

Einführung in die regenerativen Energien (EE) – WS22

Vorlesung 4: Photovoltaik - Solarzellen

Prof. Dr. Frerk Haase

Fakultät: Technik und Informatik

Email: frerk.haase@haw-hamburg.de

Büro: Berliner Tor - Raum 03.85)

Wirtschaftlichkeit und Ökologie

(Energiegestehungskosten, das EEG in Deutschland, ökologische Betrachtungen)

Photovoltaik

Solarzelle

Aufbau und Funktionsprinzip, Arten,
elektr. Beschreibung, PV-Module)

PV-Generatoren

(Aufbau, Belastung, Gleichstromsteller,
Wechselrichter/Netzeinspeisung, Anlagenkonzepte, -güte)

Grundlagen der Solarstrahlung

(Fusionsreaktor Sonne, Solarstrahlung auf der Erde(Neigung, Nachführung, Abschattung)

Bereitstellung elektrischer Energie

(Elektr. Energieversorgungssystem in Deutschland, Energiewandlung/Kraftwerke(konventionell, regenerativ))

Einführung

(Grundaufgaben, Begriffsbestimmungen, Energiebedarf und dessen Deckung, Energieträger und deren Bewertung)

4 Photovoltaik

4 Photovoltaik

4.1 Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

4.2 Arten von Solarzellen

4.3 Elektrische Beschreibung von Solarzellen

4.4 PV-Module

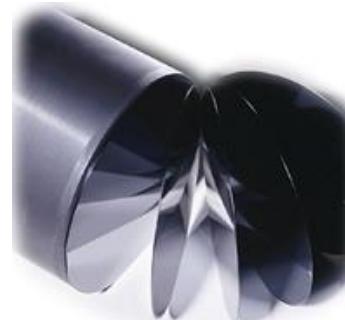
4.5 PV-Generatoren

4.6 Belastung von PV-Generatoren

4.7 PV-Anlagenkonzepte

■ Silizium

- Erdkruste besteht zu 25 Gewichtsprozent aus Si
- Ausgangsmaterial Sand, Quarz: Siliciumdioxid
- Zur Herstellung von Solarsilizium & Halbleitersilizium



■ Germanium

- durch Silizium verdrängt
- Anwendungen: HF-Technik und Detektoren

■ Gallium-Arsenid

- Verbindungshalbleiter, kein reines Element
- kurze Schaltzeiten; HF-Anwendungen, Leucht- und Laserdioden

■ Siliziumkarbid *Neue Halbleiterbauteile:*

- Chemische Verbindung aus Silizium und Kohlenstoff
- kurze Schaltzeiten; hohe Temperaturbeständigkeit
- Anwendung: schnelle Leistungshalbleiter

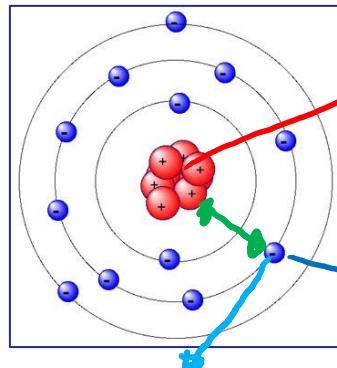
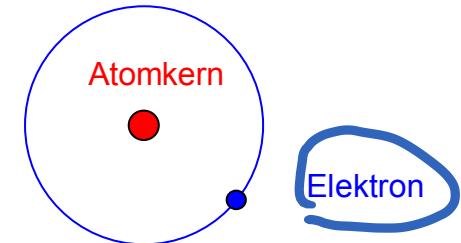
*- Dioden
- Transistoren
- MOSFETs
- IGBT*



Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Bohrsches Atommodell

- Niels Bohr in 1913
- Atomkern + Elektronenhülle
- Kern positiv, Elektron negativ geladen



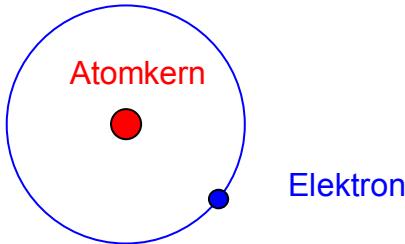
Protonen / Neutronen → Atomkern

Elektronen kreisen auf konzentrischen Bahnen
um den Atomkern

Coulombsche Kraft = Zentrifugal Kraft

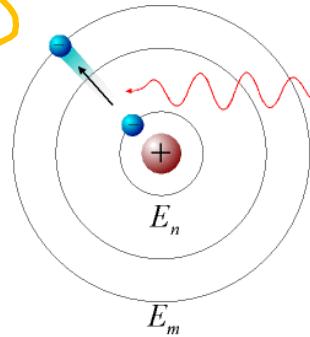
Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Bohrsches Atommodell

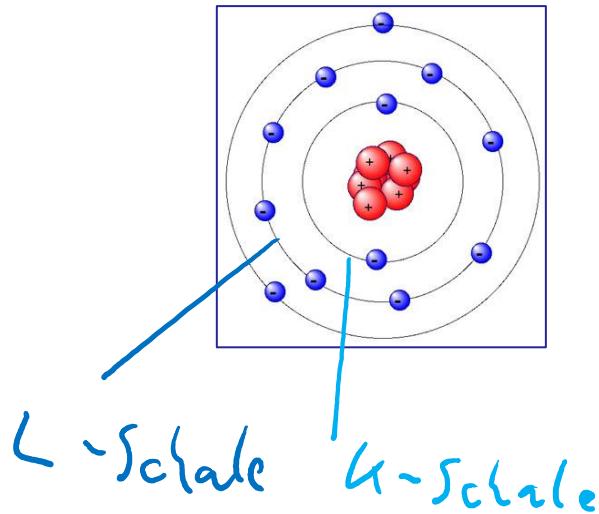


Absorption eines Photons:

Solarzelle

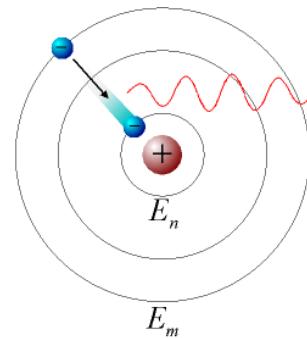


Globalstrahlung
Energie wird von außen zugegeben,



Emission eines Photons:

LED

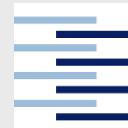


=> Energie wird abgegeben

"Strahlungsenergie"

z.B. LED

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle



Periodensystem

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
früher:	I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	I B	II B	III A	IV A	V A	VIA	VII A	VIII A	
Periode (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H														He			
2	Li	Be													F	Ne		
3	Na	Mg													S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

Ordnungszahl
Anzahl der
Kernladung (Proton)
Kernladungsgröße

9
Anzahl der Valenzelektronen

$$K \quad 2 \cdot n \Rightarrow 2$$

$$L \quad 2 \cdot 2^2 \Rightarrow 8$$

$$M \quad \Rightarrow 18$$

$$N \quad \Rightarrow 32$$

O

P

Q

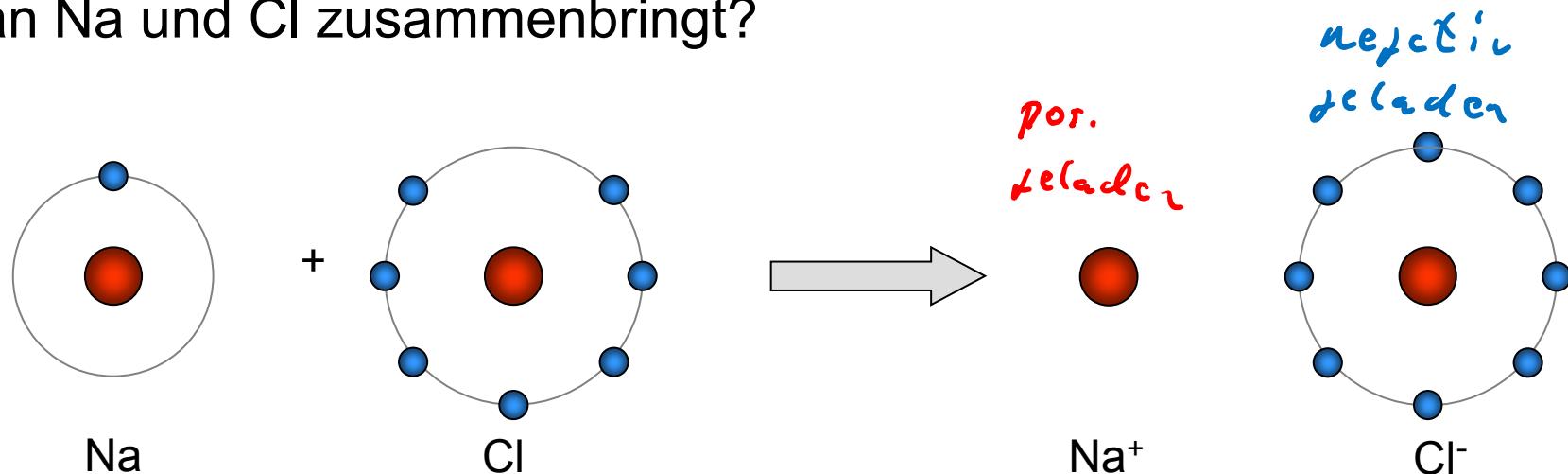
Alon ist nach außen elektrisch neutral

Elektronen auf der äußersten Schale heißen Valenzelektronen

Anzahl der Valenzelektronen bestimmt chemisches Verhalten → Gruppe

$$\oplus = \ominus$$

- Zahl der Valenzelektronen in äußerster Schale 1 bis 8
- Atome erreichen kleinste Gesamtenergie in Edelgaskonfiguration
- Beispiel:
 - Natrium (Na) *1 Valenzelektroⁿ (Elektronen auf der äußersten Schale)*
 - Chlor (Cl) *7 "*
- Was passiert, wenn man Na und Cl zusammenbringt?

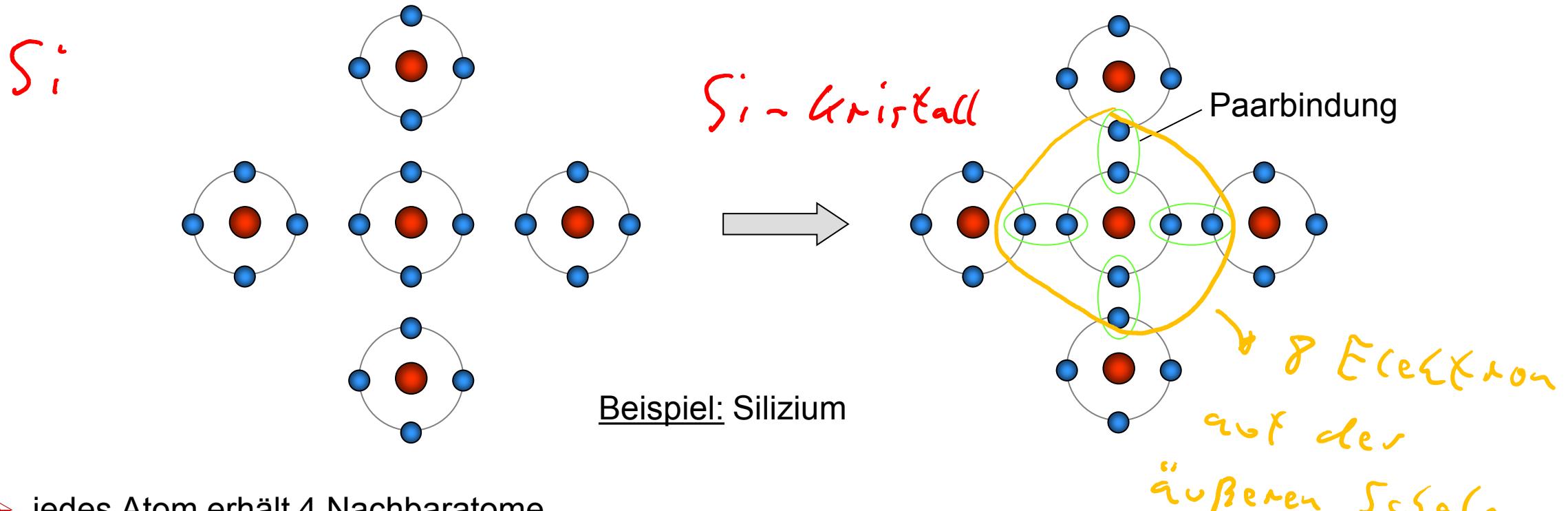


- Ergebnis:
 - Gesamtenergie Na^+Cl^- ist geringer als die der Einzelatome

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Kovalente Bindung/Elektronenpaarbindung

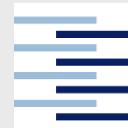
- Bei Atomen mit **gleicher Anzahl** an Valenzelektronen findet kein Elektronenaustausch statt
- Jedes Valenzelektron wird an 2 Atome gebunden



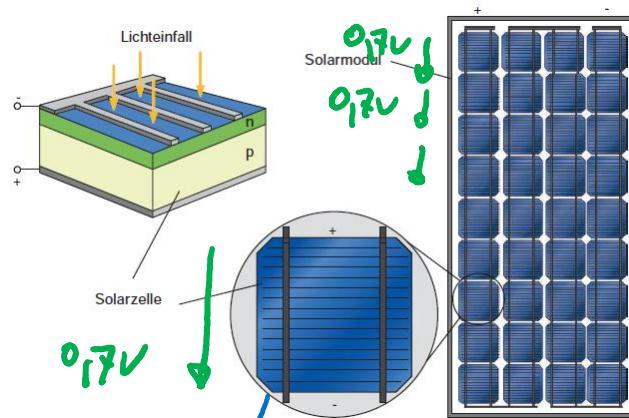
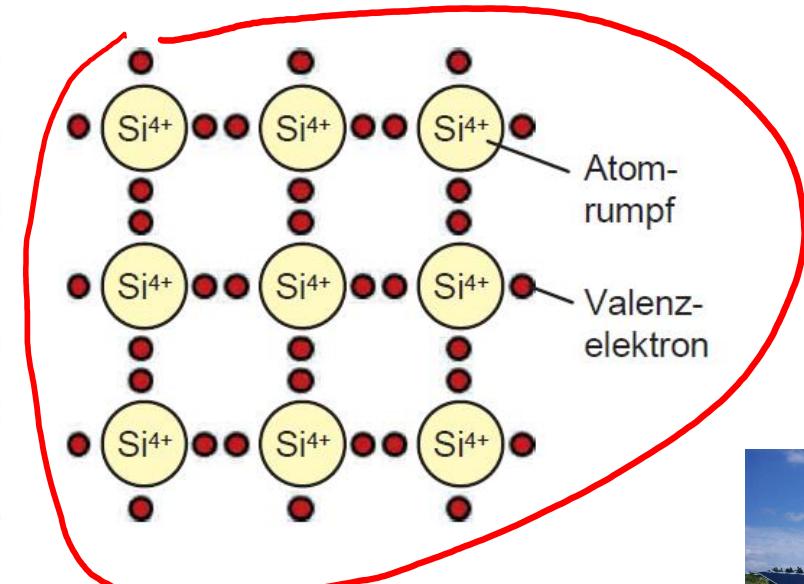
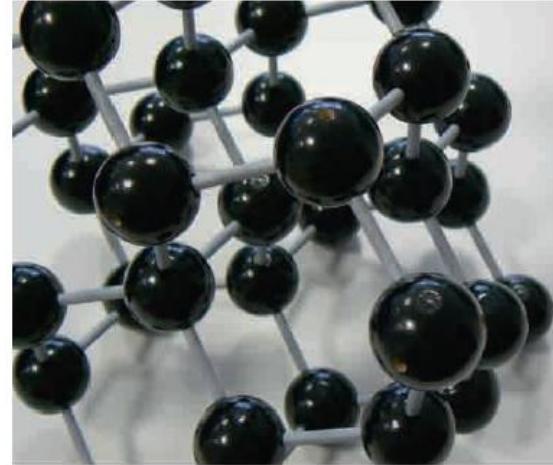
- jedes Atom erhält 4 Nachbaratome
- kristallisiert im Diamantgitter, sehr feste Bindungen
- keine beweglichen Elektronen bei $T = 0 \text{ K}$ \Rightarrow keine elektrische Leitfähigkeit bei $T = 0 \text{ K}$

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Kristallgitter von Silizium



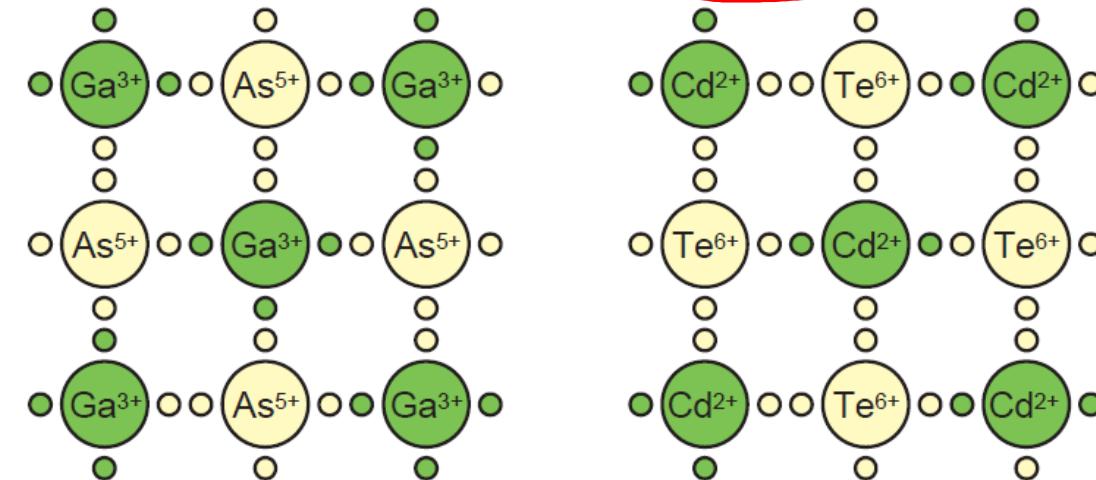
Si-Halogenide



Solarzelle |
Solarzelle Solarmodul

Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Prof. Dr. Frerk Haase

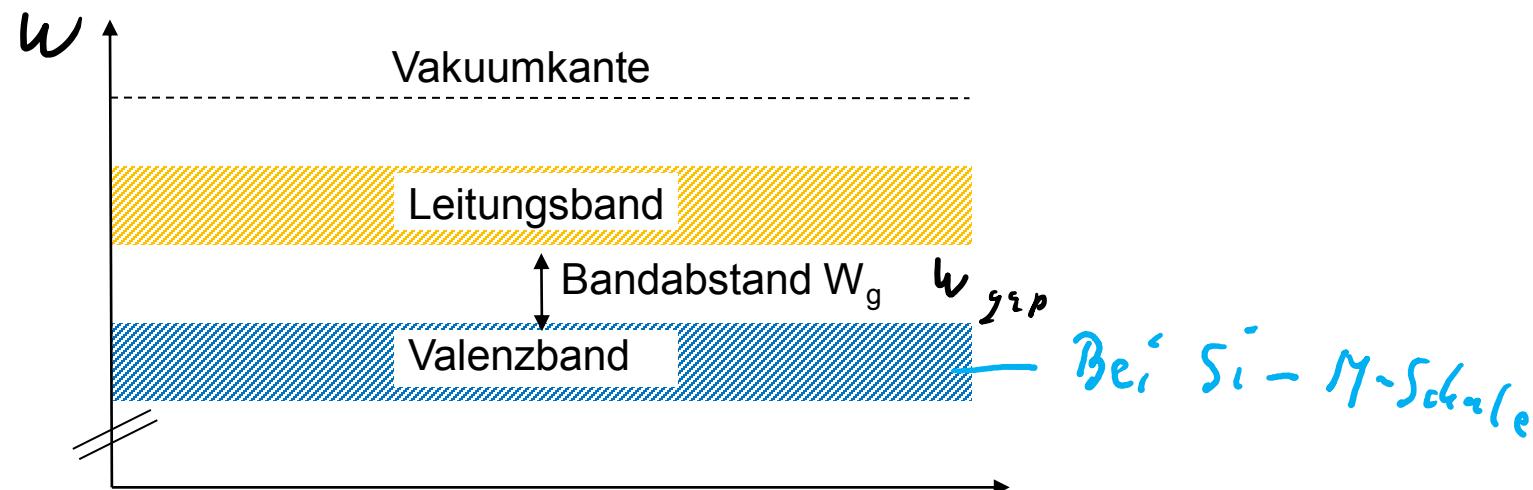


CdTe

Dünnenschicht
PV-Module
Thin-film
PV-Module

■ Bändermodell für Festkörper:

