

Vorlesung 5:

Einführung in die regenerativen Energien (EE) – WS22

Vorlesung 5: Photovoltaik – PV-Module und PV-Anlagenkonzepte

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)

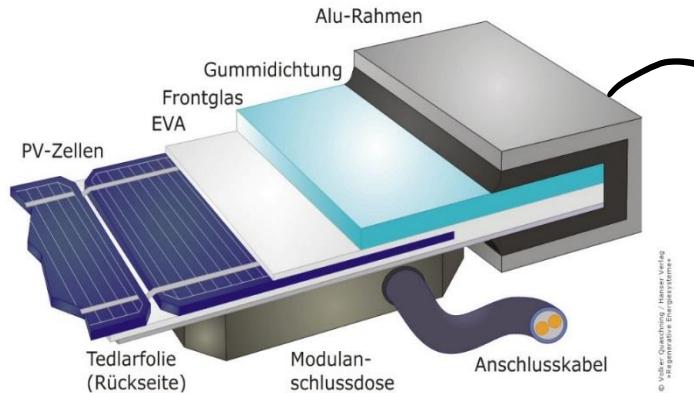
4 Photovoltaik

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

PV-Module

Elektrische Beschreibung von PV Modulen



- Standardmodule:
aufgebaut aus kristallinen Silizium-Solarzellen
optimiert auf geringe Kosten bei maximaler Leistung / m²
erhältlich in festen Abmessungen und Leistungen (z.B. 36...216 Zellen mit 100...300 Wp)
- Verkapselung (Einbettung) der Solarzellen z.B. mit Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA)
- Frontseite: UV-beständiger Wetterschutz und statische Stabilisierung durch gehärtete Glasscheibe aus hochtransparentem Weißglas
- Rückseite: z.B. nichttransparente (opake = strahlungsundurchlässige) Verbundfolie
- Mit oder ohne Aluminium-Rahmen
- Da die DC Spannung eines Modules für den Wechselrichter (AC Spannung, 230Vrms) nicht ausreicht werden PV Module zu einem Strang (engl. String) zusammengefasst.
- Die charakteristischen Eigenschaften sind im Datenblatt des Moduls beschrieben (Bei STC)

SUNPOWER
HERVORRAGENDER WIRKUNGSGRAD UND ELEGANTES DESIGN

VORTEILE

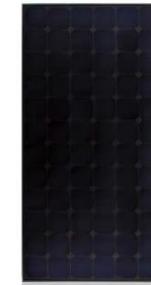
Höchster Wirkungsgrad
Das Modul verfügt um 17,7% über einen der höchsten erreichbaren Wirkungsgrade für Aufdachanlagen.

Atraktives Design
Das einzigartige Design bietet die Kombination eines hohen Wirkungsgrades mit einem eleganten, durchgehend schwarzen Erscheinungsbild.

Mehr Leistung
SunPower 220 liefert bis zu 50% mehr Leistung pro Flächeneinheit als herkömmliche Solarmodule.

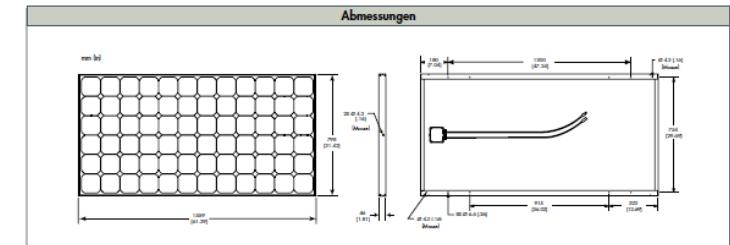
Zuverlässige und stabile Konstruktion
Dank bewährter Materialien, gehärtetem Frontglas und einem robusten, eloxierten Rahmen kann das Modul in verschiedenen Montagekonfigurationen zuverlässig betrieben werden.

220 SOLARMODUL



Elektrische Eigenschaften	
Bei Standardbedingungen (STC): Beleuchtungsstärke 1000 W/m ² , Lufttemperatur 15 °C und Zelltemperatur von 25°C.	
Max. Nennleistung (+/-3%) Pmax	220 W
Nennspannung Vmp	41,0 V
Nennstrom Imp	5,37 A
Leerlaufspannung Voc	48,6 V
Kurzschlussstrom Isc	5,75 A
Max. Systemspannung IEC, UL	1000 V
Temperaturkoeffizienten	
Leistung	-0,38% / °C
Spannung (Voc)	-132,5 mV / °C
Strom [Isc]	3,5 mA / °C
Sicherung bei Reihenschaltung	20 A
Max. Nennleistung pro Flächeneinheit	177 W/m ²

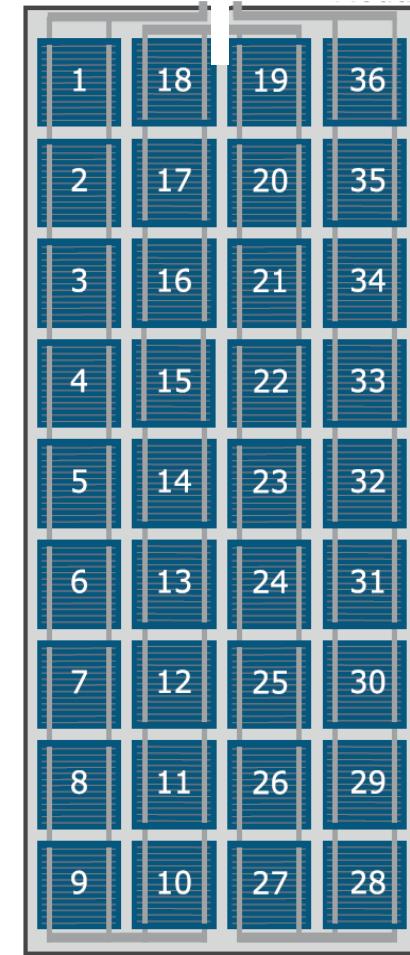
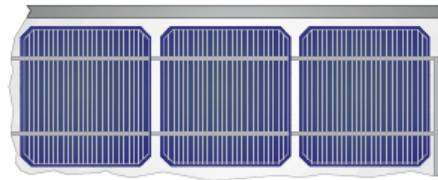
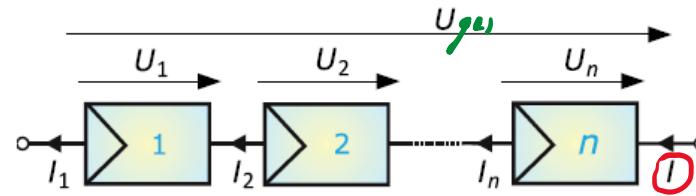
Mechanische Daten	
Solarzellen	72 monokristalline SunPower® Rückseitenkontakt-Solarzellen
Frontglas	3,2 mm (1/8 in) gehärtetes Glas
Anschlussdose	Schutzklasse IP-65 mit 3 Bypass-Dioden
Anschlusskabel	900 mm langes Kabel / Multi-Contact-Stecker
Rahmen	Eloxierter Aluminiumlegierung Typ 6063
Gewicht	15 kg



