

Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

10.1

1. Einleitung
2. Die Sonne als Energiequelle
3. Halbleiterphysikalische Grundlagen
4. Kristalline pn-Solarzellen
5. Elektrische Eigenschaften
6. Optimierung von Si-Solarzellen
7. Anorganische Dünnschichtsolarzellen
8. Third Generation Photovoltaics

9. PV-Systemtechnik

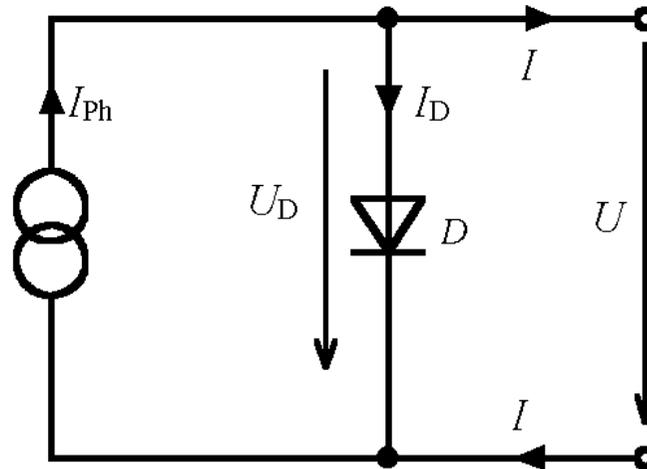
- 9.1 Kennlinienfelder
- 9.2 Erweiterung des Ersatzschaltbildes
- 9.3 Solarmodule
- 9.4 Photovoltaische Anwendungen
- 9.4 Spannungsanpassung

Erinnerung: I-U-Kennlinie im vereinfachten Ersatzschaltbild

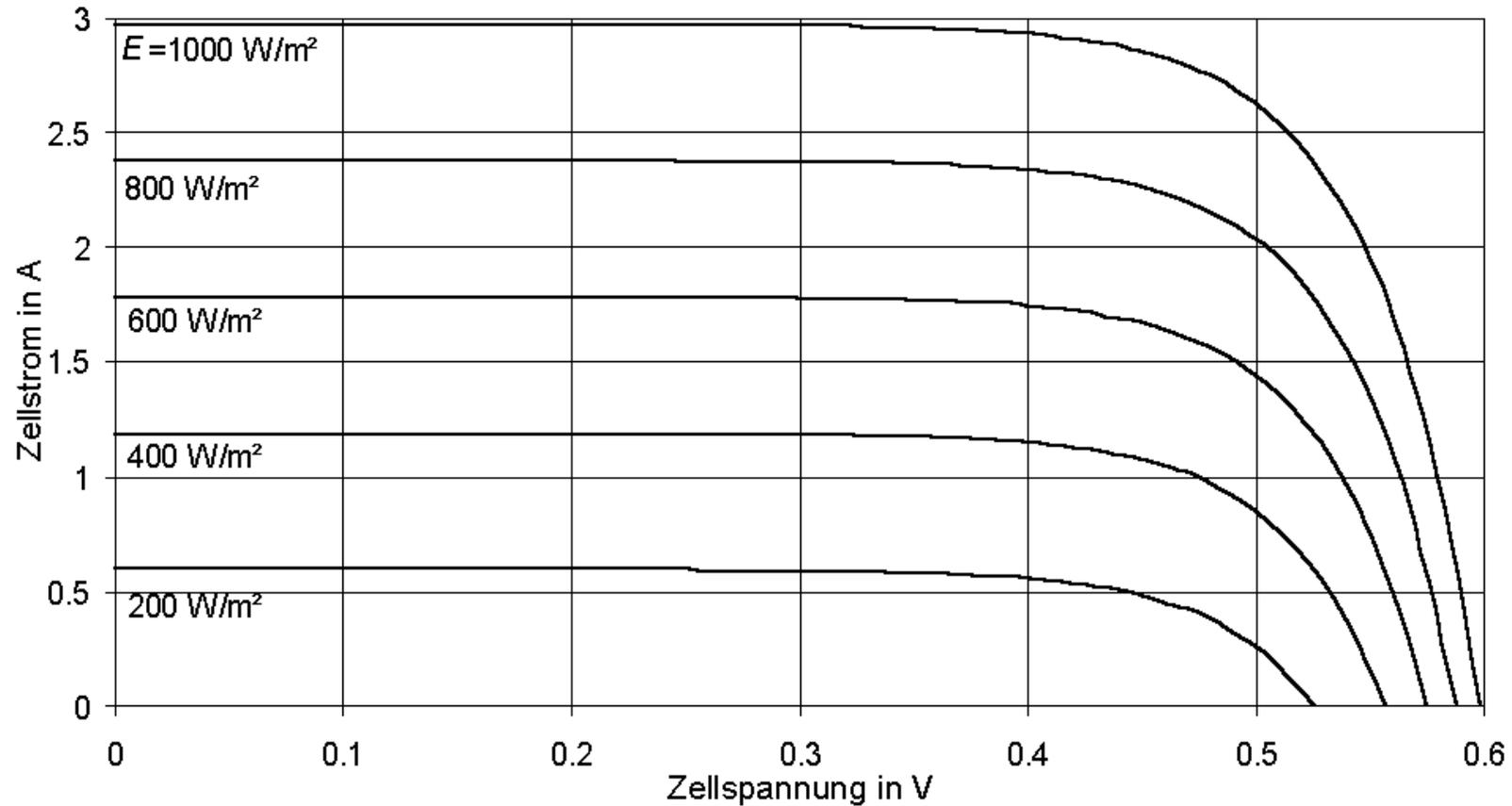
$$I = I_L - I_s \left(e^{\frac{eU}{mkT}} - 1 \right) = I_L - I_s \left(e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right); \text{ (Idealitätsfaktor } m)$$

$$I_L = A \cdot J_L = \text{const.} \cdot E; \text{ (Bestrahlungsstärke } E, \text{ Fläche } A)$$

$$I_s = AJ_s; J_s = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} \approx \frac{D_n n_i^2}{L_n n_A} + \frac{D_p n_i^2}{L_p n_D}$$



Bestrahlungsstärkenabhängigkeit

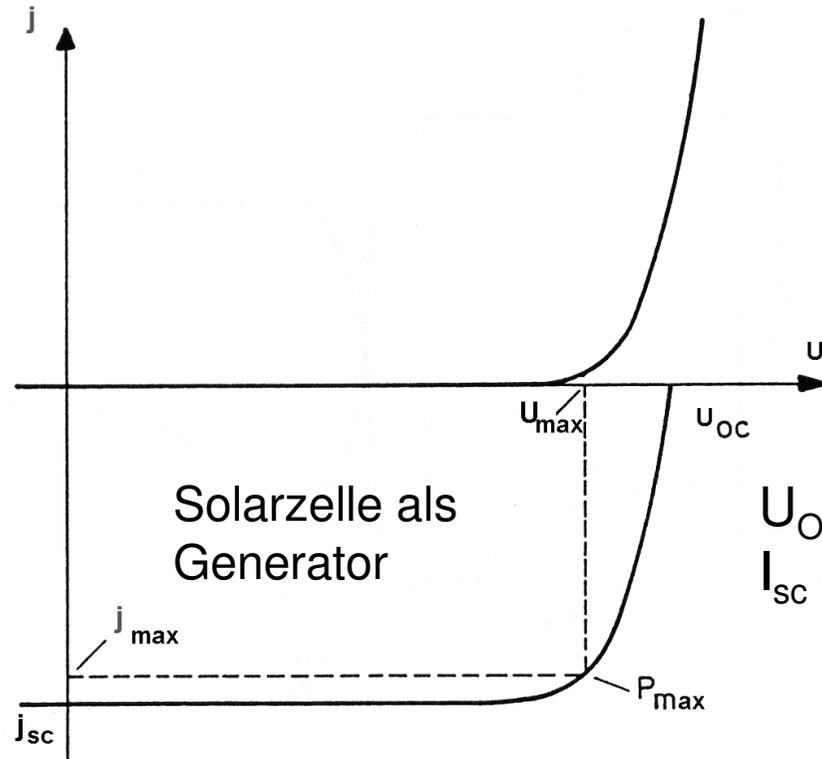


Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

(Kurzschluss) Photostromdichten sind proportional zur Bestrahlungsstärke
Leerlaufspannung variiert nur wenig (logarithmisch) mit der Bestrahlungsstärke

Kurzschluss- und Leerlaufbetrieb

10.4



Kennlinien einer infiniten Solarzelle

Solarzelle als Generator

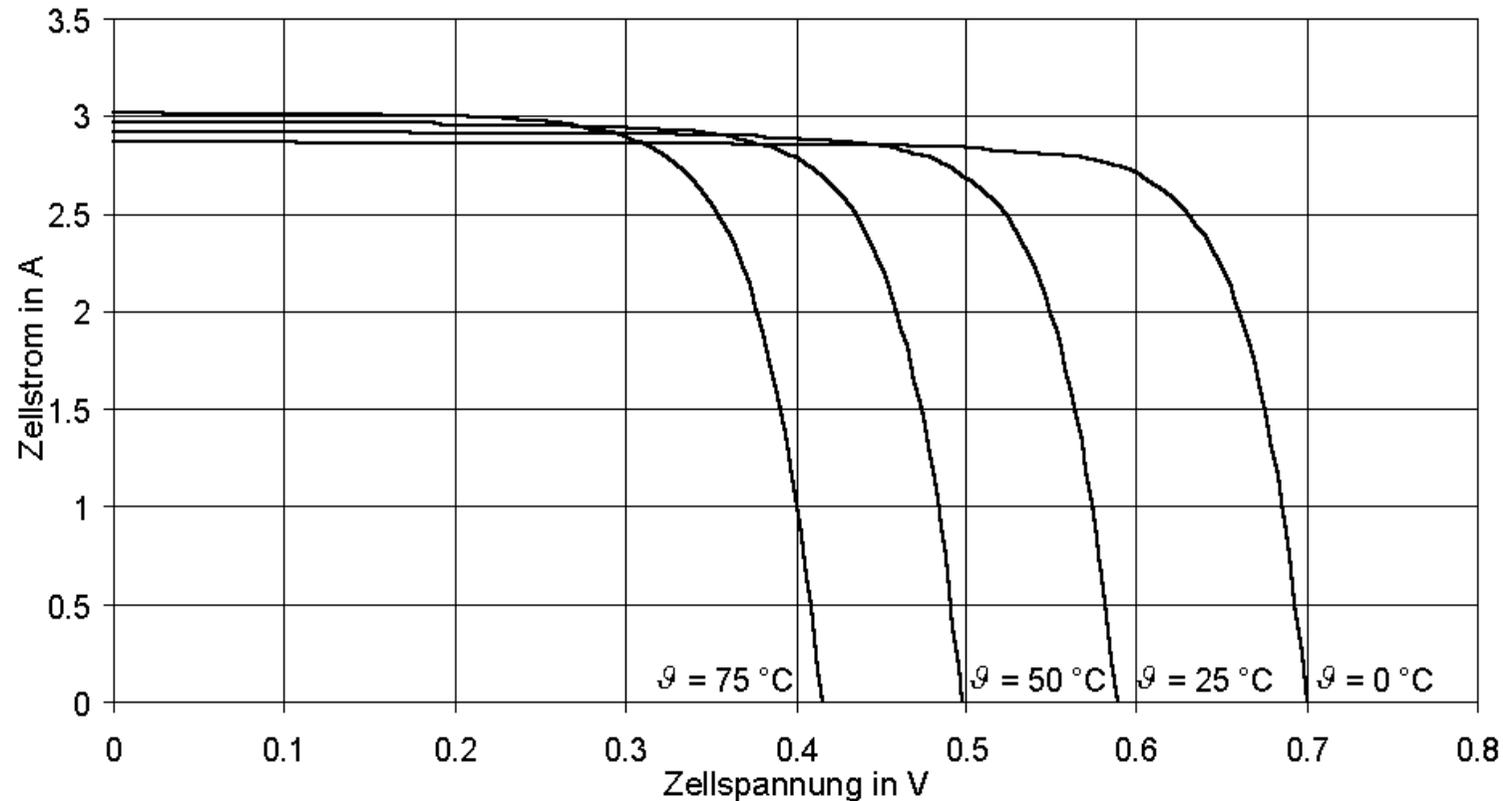
$U_{OC}; V_{OC}$: Leerlaufspannung (open circuit voltage)
 $I_{sc} J_{sc}$: Kurzschlussstrom (short circuit current)

Kurzschluss: $I = I_s \left(e^{\frac{eU}{mkT}} - 1 \right) - I_L : U = 0 \Rightarrow I_{sc} = -I_L = \text{const.} \cdot E$

Leerlauf: $I = 0 \Rightarrow U_{OC} = \frac{kT}{e} m \ln \left(\frac{I_L}{I_s} + 1 \right)$

Temperaturabhängigkeit der Solarzellenkennlinie

10.5



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

$$U_{OC} = m \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_{SC}}{I_S}\right)$$

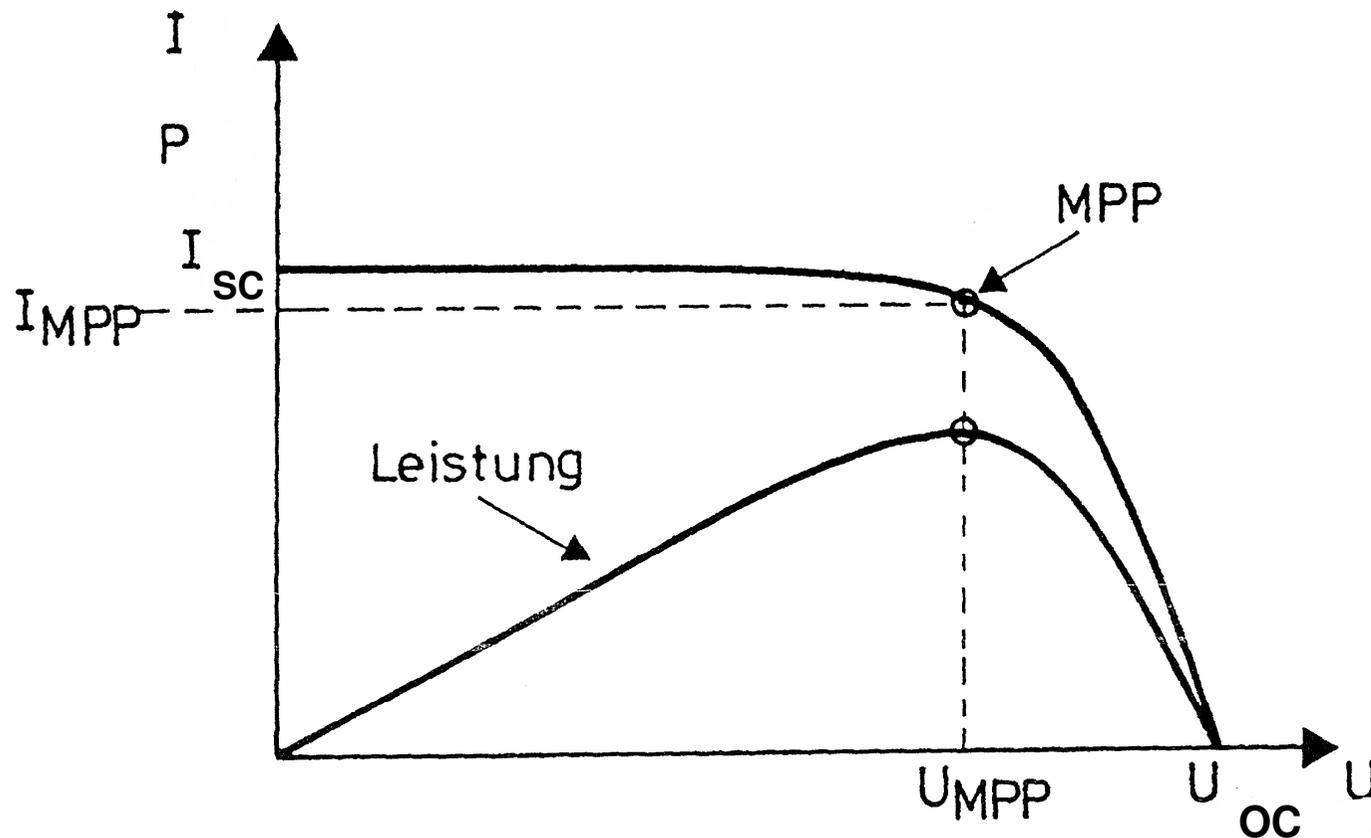
$$I_S \propto \exp\left(-\frac{W_G}{m \cdot kT}\right)$$

Leerlaufspannung U_{OC} über den Sperrsättigungsstrom I_S , stark abhängig von der Temperatur, weniger der Kurzschlussstrom $I_{SC} \Rightarrow$

MPP-Leistung fällt mit steigender Temperatur!