- Vakuumkante
- Leitungsband
- Bandabstand
- Valenzband



Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Bändermodell für Metall, Halbleiter und Isolator



■ Bandabstand:

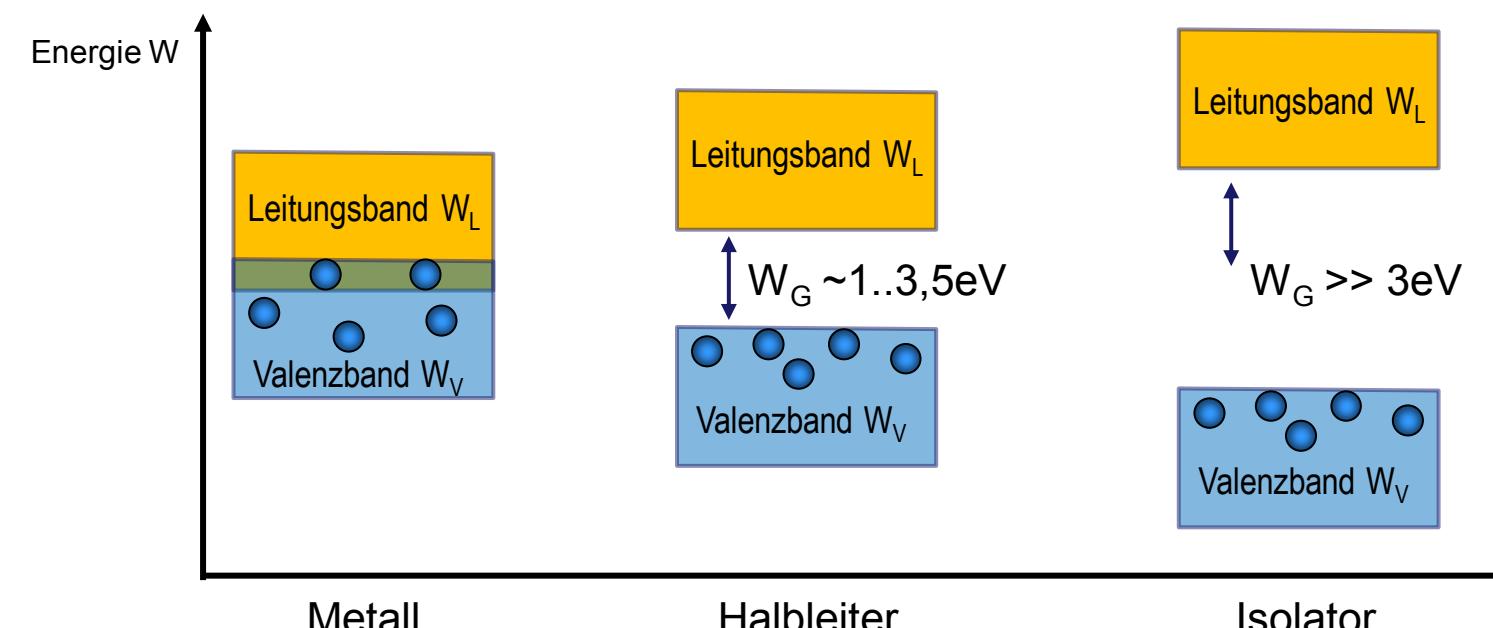
- Ein hoher Bandabstand zusammen mit einem leeren oder voll besetzten äußeren Band charakterisieren die Isolationsfestigkeit

■ 3 Arten, der Energiezufuhr:

- Thermische Energie
- Optische Energie
- Elektrische Energie

Halbleiter

	W_G [eV]
Ge	0,66
Si	1,12
GaAs	1,42
SiC	3,26
GaN	3,45



*e.c.
Leitend*

*Leitfähigkeit
ist stark Temp. abhängig*

*el.
Nichtleiter*

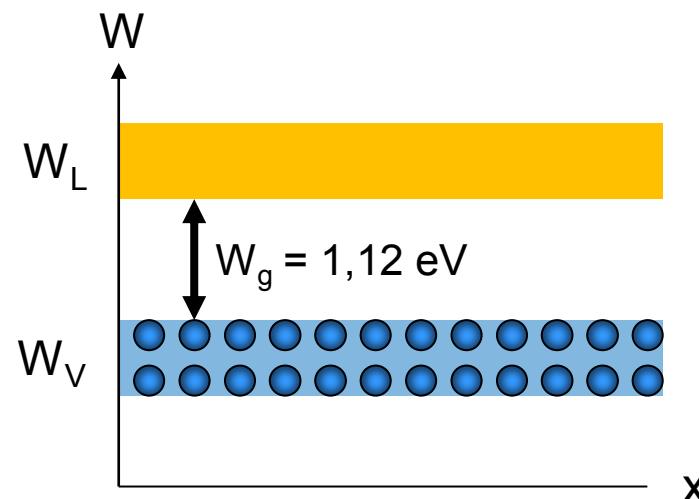
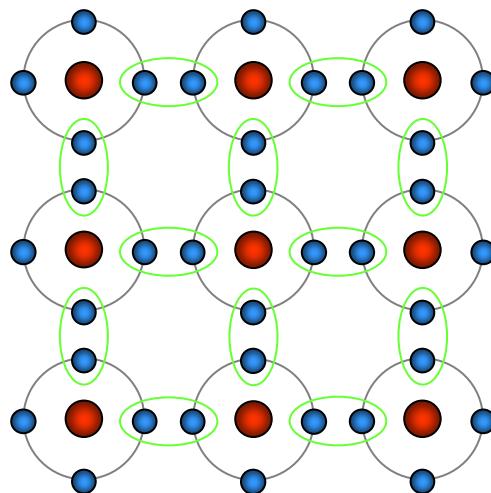
Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Eigenleitung des Halbleiters



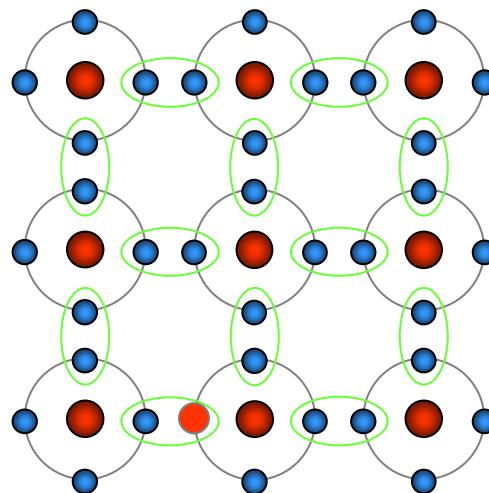
■ $T = 0 \text{ K}$ (-2734) \Rightarrow Isoterm

- alle e^- im Gitter gebunden
- Valenzband voll besetzt
- Leitungsband ist leer

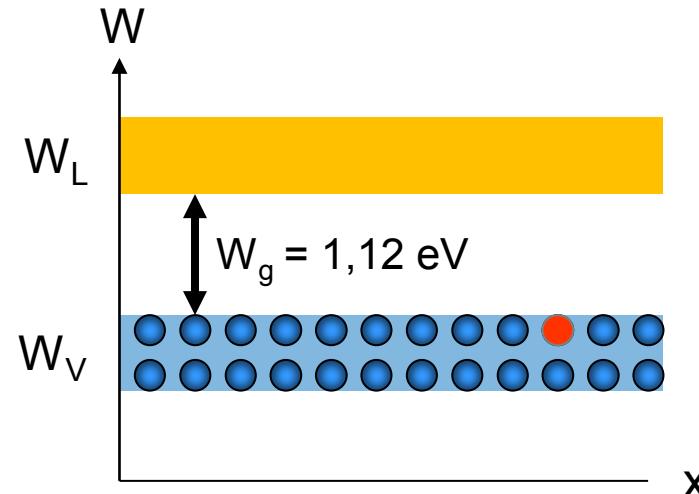


■ $T > 0 \text{ K}$ ($\sim 273^\circ\text{C}$)

- einzelne Elektronen ins Leitungsband:
- freie Elektronen (Dichte n_i) ~~Elektronen~~ (i: intrinsic) → ^{"Eigenleitung"} ~~innewohrend~~
- Loch entsteht (Dichte p_i) (Defektelektron, Fehlstelle)



$n_i = \text{Eigenleitfähigkeitsdichte}$



- Die Eigenleitungsichte n_i von Si bei unterschiedlichen Temperaturen:

$T = 273 \text{ K}$ (ca. Gefrierpunkt)	$n_i = 0,137 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
$T = 290 \text{ K}$ (Raumtemperatur)	$n_i = 0,551 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
$T = 300 \text{ K}$	$n_i = 1,165 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
$T = 320 \text{ K}$ (Betriebstemperatur)	$n_i = 4,512 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
$T = 373 \text{ K}$ (ca. Siedepunkt)	$n_i = 80,90 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

$$n_i = N_0 \cdot e^{-\frac{W_G}{2kT}}$$

Boltzmannkonstante $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$

Gesamte Anzahl
der zur Verfügung
stehenden Elektronen

(Bei Si $\Rightarrow N_0 = 3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)

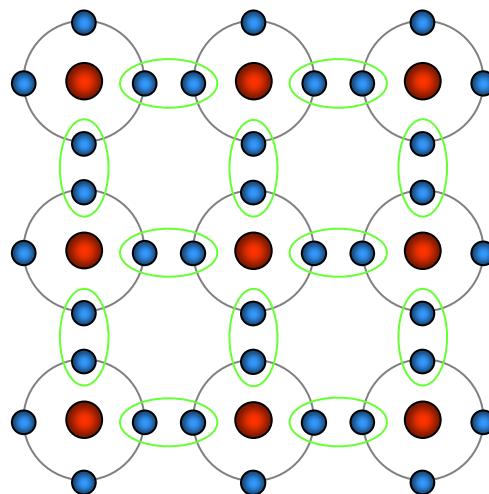
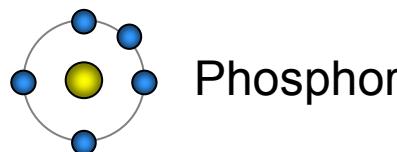
Energie die freigesetzt wird um vom Valenzband ins
Leitungsband zu
gelangen
Bei Si $\Rightarrow W_f = 1,12 \text{ eV}$

Ladung/Elektron
 $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

$$\frac{1}{\text{cm}^3} = \text{cm}^{-3} \approx 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ A},$$

n-Dotierung:

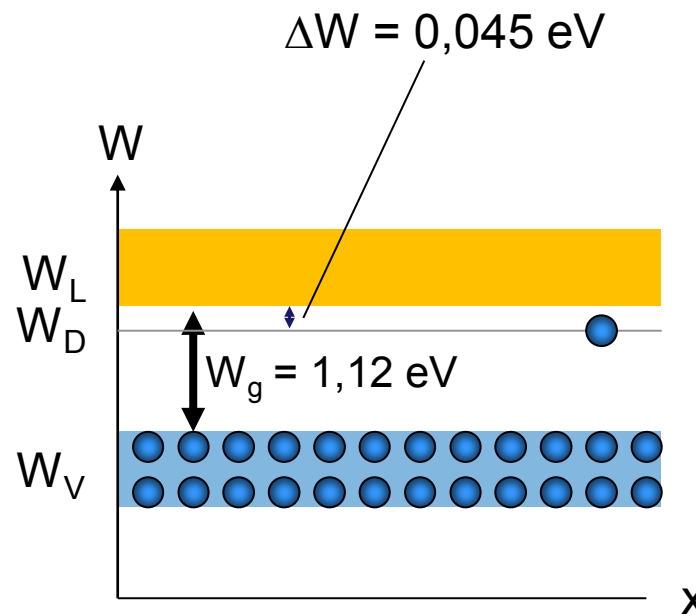
- Einbringen von 5-wertigen Fremdatomen (z.B. Phosphor)
- ⇒ Edelgaskonfiguration, wenn Phosphor Elektron abgibt



Donatoratoren ≈ Phosphor

13	14	15
III A	IV A	V A
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb

(ΔW (As) = 0,054 eV)



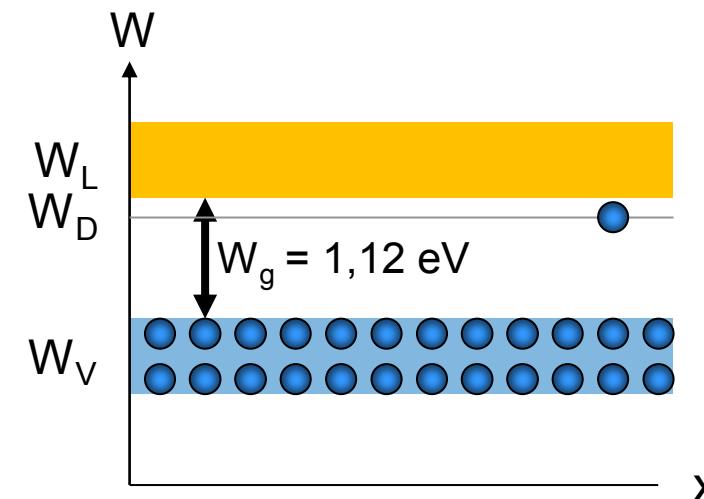
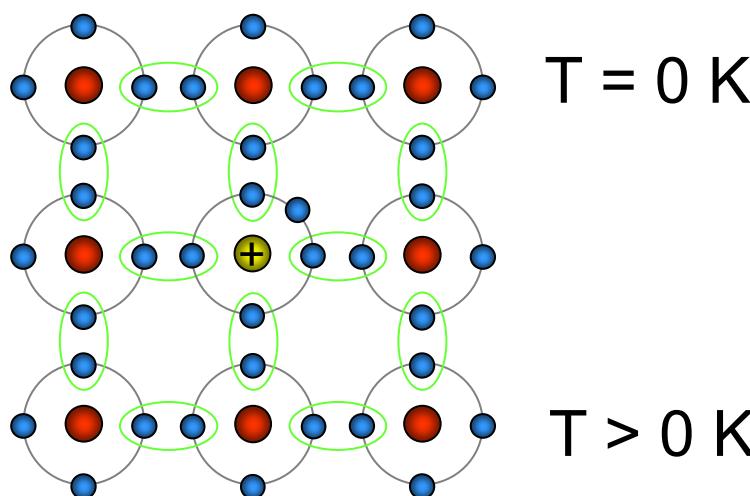
- Phosphor-Atom ist ein Donator (= gibt Elektron ab)

- Donatorniveau liegt dicht beim Leitungsband

- Donatoren Dichte $N_D \approx 10^{12} \dots 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

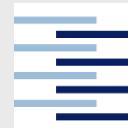
$\Rightarrow n_i$ im Verhältnis zu N_D und n :

$$\frac{n_i}{10^0 \text{ cm}^{-3}} \ll N_D \ll N_o \ll 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$



Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

p-Halbleiter



■ Frage:

- Welches Element wird zur p-Dotierung von Halbleitern verwendet (z.B. Si)?

Gruppe früher:	1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VII B	8 VIII B	9 VIII B	10 I B	11 II B	12 III A	13 III A	14 IV A	15 VA	16 VI A	17 VII A	18 VIII A	Schale
Periode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	K
1	1 H															2 He			L
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	M
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	N
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	O
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	P
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	Q
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uup	115 Uuh	116 Uus	117 Uuo		

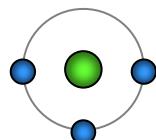
Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

p-Halbleiter



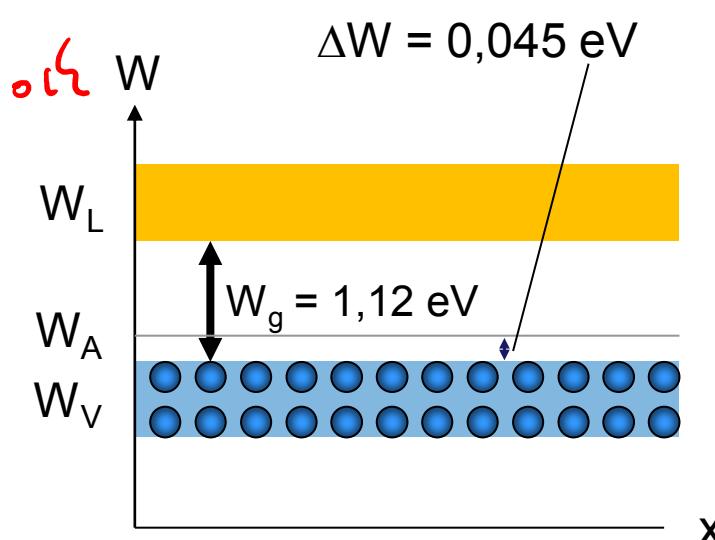
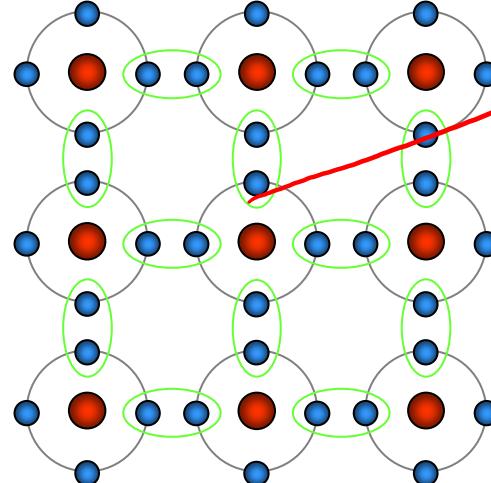
■ p-Dotierung:

- Einbringen von 3-wertigen Fremdatomen (z.B. Bor)
- ⇒ Edelgaskonfiguration, wenn Bor Elektron aufnimmt



Bor

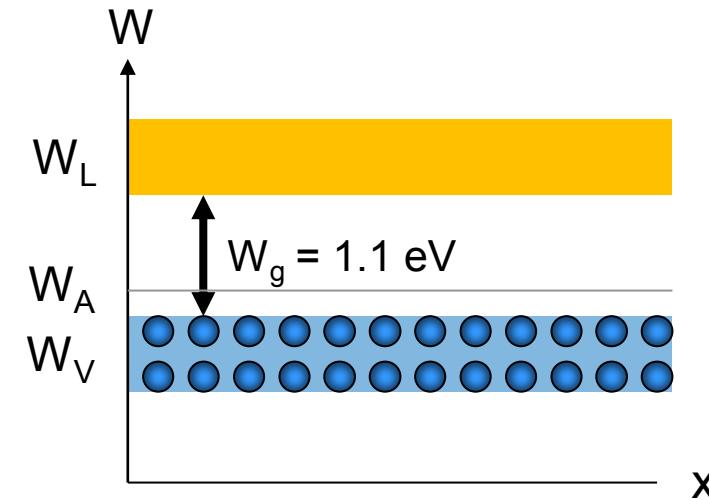
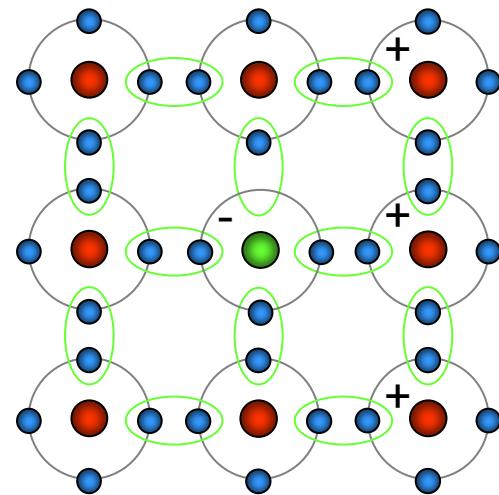
Bor (3wertig, leicht Elektronen zuver)