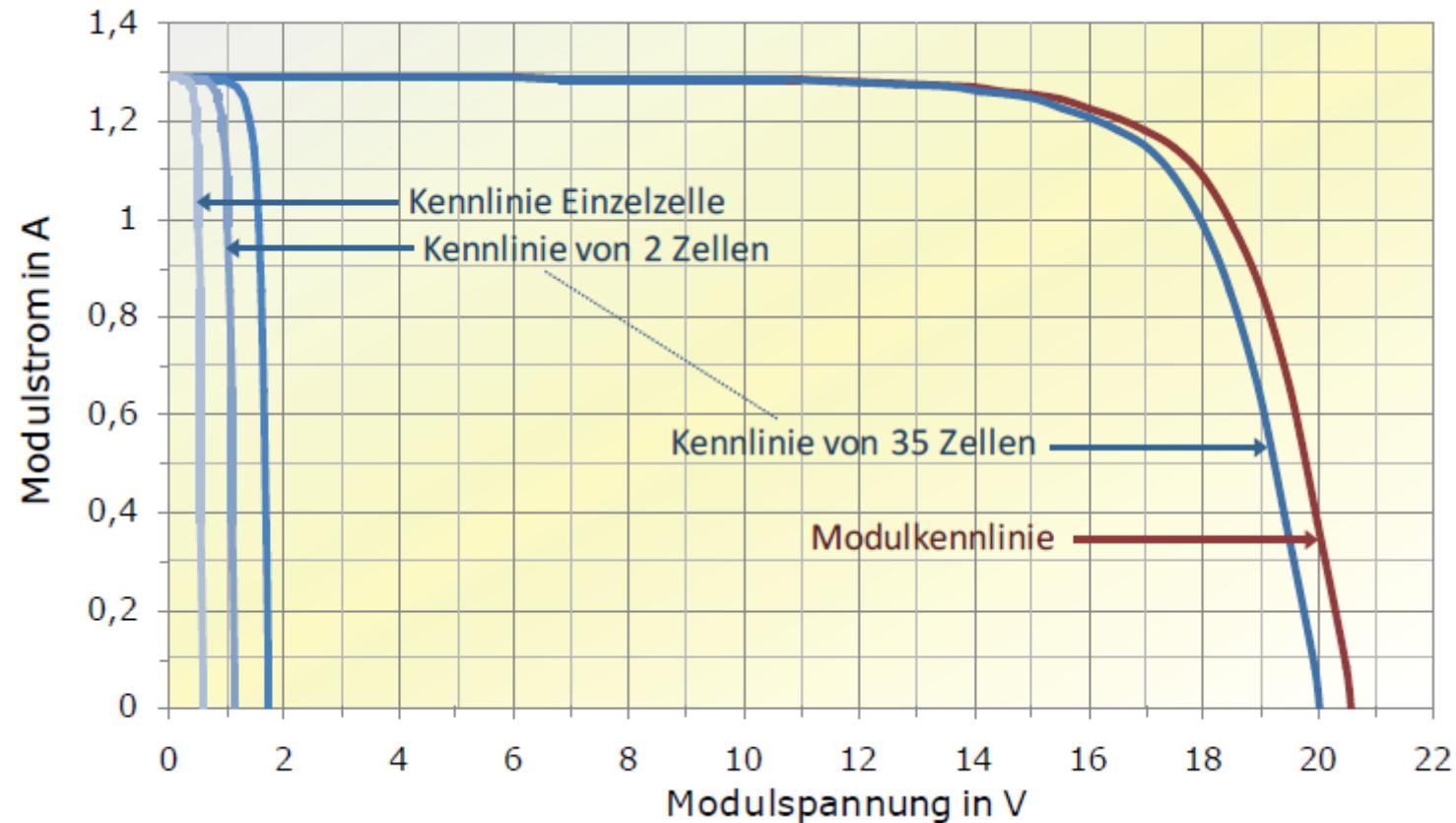
Exkurs: Schutzklasse I & II

- PV Module haben Schutzklasse II wie auch die meisten Netzteile für z.B. dem LapTop
- Gegenüber Schutzklasse I ist das Gehäuse nicht leitfähig und bittet daher einen ausreichenden Isolationsschutz
- Bei Schutzklasse I ist das Gehäuse leitfähig und muss daher geerdet werden
- Bei einer Störung könnte die Phase L das Gehäuse berühren, welches dann unter Spannung stände (Lebensgefahr!). Wenn das Gehäuse geerdet ist, würde bei so einer Störung die Sicherung herauspringen (Kurzschluss) – bzw. heute zutage der FI-Schutzschalter

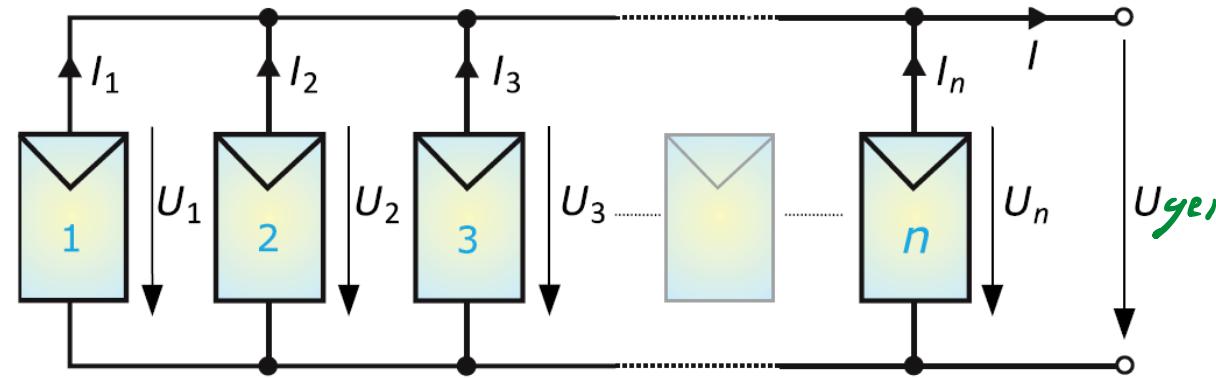




Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- Aus den in den **Datenblättern angegebenen Modulparametern:**

- Leerlaufspannung U_{L0}
- Kurzschlussstrom I_{K0}
- MPP-Spannung U_{MPP0}
- MPP-Strom I_{MPP0}
- (Unter STC gemessen)
- Spannungs-Temperaturkoeffizient α_U (z.B. für kristalline Zellen: $-0,3\dots-0,55\%/\text{°C}$)
- Strom-Temperaturkoeffizient α_I (z.B. für kristalline Zellen: $+0,02\dots+0,08\%/\text{°C}$)
- MPP-Leistungs-Temperaturkoeffizient α_{PMPP}
(z.B. für kristalline Zellen bei STC: $-0,37\dots-0,52\%/\text{°C}$)

- Modulparameter bei veränderten Bedingungen (E, ϑ) in Analogie zu den vorherigen Gleichungen der Solarzelle näherungsweise berechnet werden:

$$U_L(E, \vartheta) = U_{L0} \cdot \frac{\ln(E)}{\ln(E_0)} \cdot \{1 + \alpha_U \cdot (\vartheta - \vartheta_0)\}$$

$$I_K(E, \vartheta) = I_{K0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \{1 + \alpha_I \cdot (\vartheta - \vartheta_0)\}$$

$$U_{MPP}(E, \vartheta) = U_{MPP0} \cdot \frac{\ln(E)}{\ln(E_0)} \cdot \{1 + \alpha_U \cdot (\vartheta - \vartheta_0)\}$$

$$I_{MPP}(E, \vartheta) = I_{MPP0} \cdot \frac{E}{E_0} \cdot \{1 + \alpha_I \cdot (\vartheta - \vartheta_0)\}$$

$$P_{MPP}(E, \vartheta) = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = P_{MPP0} \cdot \frac{E \cdot \ln(E)}{E_0 \cdot \ln(E_0)} \cdot \{1 + \alpha_{PMPP} \cdot (\vartheta - \vartheta_0)\}$$

Dabei: $\vartheta = \vartheta_U + c \cdot \frac{E}{1000W/m^2}$

mit c : vom Einbau des Solarmoduls abhängige Proportionalitätskonstante (22...55°C)

Datenblatt Referenz

wie ist Leerlaufspannung
bei $\vartheta = 37^\circ$
(was ähnliches)
der PV-Modulen.

Näherungsweiser Zusammenhang zwischen Modulstrom I und Modulspannung U :

$$I = I_K - c_1 \cdot e^{c_2 \cdot U}$$

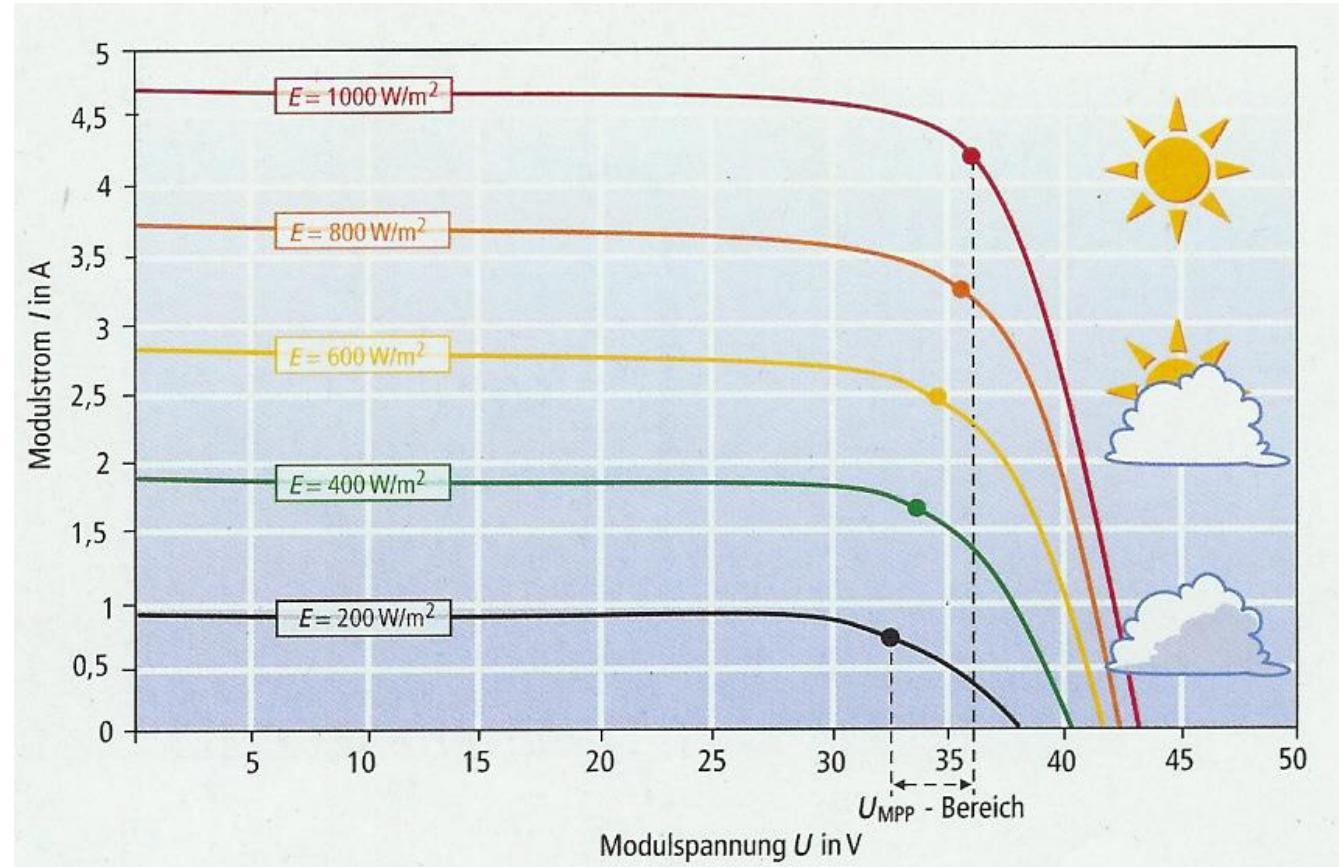
mit $c_1 = I_K \cdot e^{-c_2 \cdot U_L}$