Leistungskurve einer Solarzelle

10.6



$$U_{MPP} = 0,75 \dots 0,9 U_{OC}$$

$$I_{MPP} = 0,85 \dots 0,95 I_{SC}$$

Maximum Power Point (MPP):

Erforderlicher Widerstand:

$$R = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}} \approx \frac{U_{OC}}{I_{SC}}$$

Spezifikation der Nennleistung W_p (Watt peak) eines Solarmoduls bei Standard-Testbedingungen: $T=25^\circ\text{C}$, $AM=1,5$, $E=1000 \text{ W/m}^2$

Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

10.7

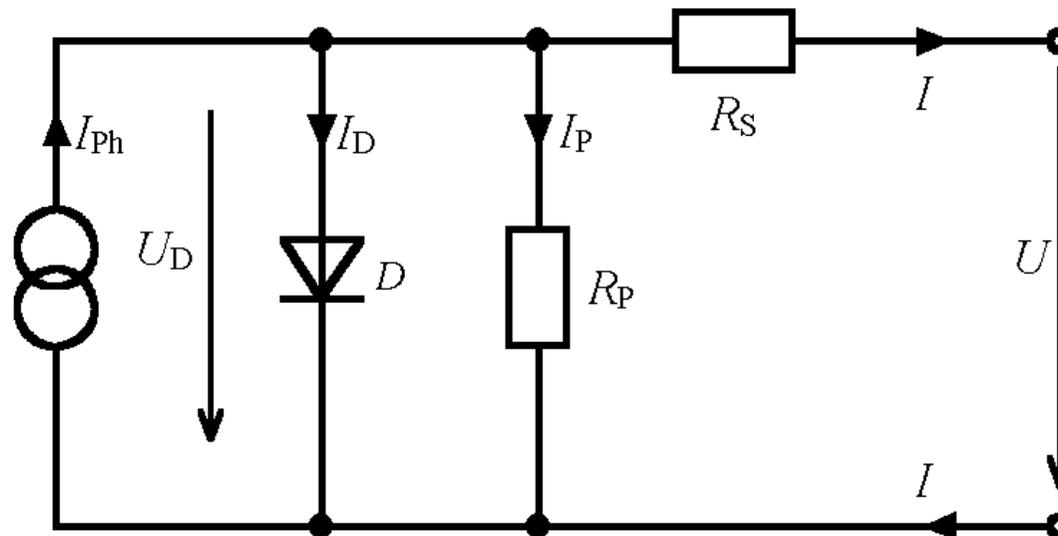
1. Einleitung
2. Die Sonne als Energiequelle
3. Halbleiterphysikalische Grundlagen
4. Kristalline pn-Solarzellen
5. Elektrische Eigenschaften
6. Optimierung von Si-Solarzellen
7. Anorganische Dünnschichtsolarzellen
8. Third Generation Photovoltaics
- 9. PV-Systemtechnik**
 - 9.1 Kennlinienfelder
 - 9.2 Erweiterung des Ersatzschaltbildes
 - 9.3 Solarmodule
 - 9.4 Photovoltaische Anwendungen
 - 9.4 Spannungsanpassung

Erinnerung: I-U-Kennlinie im erweiterten Ersatzschaltbild

10.8

Eindiodenmodell:

$$I = I_L - I_s \left[e^{\frac{U + R_s I}{m U_T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p}$$



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

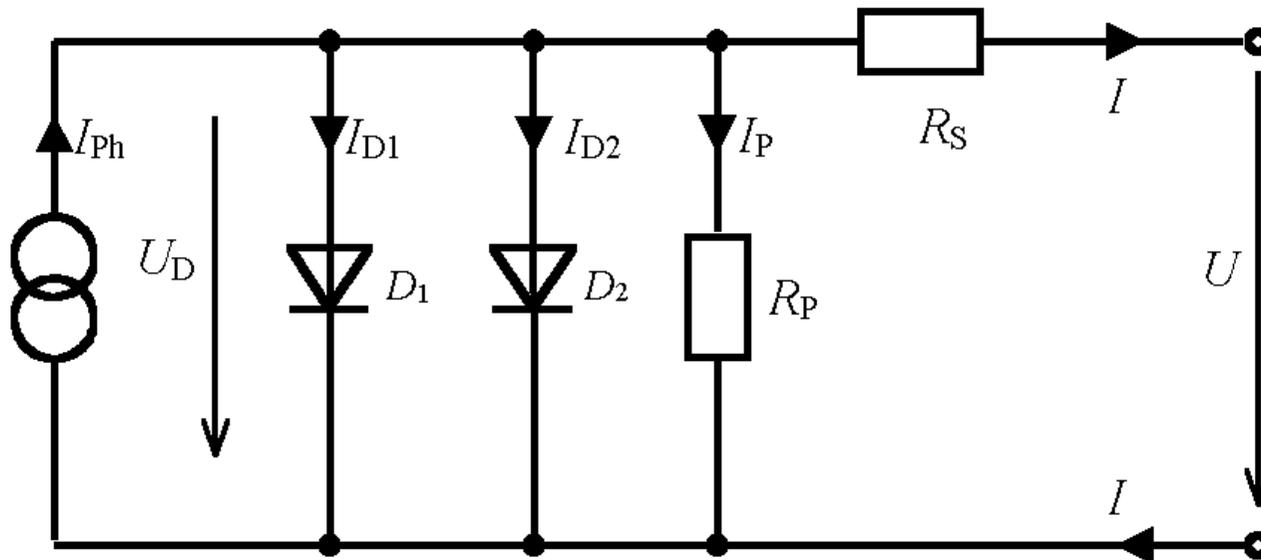
Serienwiderstand R_S (Bahnwiderstand, Kontakte,..)
Parallelwiderstand R_P (Leckströme)

Erinnerung: I-U-Kennlinie im erweiterten Ersatzschaltbild

10.9

Zweidiodenmodell:

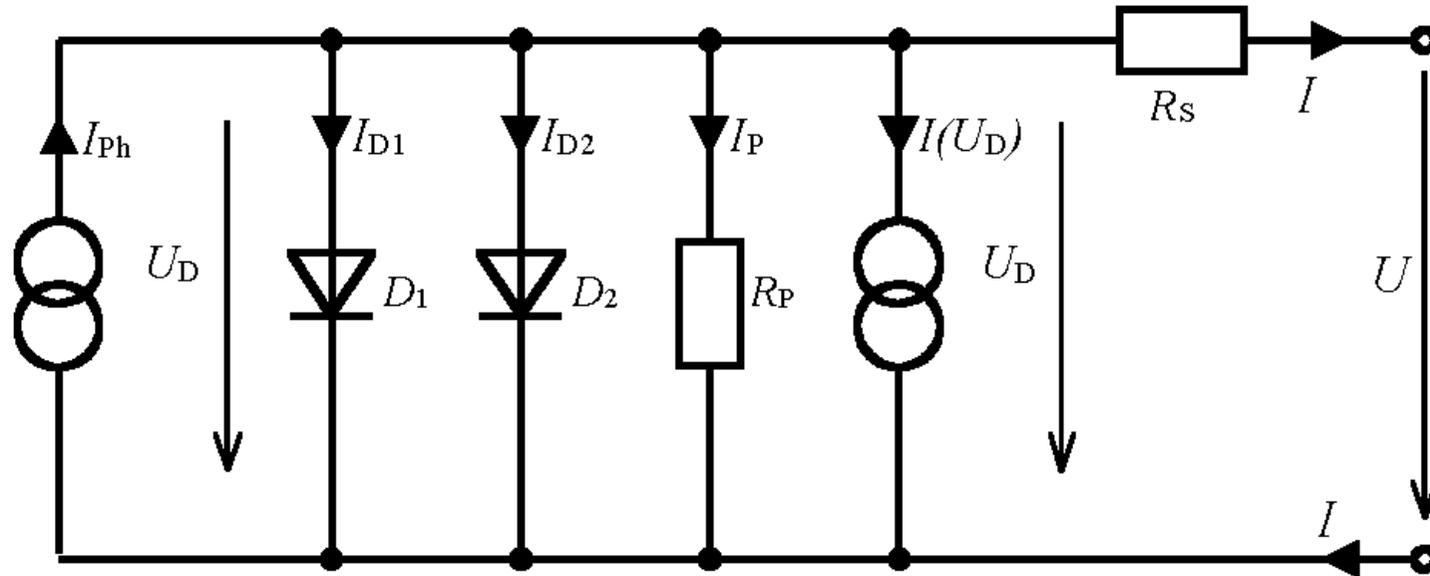
$$I = I_L - I_{s,1} \left[e^{\frac{U+R_s I}{m_1 U_T}} - 1 \right] - I_{s,2} \left[e^{\frac{U+R_s I}{m_2 U_T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p}$$



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Eine Diode dominiert durch Band-Band-Rekombination, die zweite Diode berücksichtigt die Störstellenrekombination.

Zweidiodenmodell mit Erweiterungsterm



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

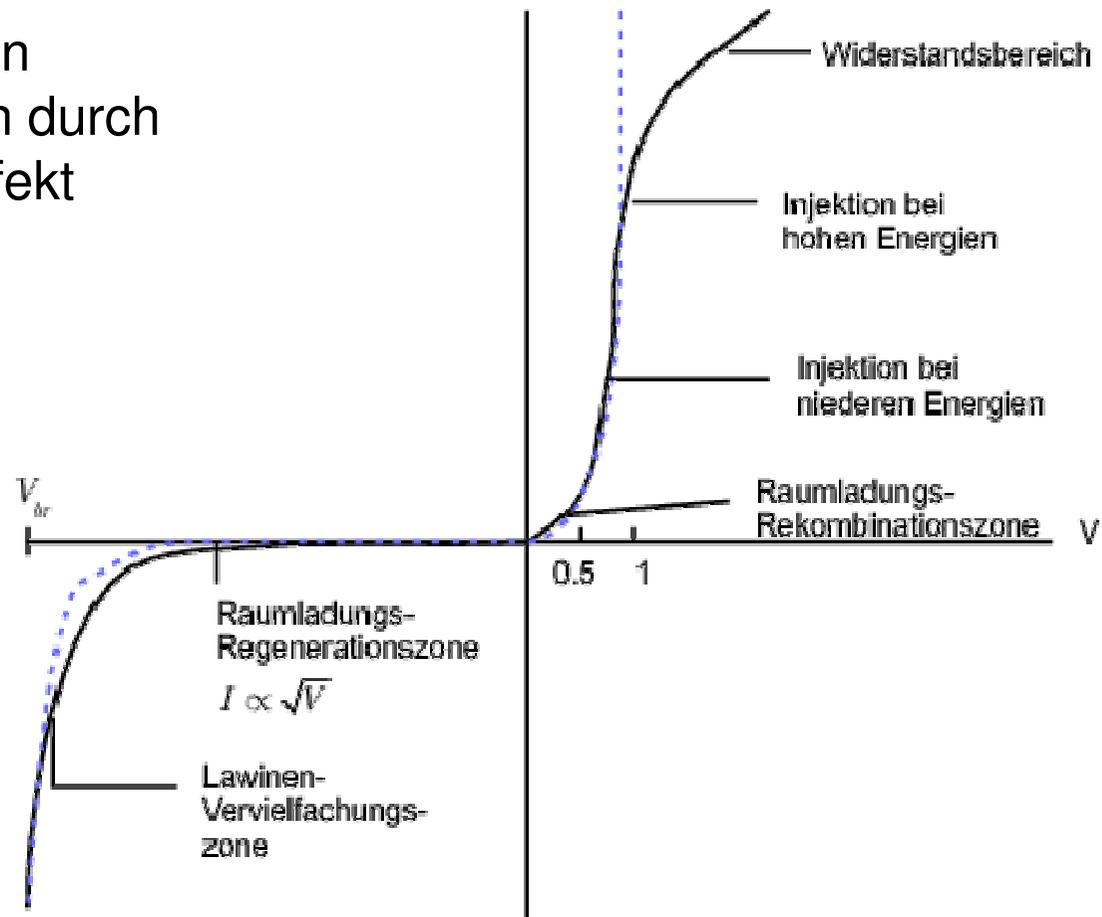
Zweite Stromquelle zur Berücksichtigung des Lawinendurchbruchs bei großen Rückwärtsspannungen:

$$I = I_L - I_{s,1} \left[e^{\frac{U+R_s I}{m_1 U_T}} - 1 \right] - I_{s,2} \left[e^{\frac{U+R_s I}{m_2 U_T}} - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_p} + b(U + IR_s) \left(1 - \frac{U + IR_s}{U_{Br}} \right)^{-n}$$