13	14	15
III A	IV A	V A
5 B	6 C	7 N
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As
49 In	50 Sn	51 Sb

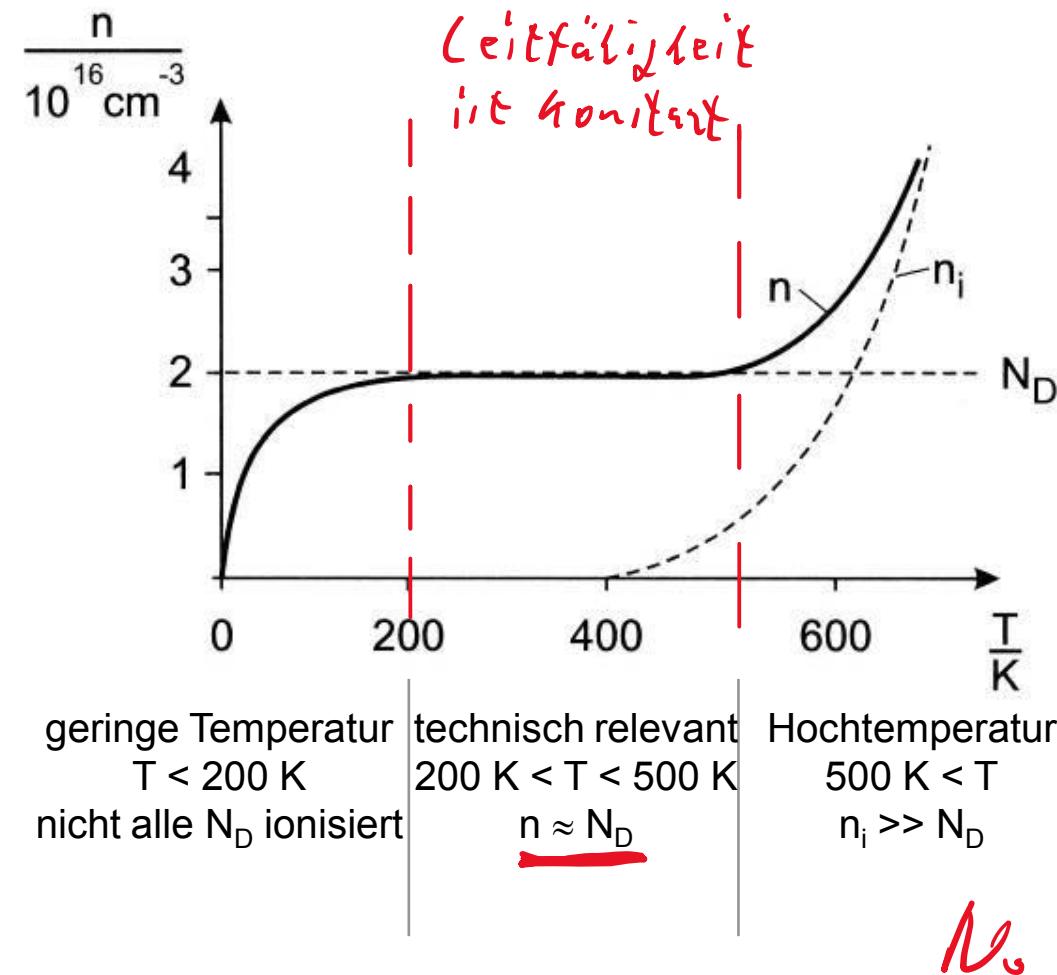
$(\Delta W (\text{Al})) = 0,067 \text{ eV})$

- Bor-Atom ist ein **Akzeptor** (= nimmt Elektron auf)
- Akzeptorniveau liegt dicht beim Valenzband



■ Vorteile durch Dotieren:

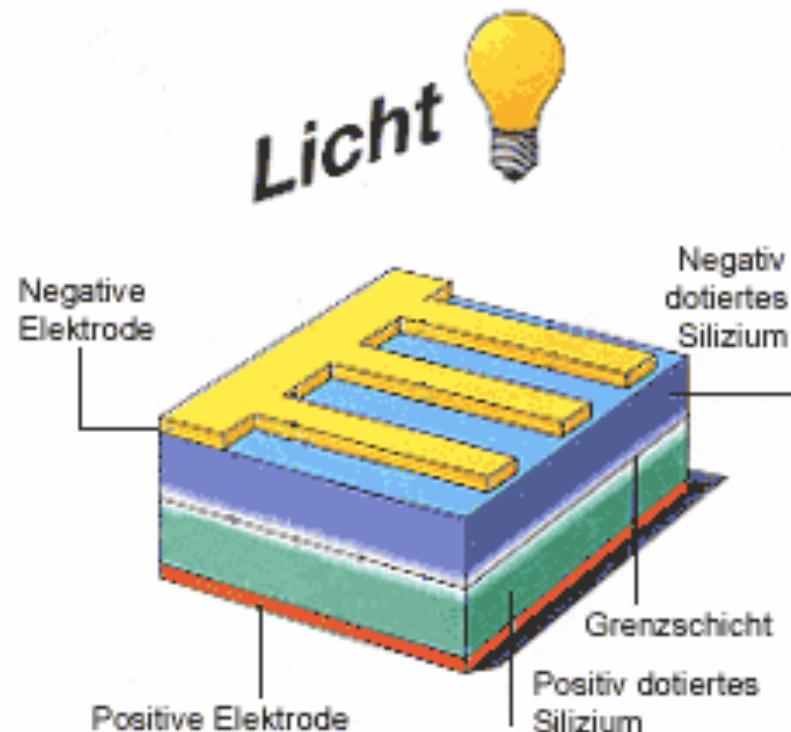
- Höhere Leitfähigkeit
- Leitfähigkeit ist nahezu temperaturunabhängig
(im technisch relevanten Bereich)



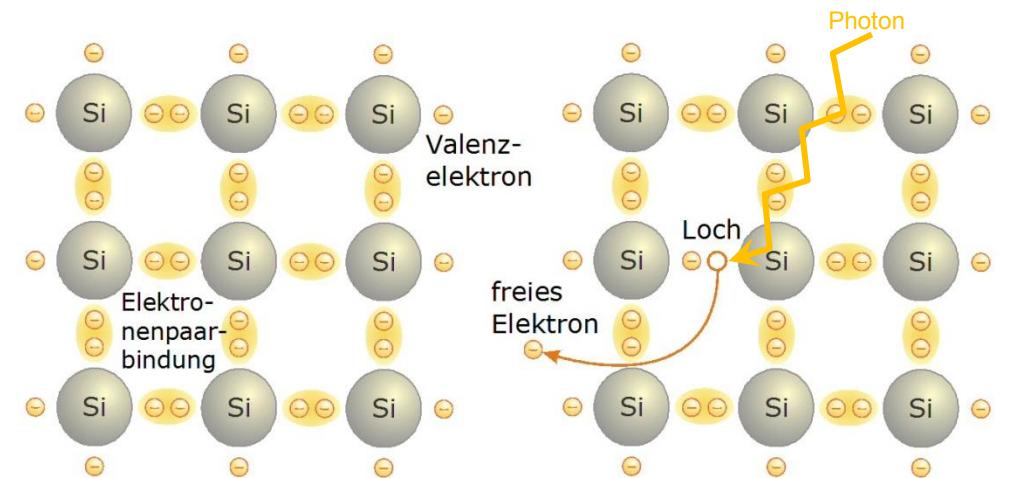
■ Photoelektrischer Effekt (A. Becquerel, 1839):

- Herauslösen von Elektronen aus Atomverband durch Bestrahlung mit Licht bestimmter Wellenlänge. Energie der Photonen: $W_{Ph} = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$

Funktionsprinzip einer Solarzelle



Photoeffekt im Halbleiter-Atomgitter



Photoleitung:
Elektronen werden vom Valenzband VB (oberstes, vollständig gefülltes Energieband) ins Leitungsband LB (nächst höheres, bei reinen Halbleitern leeres Energieband) gehoben
→ **ansteigende Leitfähigkeit**

© Volker Quaschning / Hanser Verlag
Regenerative Energiesysteme

Quelle: www.elsenbruch.info, V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

EE – Einführung in die regenerativen Energien – WS22 – Vo4

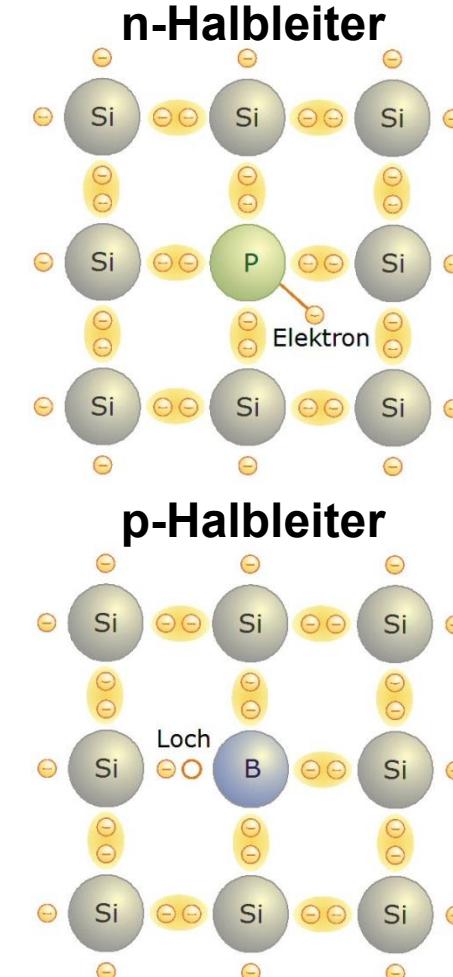
Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Photovoltaischer Effekt



- Dotierung von Silizium mit Donatoren (z.B. Phosphor → n-Halbleiter) oder Akzeptoren (z.B. Bor → p-Halbleiter) und Störstellenleitung:

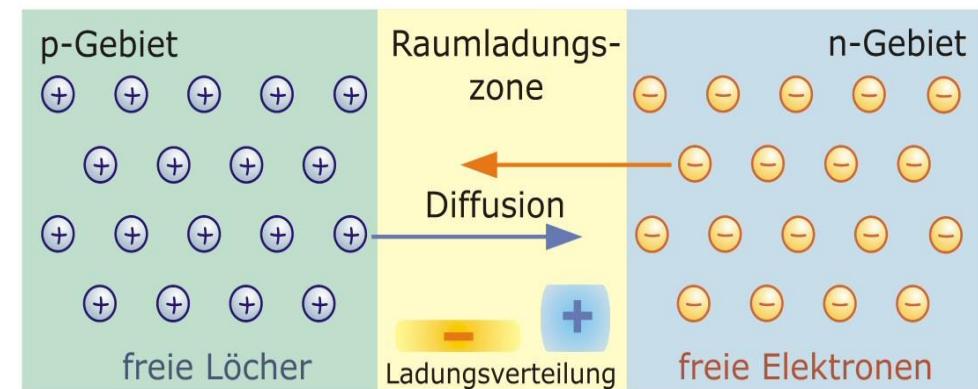
- Atome aus der V. Gruppe (z.B. Phosphor P, Antimon Sb, „Donatoren“) haben im Gegensatz zu Si 5 Valenzelektronen.
- Das 5. Elektron ist nur locker gebunden, wird durch geringe Energiezufuhr vom Atom getrennt ($W_{D,P} = 0,044 \text{ eV}$)
 - steht als freies Elektron im Leitungsband zur Verfügung
 - Donatoren werden durch Elektronenabgabe positiv ionisiert.
- Atome aus der III. Gruppe (z.B. Bor B, Aluminium Al, „Akzeptoren“) haben im Gegensatz zu Si 3 Valenzelektronen.
- Im Gitter fehlt ein Valenzelektron und es entsteht ein Loch.
- Elektronen von benachbarten Si Atomen im Valenzband können dieses Loch auffüllen, wodurch an anderer Stelle im Kristallgitter ein neues Loch entsteht.
 - p Dotierung.
 - Akzeptoren durch Elektronenaufnahme negativ ionisiert.
- Bereits bei Raumtemperatur sind im Silizium alle Donatoren und Akzeptoren vollständig ionisiert.



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- Werden ein n Halbleiter und ein p Halbleiter in Kontakt gebracht, so entsteht ein pn-Übergang:

- An der Grenzschicht diffundieren überschüssige (freie) Elektronen aus dem n Halbleiter in den p Halbleiter. Es entsteht ein Gebiet mit wenigen freien Ladungsträgern und im n Halbleiter eine positive sowie im p Halbleiter eine negative Raumladungszone.
- Das so entstehende elektrische Feld wirkt der Bewegung der Ladungsträger entgegen, so dass die Diffusion nicht endlos fortgesetzt wird.
- Wird nun der pn Halbleiter (Solarzelle) dem Licht ausgesetzt, werden durch die Photonen Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben (→ freie Elektronen)
- Diese werden durch das elektrische Feld in das n-Gebiet gezogen, die entstehenden Löcher wandern in die entgegengesetzte Richtung ins p-Gebiet (→ Ladungstrennung)
Dieser gesamte Vorgang wird photovoltaischer Effekt genannt.
- Erste Silizium-Solarzelle 1954 bei den Bell Laboratories/USA mit Wirkungsgrad von 6%

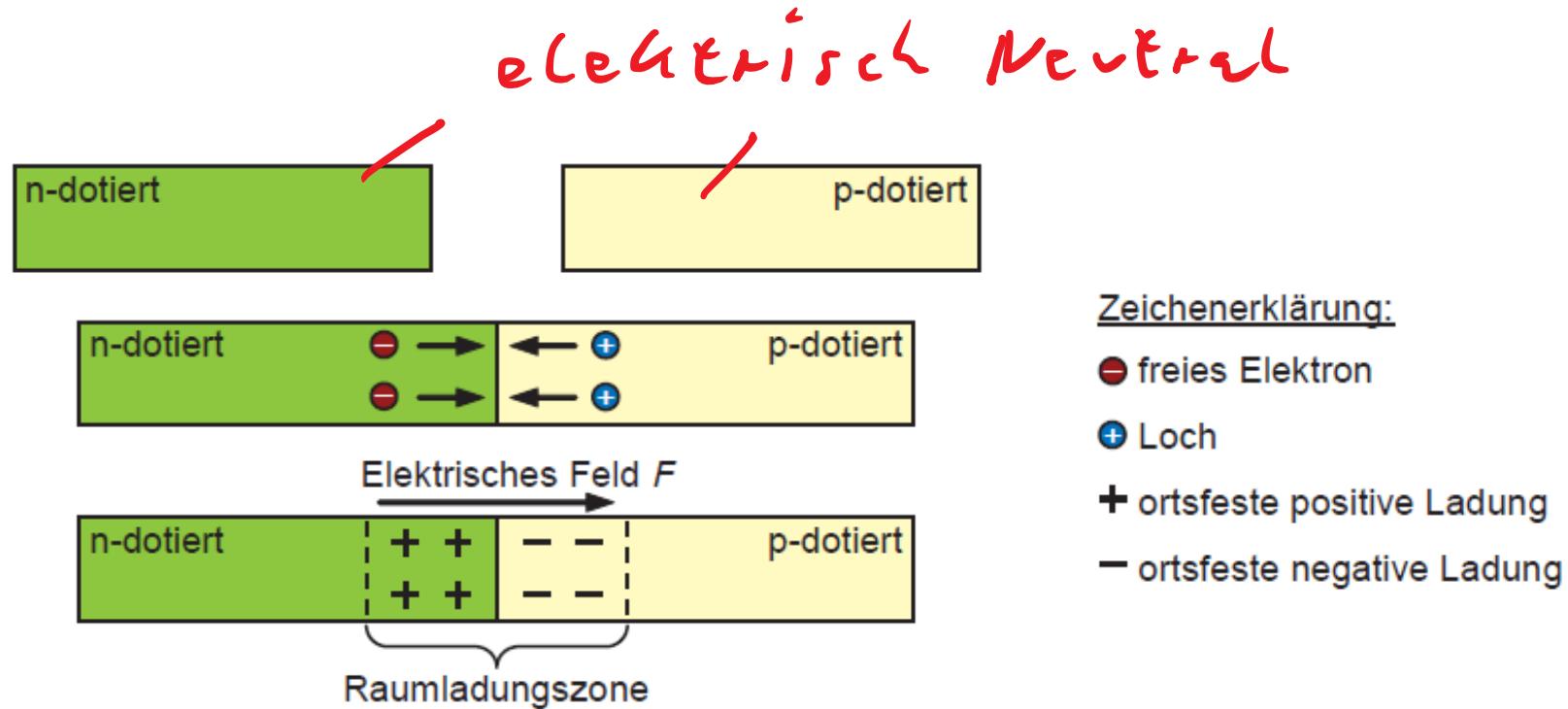


© Volker Quaschning / Hansen Verlag
»Regenerative Energiesysteme«

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

PN-Übergang und Raumladungszone



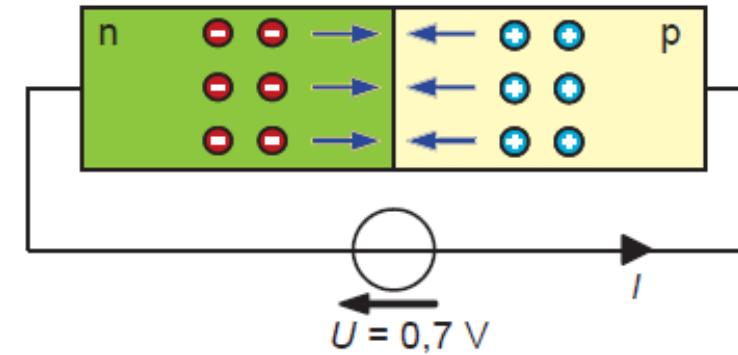
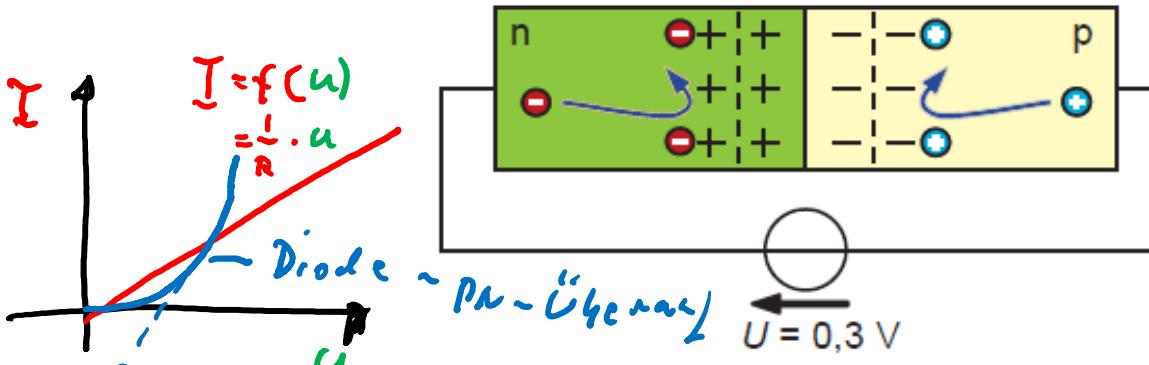
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

