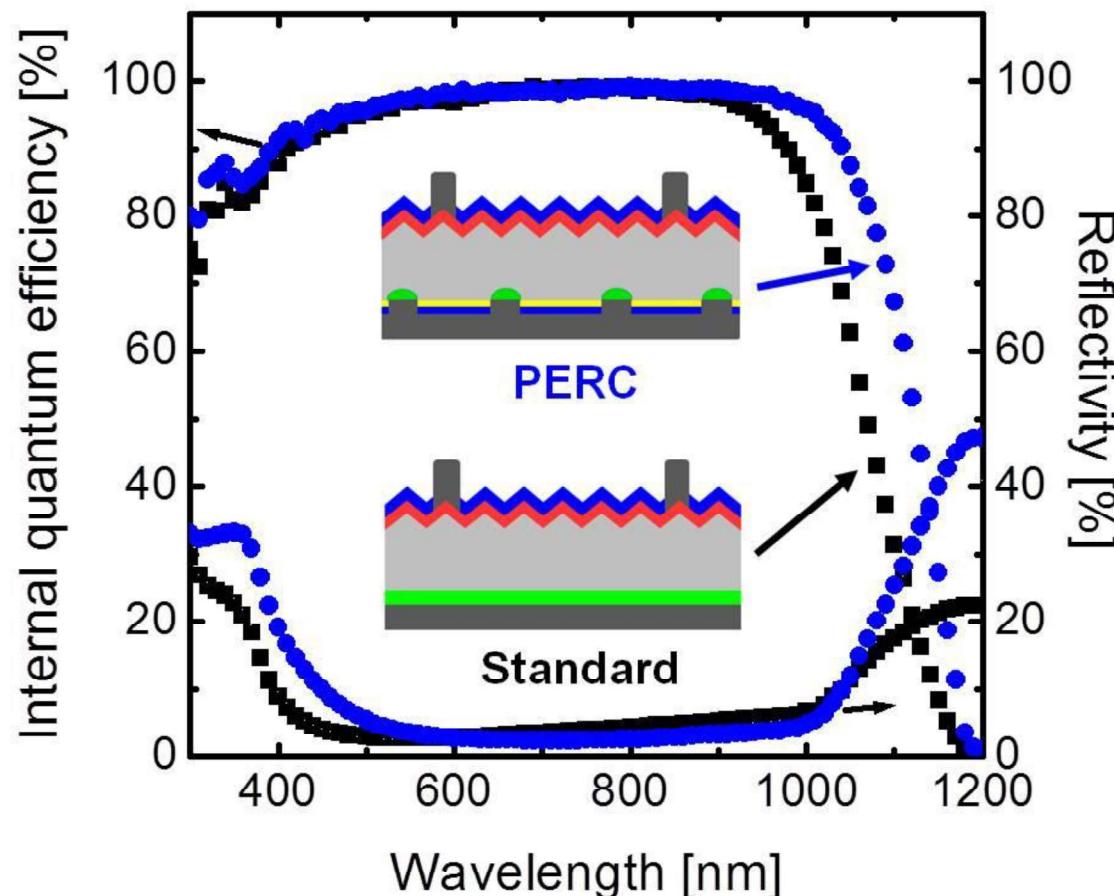
- Weiterentwicklung der “Standardzelle”
- Passivierte Rückseite
 - bessere Rückseitenreflexion
 - verringerte Rekombination
- Aber in der Regel höherer Serienwiderstand aufgrund des lateralen Stromtransportes!