und $c_2 = \frac{\ln(1 - I_{MPP}/I_K)}{U_{MPP} - U_L}$

Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

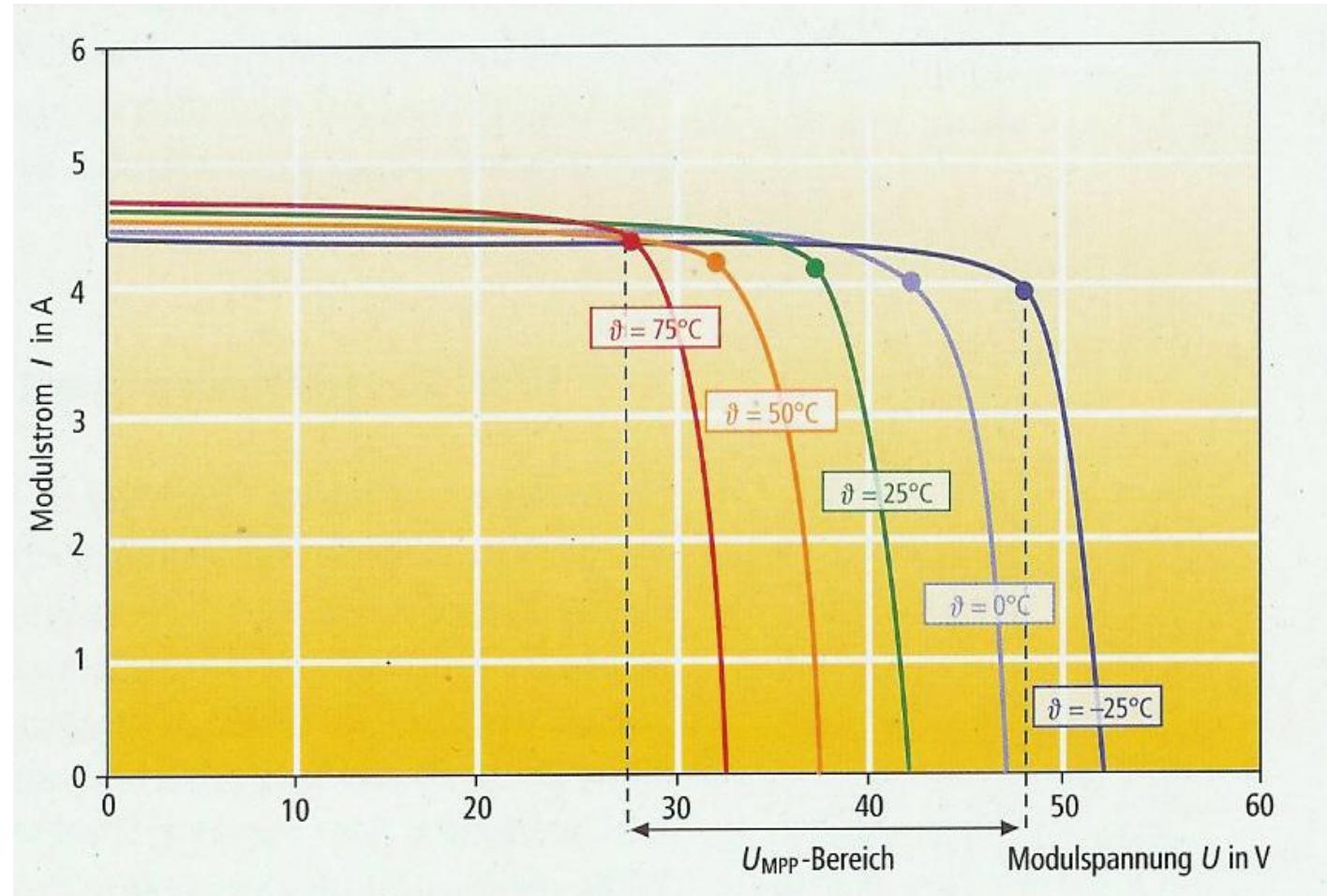
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2015

- I U-Kennlinien eines Moduls bei unterschiedlicher Bestrahlungsstärke und konstanter Zellbetriebstemperatur



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- I U-Kennlinien eines Moduls bei unterschiedlichen Zellbetriebstemperaturen und konstanter Bestrahlungsstärke

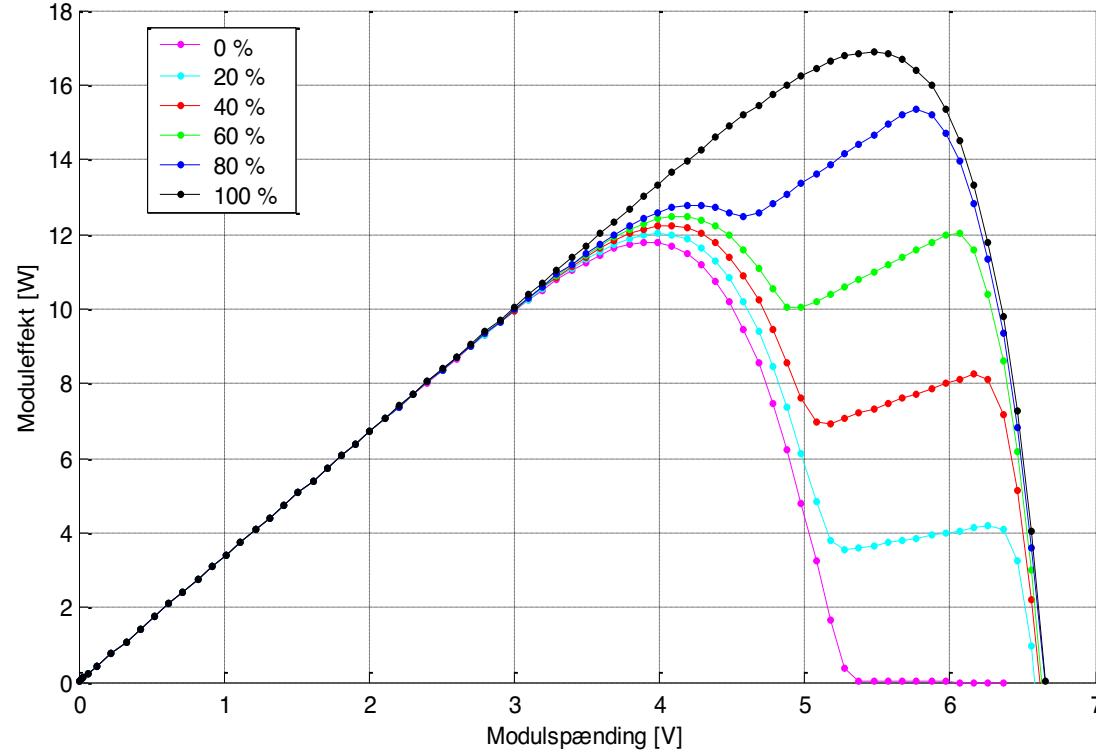


Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

PV-Module

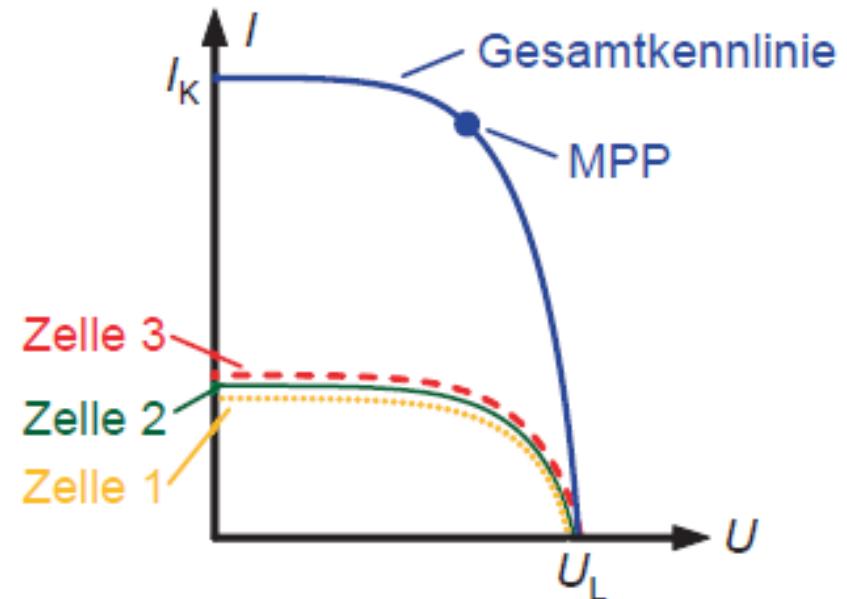
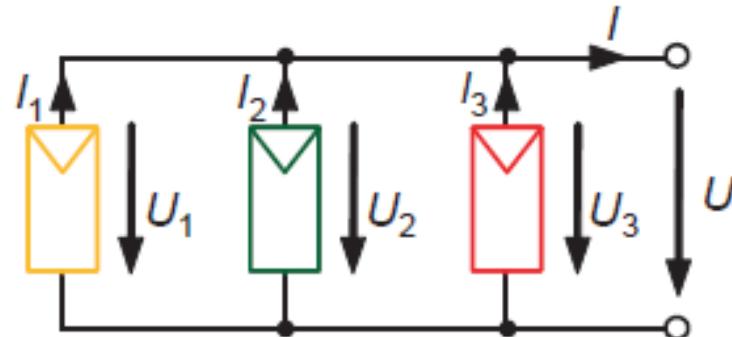
Einfluss von Abschattungen

Udgangseffekt som funktion af procent indkommende sol på en celle i forhold til de resterende 10. (1000 W/m² og 25 °C)