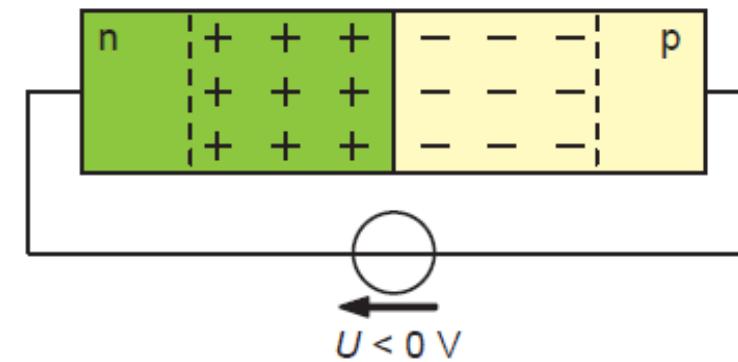
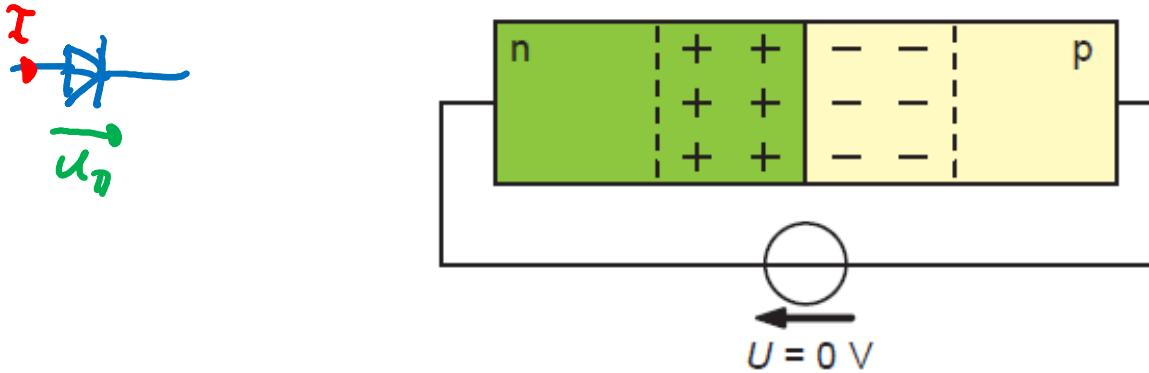
PN-Übergang und Raumladungszone



a) Vorwärtsspannung:



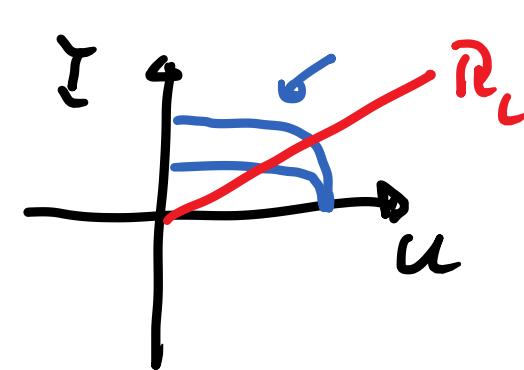
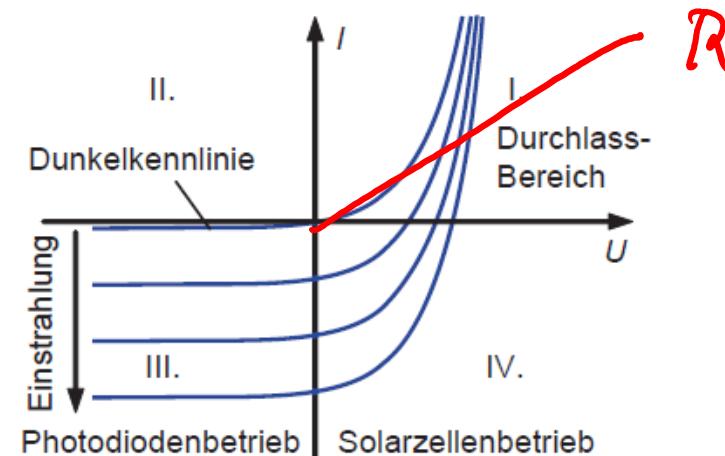
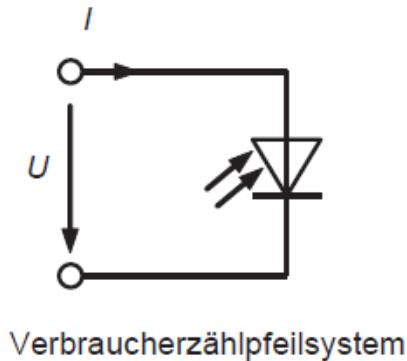
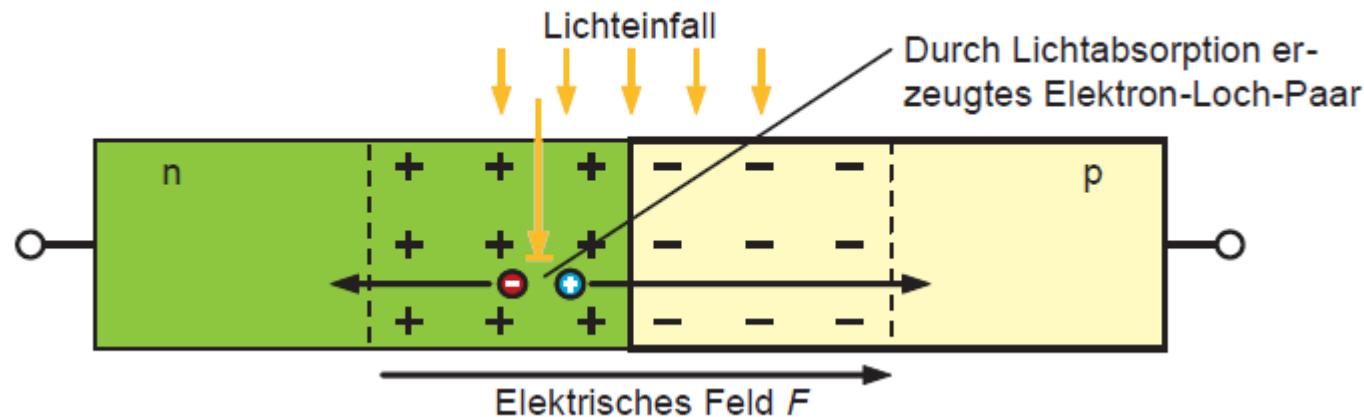
b) Rückwärtsspannung:



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

PN-Übergang und Raumladungszone



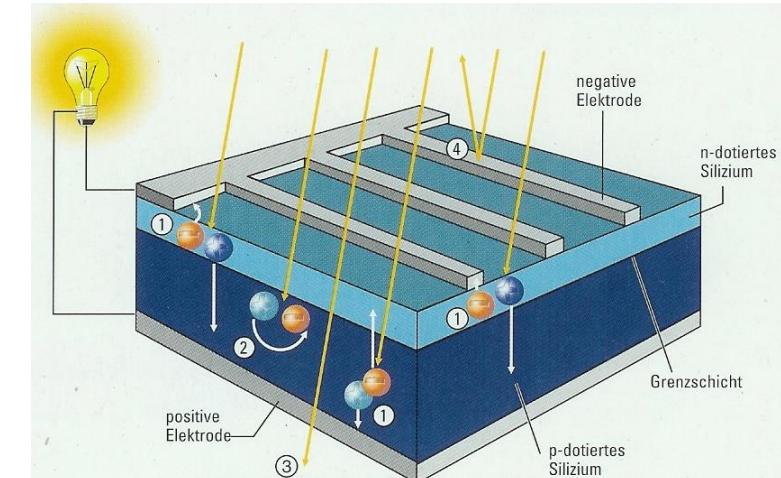
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

PN-Übergang und Raumladungszone

■ Aufbau:

- Aus zwei unterschiedlich dotierten Silizium-Schichten zusammen:
 - Die dem Sonnenlicht zugewandte Schicht ist mit Phosphor negativ dotiert
 - Die darunterliegende Schicht ist mit Bor positiv dotiert
- An der Grenzschicht entsteht ein elektrisches Feld (pn-Übergang):
 - Freie Elektronen diffundieren aus dem n-Halbleiter in den p-Halbleiter und freie Löcher aus dem p-Halbleiter in den n-Halbleiter
 - Es entsteht ein Gebiet mit wenigen freien Ladungsträgern (Raumladungszone RLZ)
 - Im n-Gebiet des Übergangs bleiben positiv, im p-Gebiet negativ geladene Dotieratome zurück. Es entsteht ein elektrisches Feld E , das der Bewegung der Ladungsträger entgegen gerichtet ist, so dass die Diffusion nicht endlos fortgesetzt wird.
- Zur Stromentnahme auf Vorder- und Rückseite metallische Kontakte (Rückseite ganzflächig, Vorderseite Gitter/Baumstruktur (lichtdurchlässig))
- Silizium reflektiert ca. 30% der auftreffenden Solarstrahlung. Antireflexschicht auf der Vorderseite aus Siliziumnitrid oder Titandioxid.
- Die Dicke beträgt 200-300µm



Quelle: Photovoltaische Anlagen, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS)

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Spektrale Empfindlichkeit

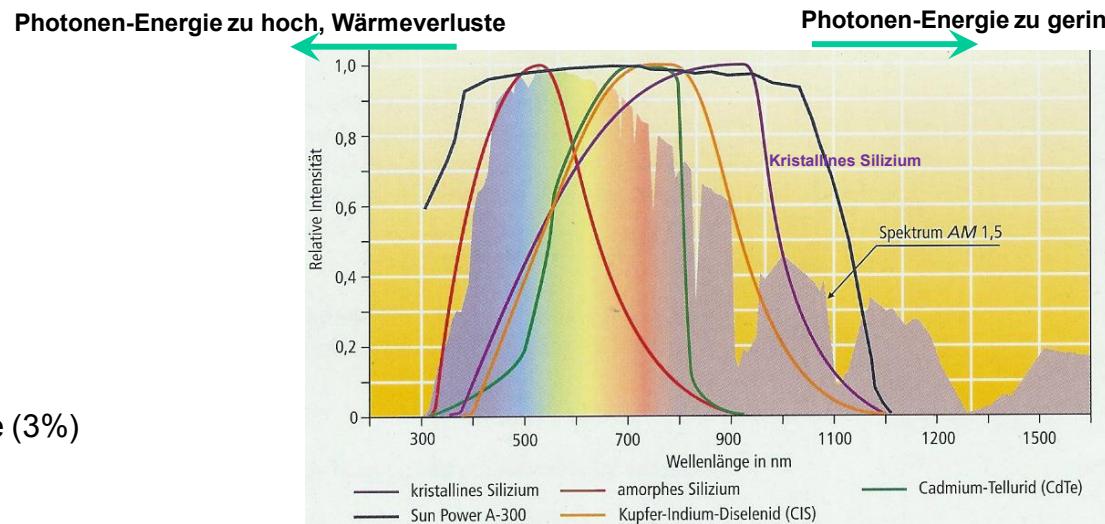


- Von der solaren Strahlungsenergie kann nur ein begrenzter Lichtwellenlängenbereich (350...1100 nm) genutzt werden:

- → Zu geringe Photonen-Energie der langwelligen Strahlung ($h \cdot f = h \cdot c / \lambda < W_G$, d.h. $\lambda > h \cdot c / W_G$): Durchstrahlungs- oder Transmissionsverluste
- → Überschüssige Photonen-Energie der kurzwelligen Strahlung ($h \cdot f = h \cdot c / \lambda > W_G$, d.h. $\lambda < h \cdot c / W_G$): Überschüssige Energie wird durch Stöße an das Kristallgitter weitergegeben, d.h. in Wärme umgewandelt: Thermalisierungsverluste

- Energiebilanz:

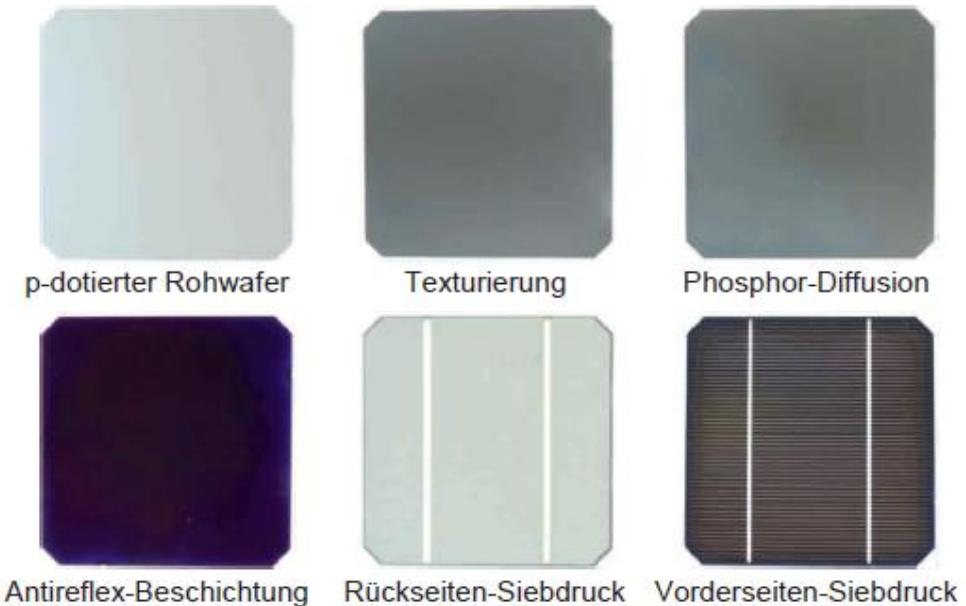
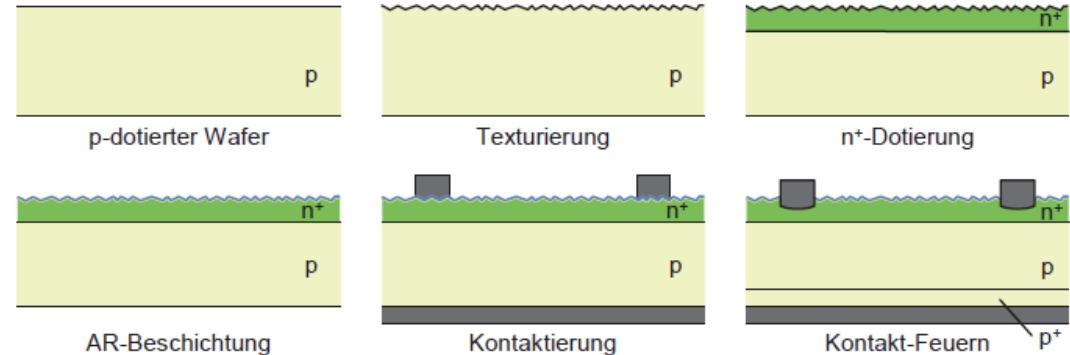
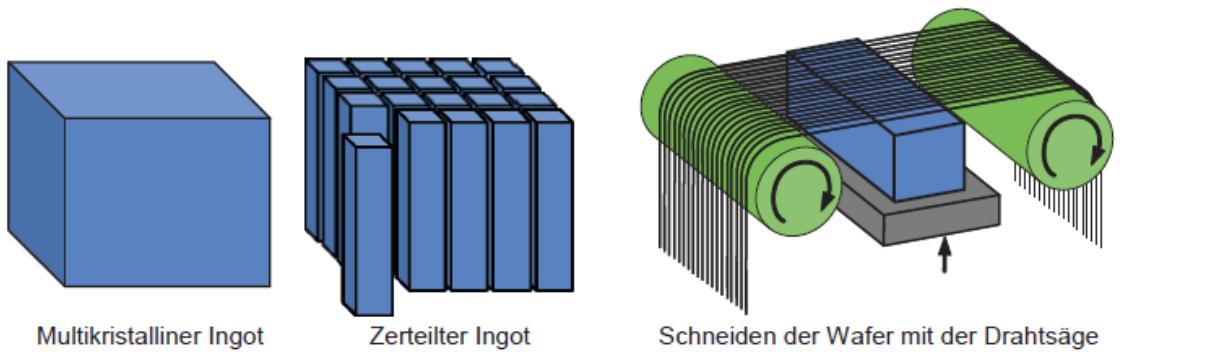
- 100% eingestrahlte Sonnenenergie
 - ∴ optische Verluste (58%):
 - Überschüssige Photonen-Energie der kurzwelligen Strahlung (32%)
 - Zu geringe Photonen-Energie der langwelligen Strahlung (23%)
 - Reflexion und Abschattung durch Frontkontakte (3%)
 - ∴ elektrische Verluste (29%):
 - Potenzialgefälle in der Zelle, insbesondere in der Raumladungszone (20%)
 - Rekombination (8,5%)
 - Serienwiderstand (0,5%)
- = 13...25% nutzbare elektrische Energie (13%)



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

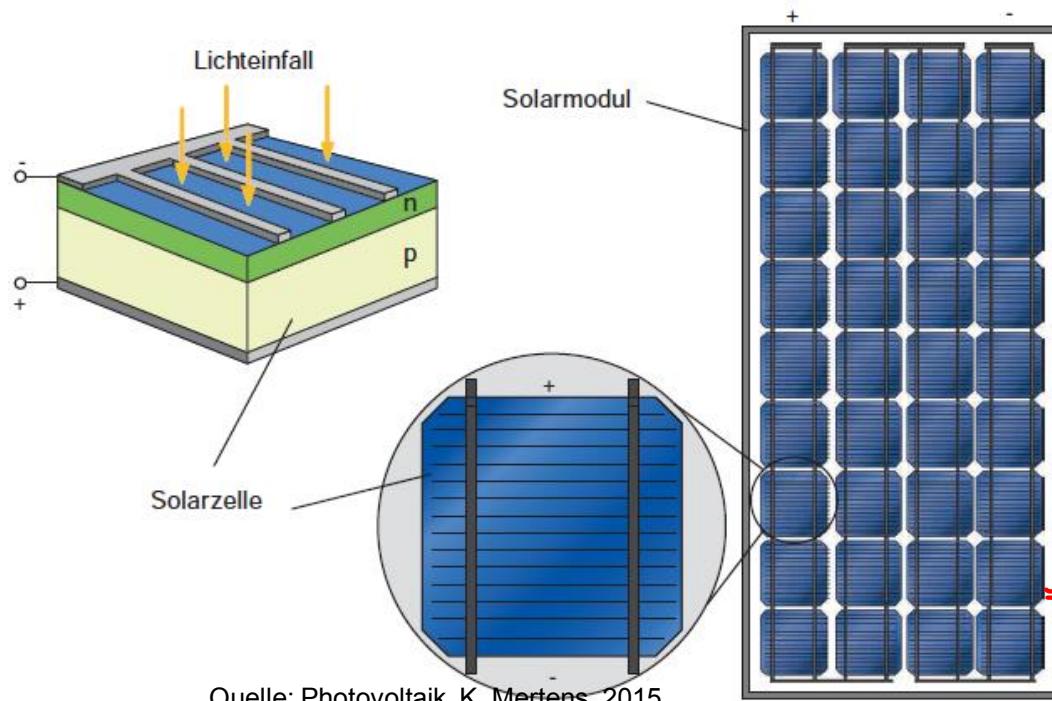
Herstellung von Standard Solarzellen/Modulen