V_{oc} (mV)	696
J_{sc} (mA/cm ²)	40.3
FF (%)	81.4
η (%)	22.8

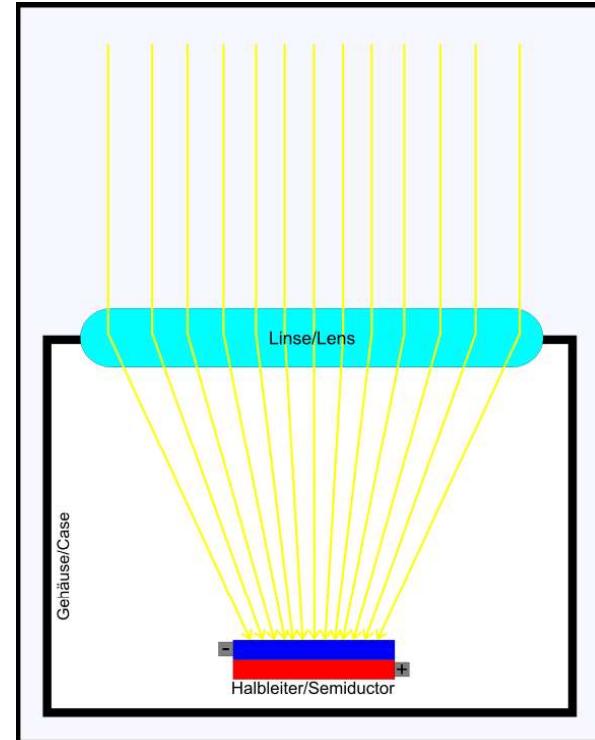


Blakers et al., Appl. Phys. Lett. 55, 1989

Vergleich: Standard - PERC



- Konzentratorzellen
Fangen mehr Licht ein
Konzentratoren:
wie z. B. Linsen, zumeist
Fresnel-Linsen, oder
auch Lichtleitkörper, die
die Totalreflexion nutzen.

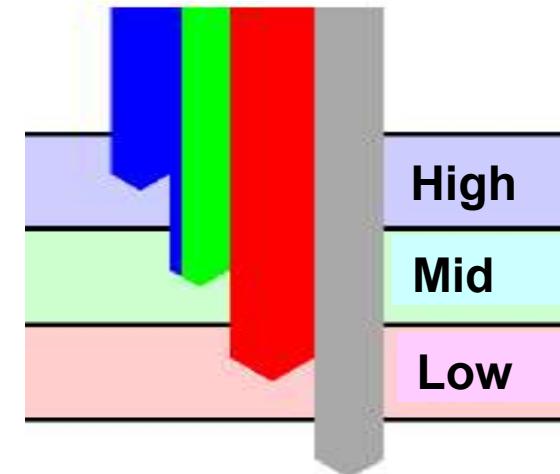
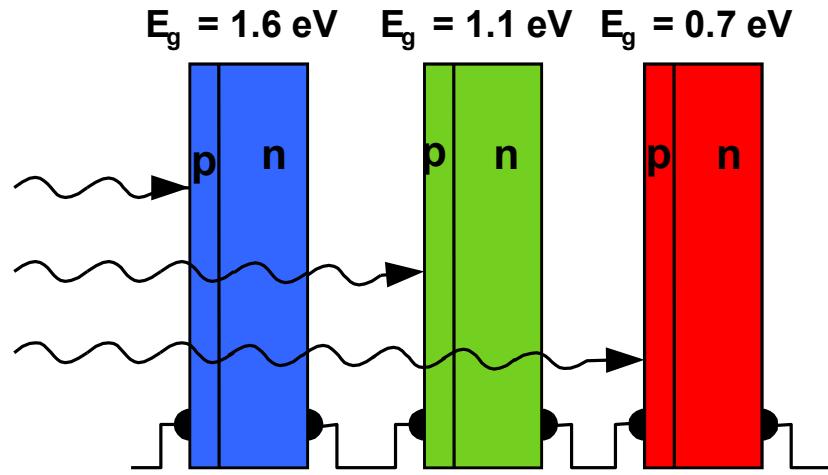


Vergleich zwischen DRAM und PV-Technologie

	DRAM	PV	DRAM / PV
Feature Size	65 nm	50 μm	$\sim 10^{-3}$
# Process steps	> 500	~ 10	50
Leakage Current	1 fA /Transistor	400 fA /cm²	$\sim 10^9$
Active Current	100 $\mu\text{A}/\text{Transistor}$	35 mA/cm²	$\sim 10^{11}$
Value / Silicon	$\sim 3 \text{ US\\$} / \text{Chip}$	$\sim 3 \text{ US\\$} / W_p$	~ 200
New Fab	3 Billion US\$	100 Million US\$	30

→ Beides Silizium-Halbleitertechnologien, aber um Größenordnungen verschieden!