Lawineneffekt bei pn-Dioden

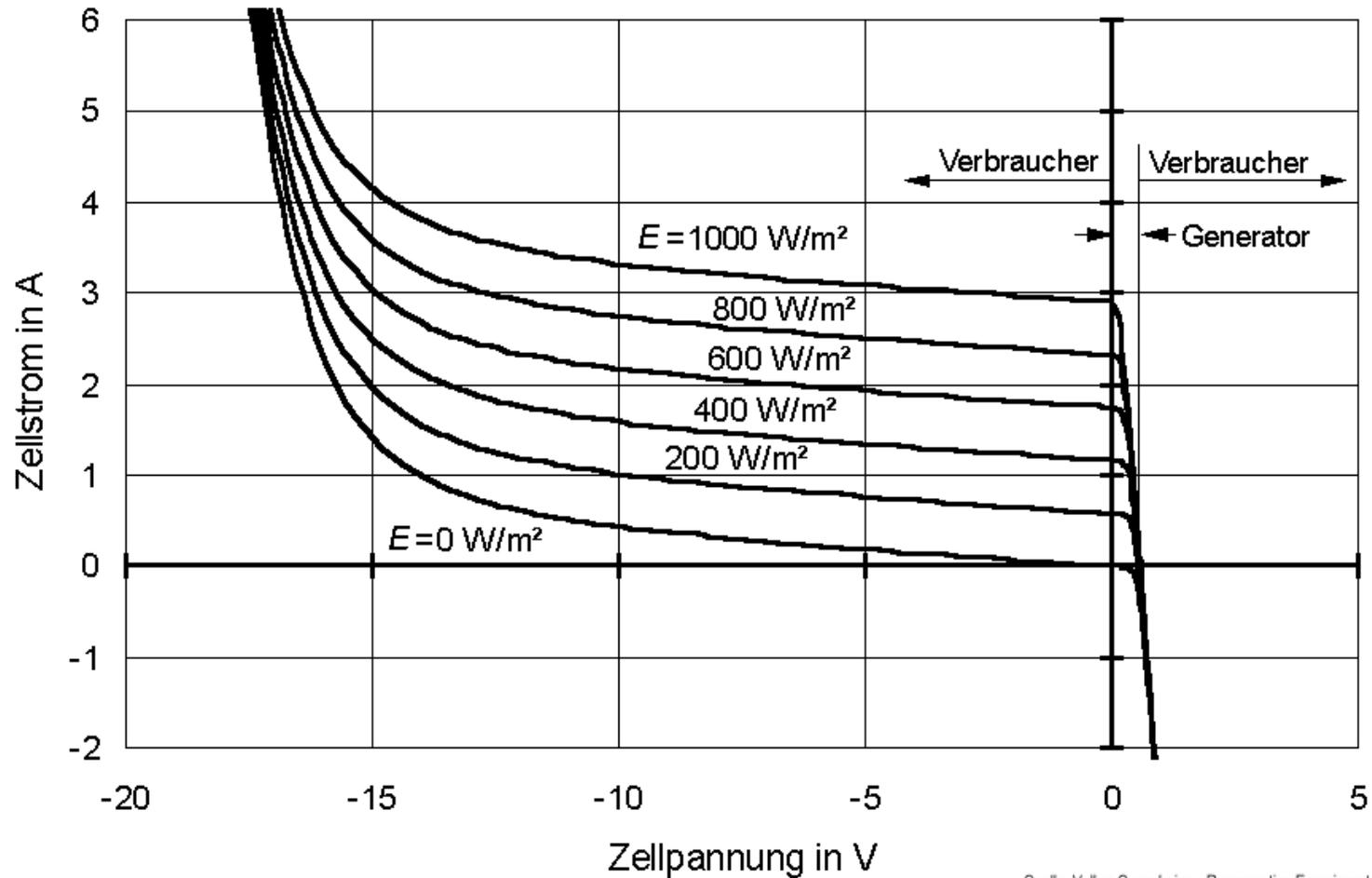
10.11

„Durchbruch“ bei hohen Rückwärtsspannungen durch Lawinen- und Zenerereffekt



Lawinendurchbruch bei Solarzellen

10.12



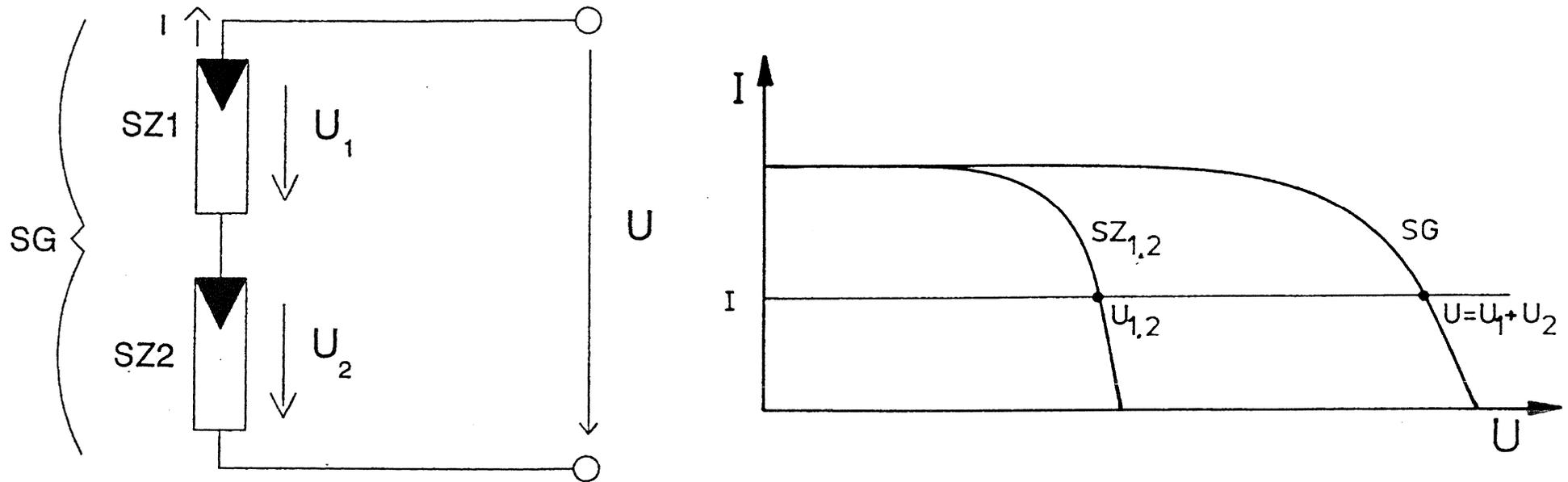
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

10.13

1. Einleitung
2. Die Sonne als Energiequelle
3. Halbleiterphysikalische Grundlagen
4. Kristalline pn-Solarzellen
5. Elektrische Eigenschaften
6. Optimierung von Si-Solarzellen
7. Anorganische Dünnschichtsolarzellen
8. Third Generation Photovoltaics
- 9. PV-Systemtechnik**
 - 9.1 Kennlinienfelder
 - 9.2 Erweiterung des Ersatzschaltbildes
 - 9.3 Solarmodule
 - 9.4 Photovoltaische Anwendungen
 - 9.4 Spannungsanpassung

Reihenschaltung von Solarzellen



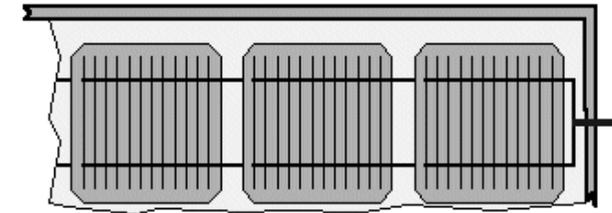
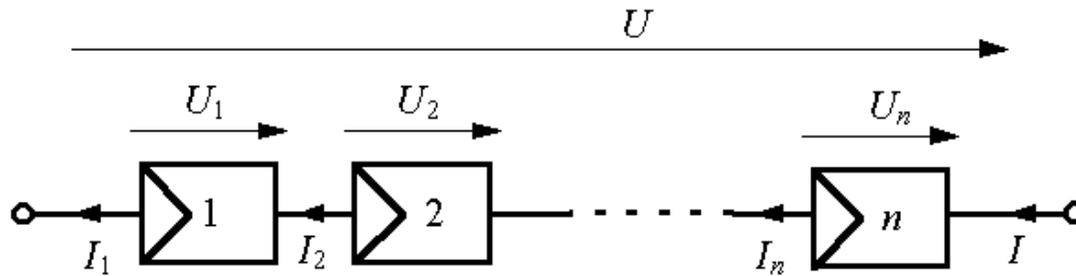
Addition der zu einem Stromwert gehörenden Spannungswerte

Standardmodul zur Aufladung von 12V-Batteriesystemen

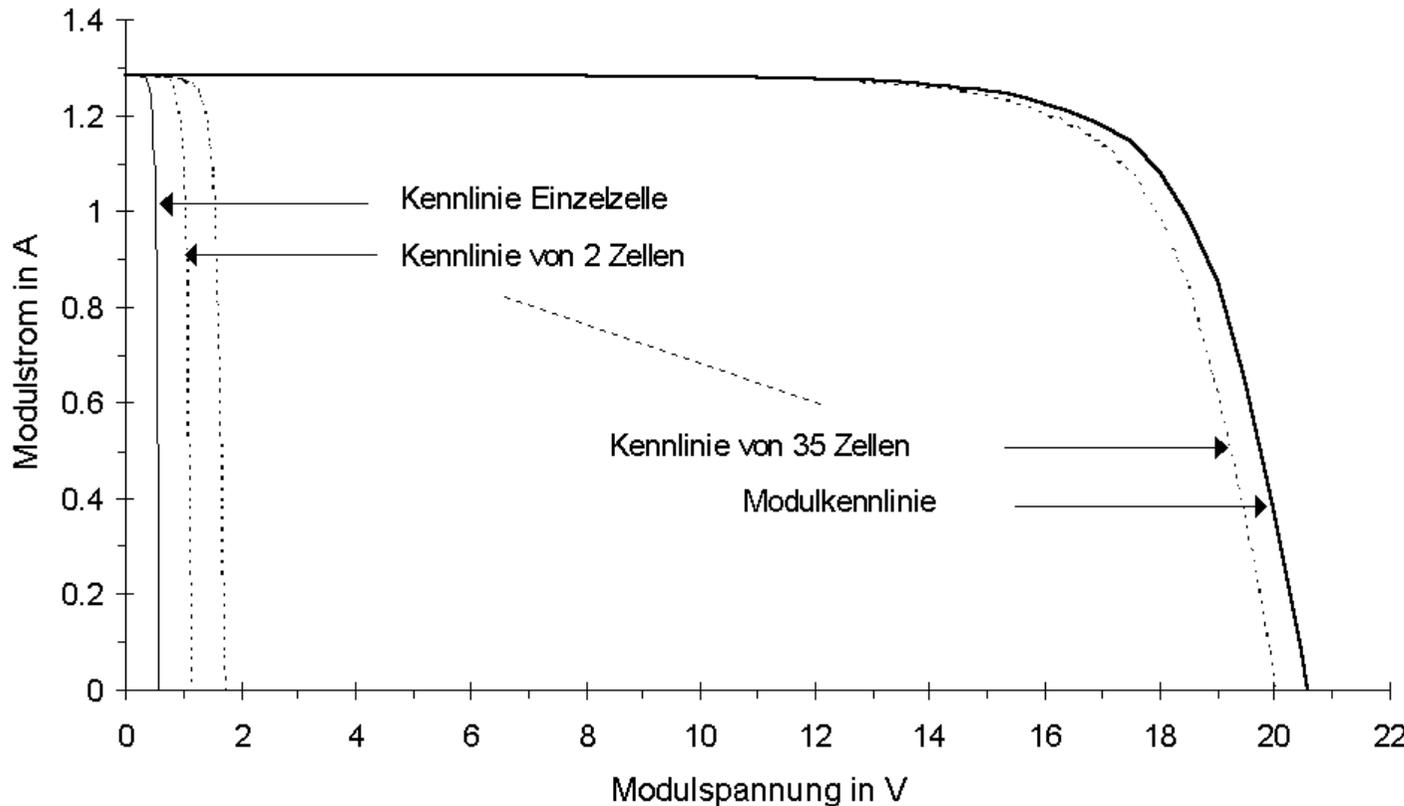
- besteht aus 36 Zellen
- besitzt eine MPP-Spannung von ca. 17 V
- Liefert eine Nennleistung von ca. 45 – 60 W

Konstruktion einer Modulkennlinie mit 36 Zellen

10.15



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme



$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

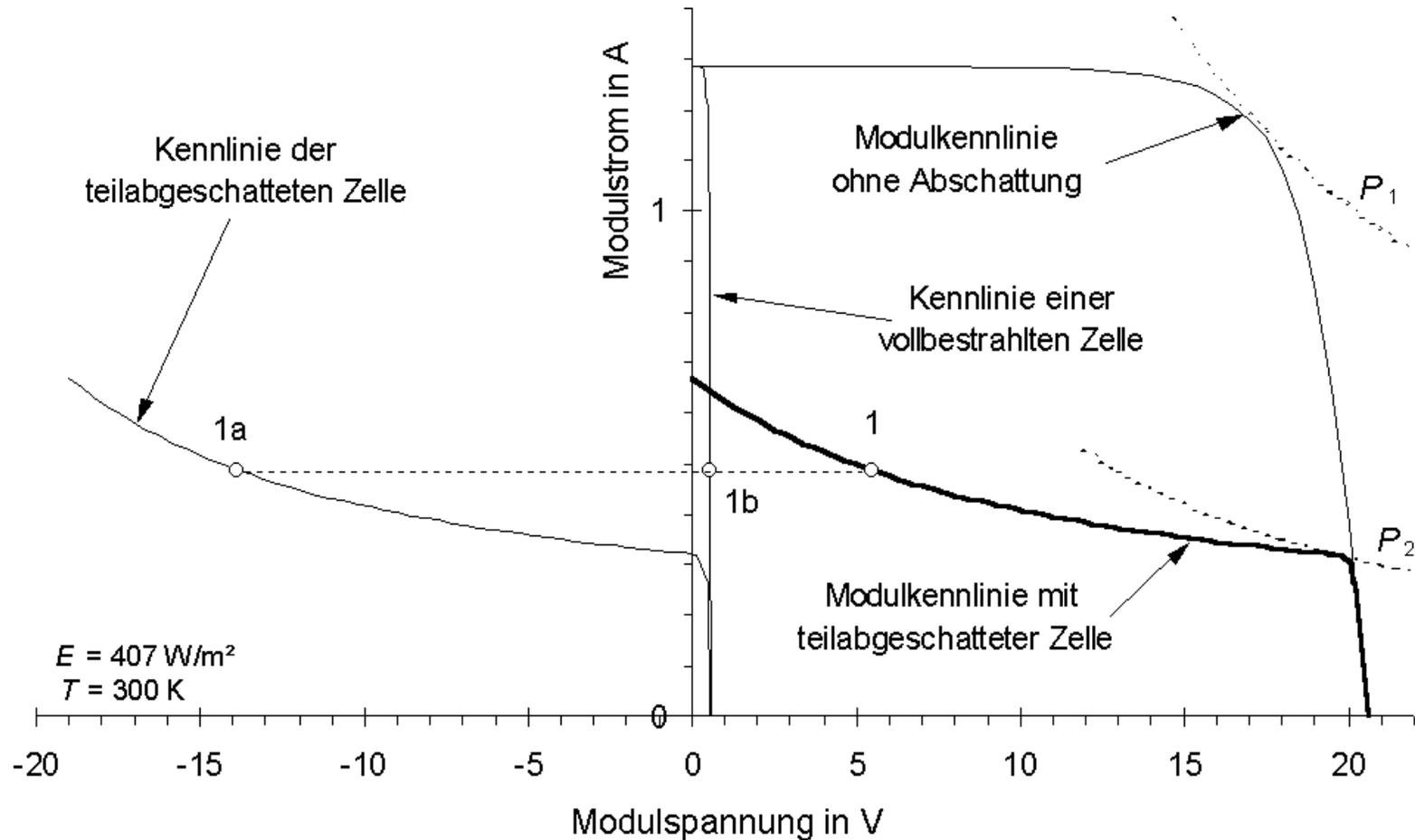
$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

$$I \approx I_{SC} - c_1 \cdot \exp(c_2 \cdot U)$$

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Teilabschattung eines Solarmoduls bei Serienschaltung