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

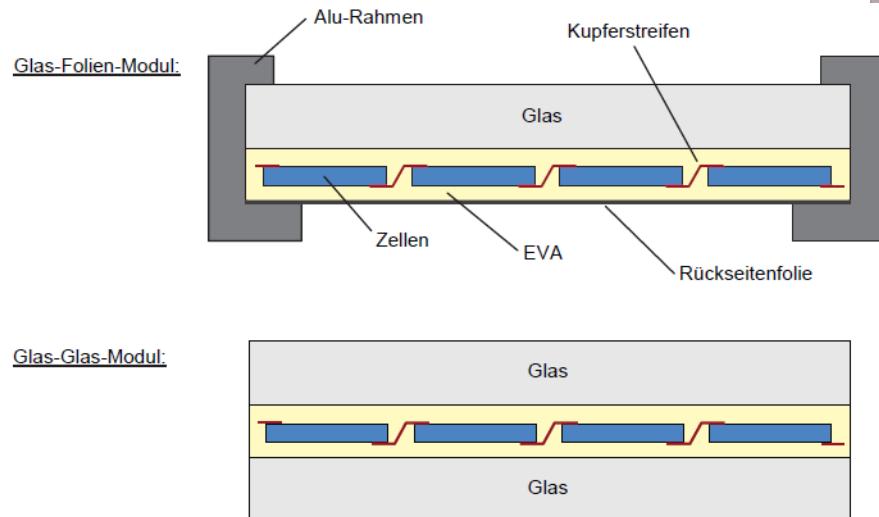
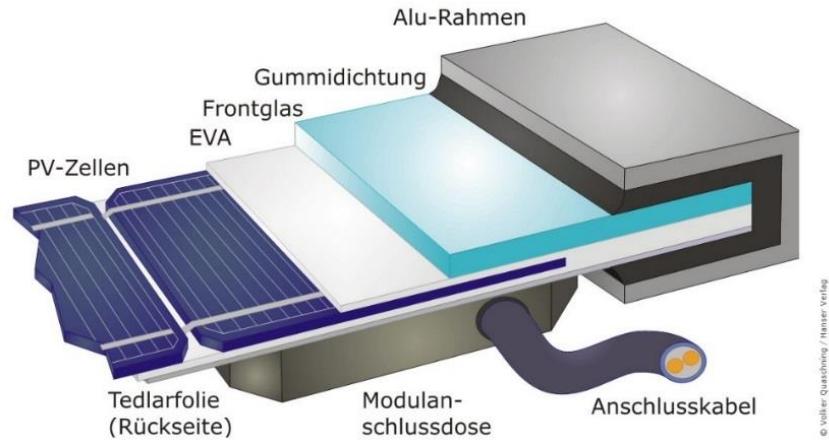
Herstellung von Standard Solarzellen/Modulen



U_{c} einer PV Zelle nur 0,6-0,7V
⇒ Daher Reihenschaltung von z.B. 36 Zellen
zu einem PV Modul
Reihenschaltung von PV Modulen ⇒ PV Strang

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

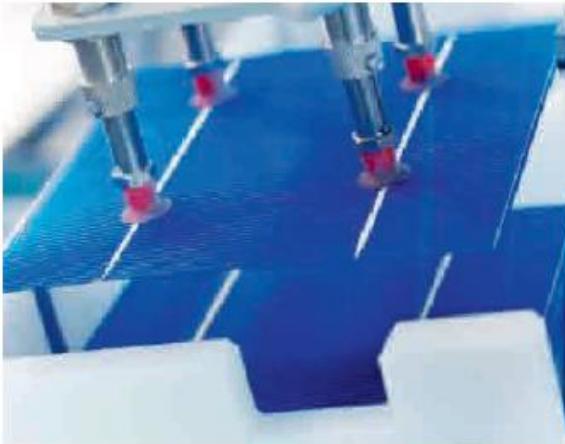
Herstellung von Standard Solarzellen/Modulen



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

Herstellung von Standard Solarzellen/Modulen



Aufnahme der Zellen



Transport der Zellen



Verlötung zu Zellstrings



Ablegen der Zellstrings



Zufuhr zum Laminator



Montage der Modulrahmen

4 Photovoltaik

4 Photovoltaik

4.1 Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

4.2 Arten von Solarzellen

4.3 Elektrische Beschreibung von Solarzellen

4.4 PV-Module

4.5 PV-Generatoren

4.6 Belastung von PV-Generatoren

4.7 PV-Anlagenkonzepte

Arten von Solarzellen

Arten von Solarzellen

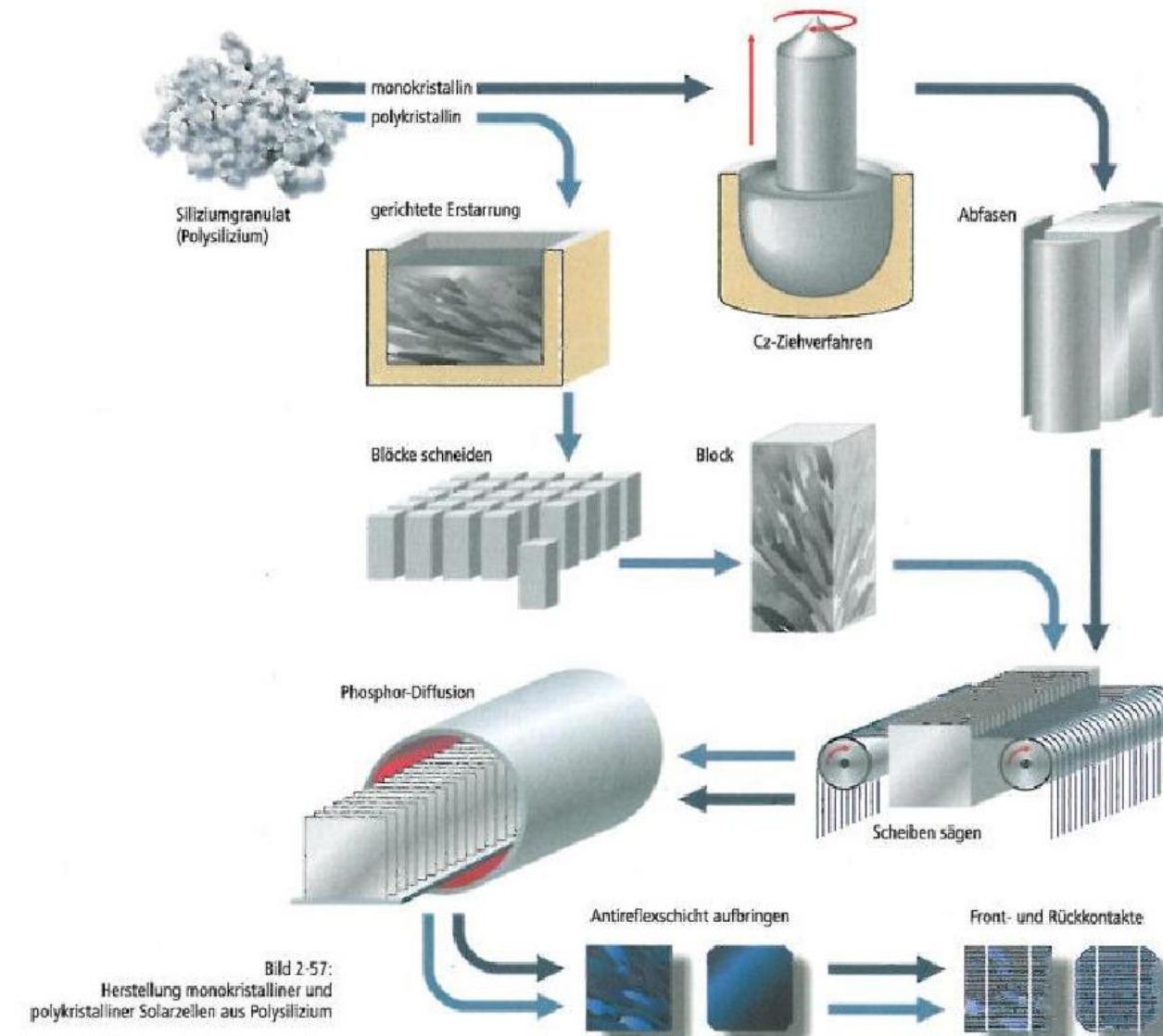


Zellarten		Maximale Wirkungsgradwerte	Einsatzgebiete
		Zellwirkungsgrad Labor / Zellwirkungsgrad Produktion / Modulwirkungsgrad Serienprod.	
Kristalline Si-Zellen	Monokristalline Zellen		
	"Standard"zellen	21,6% / 17,5% / 16%	Netzgekoppelte Solaranlagen
	Hochleistungszellen	25% / 21,5% / 20%	
	Polykristalline Zellen (blockgegossen)	20,3% / 16,5% / 15%	
	Polykristalline Band-Zellen		
	EFG-Zellen		
	String Ribbon-Zellen	19,7% / 14 % / 13,1%	
Dünnschichtzellen	Amorphe Si-Zellen	13,2% / 10,5 % / 7,5% (im stabilisierten Zustand/ d.h. nach lichtinduzierter Alterung)	* Freizeitbereich (Kleinanwendungen, Camping, Boot) * Systeme mit Dachintegration
	Cadmium-Tellurid-Zellen (CdTe)	16,5% / 11 % / 10,4%	Freiflächenanlagen der MW-Klasse
	Kupfer-Indium-Diselenid-Zellen (CuInSe ₂ oder CIS)	19,5% / 14 % / 11%	Serienreif, viele Referenzobjekte
	CIS-Nanozellen	14% / 12 % / 10%	Marktreif
	Stapelzellen (III-V Halbleiter) mit Konzentrator	40,7% / 27,4% / 27%	Markteinführung für Einsatz in sonnenreichen Regionen
	Mikrokristalline Si-Zellen	15,2% / 9,5% / 7,6%	
	Mikromorphe Si-Zellen	13% / 11,5% / 12,2% (im stabilisierten Zustand/ d.h. nach lichtinduzierter Alterung)	
	Farbstoffzellen	12% / 7% / 5%	
	Organische Solarzelle	6,5% / --- / ---	Kostengünstige Varianten in der Zukunft
Hybride Si-Zellen (HIT)		21% / 18,5% / 16,8%	

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Arten von Solarzellen

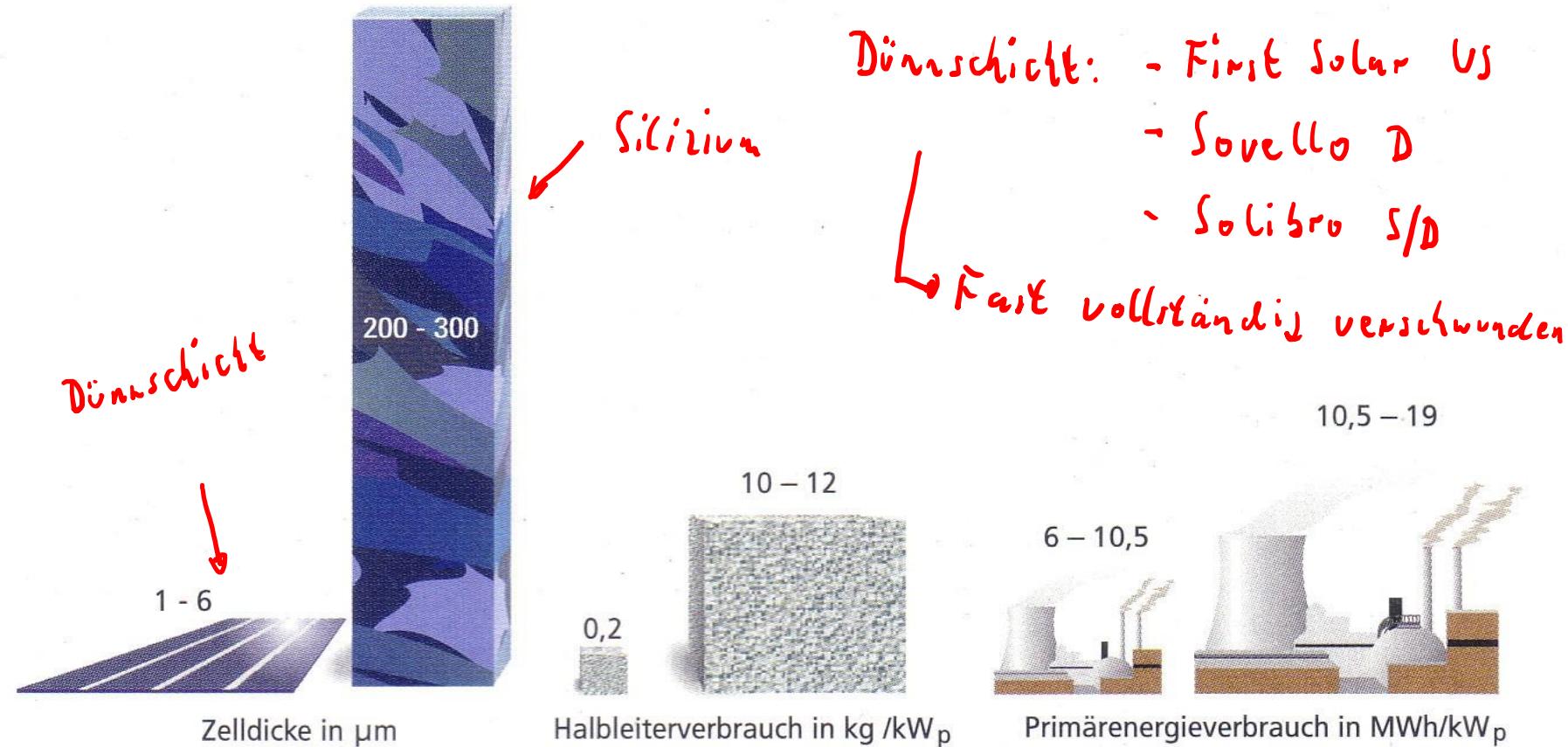
Zelltechnologie-Vergleich



Arten von Solarzellen

Zelltechnologie-Vergleich

- Vergleich zwischen Dünnschicht-Zellen (links) und kristallinen Silizium-Zellen (rechts):



Arten von Solarzellen

Zelltechnologie-Vergleich

Zellmaterial	Benötigte PV-Fläche für 1 kW _p	
Monokristallines Silizium Hochleistungszellen	7 – 9 m ² 6 – 7 m ²	
Polykristallin	7,5 – 10 m ²	
Kupfer-Indium-Diselenid (CIS)	9 – 11 m ²	
Solisro		
Cadmiumtellurid (CdTe)	9 – 16 m ²	
Mikrokristallines Silizium	10 – 14 m ²	
Firix Solar		
Amorphes Silizium	14 – 20 m ²	
$\eta = 6\%$		

Platzbedarf bei
verschiedenen
Materialien

Dünnschicht

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

EE – Einführung in die regenerativen Energien – WS22 – Vo4

Arten von Solarzellen

Zelltechnologie-Vergleich

- Vergleich zwischen Dünnschicht-Zellen (rechts) und kristallinen Silizium-Zellen (links):



4 Photovoltaik

4 Photovoltaik

4.1 Aufbau und Funktionsprinzip einer Solarzelle

4.2 Arten von Solarzellen

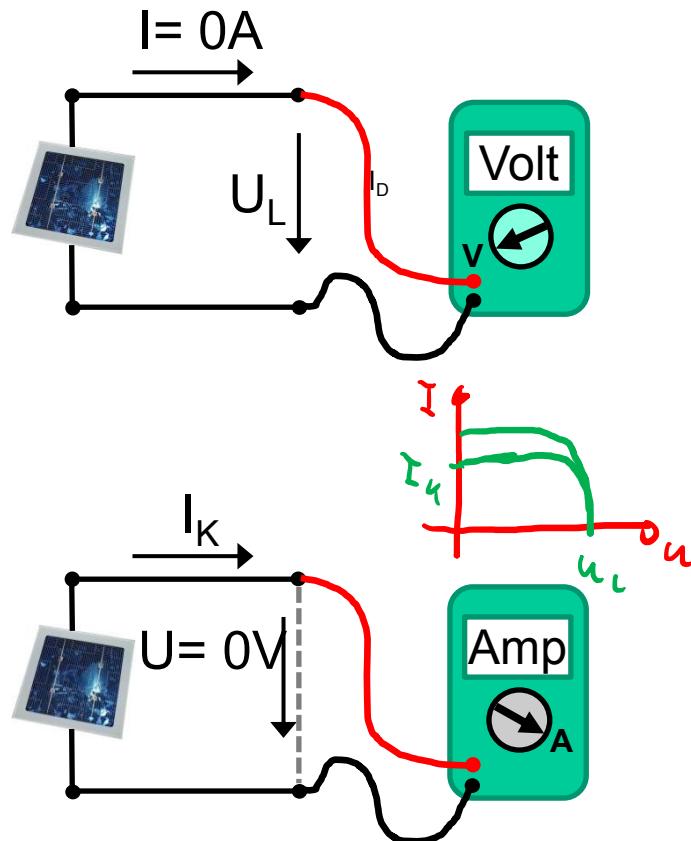
4.3 Elektrische Beschreibung von Solarzellen

4.4 PV-Module

4.5 PV-Generatoren

4.6 Belastung von PV-Generatoren

4.7 PV-Anlagenkonzepte



Leerlaufspannung U_L

- Messung **ohne** elektrischen Verbraucher, zwischen den offenen Klemmen
- Spannung: U ist maximal = U_L
- Stromstärke: $I = 0 A$

Kurzschlussstrom I_K

- Messung bei Kurzschluss zwischen den Klemmen.
- Spannung: $U = 0 V$
- Stromstärke: I ist maximal = I_K

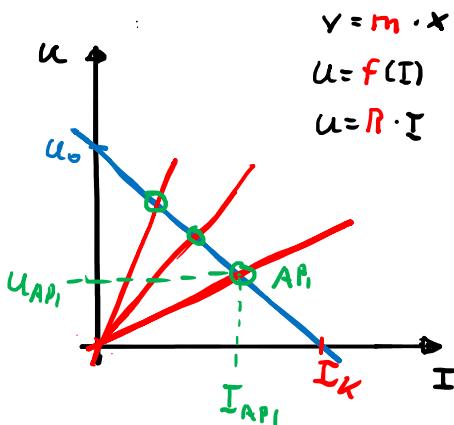
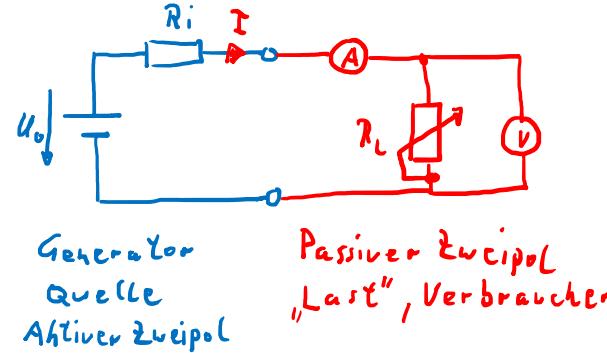
HINWEIS: U_L und I_K können **nie gleichzeitig** in einem Stromkreis auftreten. Sie sind Maximalwerte für zwei völlig unterschiedliche elektrische Schaltungen. Aber sie charakterisieren eine Solarzelle.