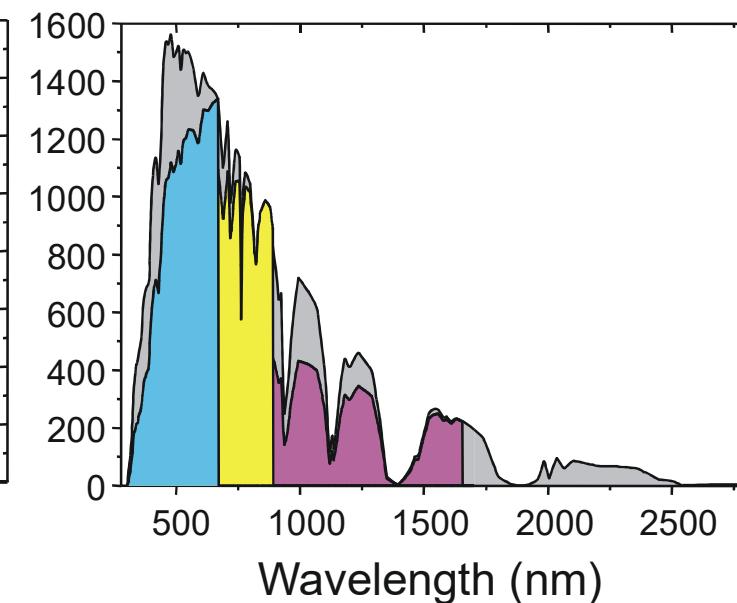
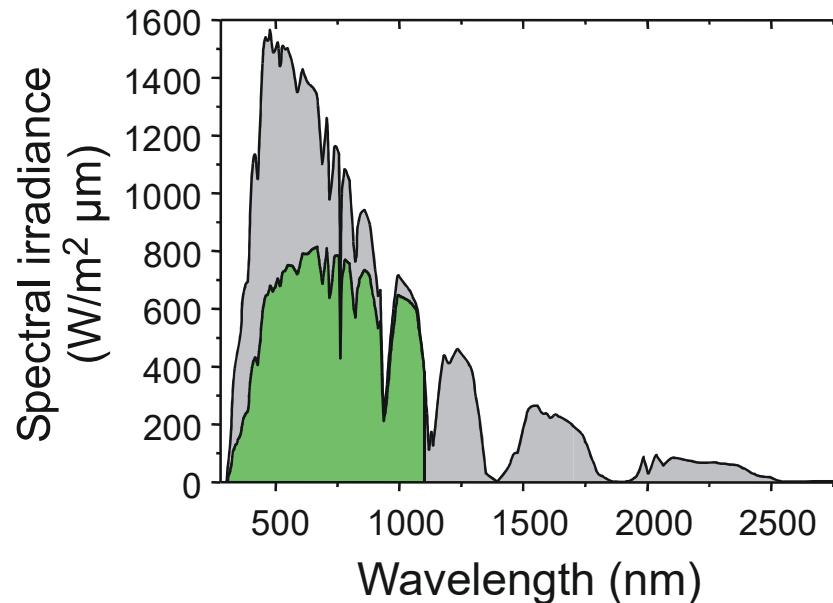
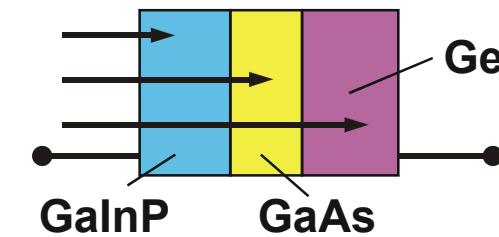
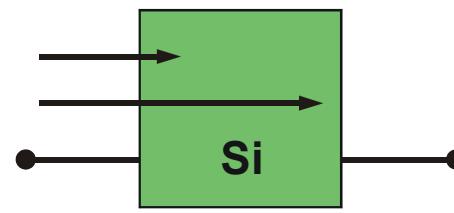
Multijunction-Solarzellen