10.16



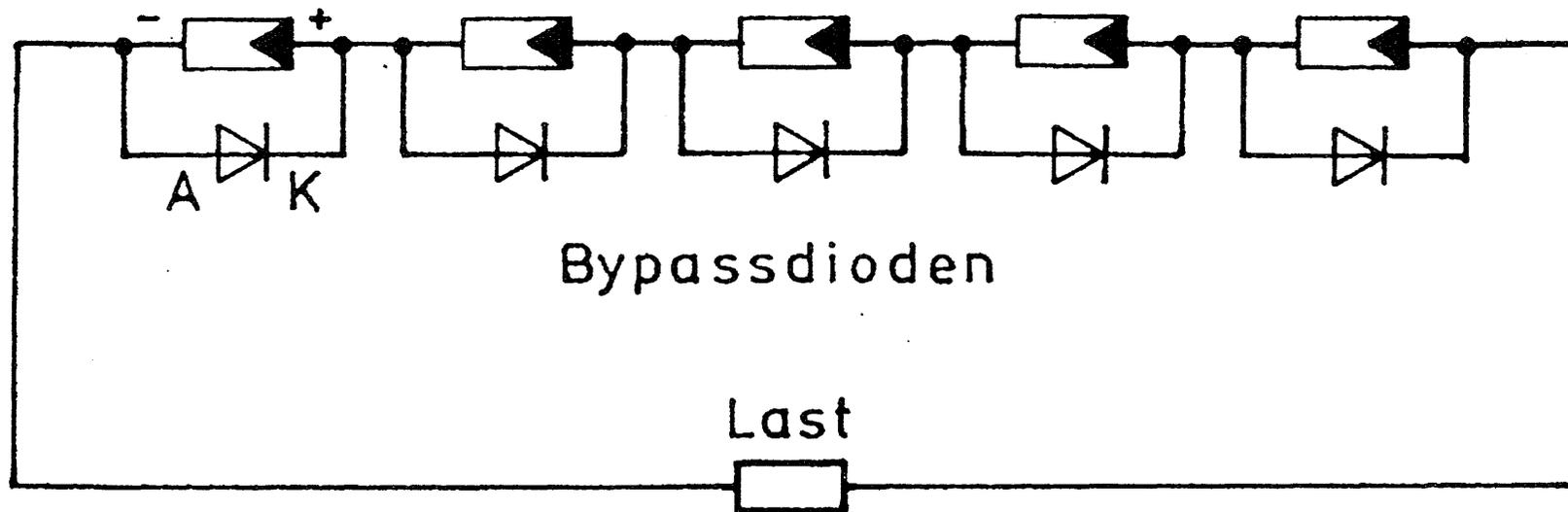
Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Konstruktion der Modulkennlinie bei 35 voll bestrahlten und einer 75 % teilabgeschatteten Zelle: $P_1 = 20,3 \text{ W} \rightarrow P_2 = 6,3 \text{ W}$

Hot Spots

- Abschattung einer Zelle ist gleichbedeutend mit einer Abschattung aller in Serie geschalteter Zellen – **drastische Leistungseinbuße**
- Die abgeschattete Zelle wird hoch belastet – besonders bei Kurzschluss des Moduls
- Höchste Verlustleistung in der abgeschatteten Zelle bei Verlauf von deren Kennlinie durch den MPP der übrigen Zellen – etwa 20 W bei insgesamt 20 Zellen für eine 10 – 20% Abschattung einer Einzelzelle (10 x 10 cm² polykristallines Silizium)
- Bei sehr vielen in Reihe geschalteten Zellen durch Teilabschattung einer Zelle u.U. Zerstörung der Solarzelle oder ihrer Einbettung
- Möglichst keine Verschaltung von Modulen unterschiedlicher Technologie (Mismatch), da der schlechteste Modul die Qualität der Anordnung bestimmt

Verhinderung lokaler Überhitzungen bei Serienschaltung^{10.18}



Bypass-Dioden in Flussrichtung zum Solarstrom bewirken Abschattungstoleranz.

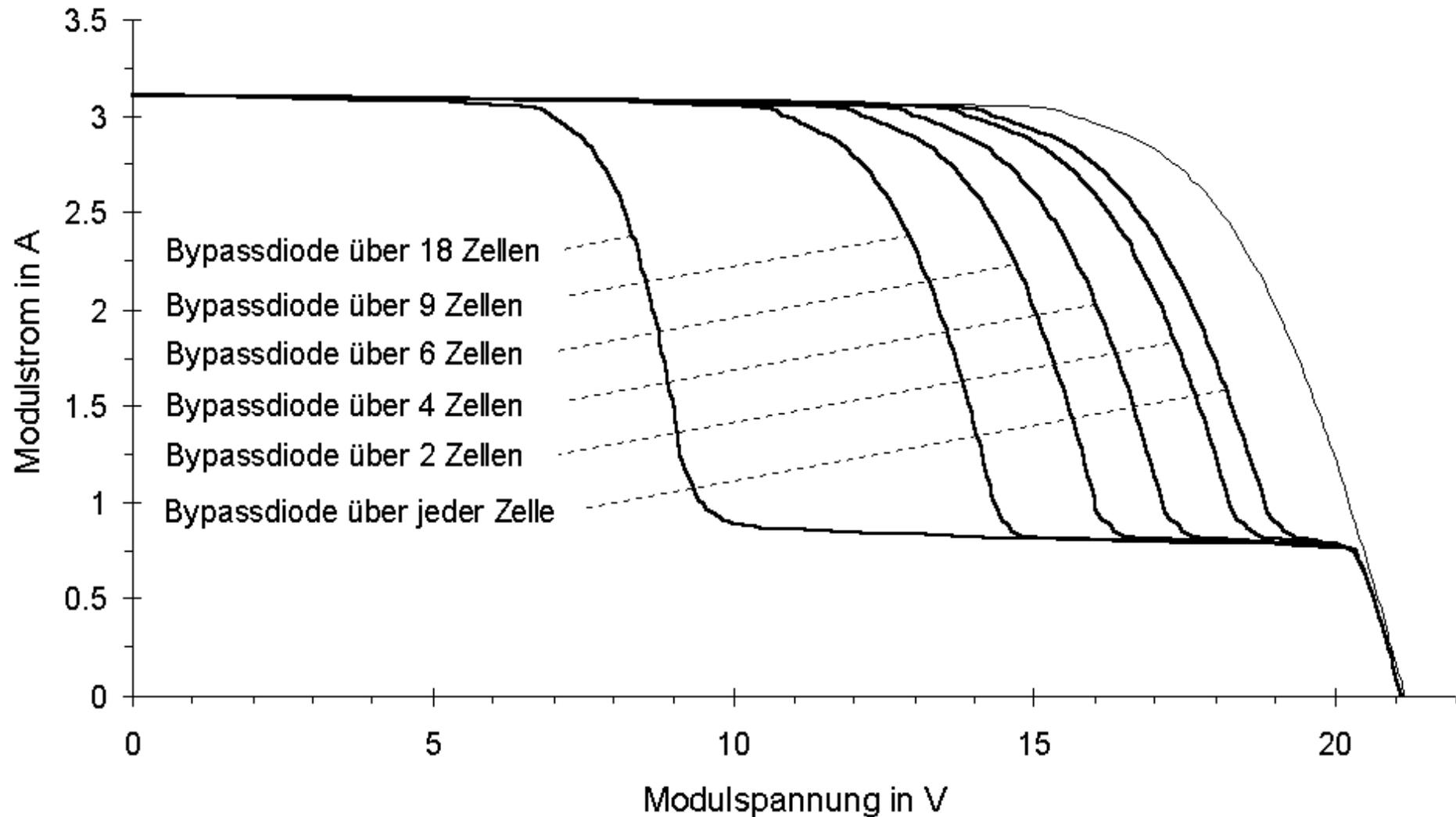
Bei großflächigen Solarzellen, die eine höhere Verlustleistung ertragen, genügen wenige Bypass-Dioden – beim Standardmodul mit 36 Zellen 2 Stück.

Bei Teilabschattung mit Bypass-Diode geringere Reduktion von Spannung und Leistung an der Last.

Optimale Abschattungstoleranz bei einer Bypassdiode pro Solarzelle

Wirkung von Bypassdioden bei Teilabschattung

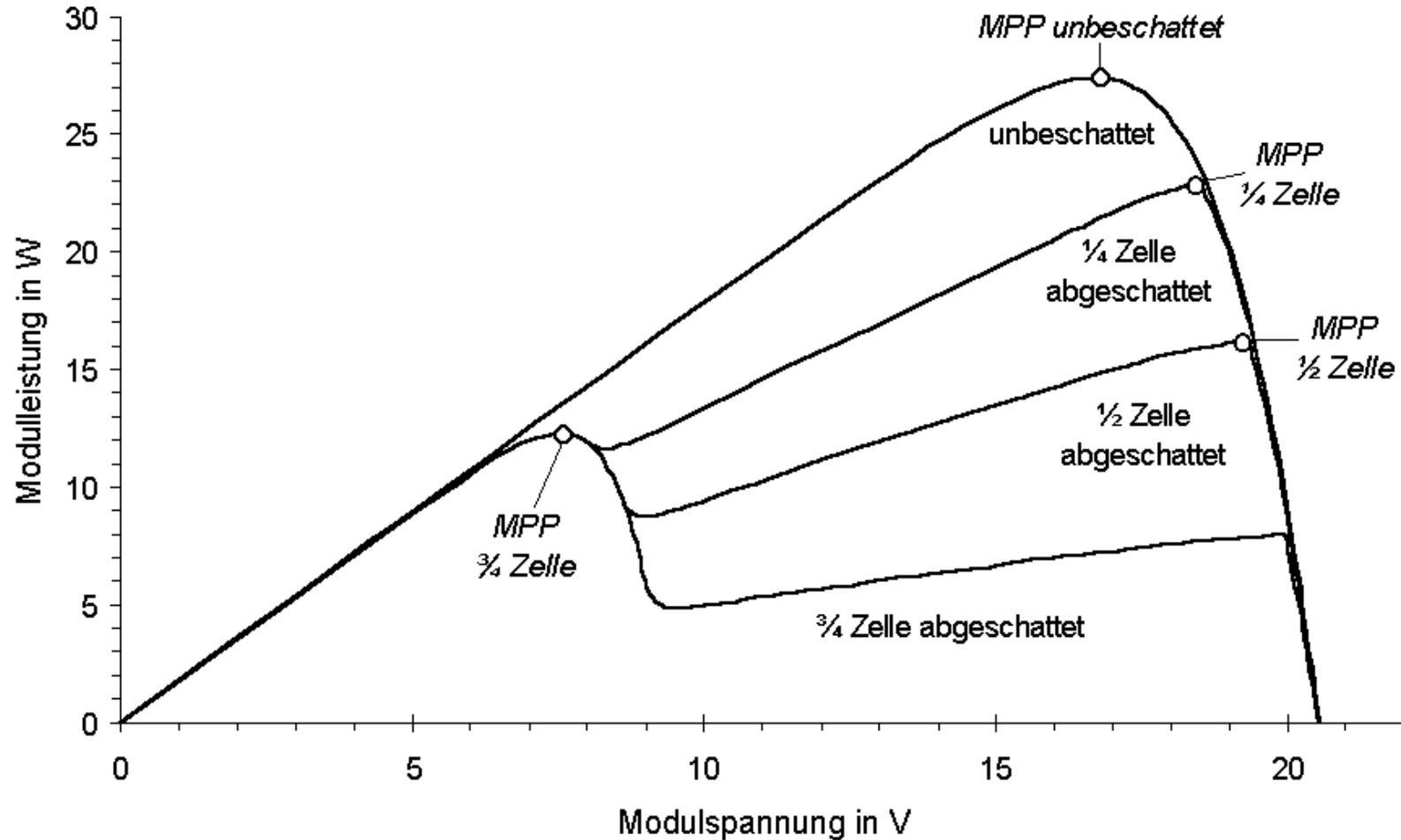
10.19



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

75 %ige Abschattung einer Zelle (Simulation)