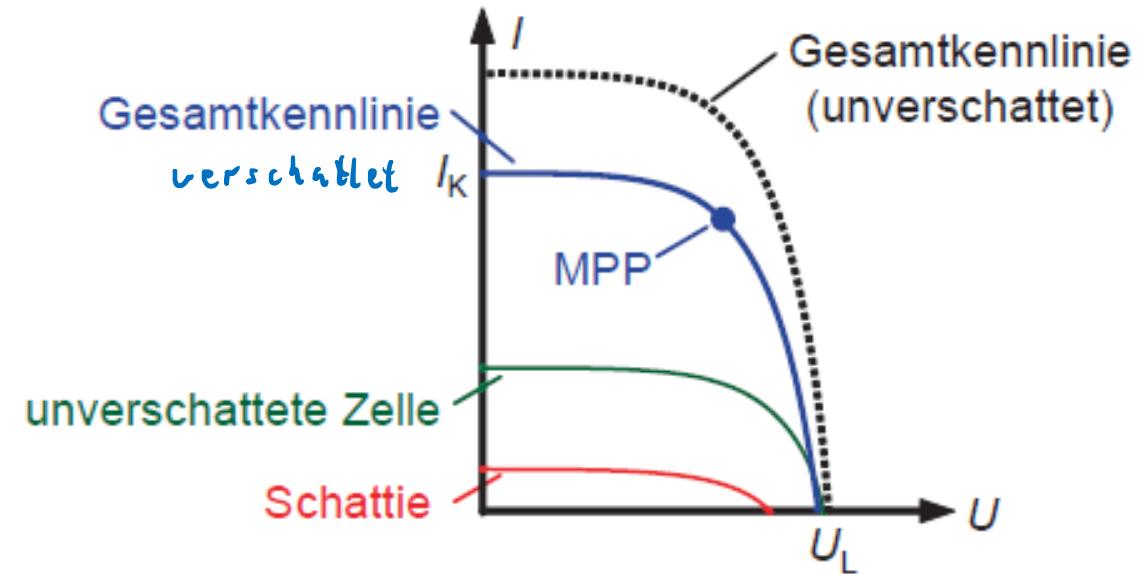
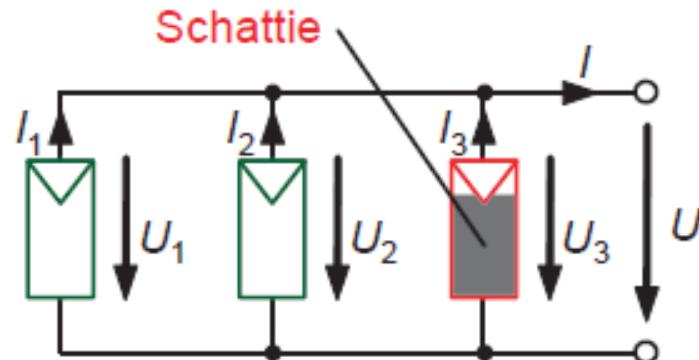
Quelle: Danfoss AS



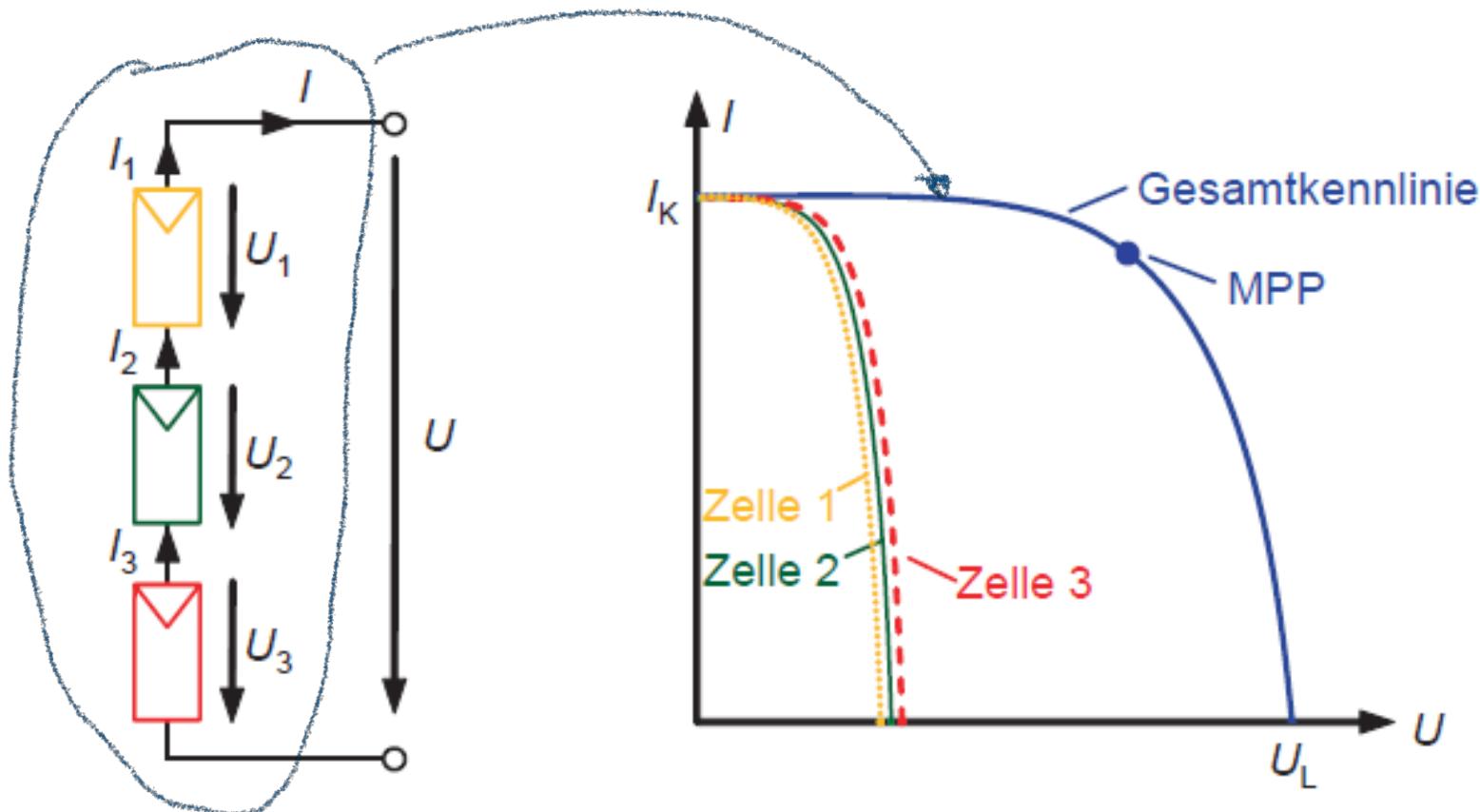


Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

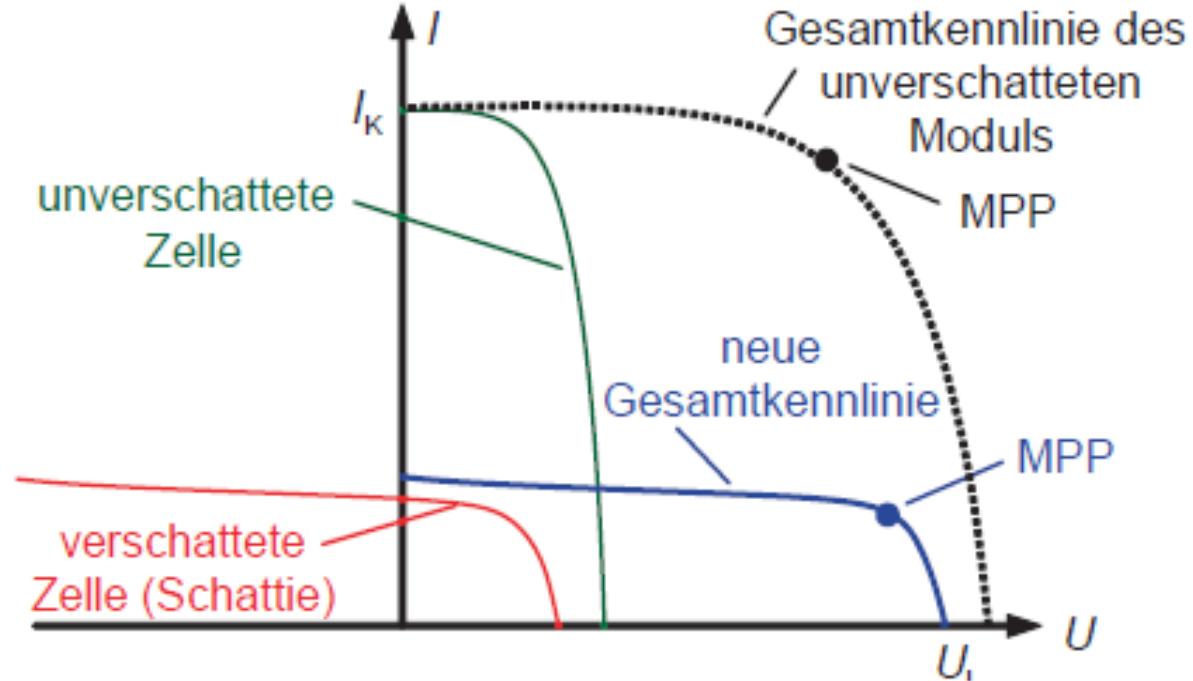
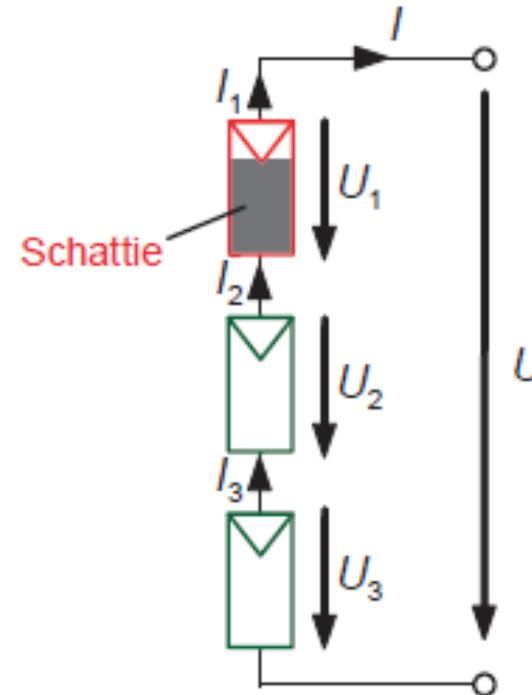
- Warum schaltet man nicht alle Zellen eines Modules parallel?