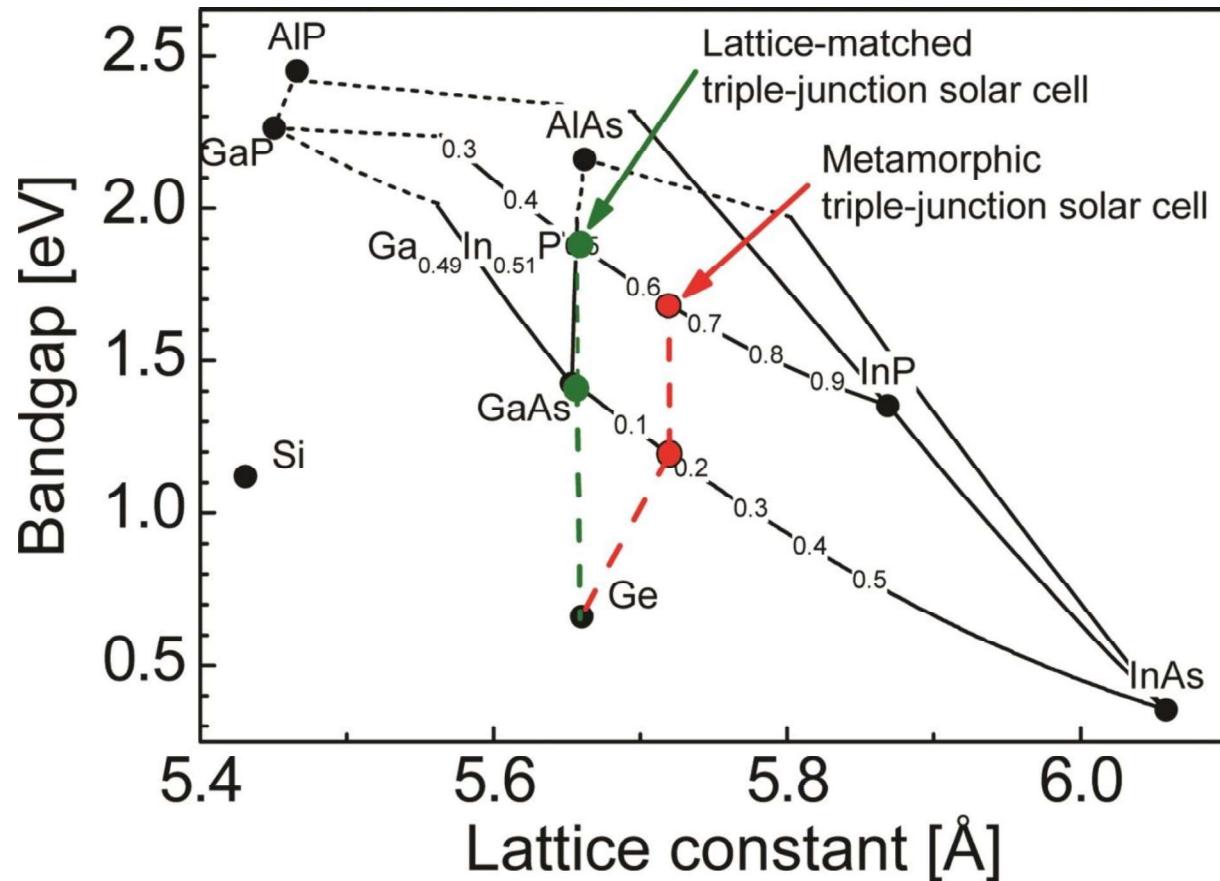
Vorteile:

- Bessere Ausnutzung des gesamten Lichtspektrums
- Reduzierung der thermischen Verluste