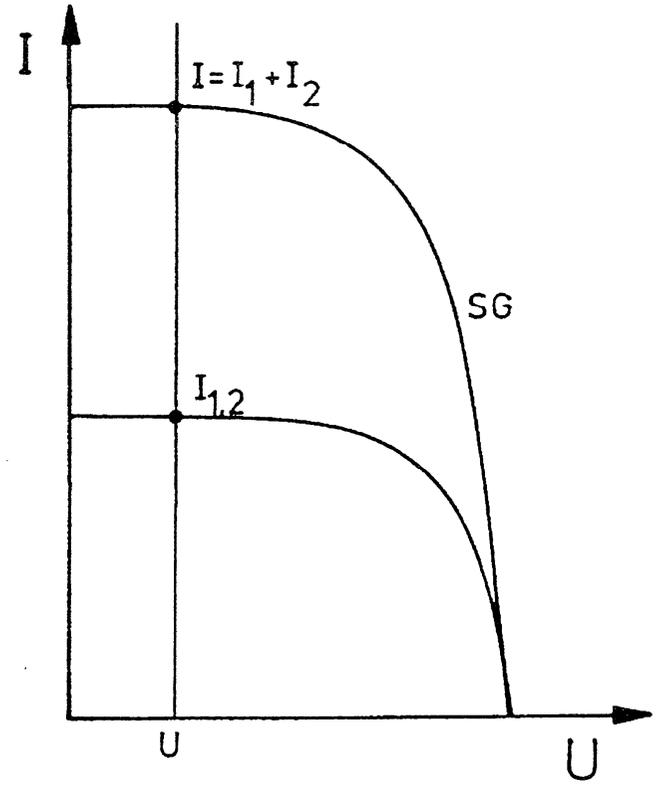
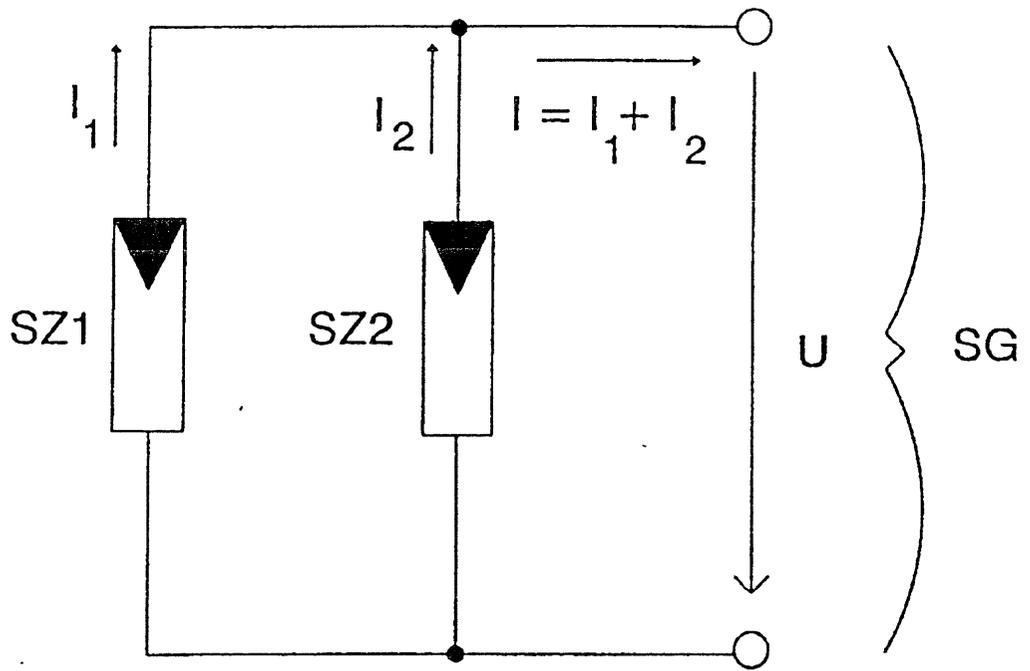
Wirkung einer Bypassdiode bei Teilabschattung



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

36 Zellen, 2 Bypassdioden

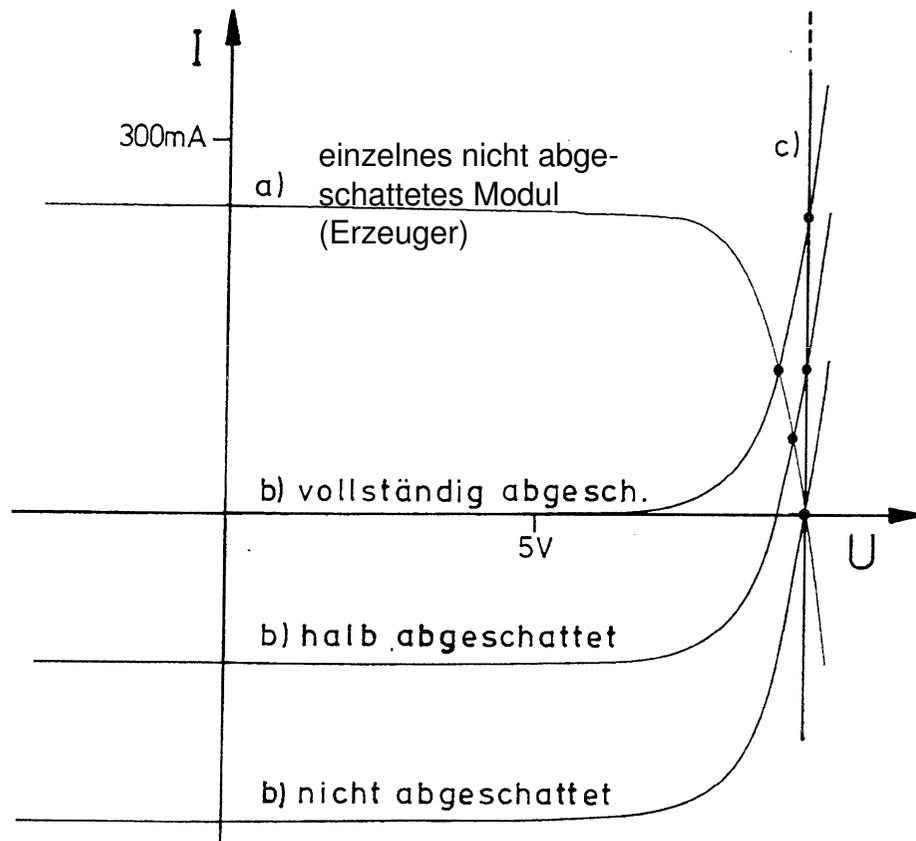
Parallelschaltung von Solarzellen



Addition von Strömen eines Spannungswerts

Teilabschattung eines Solarmoduls bei Parallelschaltung

10.22



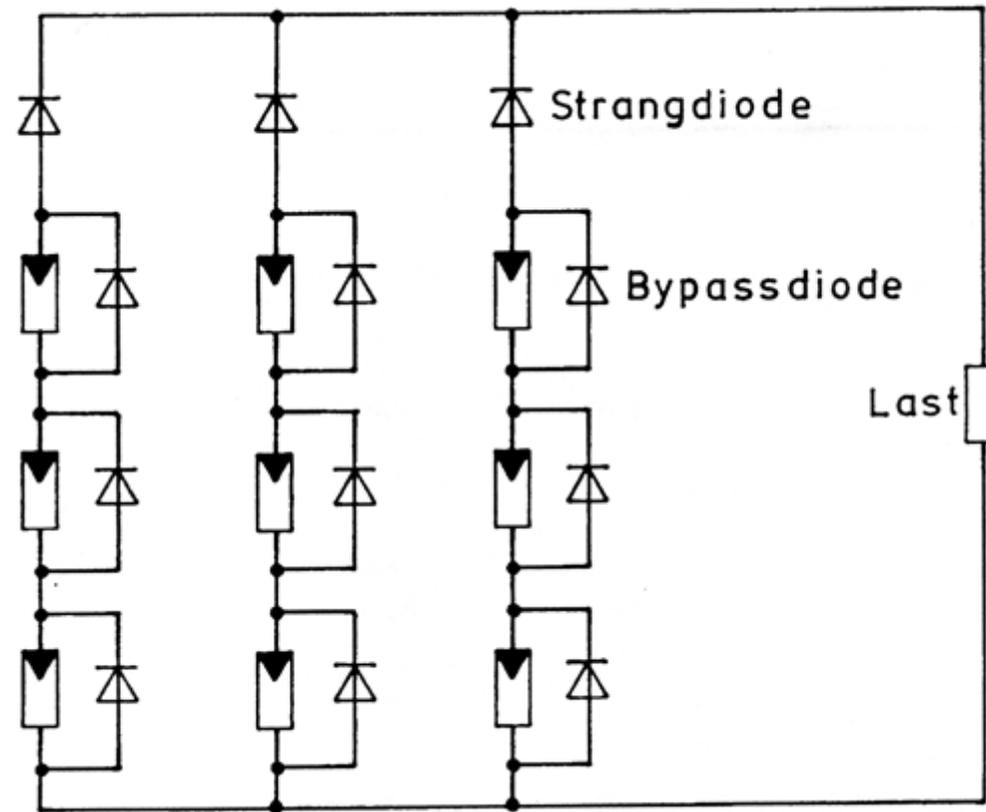
b) **Abschattung eines Moduls (Verbraucher)** von 2 parallel geschalteten Modulen:

Rückstrom durch den abgeschatteten Modul (Verbraucher) maximal bei Leerlauf

Spannungen gleich, Ströme entgegengesetzt – Spiegelung der Kennlinie des abgeschatteten Moduls an der Abszisse zur Bestimmung des Arbeitspunkts

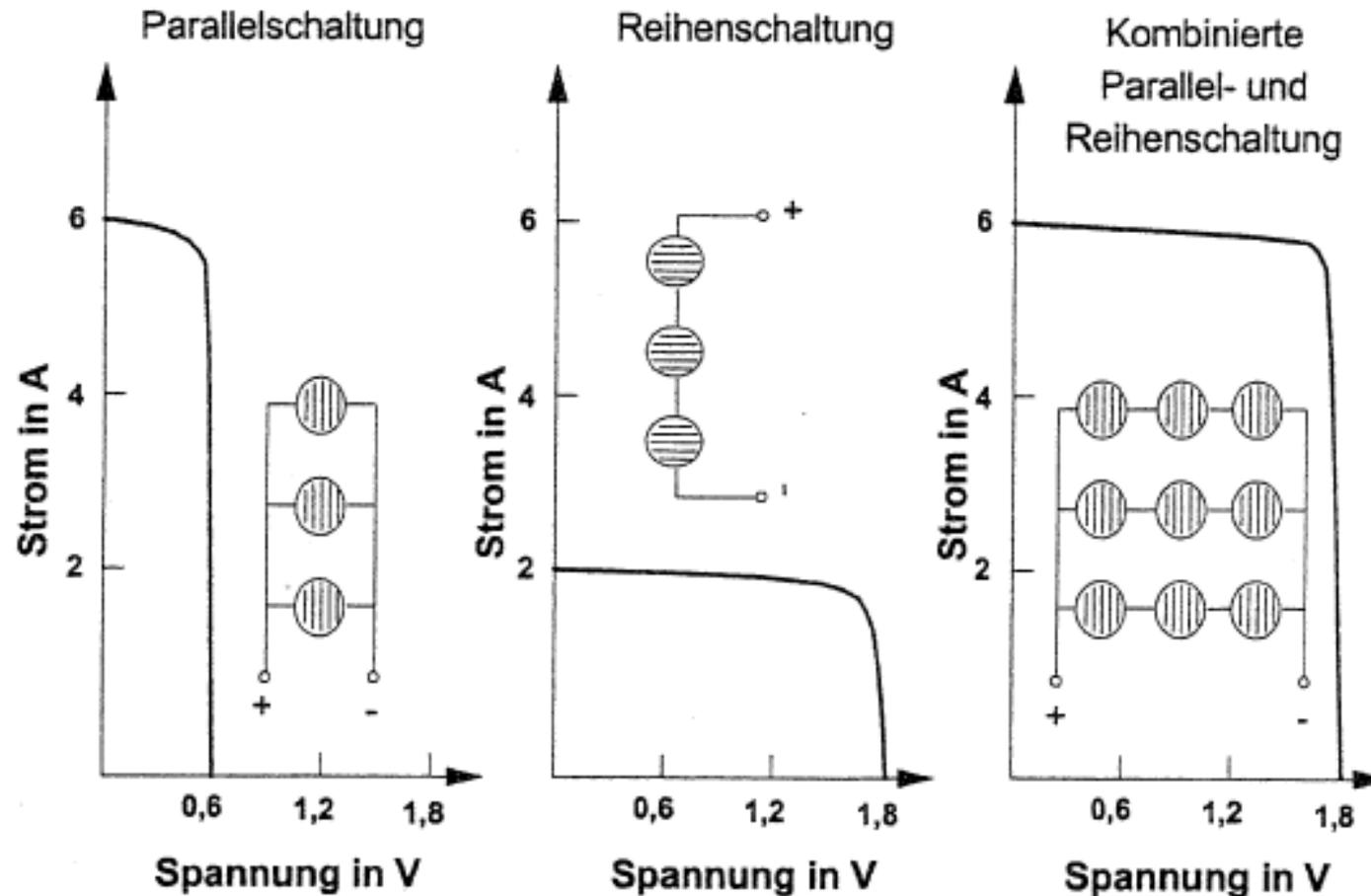
Maximal der halbe Kurzschlussstrom in das abgeschattete Modul bei vollständiger Abschattung eines Moduls – unproblematisch, da Durchlassstrom

c): Bei der Parallelschaltung von immer mehr nicht abgeschatteten Modulen (Erzeugern) wird die Strom-Spannungskennlinie im abfallenden Teil immer steiler - Spannungsquelle



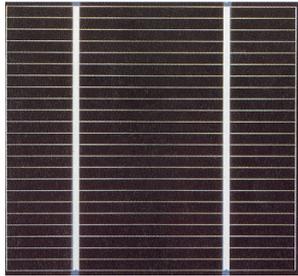
Entkopplung parallel geschalteter Module durch Strangdioden –
keine verlustbehafteten Rückströme

Zusammenschalten von Solarzellen



Über die Anzahl in Serie geschalteter Zellen wird die Leerlaufspannung des Moduls bestimmt,
 durch die Anzahl parallel geschalteter Zellstränge der Kurzschlussstrom des Moduls.

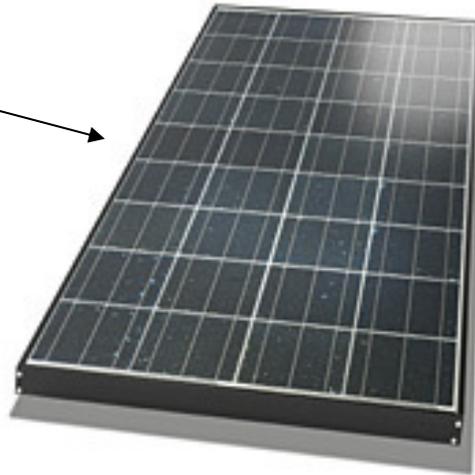
Solarzelle - Solarmodul - Solargenerator



Solarzelle

Fläche: 100 cm²
Spannung: 0,5 Volt
Strom: 3,0 Ampere
Leistung: 1,5 Watt

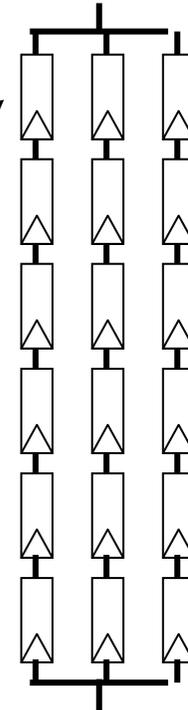
0,01 m²



Solarmodul

36 Solarzellen
Spannung: 18 Volt (36 * 0,5 V)
Strom: 3 Ampere
Leistung: 54 Watt (36 * 1,5 W)

0,36 m²



Solargenerator

18 Solarmodule
Spannung: 108 Volt (6 * 18 V)
Strom: 9 Ampere (3 * 3 A)
Leistung: 972 Watt (18 * 54 W)

6,48 m²

Typische Werte für
Standardtestbedingungen:

- Einstrahlung $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- Zelltemperatur $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Air Mass $AM = 1,5$