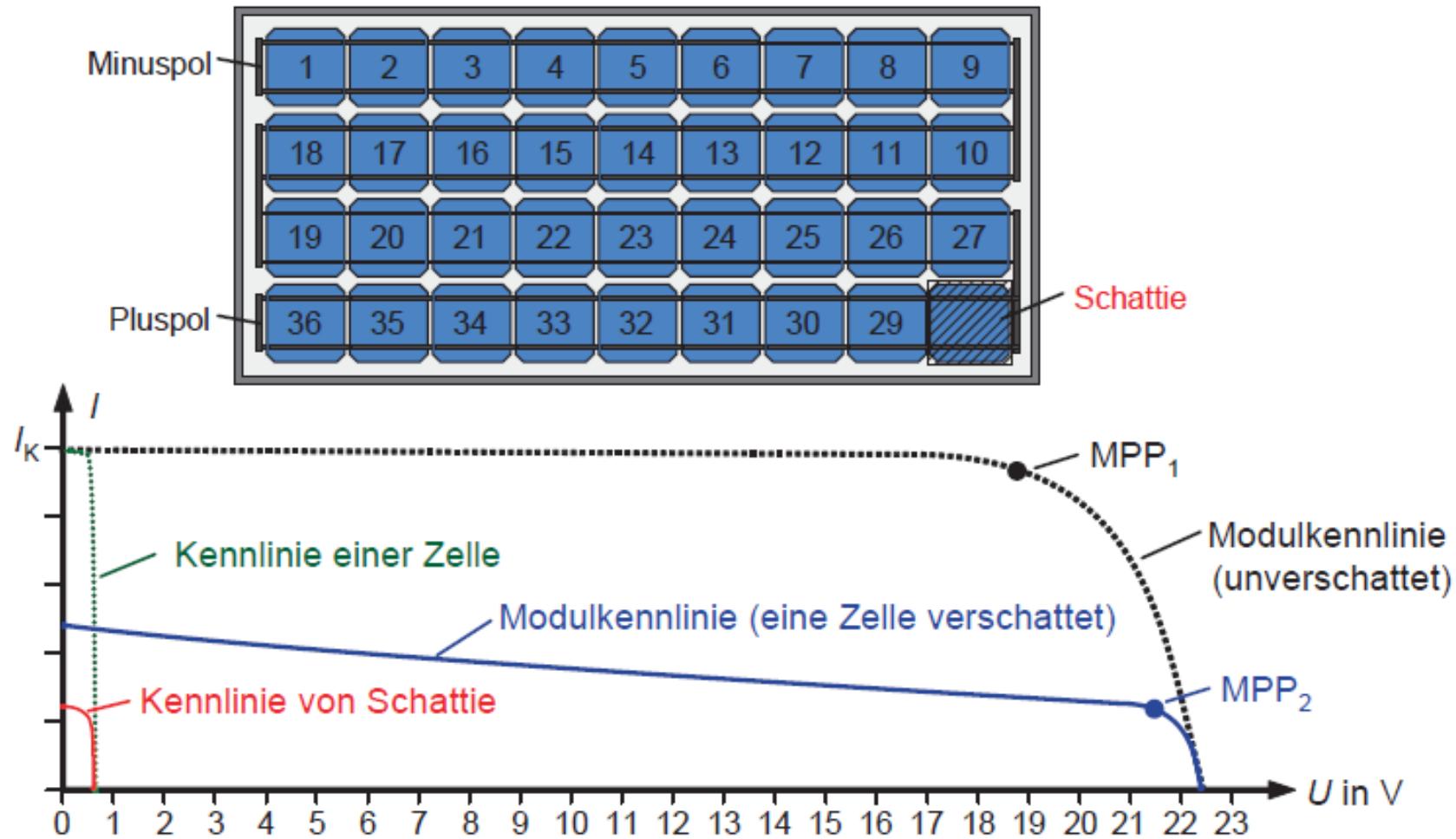
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



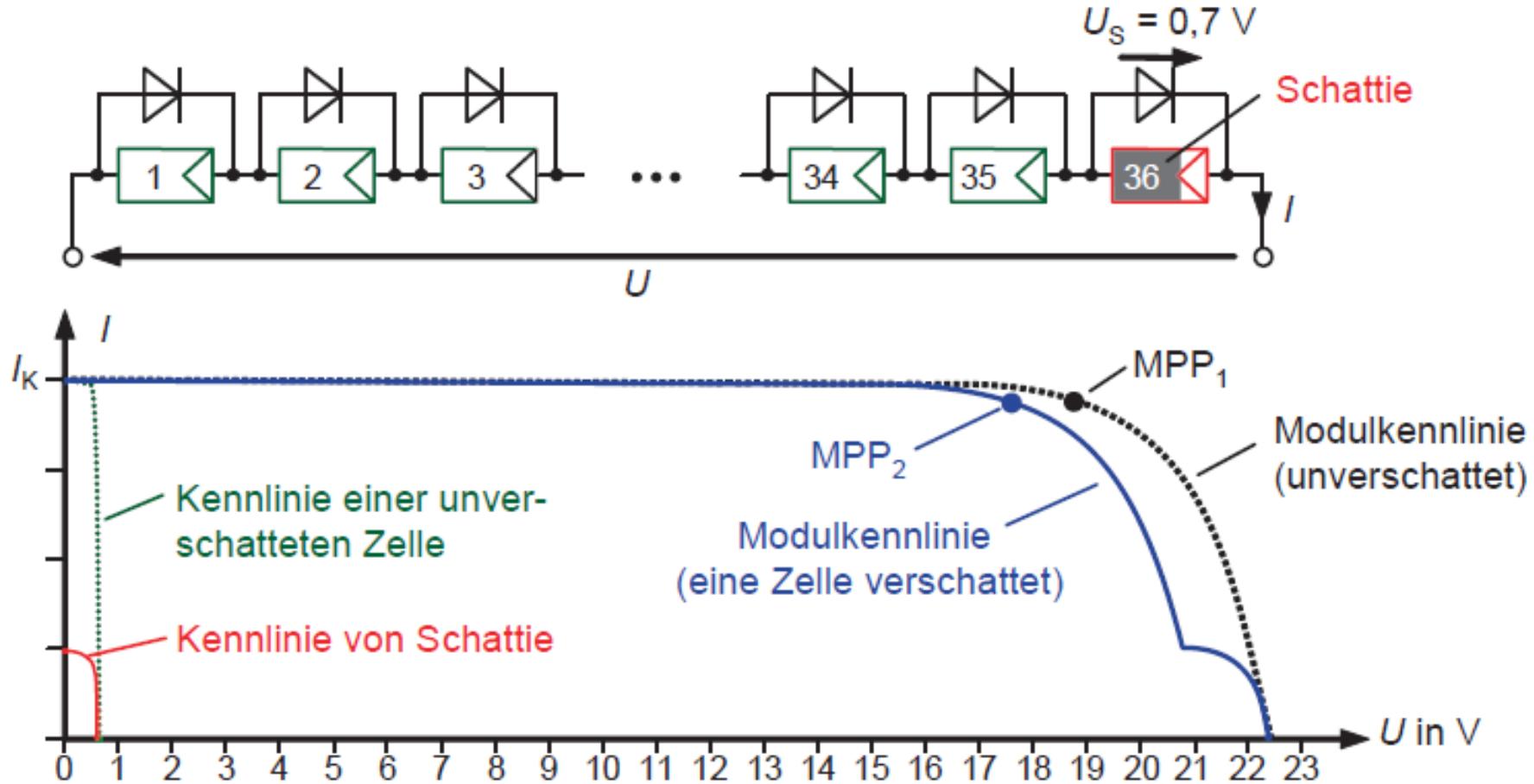
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