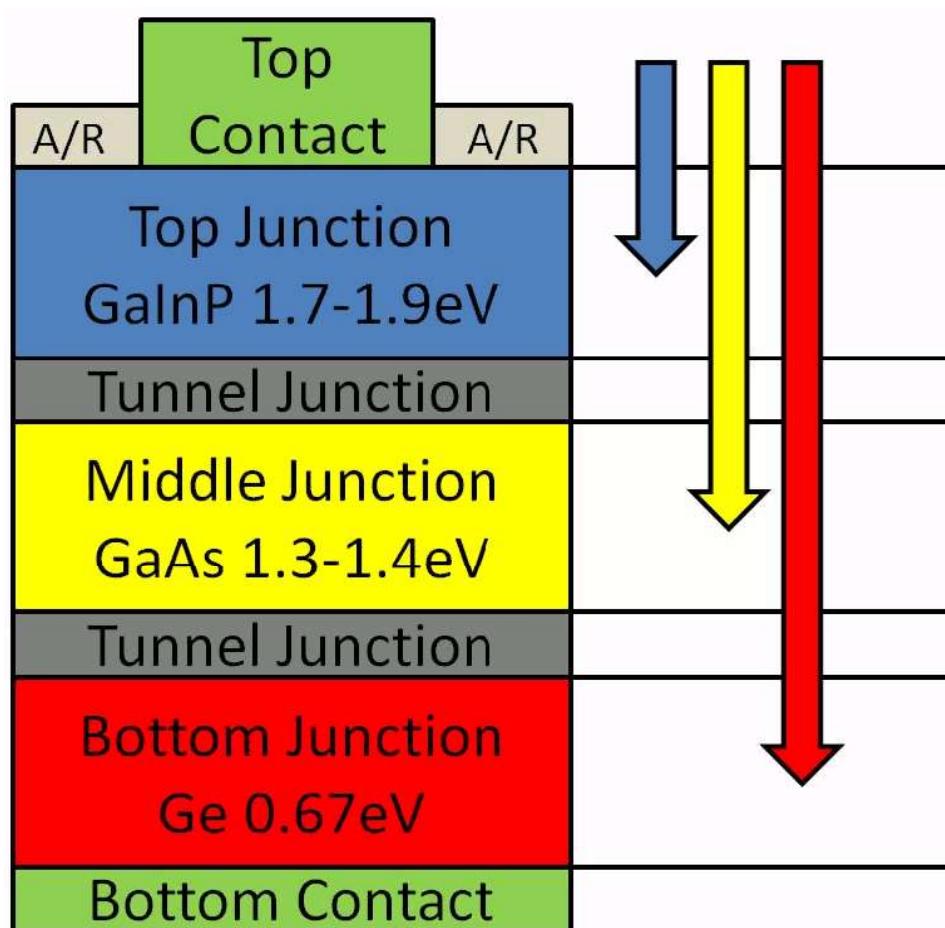
Multijunction-Solarzellen



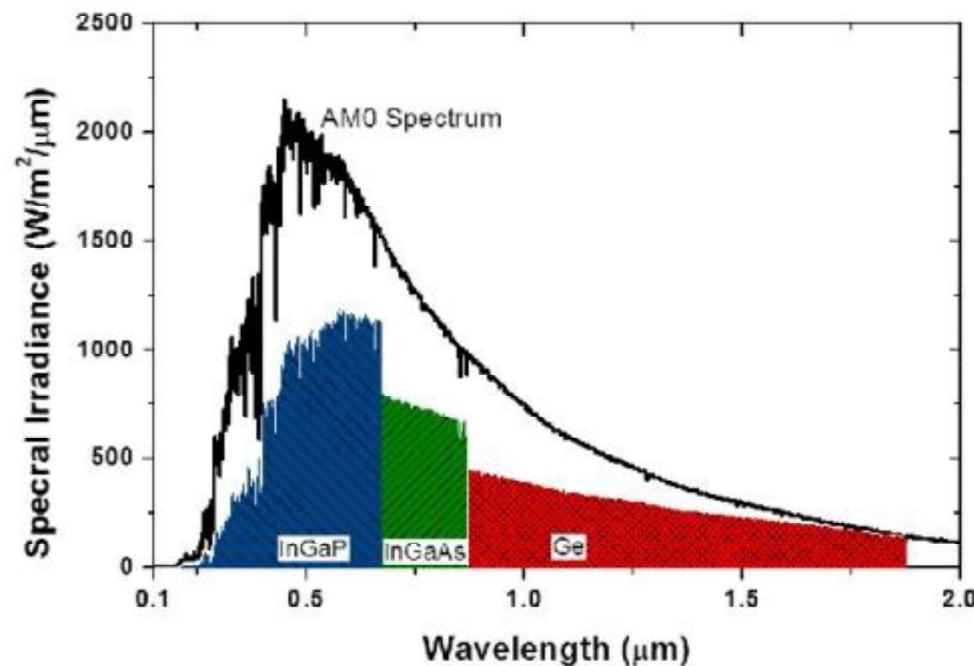
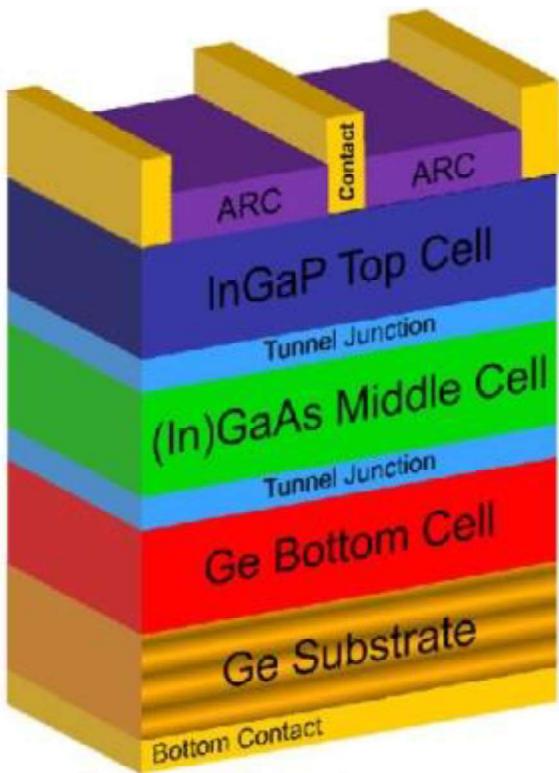
Multijunction-Zellen