Technische Daten ausgewählter Solarmodule

Bezeichnung		SM 55	BP585	NT51A85E	50-ALF	UPM 880	ST40
Hersteller		Siemens	BP Solar	Sharp	ASE	Unisolar	Siemens
Zellenzahl		36 (3 · 12)	36 (4 · 9)	36 (4 · 9)	36 (4 · 9)	--	--
Zelltyp		mono-Si	mono-Si	mono-Si	poly-Si	a-Si	CIS
MPP-Leistung P_{MPP}	Wp	55	85	85,5	50	22	38
Nennstrom I_{MPP}	A	3,15	4,72	4,91	2,9	1,4	2,29
Nennspannung U_{MPP}	V	17,4	18,0	17,4	17,2	15,6	16,6
Kurzschlussstrom I_K	A	3,45	5,00	5,5	3,2	1,8	2,59
Leerlaufspannung U_L	V	21,7	22,03	22,0	20,7	22,0	22,2
Temp.Koeff. α_{TK}	%/°C	+0,04	+0,03	+0,05	+0,09	k. A.	+0,01
Temp.Koeff. α_{UL}	%/°C	-0,34	-0,34	-0,35	-0,38	k. A.	-0,60
Temp.Koeff. α_{PMPP}	%/°C	k. A.	k. A.	-0,53	-0,47	k. A.	k.A.
Modulwirkungsgrad	%	12,9	13,5	13,4	11,5	5,4	8,9
Länge	mm	1.293	1.188	1.200	965	1.194	1.293
Breite	mm	329	530	530	452	343	329
Gewicht	kg	5,5	7,5	8,5	6,1	3,6	7,0
Bypassdioden		2	2	36	2	13	1

Modul besteht aus

- elektrisch verbundenen Solarzellen
- Frontscheibe und Rückseitenabdeckung – muss hohen Windlasten und Hagelkörnern widerstehen
- Einbettungsmaterial und Randversiegelung – keine Feuchtigkeit darf im Temperaturbereich von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ über mindestens 20 Jahre zu den Zellen vordringen
- Rahmen aus Kunststoff oder Metall
- elektrischen Anschlusskabeln

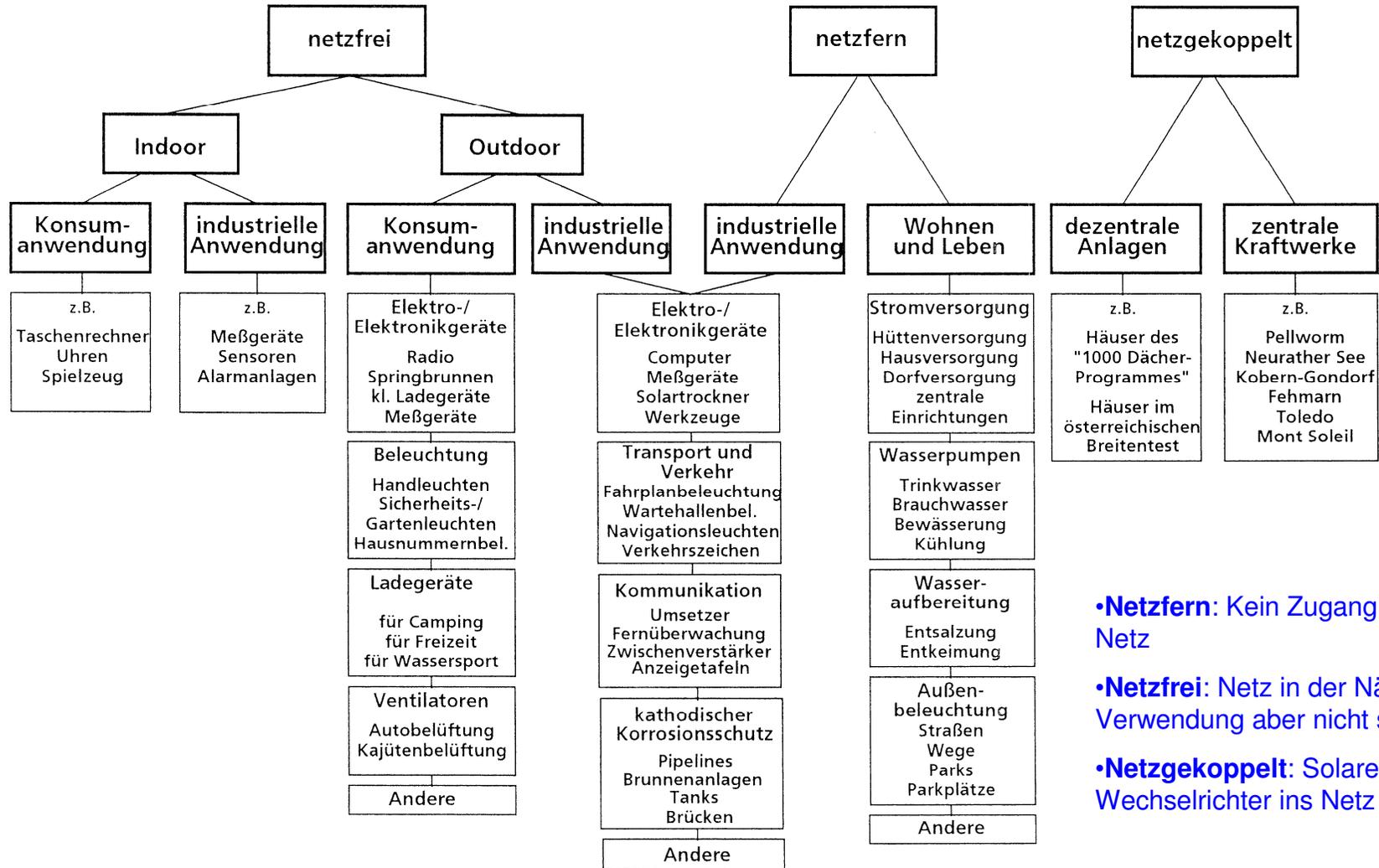


Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

10.28

1. Einleitung
2. Die Sonne als Energiequelle
3. Halbleiterphysikalische Grundlagen
4. Kristalline pn-Solarzellen
5. Elektrische Eigenschaften
6. Optimierung von Si-Solarzellen
7. Anorganische Dünnschichtsolarzellen
8. Third Generation Photovoltaics
- 9. PV-Systemtechnik**
 - 9.1 Kennlinienfelder
 - 9.2 Erweiterung des Ersatzschaltbildes
 - 9.3 Solarmodule
 - 9.4 Photovoltaische Anwendungen
 - 9.4 Spannungsanpassung

Anwendungen photovoltaischer Energieversorgungen 10.29



•**Netzfern:** Kein Zugang zum öffentlichen Netz

•**Netzfri:** Netz in der Nähe verfügbar, Verwendung aber nicht sinnvoll

•**Netzgekoppelt:** Solarenergie über Wechselrichter ins Netz eingespeist

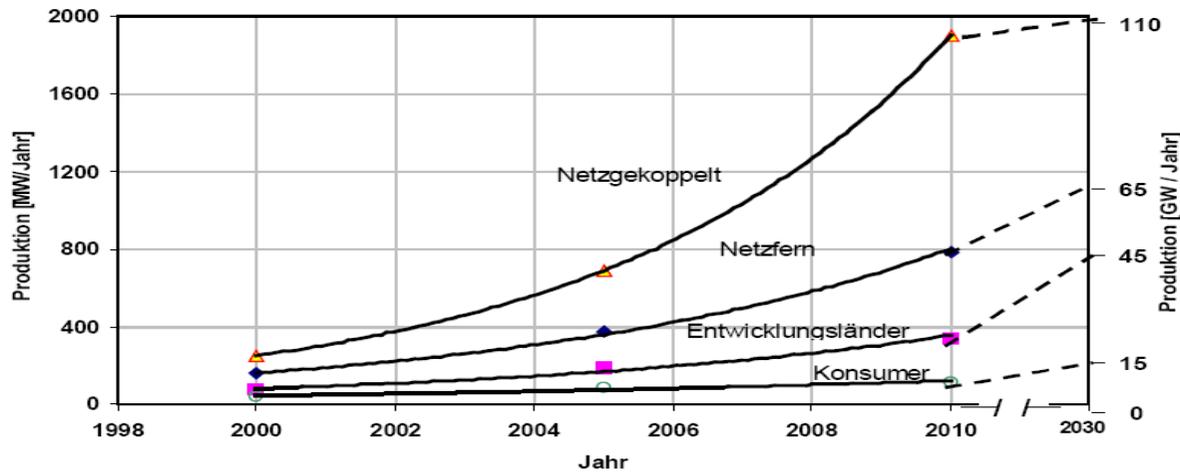
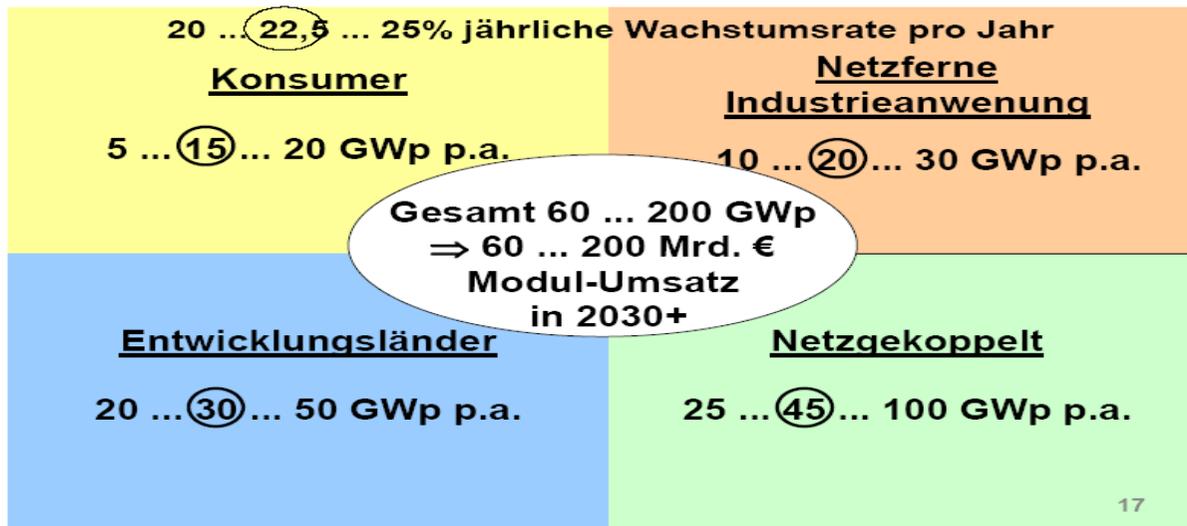


Abb. 11: Prognostizierte Entwicklung der vier PV Marktsegmente.



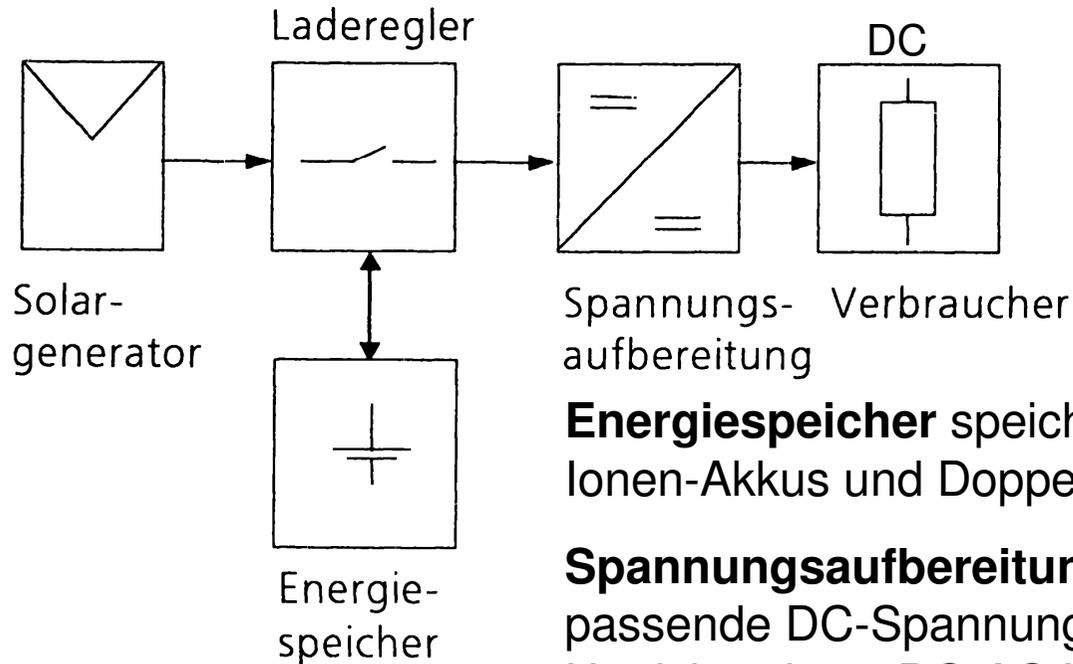
Quelle:
W. Hoffmann (ex. SchottSolar)

Abb. 12: Marktgröße und weltweiter Modulumsatz in 2030 für die vier Marktsegmente bei einem Wachstum von 20 bis 25 % pro Jahr.