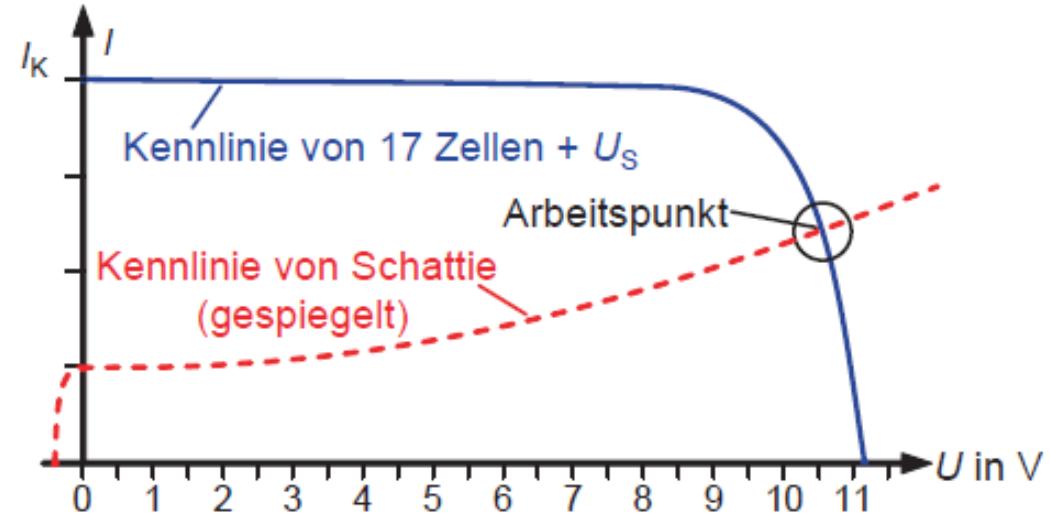
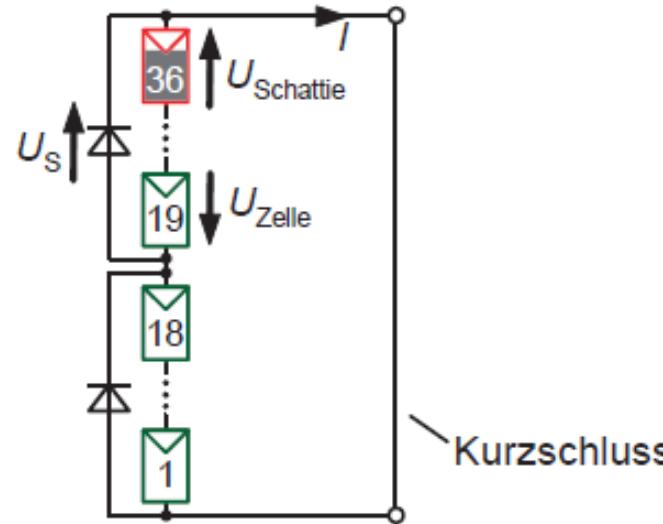
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



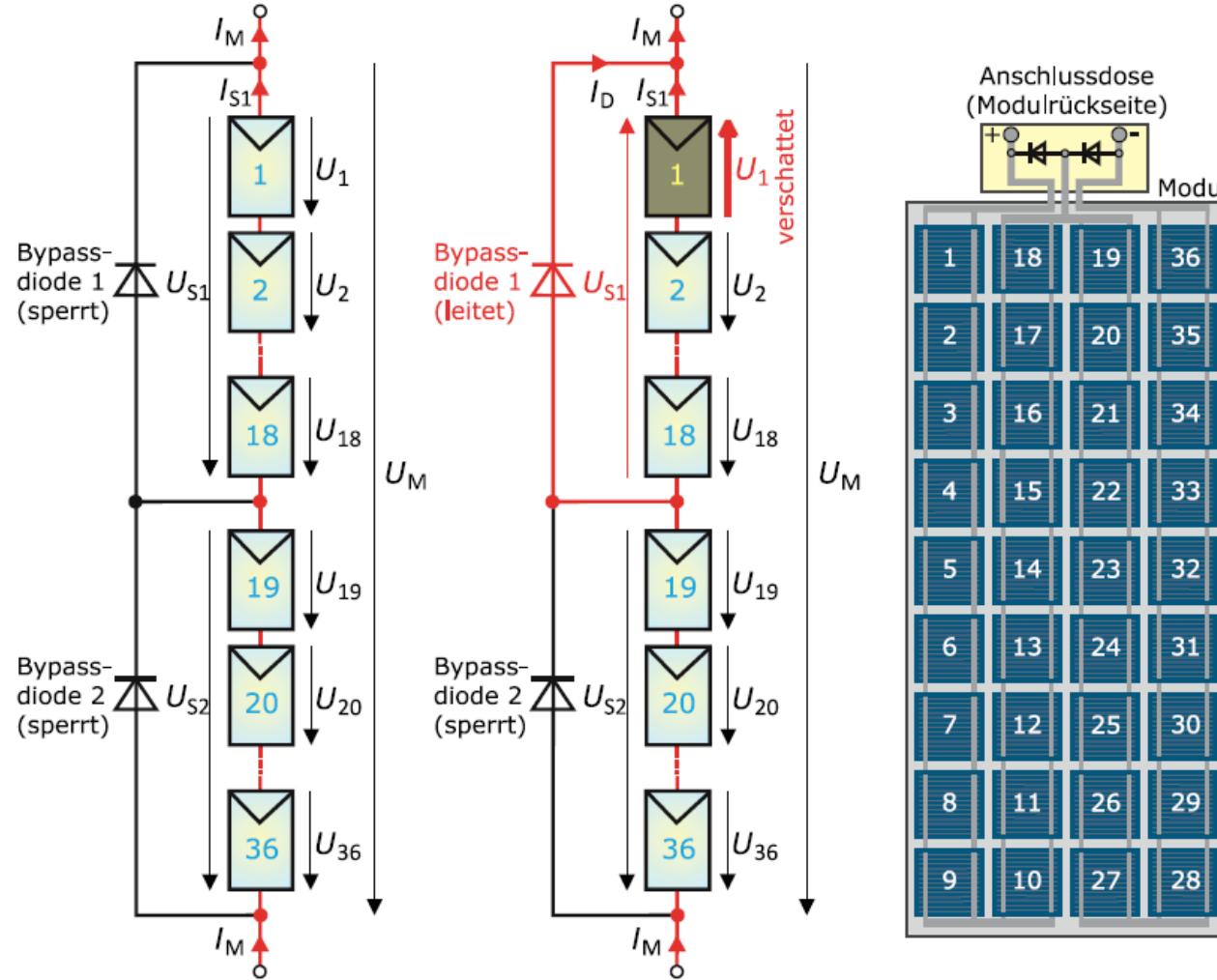
Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