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie

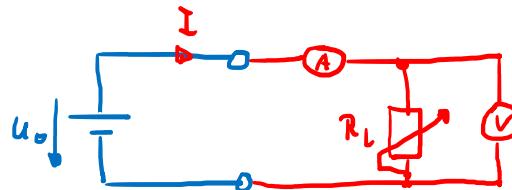
- Messung der Generatorkennlinie von verschiedenen Quellen – siehe ET1 „Der Grundstromkreis“

Batterie – siehe ET1

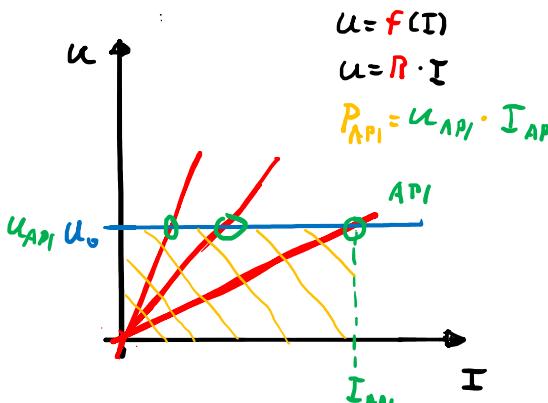


- Generatorkennlinie
- Lastkennlinie
- Arbeitspunkt AP

Labornetzteil (Spannungsgeregelt)

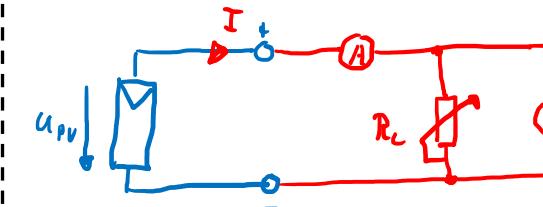


Generator Quelle Aktiver Zweipol Passiver Zweipol „Last“, Verbraucher

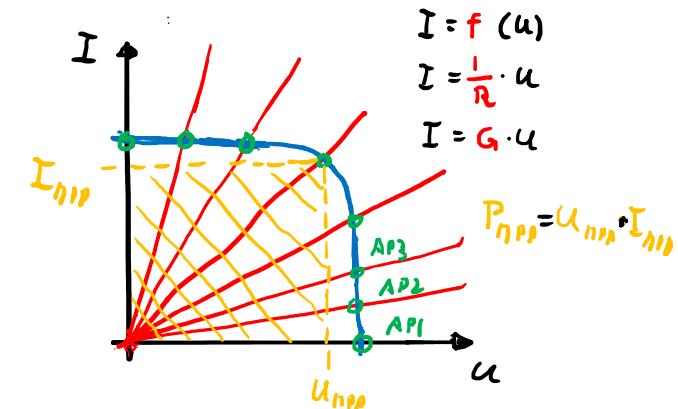


- Generatorkennlinie
- Lastkennlinie
- Arbeitspunkt AP

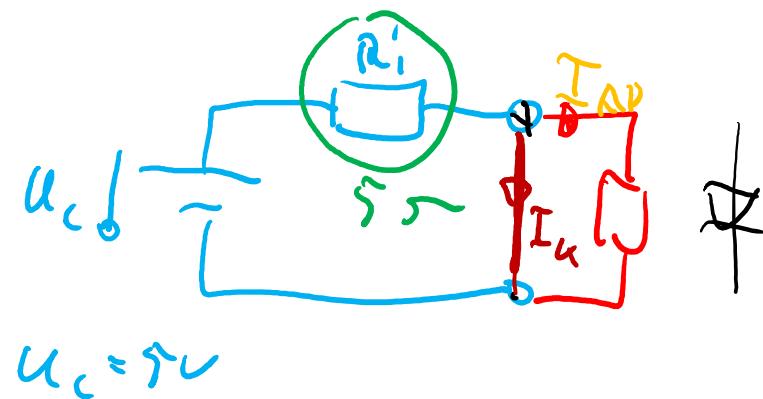
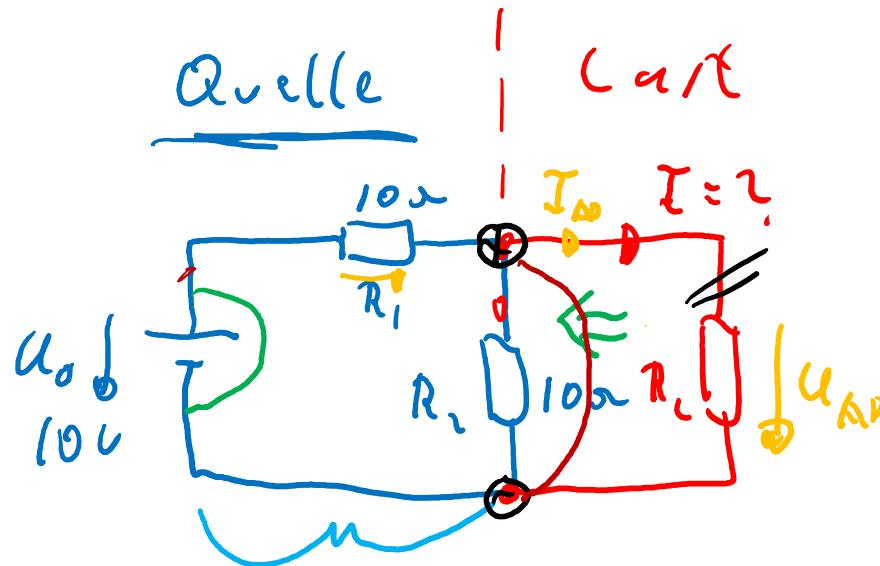
PV-Modul



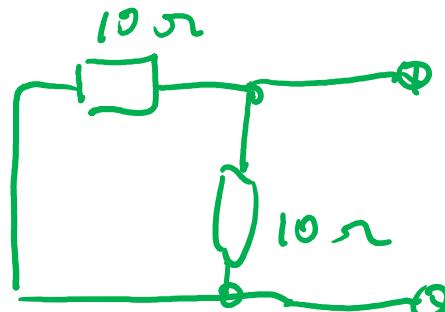
Generator Quelle Aktiver Zweipol Passiver Zweipol „Last“, Verbraucher



- Generatorkennlinie
- Lastkennlinie
- Arbeitspunkt AP



$$I_A = \frac{u_C}{R'_i} = \frac{5V}{5\Omega} = 1A$$

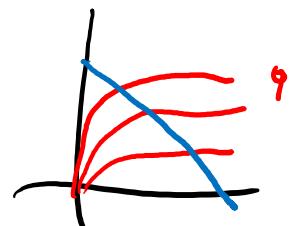
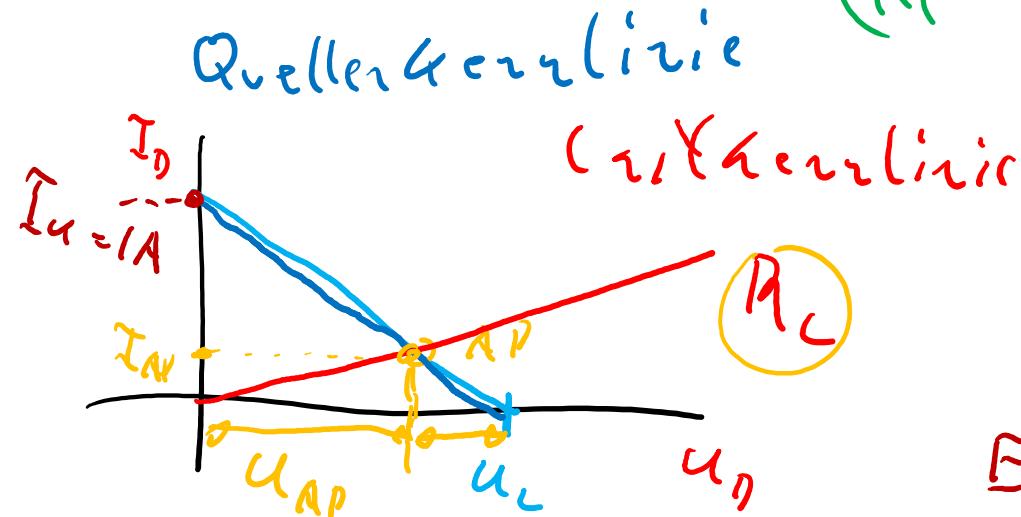


$$R_i + R_L$$

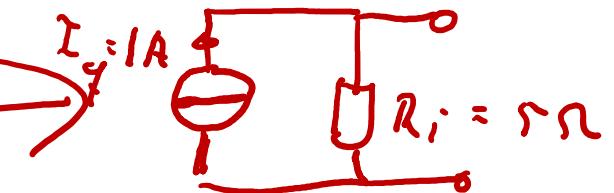
$$R'_i \approx ?$$

$$\approx R_i // R_L$$

$$\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_L}\right)^{-1} \approx 5\Omega$$



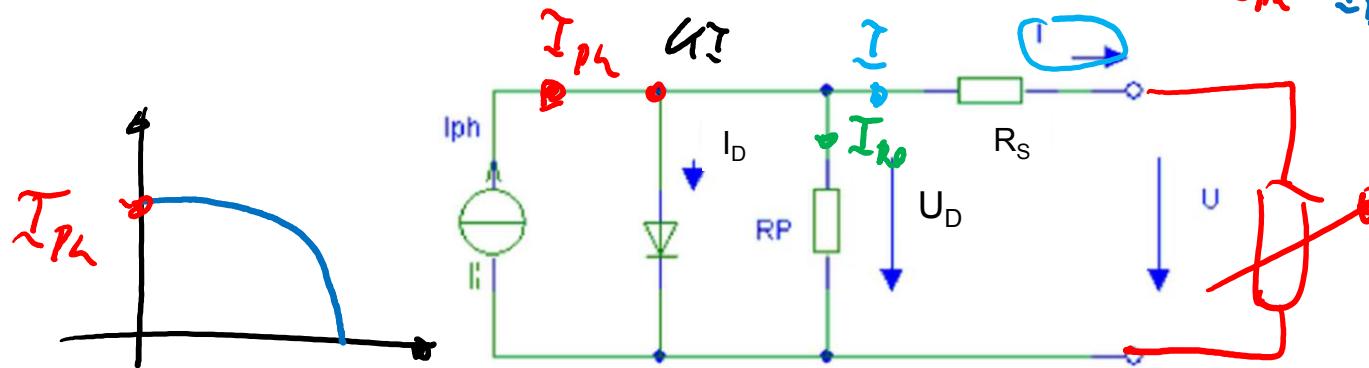
Ersatzstromquelle



Elektrische Beschreibung von Solarzellen

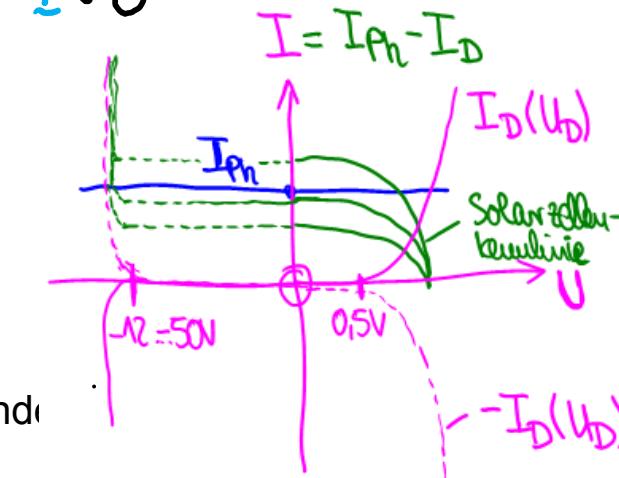
Elektrische Beschreibung von Solarzellen

- Erweitertes Ersatzschaltbild der Solarzelle:



$$I_{ph} - I_D - I_{R_p} - I = 0$$

R_S : Bahnwiderstand und Kontaktwiderstände
 R_P : Rekombination, Kristallfehler im pn-Übergang



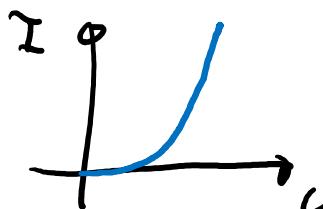
- Mathematische Beschreibung (rekursiv!):

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{U_D}{R_P}$$

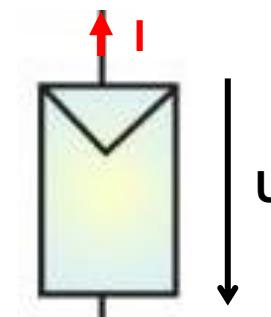
mit $I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot U_T}} - 1 \right)$

$$U_D = U + R_S \cdot I$$

$$I_{ph} = c_0 \cdot E$$



Schaltzeichen



Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

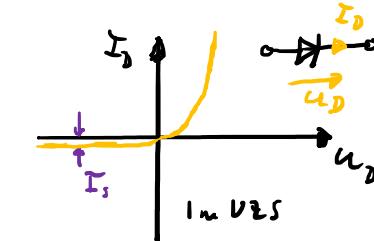
Ersatzschaltbilder – Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Solarzelle:

$$I = I_{\text{Ph}} - I_D = I_{\text{Ph}} - I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{m \cdot U_T}} - 1 \right)$$

Shockley Gleichung:

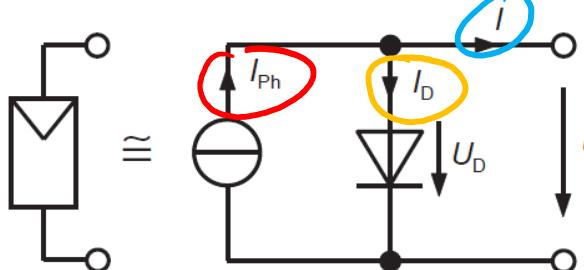
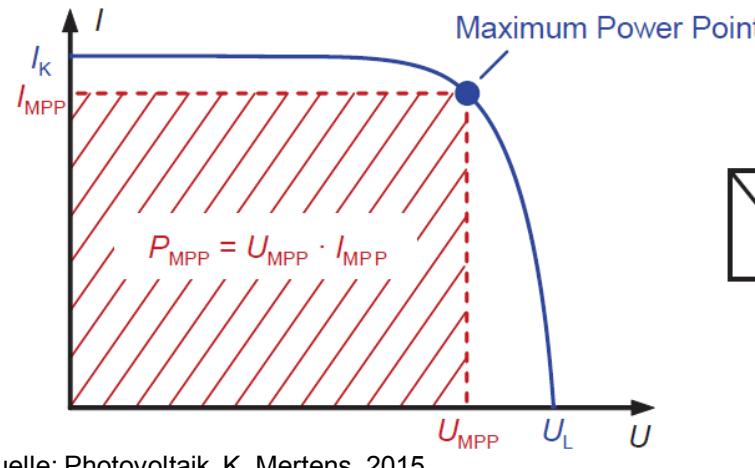
$$I_D = f(U_D)$$

$$I_D = I_s \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$$

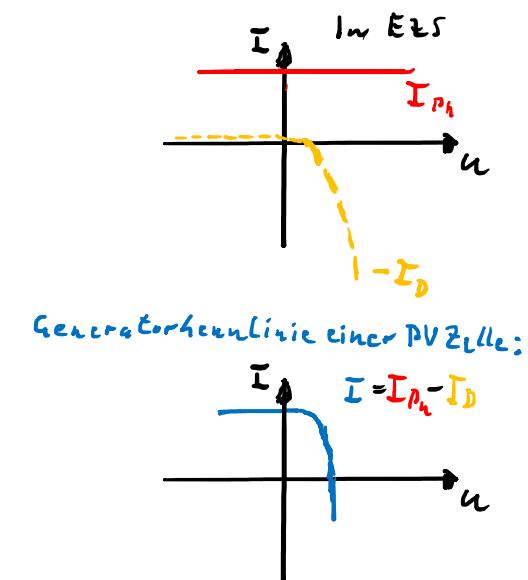


- Shockley-Gleichung (Strom-Spannungskennlinie einer idealen Diode {m = 1} im Durchlassbereich (Großsignalverhalten))

- I_{Ph} : Photostrom – hängt von der Bestrahlungsstärke E ab
- I_s : Sättigungsstrom der Diode in Sperrrichtung (Größenordnung $\approx 10^{-10}\text{A}$)
- U_T : Temperaturspannung = 25,7 mV bei Raumtemperatur 25°C
- m: Diodenfaktor (ideale Diode: m = 1, reale Diode: $1 < m \leq 5$)



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

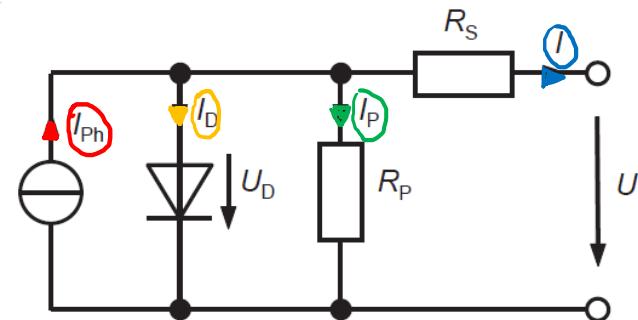


■ Ersatzschaltbilder – Erweitertes Ersatzschaltbild einer Solarzelle :

für eine genauere Beschreibung:

- Serienwiderstand R_S : berücksichtigt Spannungsfall bei der Wanderung der Ladungsträger vom Halbleiter zu den elektrischen Kontakten inkl. Kontakt-Übergangswiderstand (möglichst klein, einige mΩ)
- Parallelwiderstand R_P : berücksichtigt Leckströme längs der Kanten der Solarzelle (möglichst groß, deutlich > 10 Ω)
- Beide Widerstände bewirken eine Verflachung der Strom-Spannungs-Kennlinien von Solarzellen