Prinzipieller Aufbau von Photovoltaik-Systemen zur Versorgung netzfreier und netzferner Verbraucher

10.31

Gleichspannungsversorgung



Laderegler zwischen Solarmodul und Akkumulator mit Über- und unterspannungsüberwachung zur Begrenzung gegen Überladung und Tiefentladung. Entladeschutzdiode gegen nächtliche Entladung des Akku über den Solarmodul sowie Lastabwurfschaltung

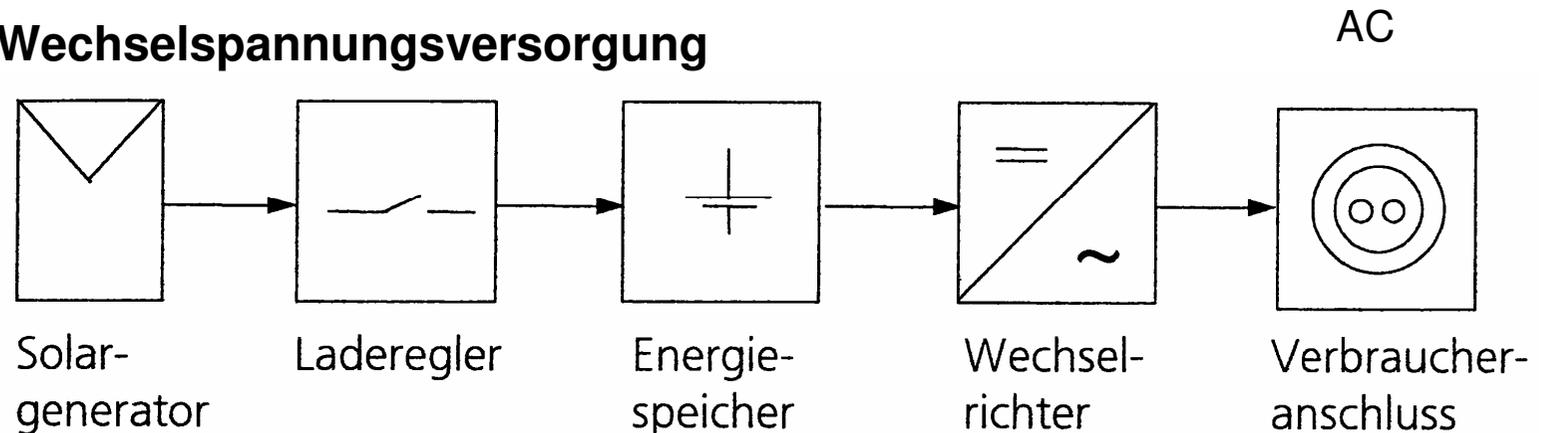
Energiespeicher speichert die Solarenergie: NiCd-, Ni-MH-, Pb-, Li-Ionen-Akkus und Doppelschichtkondensatoren

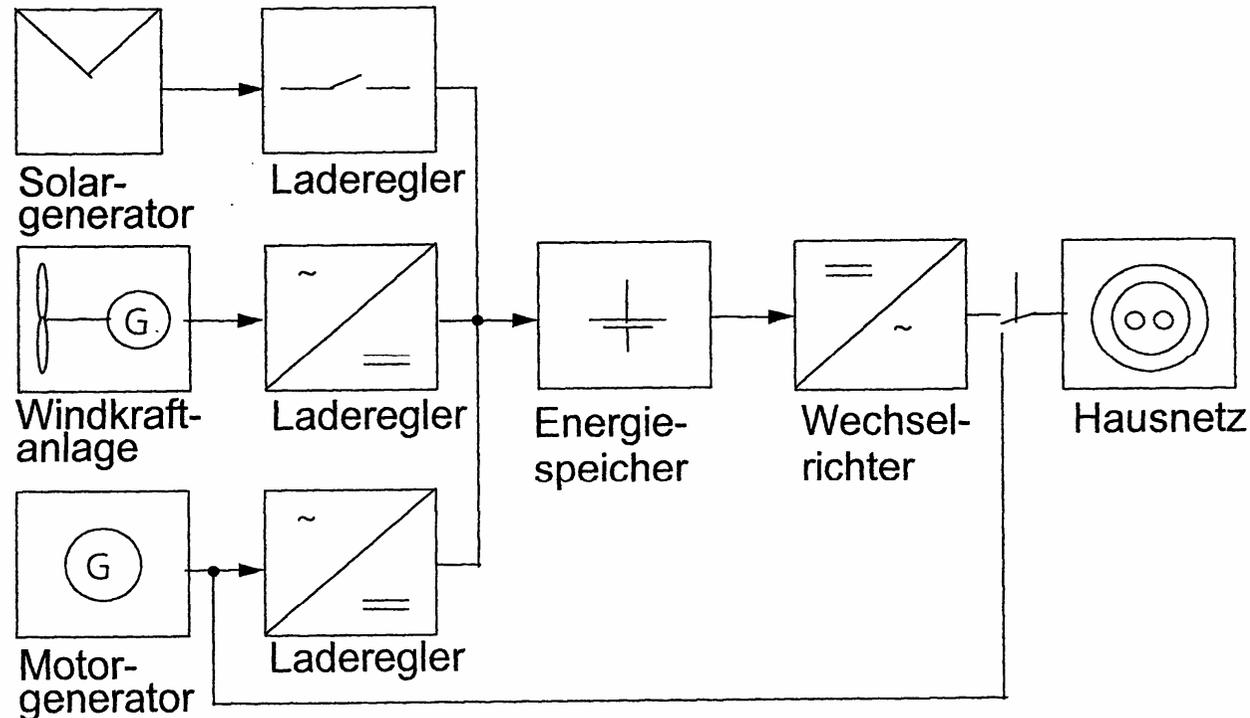
Spannungsaufbereitung: Wandlung der Akkuspannung in eine passende DC-Spannung bzw. AC-Spannung mittels DC-DC-Umrichter bzw. DC-AC-Wechselrichter

Solargenerator:

Zusammenfassung von Solarzellen zu Solarmodulen mit gerätespezifischer Ausgangsspannung oder Standardmodulen

Wechselspannungsversorgung

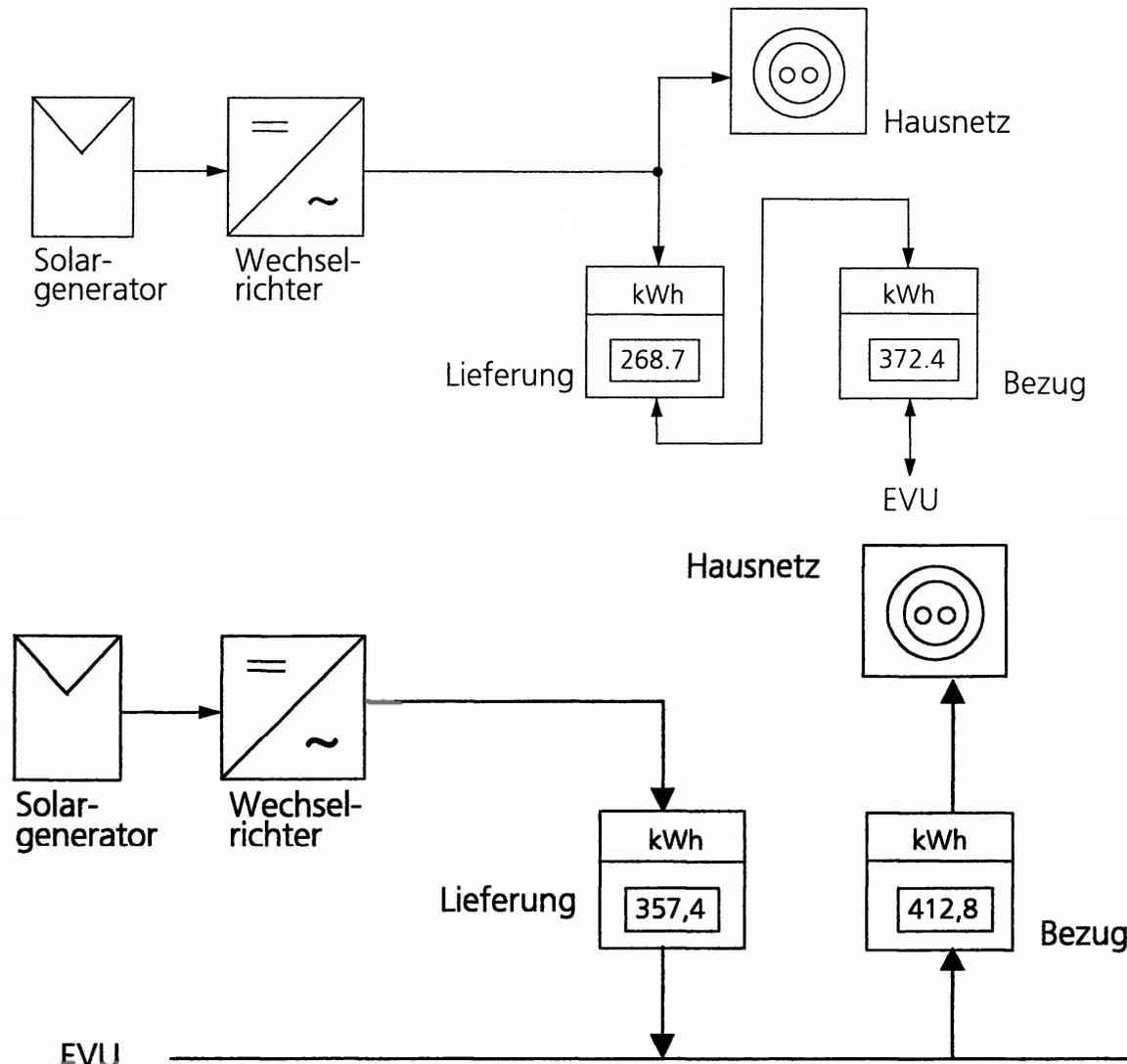




Hybridsystem aus Solargenerator und Motorgenerator und Windkraftanlage

- Bei Verbrauchern größerer Leistung müßte wegen der starken Variation der Solarstrahlung der Solargenerator relativ groß ausgelegt werden.
- Hybridsystem wie z.B. die Kombination aus Solargenerator und Dieselgenerator gewährleistet **Versorgungssicherheit** ähnlich der des öffentlichen Netzes.

Netzgekoppelte Photovoltaik-Anlagen



Solarenergieeinspeisung ins Hausnetz und ins öffentliche Netz bei Vergütung des Solarstroms einer kleinen dezentralen Anlage unterhalb des EVU-Preises

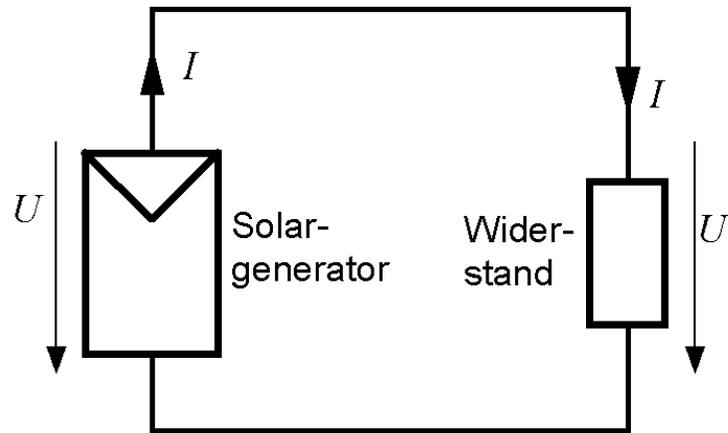
Solarenergieeinspeisung ins öffentliche Netz, Strombezug vom EVU bei Vergütung des Solarstroms oberhalb des EVU-Preises – Solarstrom immer ins öffentliche Netz!

Übersicht über die Vorlesung Solarenergie

10.34

1. Einleitung
 2. Die Sonne als Energiequelle
 3. Halbleiterphysikalische Grundlagen
 4. Kristalline pn-Solarzellen
 5. Elektrische Eigenschaften
 6. Optimierung von Si-Solarzellen
 7. Anorganische Dünnschichtsolarzellen
 8. Third Generation Photovoltaics
 9. **PV-Systemtechnik**
 - 9.1 Kennlinienfelder
 - 9.2 Erweiterung des Ersatzschaltbildes
 - 9.3 Solarmodule
 - 9.4 Photovoltaische Anwendungen
- 9.4 Spannungsanpassung

Solarmodul mit Widerstandslast

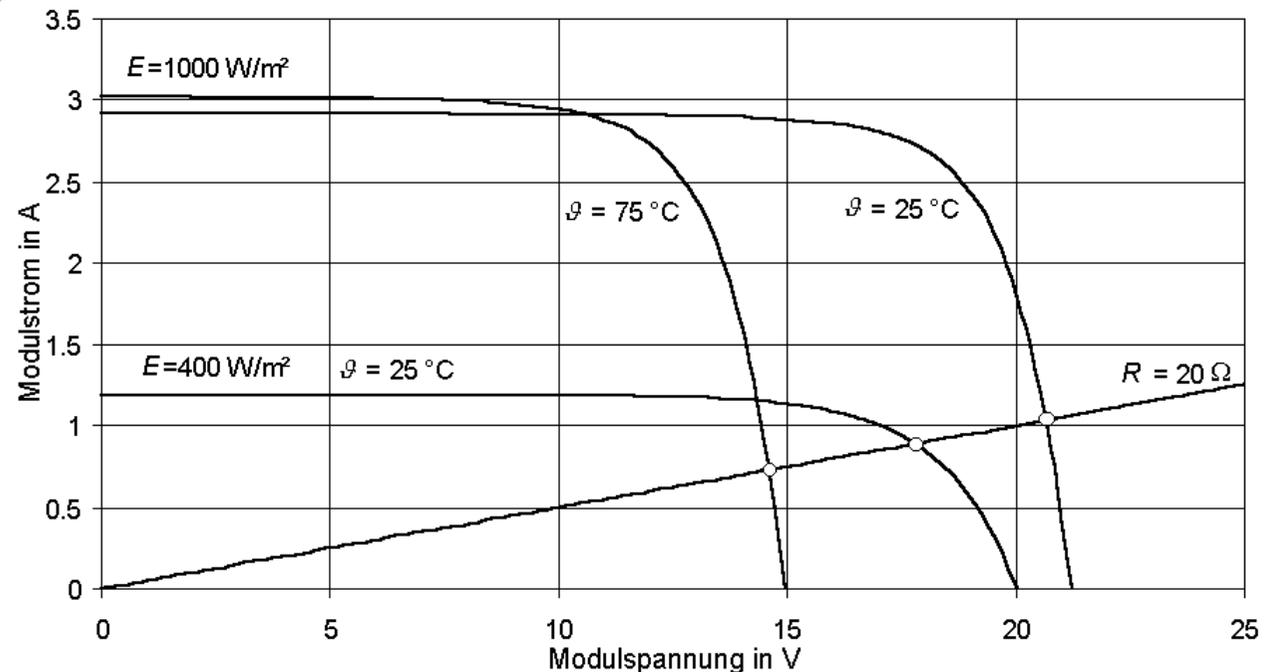


Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme*

Nur bei 25 °C und $E = 400 \text{ W m}^{-2}$ wird der Modul nahe dem MPP betrieben, sonst liegt die abgegebene Leistung weit unterhalb der möglichen Leistung

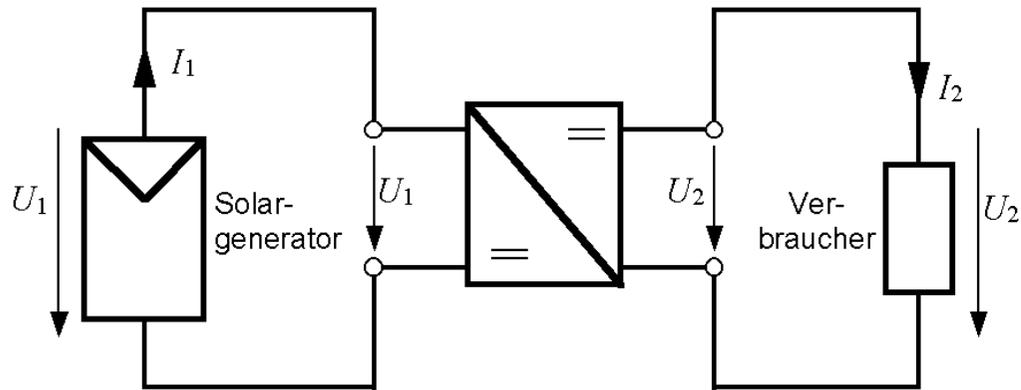
Arbeitspunkte: Schnittstellen von $I(U)$ -Kennlinie des Moduls mit Widerstandsgeraden der Last

Die Arbeitspunkte variieren mit der Temperatur und der Bestrahlungsstärke, die am Modul ansteht.