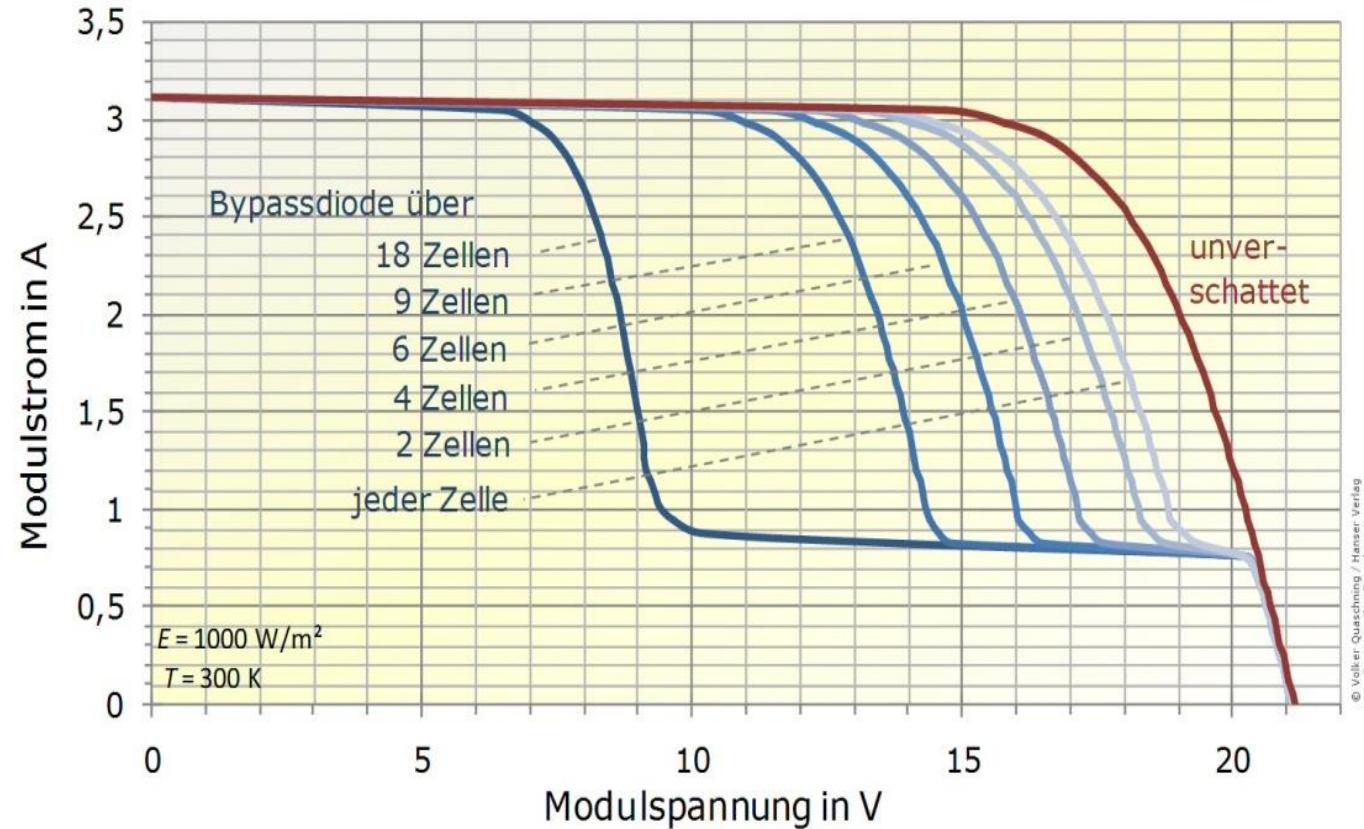


Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015



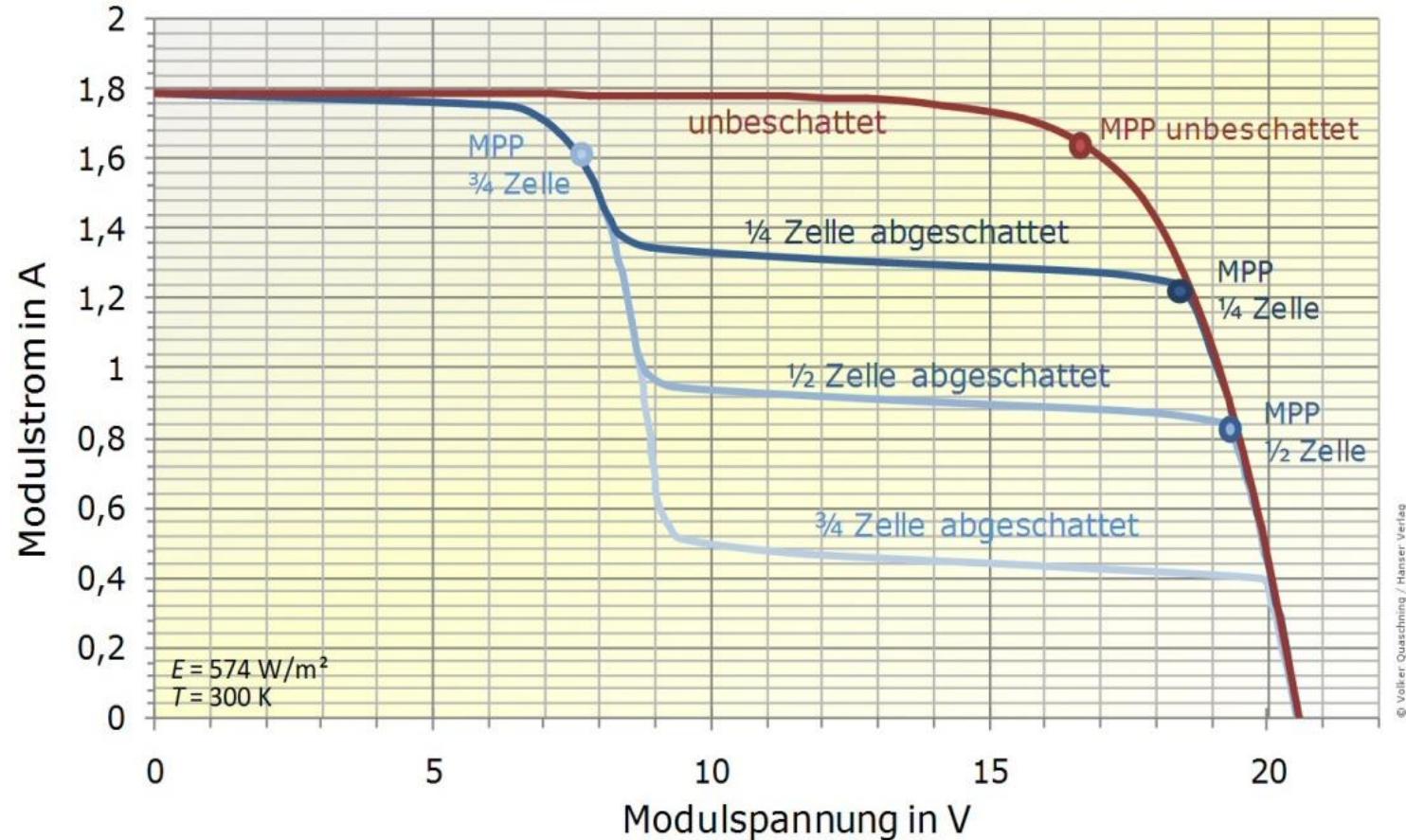
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- I U-Modulkennlinien mit Bypass-Dioden über einer unterschiedlichen Anzahl von Zellen
- Eine Zelle wird zu 75% abgeschattet



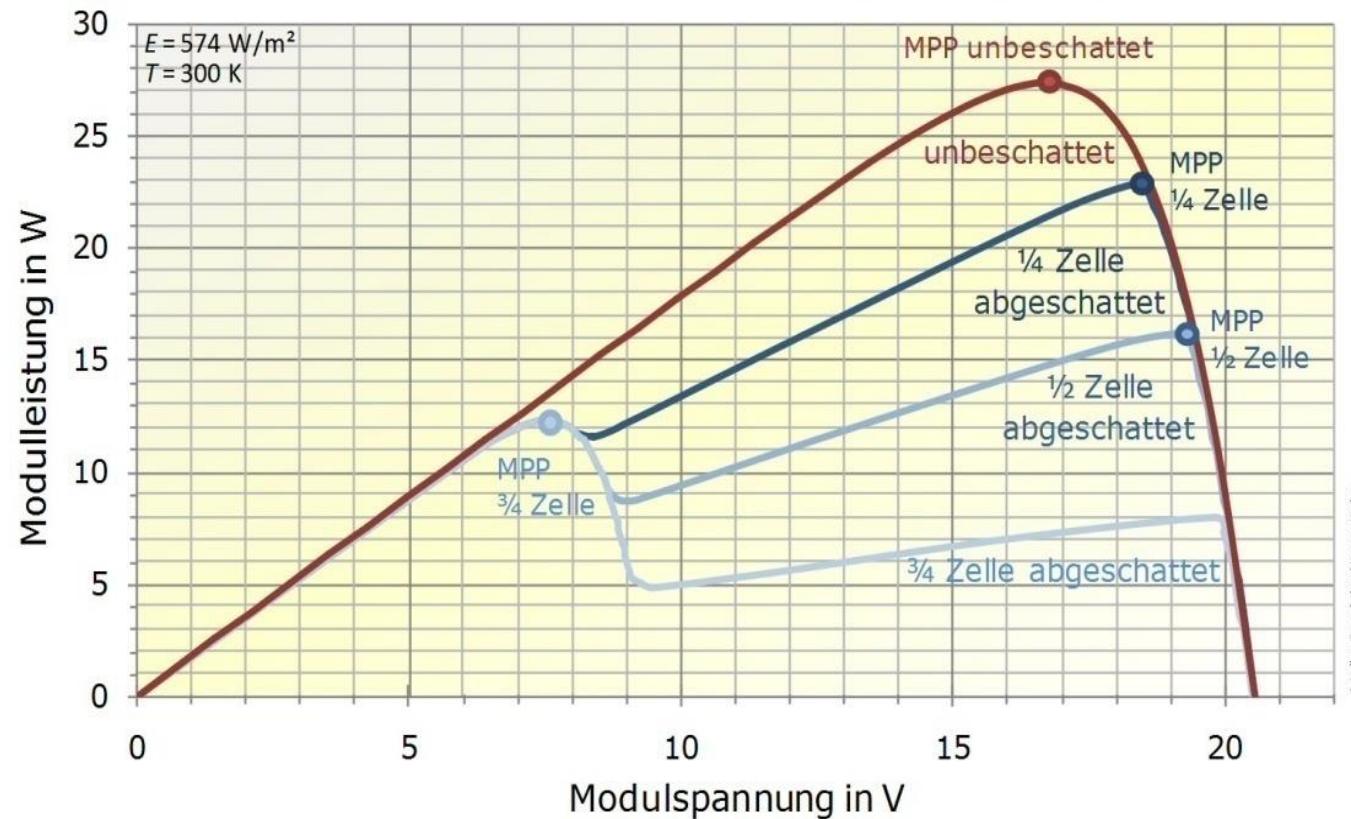
Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- I U-Kennlinien eines Moduls mit 36 Zellen und 2 Bypass-Dioden über jeweils 18 Zellen bei unterschiedlichen Abschattungen einer Zelle



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- P U-Kennlinien eines Moduls mit 36 Zellen und 2 Bypass-Dioden über jeweils 18 Zellen bei unterschiedlichen Abschattungen einer Zelle



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

Bezeichnung		X3-140	Pro-G3	SW280	X21	HIT245	FS-395	SF-170
Hersteller		Inventux	Hanwha Q Cells	Solar-world	Sun power	Panasonic	First Solar	Solar Frontier
Zellenzahl		125	60 (6 · 10)	60 (6 · 10)	96 (8 · 12)	72 (6 · 12)	154	k.A.
Zelltyp		aSi/µSi	poly-Si	mono-Si	mono-Si Rücks.	HIT	CdS/CdTe	CIS
MPP-Leistung P_{MPP}	W _p	140	270	280	345	245	95	170
Nennstrom I_{MPP}	A	1,09	8,85	9,07	6,02	5,54	2,00	1,95
Nennspannung U_{MPP}	V	128	30,8	31,2	57,3	44,3	47,5	87,5
Kurzschlussstrom I_K	A	1,25	9,47	9,71	6,39	5,86	2,17	2,20
Leerlaufspannung U_L	V	169	38,9	39,5	68,2	53,0	60,5	112,0
Temp.Koeff. α_{IK}	%/°C	+0,07	+0,04	+0,004	+0,055	+0,03	+0,04	+0,01
Temp.Koeff. α_{UL}	%/°C	-0,4	-0,33	-0,3	-0,25	-0,25	-0,20	-0,30
Temp.Koeff α_{PMPP}	%/°C	-0,3	-0,42	-0,45	-0,30	-0,29	-0,25	-0,31
Modulwirkungsgrad	%	9,8	16,2	16,7	21,2	19,4	13,2	13,4
Füllfaktor		0,66	0,74	0,73	0,79	0,79	0,72	0,69
Länge	mm	1100	1670	1675	1559	1580	1200	1257
Breite	mm	1300	1000	1001	1046	798	600	977
Masse	kg	26	19	21,2	18,6	15	12	20
Bypassdioden		0	3	3	3	3	0	1