„Ein-Dioden-Modell“ – Das Standardmodell

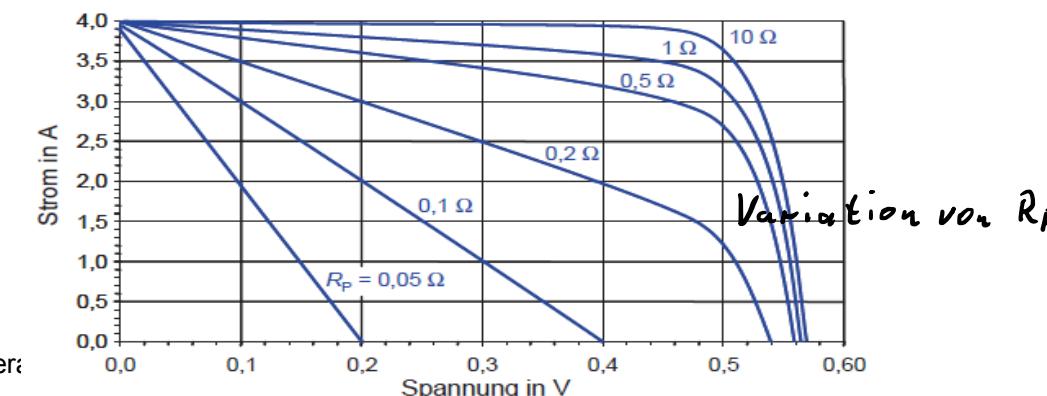
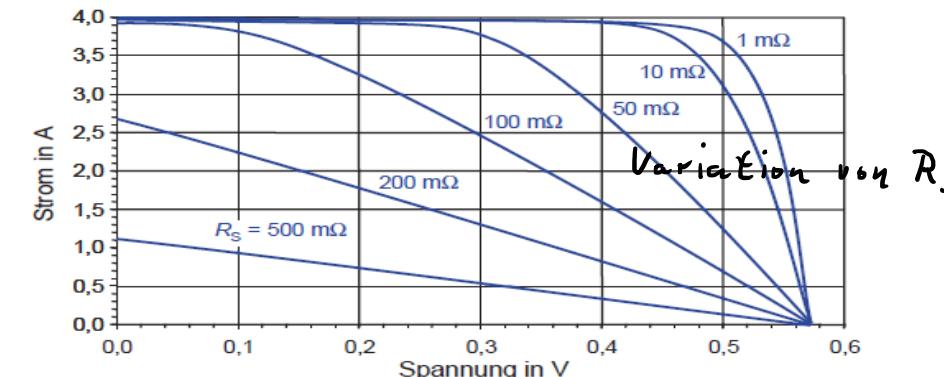


$$I = I_{Ph} - I_D - I_P$$

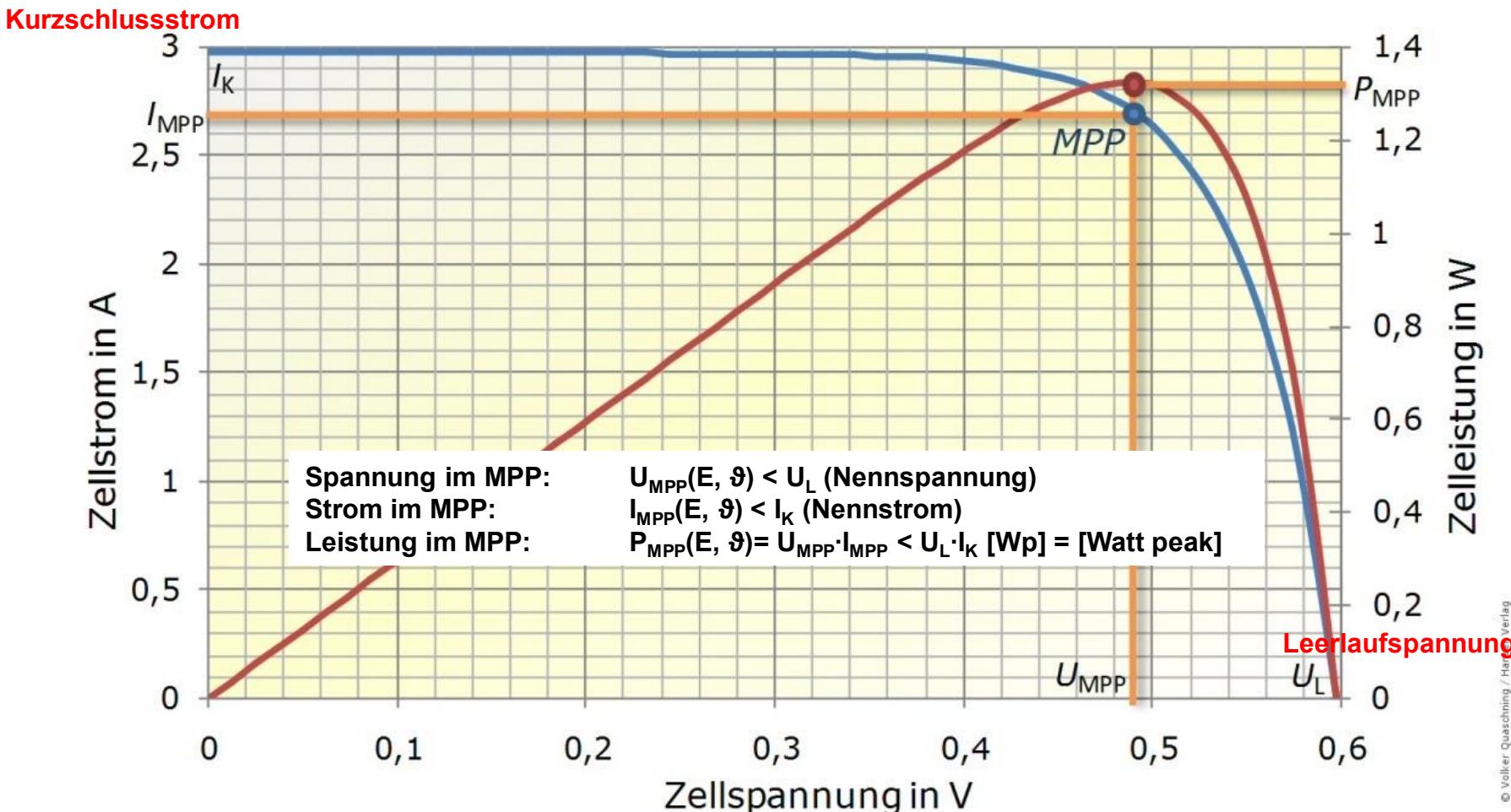
$$I_P = \frac{U_D}{R_P} = \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$$

$$I = I_{Ph} - I_S \cdot \left(e^{\frac{U+I \cdot R_S}{m \cdot U_T}} - 1 \right) - \frac{U + I \cdot R_S}{R_P}$$

Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



- Strom-Spannungs- und Leistungs-Spannungs-Kennlinie einer kristallinen Si-Solarzelle:



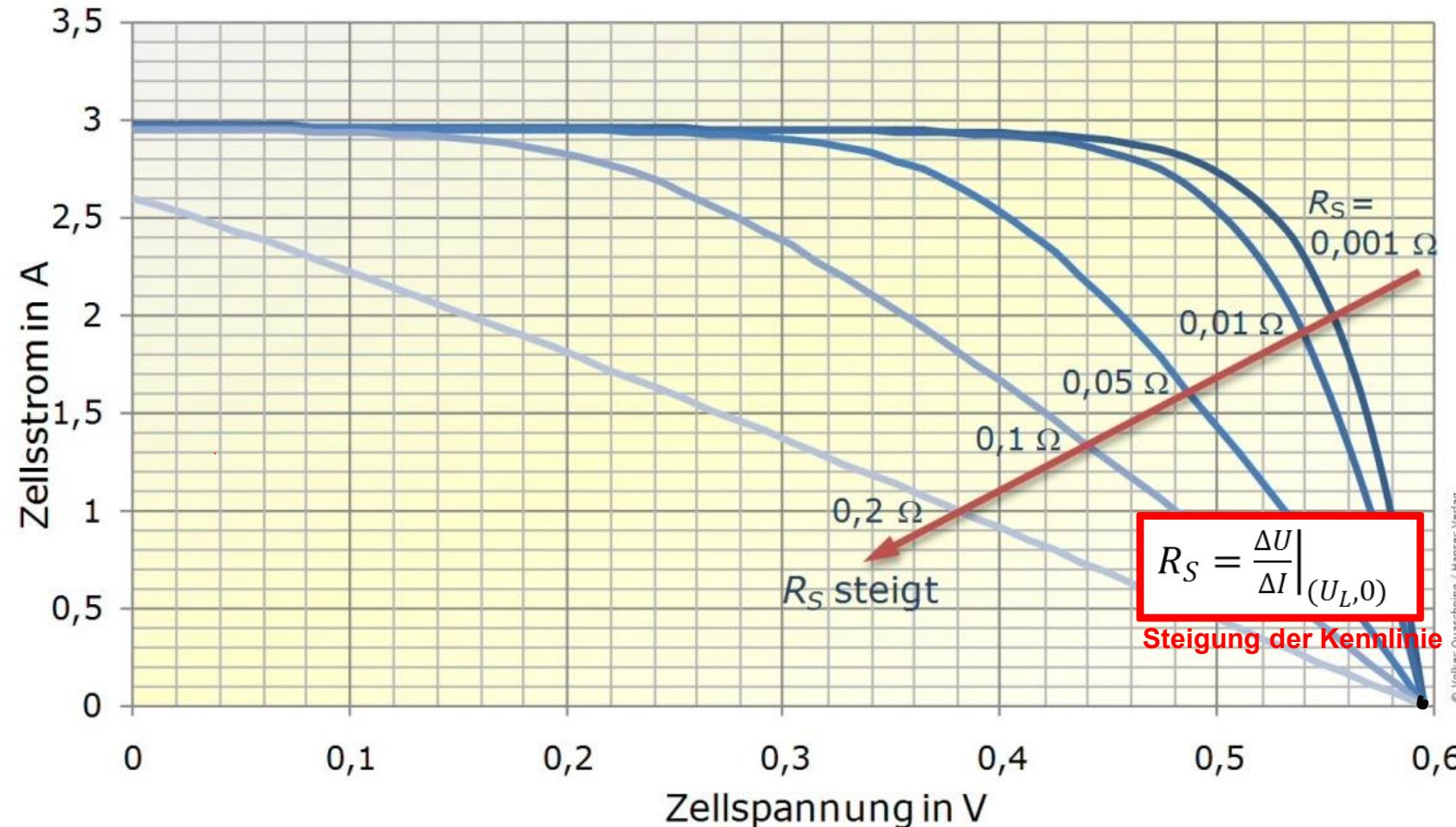
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Strom-Spannungs-Kennlinie



- Einfluss des Serienwiderstands R_S auf den Verlauf der I-U-Kennlinie einer Solarzelle:



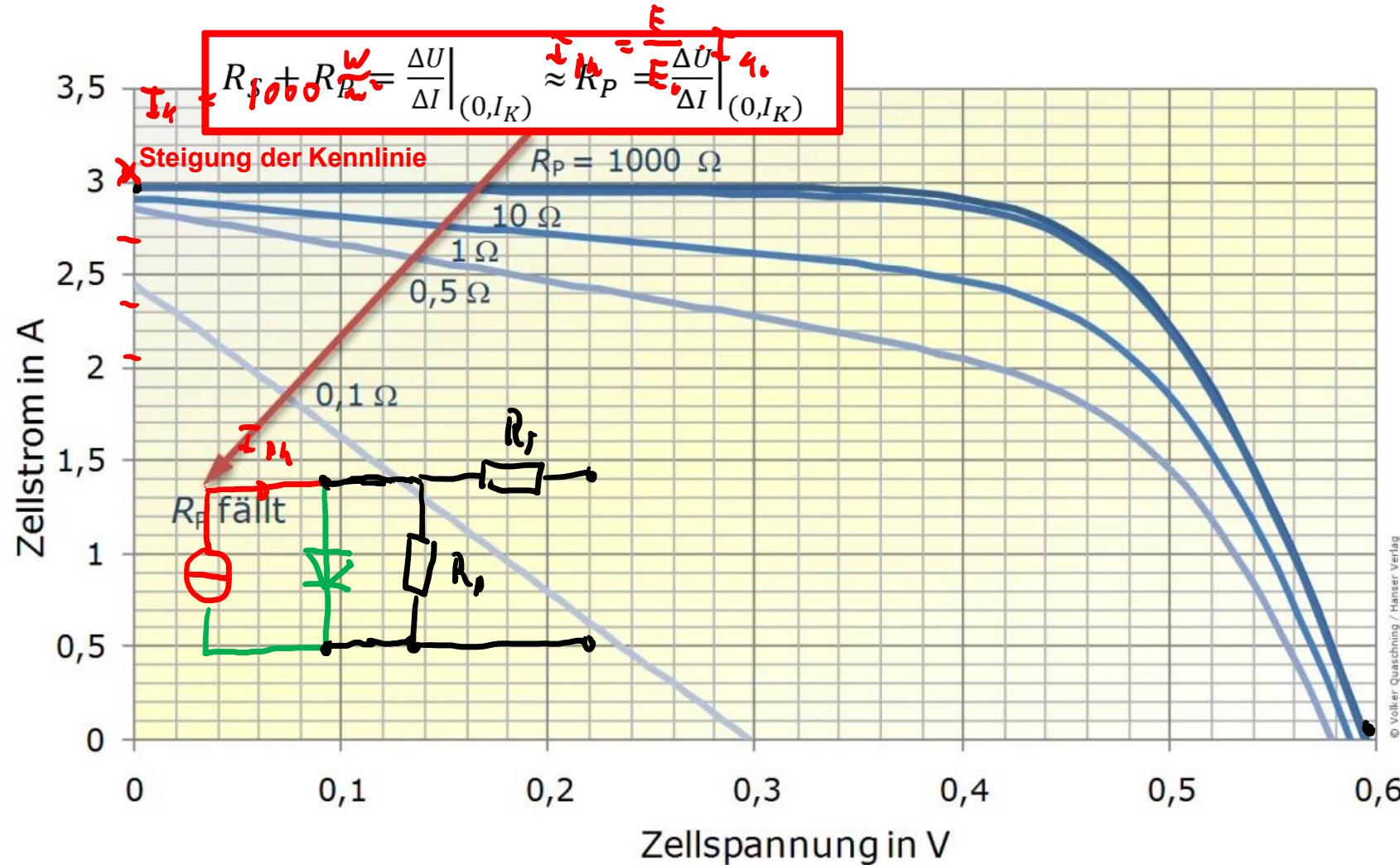
© Volker Quaschning / Hanser Verlag
Regenerative Energiesysteme

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Strom-Spannungs-Kennlinie

- Einfluss des Parallelwiderstands R_P auf den Verlauf der I-U-Kennlinie einer Solarzelle:

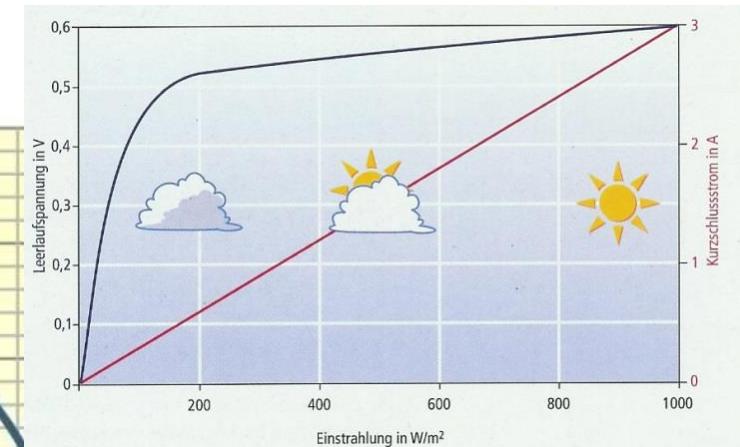
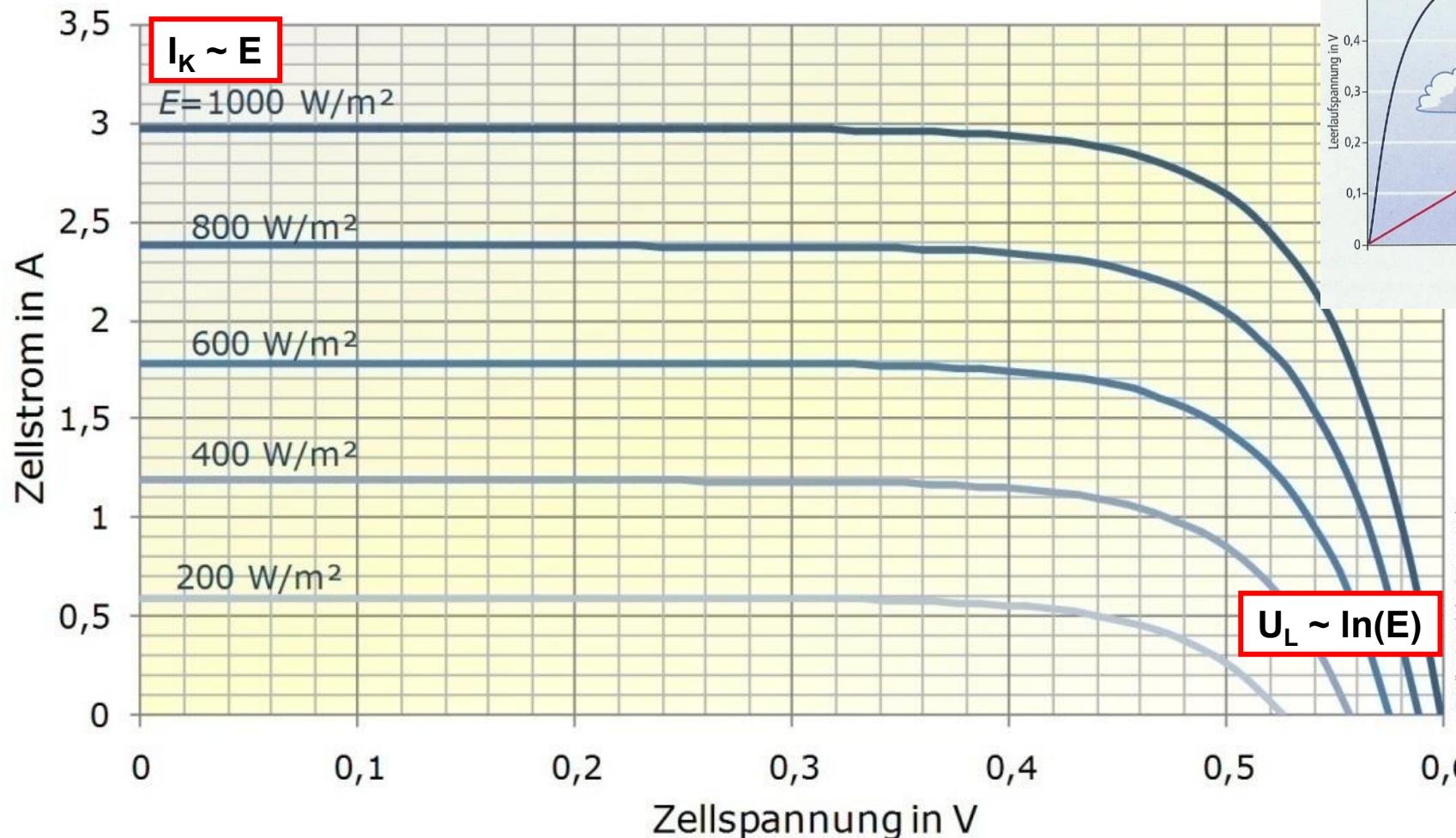


Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Strom-Spannungs-Kennlinie

- Einfluss der Bestrahlungsstärke E :



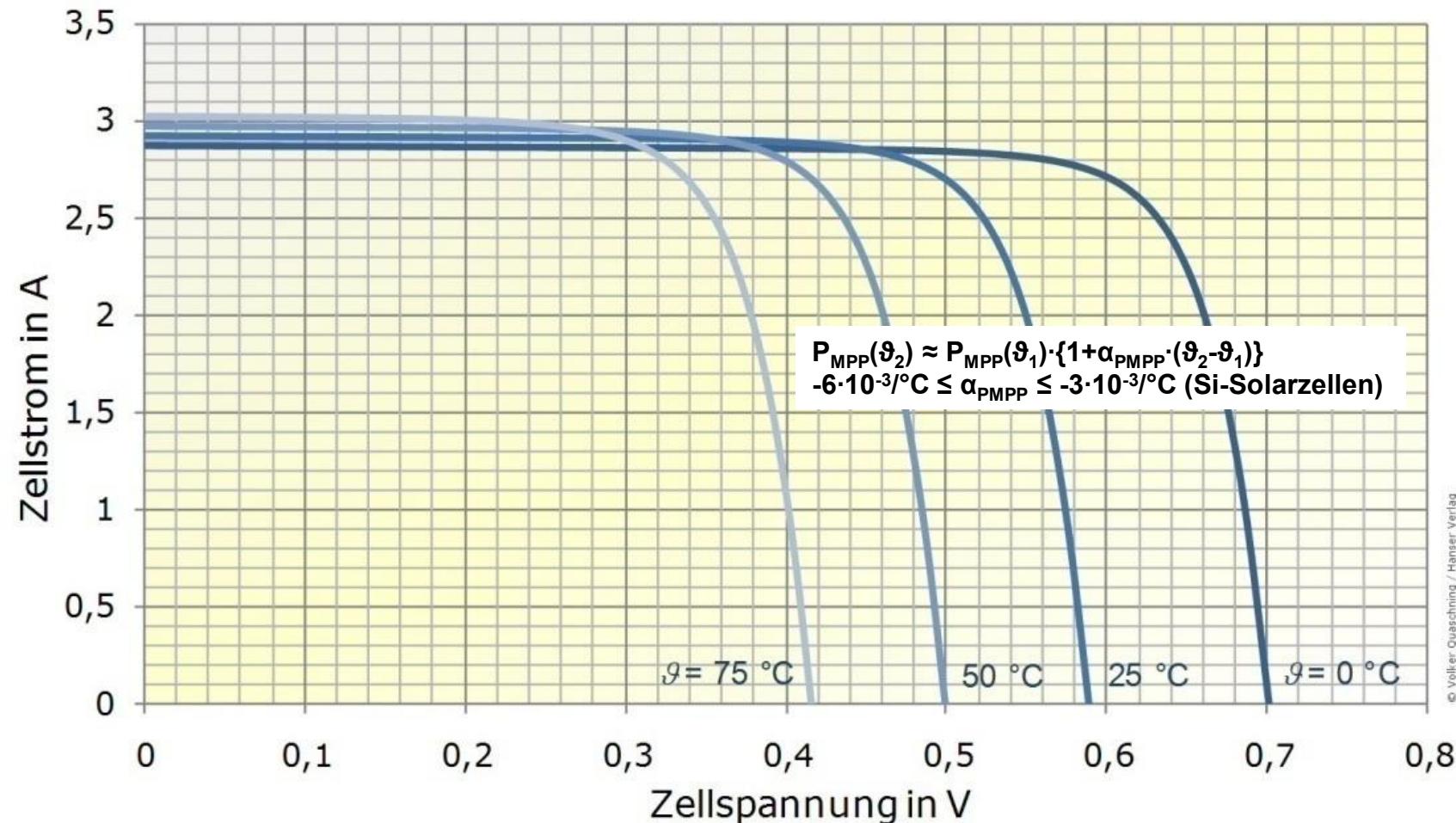
© Volker Quaschning / Hanser Verlag
»Regenerative Energiesysteme«