Tandem- oder Multijunction Zellen



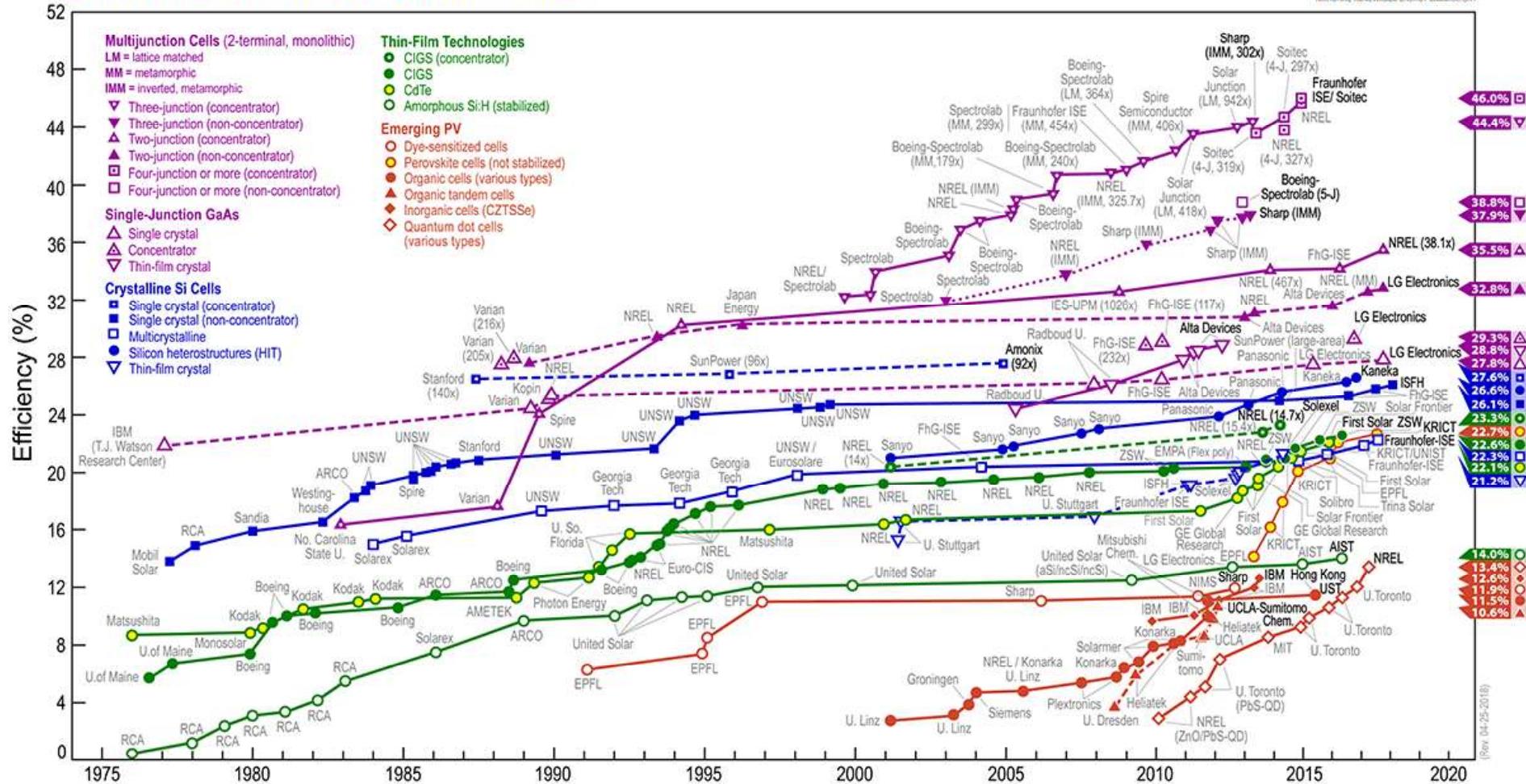
Multijunction-Solarzellen

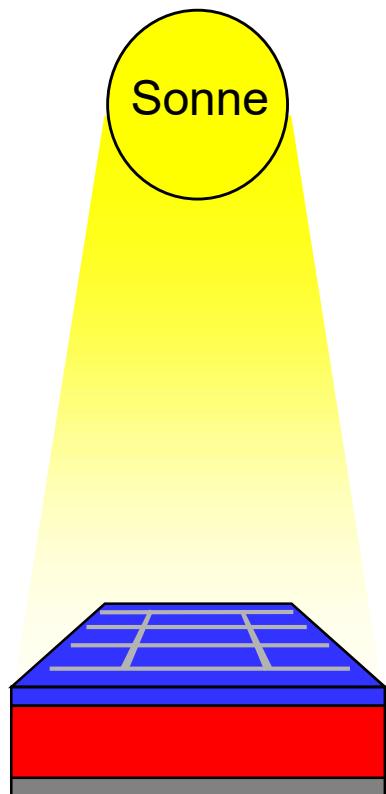


Tandem- oder Multijunction Zellen

- Galliumindiumphosphid, (Ga,In)P/Galliumarsenid, GaAs/Germanium
Tripelzellen (Mehrfachsolarzellen mit drei monolithisch gestapelten p-n-Übergängen) haben den höchsten kommerziell lieferbaren Wirkungsgrad von fast 30 % mit einer Leistungsdichte von 50 W/kg
- Triplejunction Zellen kombiniert mit dem Konzentratorkonzept erreichten im Labor bereits Wirkungsgrade von 44%

Best Research-Cell Efficiencies





- **Martin A. Green**
„Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications“
Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW, Sydney, Australia (1986)
- **Martin A. Green**
„Silicon Solar Cells: Advanced Principles and Practice“
Centre for Photovoltaic Engineering, UNSW, Sydney, Australia (1995)
- **Adolf Goetzberger und Volker Hoffmann**
„Photovoltaic Solar Energy Generation (Springer Series in Optical Sciences)“
Springer, Berlin, 2. Auflage (29. März 2005), ISBN-10: 3540236767
- **Rolf Brendel**
„Thin-Film Crystalline Silicon Solar Cells: Physics and Technology“
Wiley-VCH, 1. Auflage (Mai 2003), ISBN-10: 3527403760
- **Peter Würfel und Uli Würfel**
„Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advances Concepts“
Wiley-VCH, 2. aktualisierte Auflage (20. April 2008), ISBN-10: 3527408573
- **Alexis De Vos**
„Endoreversible Thermodynamics of Solar Energy Conversion“
Clarendon Press (Juli 1992), ISBN-10: 0198513925

Wichtige Begriffe

- Nutzung von Sonnenenergie
 - Gegenwärtige Energiequellen
 - Mögliche Entwicklungen
- Funktionsweise einer Solarzelle
 - Grundprinzip
 - Warum braucht man eine pn-Struktur
 - Wirkungsgrade, Ursachen für Verluste
- Typen von Solarzellen
 - Verschiedene Materialien
 - Verschiedene Konstruktionen