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Solarmodul unter Konstantspannungslast



Wirkungsgrad vom DC-DC-Wandler
> 90%

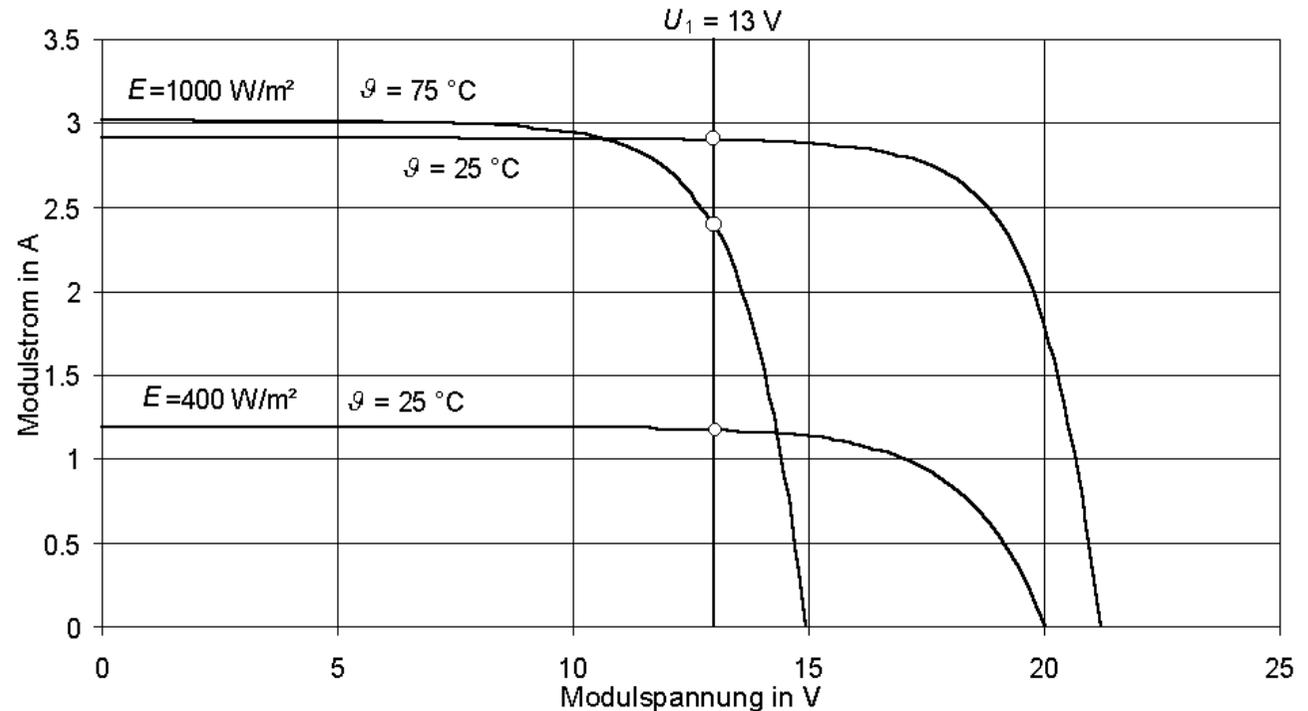
Ohne Verluste im Wandler:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 = P_2$$

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Leistungsausbeute vom Solargenerator erheblich verbessert durch Gleichspannungswandler zwischen Modul und Verbraucher.

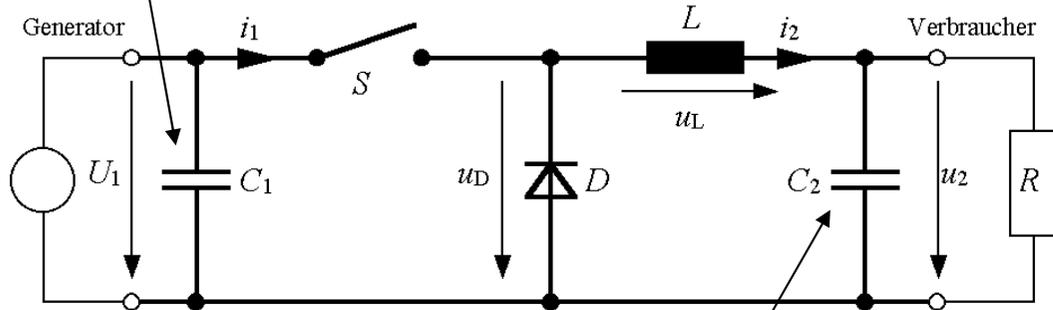
Der Gleichstrom-Umrichter wird geregelt auf konstante Spannung U_1 am Generator.



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

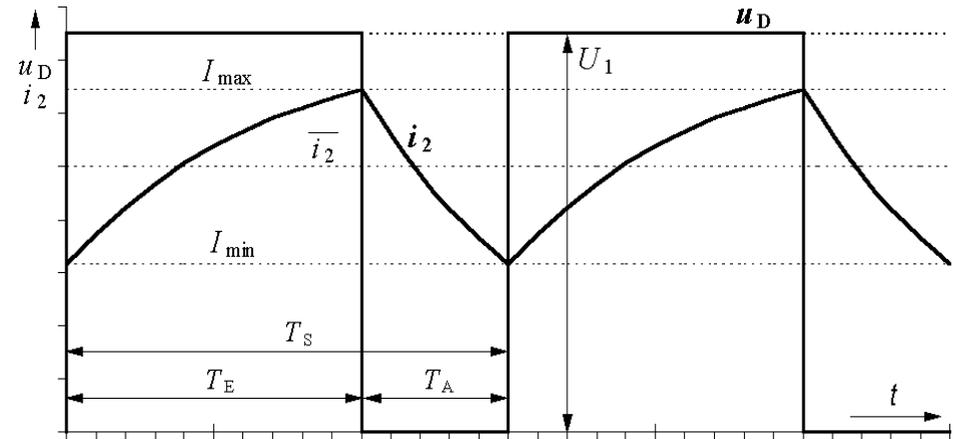
Tiefsetzsteller

C_1 speichert Solarenergie bei geöffnetem Schalter S (FET oder Bipolartransistor).



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

C_2 glättet die Ausgangsspannung.



Nicht lückender Drosselstrom

Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

$$u_L = L \frac{di_2}{dt}$$

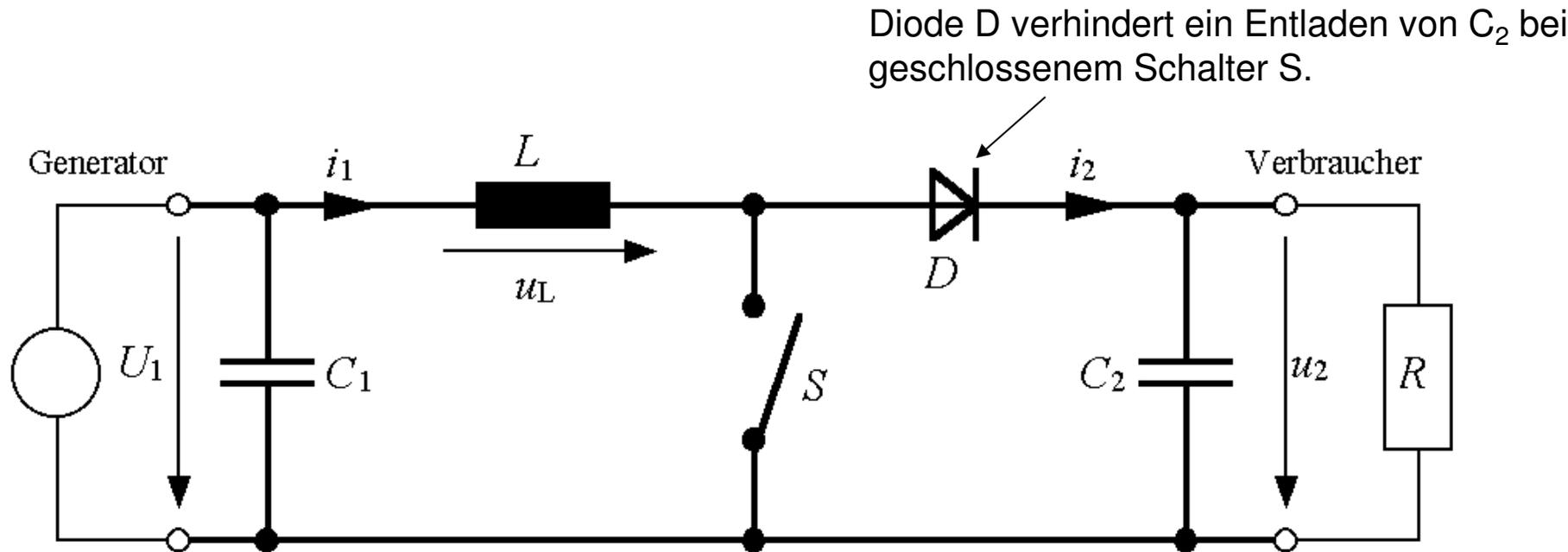
$$u_2 = \begin{cases} u_D - u_L = U_1 - u_L & \text{mit } u_L > 0 \quad \text{für } 0 \leq t \leq T_E \\ u_D - u_L \approx -u_L & \text{mit } u_L < 0 \quad \text{für } T_E \leq t \leq T_E + T_A \end{cases}$$

$$\bar{u}_2 = \delta \cdot U_1 \quad \text{mit} \quad \delta = \frac{T_E}{T_E + T_A} \quad \text{Tastverhältnis}$$

$$\bar{i}_2 = \bar{i} / \delta$$

Anpassung an eine Last R , die stets eine geringere Spannung u_2 benötigt als die Spannung U_1 , die am Solargenerator anliegt

Schaltfrequenz
 $f = 1/(T_E + T_A) = 20 - 200 \text{ kHz}$



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

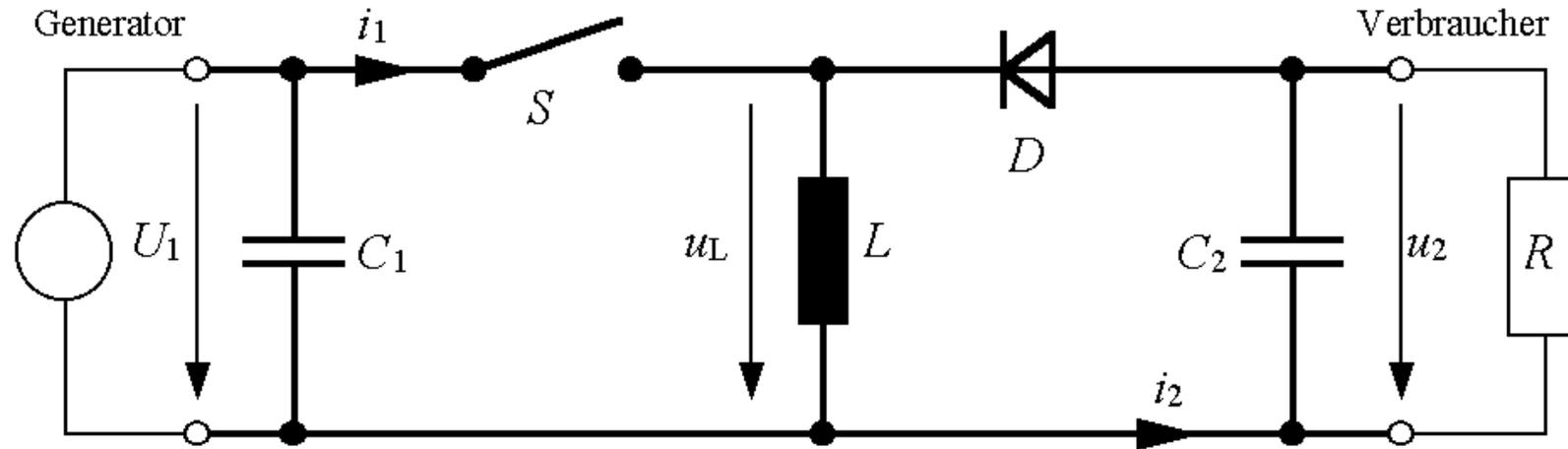
$$u_L = U_1 \quad \text{mit } u_L > 0 \quad \text{für } 0 \leq t \leq T_E$$

$$u_2 = U_1 - u_L \quad \text{mit } u_L < 0 \quad \text{für } T_E \leq t \leq T_E + T_A$$

$$\bar{u}_2 = U_1 \cdot \frac{T_E + T_A}{T_A}$$

Anpassung an eine Last R , die stets eine **höhere Spannung** u_2 benötigt als die Spannung U_1 , die am Solargenerator anliegt

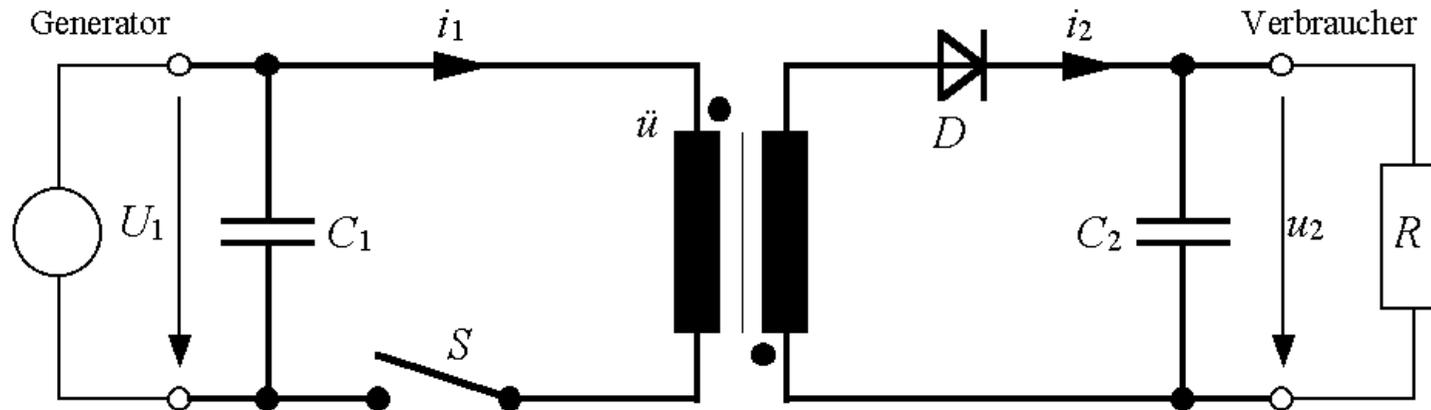
Invertierender Wandler



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

$$\bar{u}_2 = -U_1 \cdot \frac{T_E}{T_A}$$

Eintakt-Sperrwandler



Quelle: Volker Quaschnig - Regenerative Energiesysteme

Funktionsweise wie beim invertierenden Wandler

$$\bar{u}_2 = U_1 \cdot \frac{T_E}{T_A} \cdot \frac{1}{\bar{u}}$$

Nur ist die Drossel durch einen Trafo mit Übersetzungsverhältnis \bar{u} ersetzt. Damit lassen sich höhere Ausgangsgleichspannungen realisieren.

Für größere Leistungen werden Gegentakt-Wandler mit mehreren Leistungsschaltern als Gleichspannungswandler verwendet.