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Strom-Spannungs-Kennlinie



- Einfluss der Zelltemperatur:

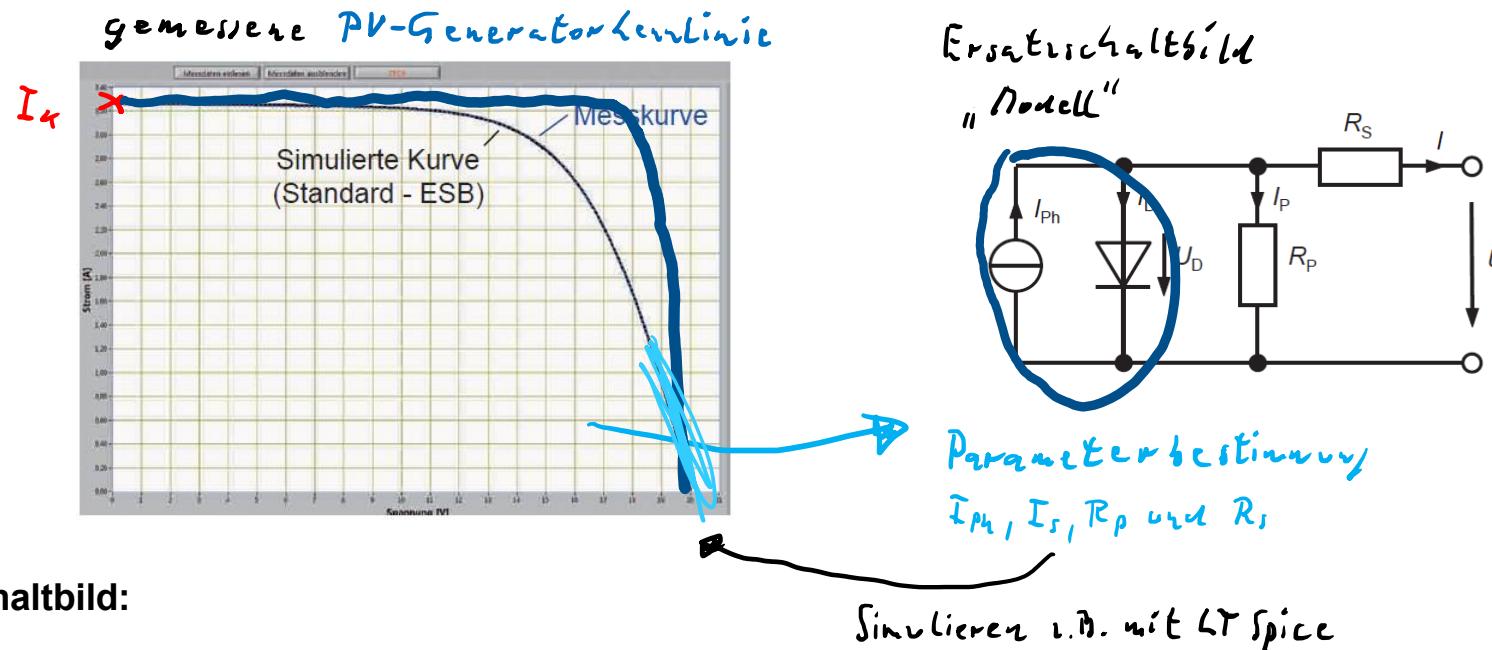


Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Parameterbestimmung

- Ziel aller Ersatzschaltbilder bzw. Solarzellenmodelle ist es, die Kennlinien der Solarzellen mit ausreichender Qualität mathematisch zu beschreiben. Sie helfen beim theoretischen Verständnis und bilden die Grundlage für Mess- und Regeleinrichtungen in der Photovoltaik (z.B. MPP-Regler) oder für Simulationsprogramme. Deshalb müssen die die Kennlinien beschreibenden Zellparameter messtechnisch und / oder rechnerisch bestimmt werden.



- Vereinfachtes Ersatzschaltbild:

➤ I-U-Kennlinie:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \cdot (e^{\frac{U_D}{m \cdot U_T}} - 1)$$

➤ Photostrom $I_{Ph} \approx I_K$ → Datenblattangabe oder Messung des Kurzschlussstroms I_K

$$\Rightarrow \text{Für } I_0 (U_{pv}=0): I_0 = I_{Ph} - I_S \cdot \left(e^{\frac{0}{m \cdot U_T}} - 1 \right) \Rightarrow I_0 = I_{Ph} - 0 \Rightarrow I_0 = I_{Ph}$$

Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Elektrische Beschreibung von Solarzellen

Parameterbestimmung



Vereinfachtes Ersatzschaltbild:

- I-U-Kennlinie:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \cdot (e^{\frac{U_D}{m \cdot U_T}} - 1)$$

$$Y = f(x)$$

$$I = f(U_D)$$

- Photostrom $I_{Ph} \approx I_K$

→ Datenblattangabe oder Messung des Kurzschlussstroms I_K

- Sättigungsstrom I_S der Diode in Sperrrichtung:

$$\text{I: } I_{Ph} = I_A \quad (\text{Für } I_A(U_{ph}=0))$$

$$\text{II: Für } U_L(I_{ph}=0) \Rightarrow 0 = I_{Ph} - I_S \cdot (e^{\frac{U_L}{U_T}} - 1) \Rightarrow I_S = I_S \left(e^{\frac{U_L}{U_T}} - 1 \right) \Rightarrow I_S = \frac{I_A}{e^{\frac{U_L}{U_T}} - 1} \approx I_A \cdot e^{-\frac{U_L}{U_T}}$$

$$I_D \approx I_S \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}} \Rightarrow I_S = I_A \cdot e^{-\frac{U_L}{U_T}} \Rightarrow I_S = \frac{I_A}{e^{\frac{U_L}{U_T}}}$$

Eindiodenmodell (erweitertes Ersatzschaltbild):

- Zusätzlich zu bestimmen: R_S und R_P :
- Aus Tangente an Solarzellenkennlinie $I(U)$
- im Leerlaufpunkt ($U_L, 0$):

$$R_S = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{(U_L, 0)}$$

- Aus Tangente an Solarzellenkennlinie $I(U)$
- im Kurzschlusspunkt ($0, I_K$):

$$R_S + R_P = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{(0, I_K)}$$

$$\approx R_P \quad (\text{Normalerweise: } R_P \gg R_S)$$

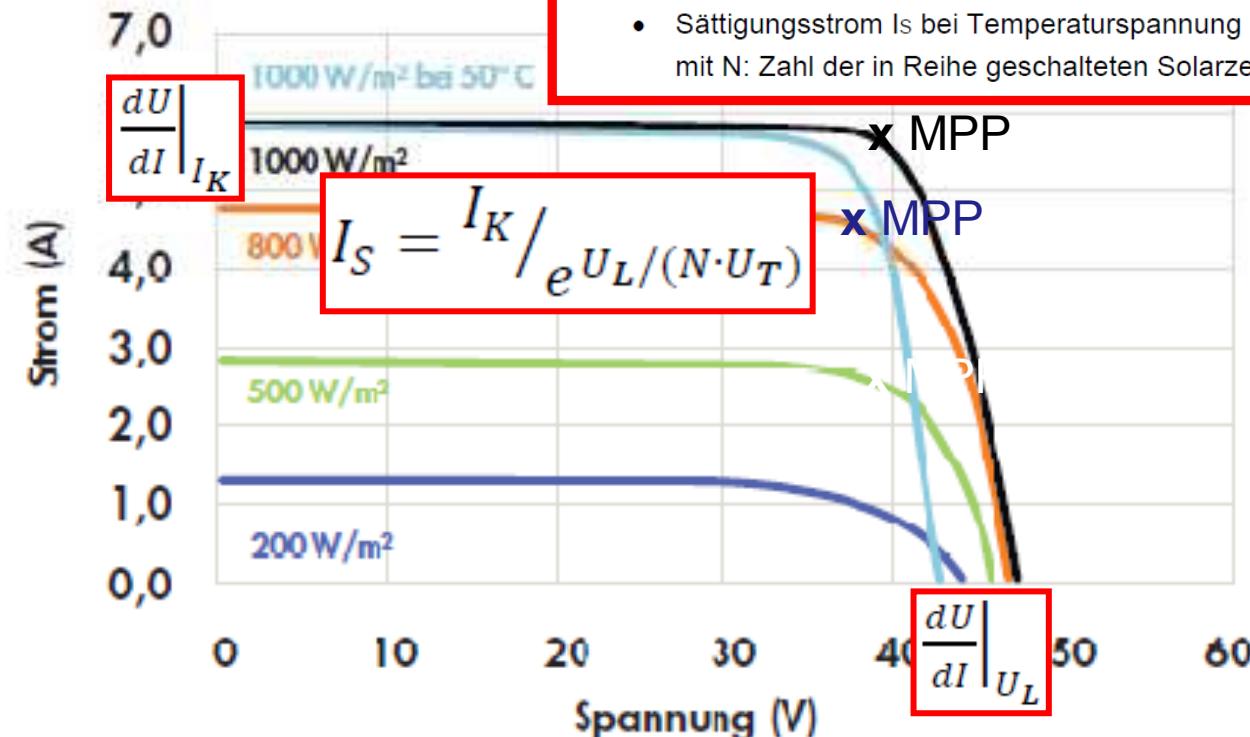
Hinweise zum Praktikum

1. Versuch: Solarzellenkennlinie

■ Kennwerte:

- U_L : Leerlaufspannung, steigt mit Bestrahlung
- I_K : Kurzschlussstrom, steigt mit Bestrahlung
- MPP: Punkt maximaler Leistung $P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}$

■ Strom-Spannungs-Kennlinie eines PV-Moduls



Praktikum: 1. Versuch

6.6 Ermitteln Sie aus der Kennlinie mit hoher Bestrahlungsstärke die nachfolgenden Kenngrößen, die Sie im zweiten Versuch EEP2 benötigen:

- Kurzschlussstrom I_K
- Leerlaufspannung U_L
- Serienwiderstand R_S aus der Steigung im Leerlaufpunkt: $R_S = \frac{dU}{dI}|_{U_L}$
- Parallelwiderstand R_P aus der Steigung im Kurzschlusspunkt: $R_P = \frac{dU}{dI}|_{I_K} - R_S$
- Sättigungsstrom I_S bei Temperaturspannung $U_T = 26 \text{ mV}$: $I_S = I_K / e^{U_L/(N \cdot U_T)}$ mit N: Zahl der in Reihe geschalteten Solarzellen.

Quelle: Datenblatt Solarmodul 220, Fa. Sunpower, www.sunpower.de

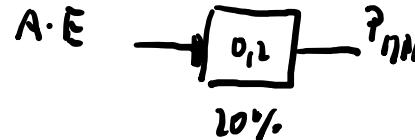
Arbeitspunkt der Solarzelle

■ Füllfaktor F:

- MPP im Verhältnis zu theoretisch max. Leistung
- FF dient als Qualitätskriterium für Solarzellen und gibt an, wie gut die I U-Kennlinie der Solarzelle dem Rechteck aus I_K und U_L angenähert ist.
- Typische Werte bei kristallinen Solarzellen: 0,75...0,85
- Wie erhalte ich einen hohen Füllfaktor?
 - R_s möglichst klein \Rightarrow steilerer Kurvenverlauf

$$F = \frac{P_{MPP}}{U_L \cdot I_K} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_L \cdot I_K} < 1$$

■ Wirkungsgrad:

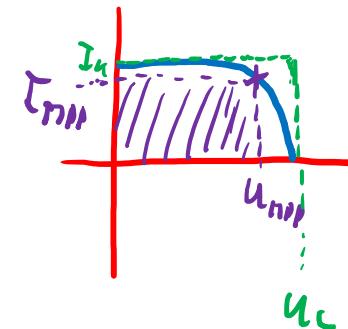


$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A \cdot E} = \frac{FF \cdot U_L \cdot I_K}{A \cdot E}$$

P_{MPP} : Max. Leistung
A: Fläche der Solarzelle
E: Bestrahlungsstärke in W/m^2

■ Erreichbarer Wirkungsgrad:

- Maximaler theoretischer Wirkungsgrad: $\eta_{max} \geq 30\%$
- Stand der Technik: $\eta = 12...25\%$
- **⇒ bei AM1,5 erreicht man eine max. Leistung $P_{MPP} = 250 W/m^2$**
(Faustformel: je installiertem Watt P_{MPP} ca. 1kWh pro Jahr)



$$U_c(v_i) = U_c(v_1) \cdot \left(1 + \alpha_u \cdot (v_i - v_1) \right)$$

aus Datenblatt mit 25°C STC

$$I_a(v_i) = I_a(v_1) \cdot \left(1 + \alpha_I \cdot (v_i - v_1) \right)$$

$$P_{max}(v_i) = P_{max}(v_1) \cdot \left(1 + \alpha_p \cdot (v_i - v_1) \right)$$

Normalverweise: $v_1 = 25^\circ\text{C}$ STC $E = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
→ aus Datenblatt

v_i = Temperatur bei welcher Sie U_c , I_a berechnen
wollen

Solarmodul-Flasher

- Mit einem „Flasher“ können die PV-Kennlinien in Bruchteilen von Sekunden unter STC-Bedingungen aufgenommen werden
- Diese Messkennlinien stellen die Leistungsdaten eines PV-Models dar und sind Grundlage des Datenblattes des betreffenden PV Moduls



Quelle: Ecoprogetti

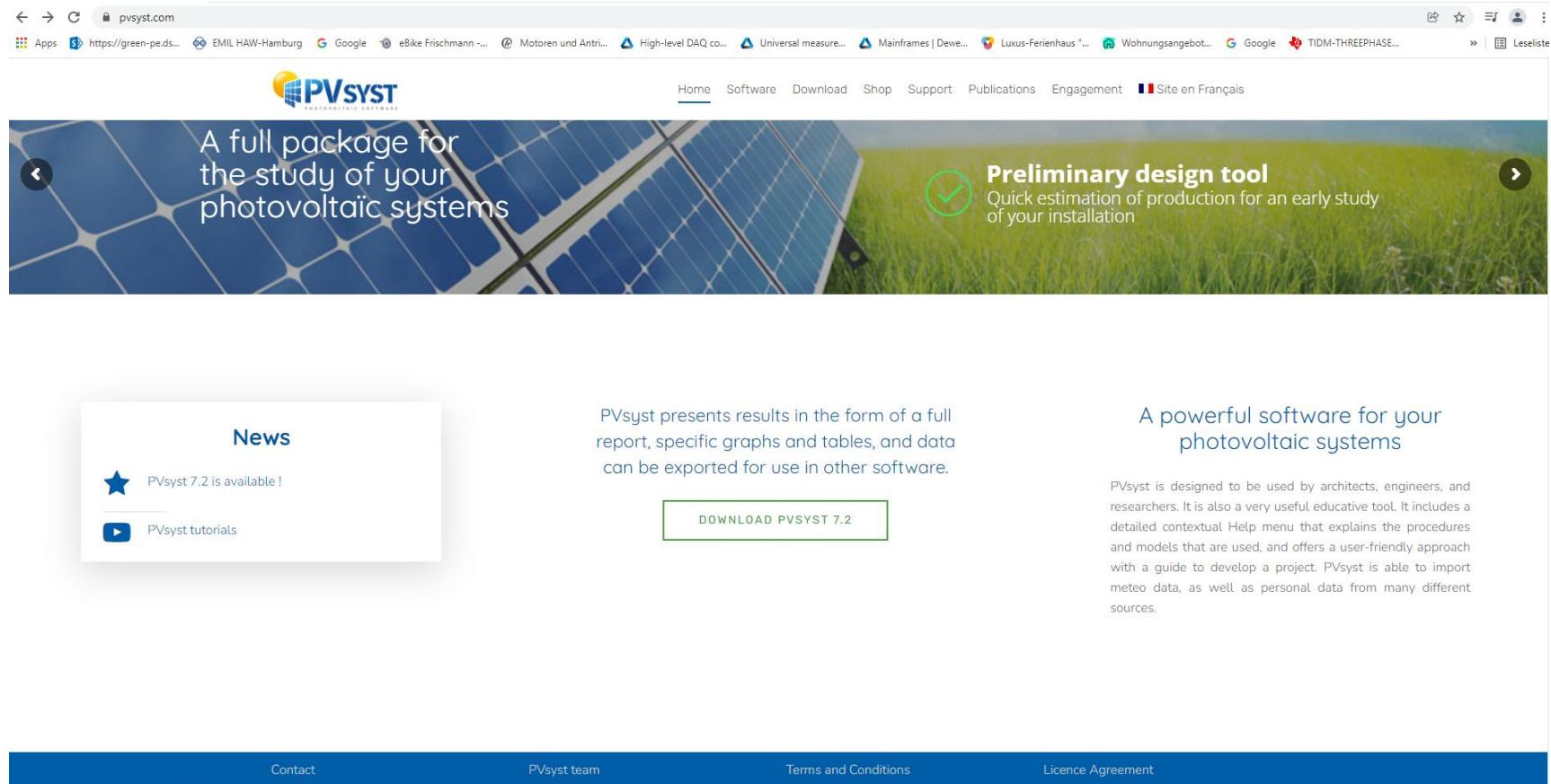
Das PV Simulationstool PVsyst

- Homepage and download trial version (Nur für 30 Tage gültig):

<https://www.pvsyst.com/>

- Tutorials:

https://www.youtube.com/channel/UCMzsEWHk3f7XD_dg1lmgmzg



The screenshot shows the official PVsyst website. At the top, there's a navigation bar with links to Home, Software, Download, Shop, Support, Publications, Engagement, and a language switcher (Site en Français). The main banner features a large image of solar panels with the text "A full package for the study of your photovoltaic systems". To the right, there's a callout for a "Preliminary design tool" with the subtext "Quick estimation of production for an early study of your installation". Below the banner, there's a "News" section with a star icon and the text "PVsyst 7.2 is available!" followed by a link to "PVsyst tutorials". To the right, there's a detailed description of the software's capabilities: "PVsyst presents results in the form of a full report, specific graphs and tables, and data can be exported for use in other software." A "DOWNLOAD PVSYST 7.2" button is located below this. Further down, another section highlights the software as "A powerful software for your photovoltaic systems" and describes its user base and data import capabilities.