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

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

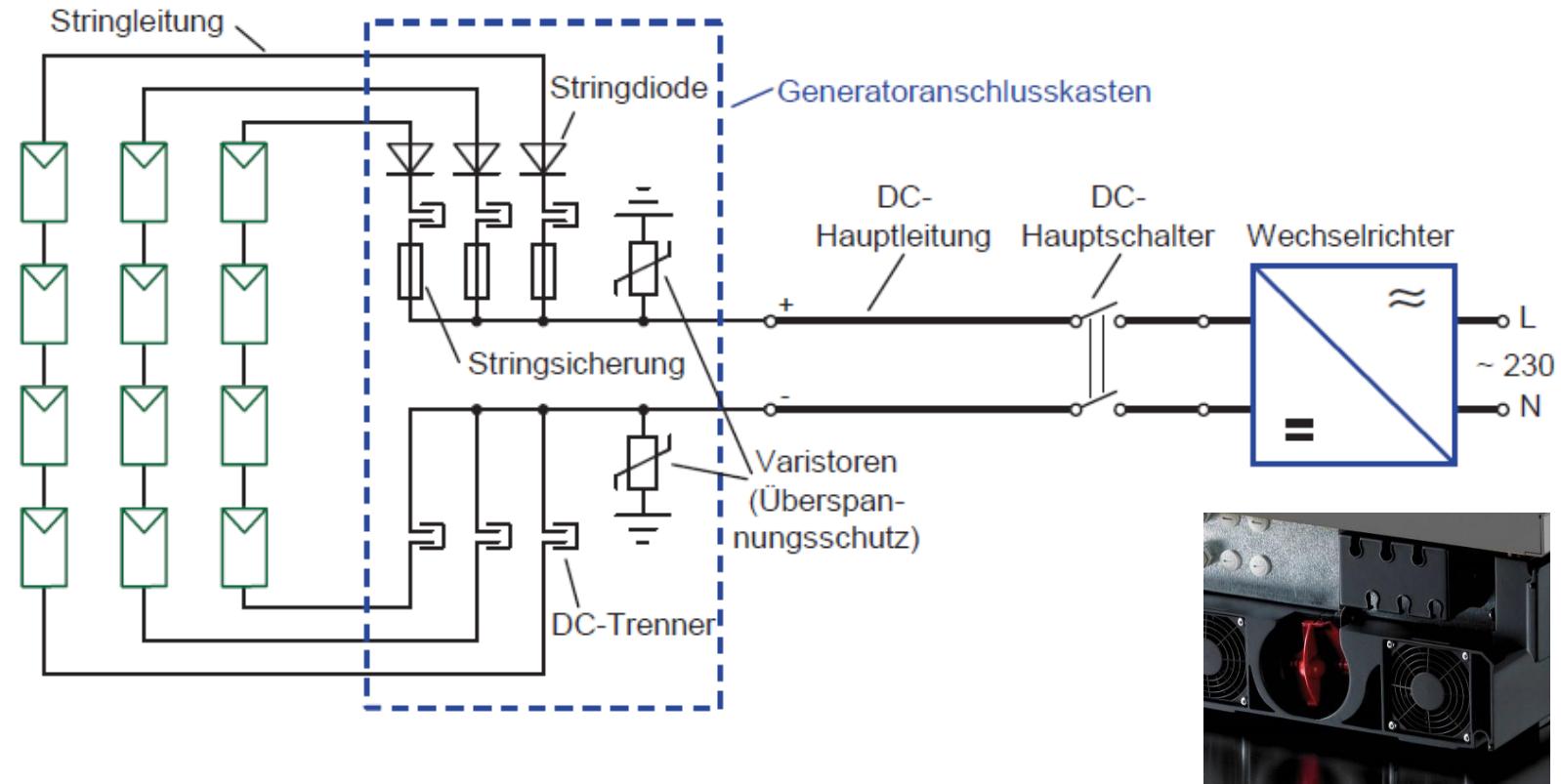
4.6 Belastung von PV-Generatoren (über Wechselrichter)

4.7 PV-Anlagenkonzepte

PV-Generatoren

Übersicht

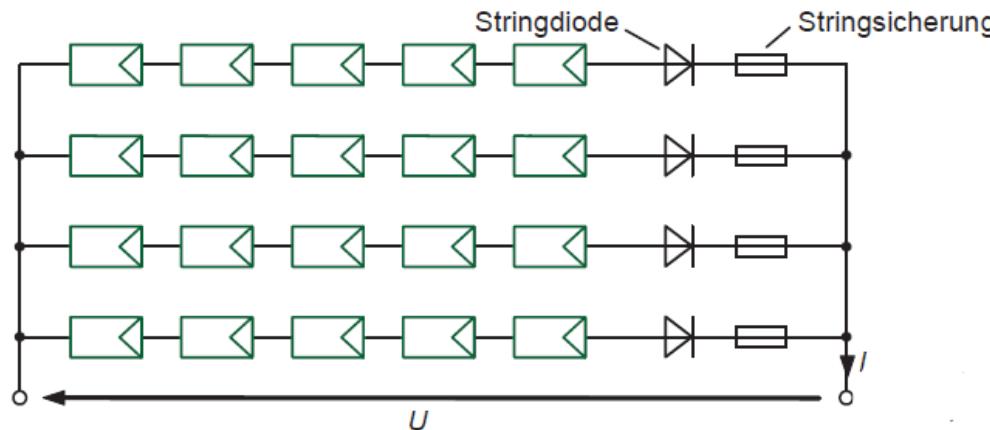
- Ein Photovoltaik-Generator (Solargenerator) entsteht durch die Reihen- und Parallelschaltung von PV-Modulen zu einer elektrisch und mechanisch größeren Einheit. Die zuvor bei den PV-Modulen diskutierte Problematik bei Teilabschaltung gilt hier entsprechend.



- Bei DC wie auch AC, fließt nur ein Strom bei einer Potentialdifferenz (Spannungsdifferenz).
- Der Strom fließt dabei von dem Höheren zum Niedrigeren Potential und wird dabei durch den Widerstand begrenzt



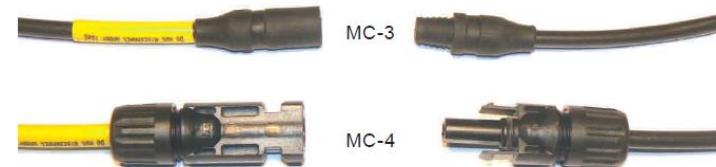
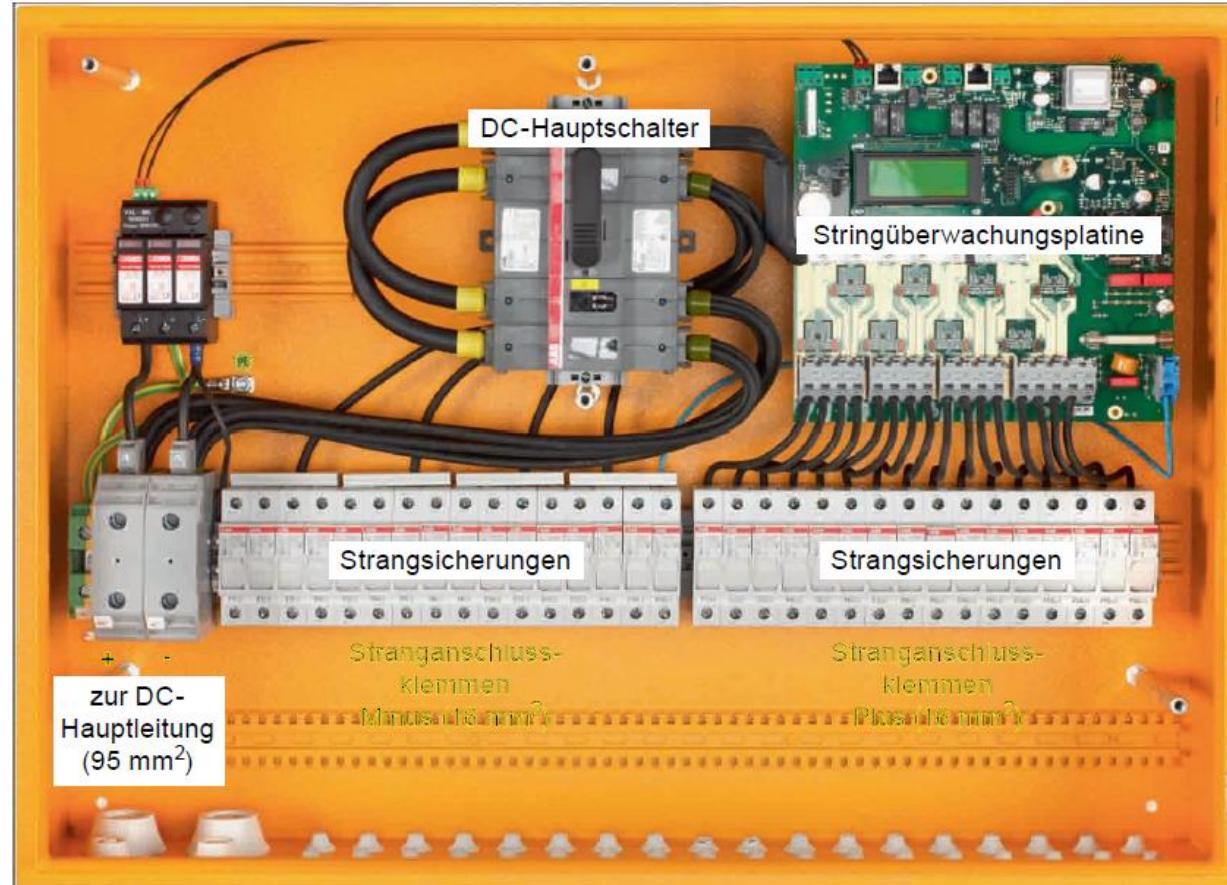
- Strangsicherungen
 - zum Schutz der Modul- bzw. Strangleitungen vor Überlastung in allen ungeerdeten Leitern (Plus- und Minusleiter)
 - geeignete PV-Gleichstromsicherungen verwenden, die auch bei kleinem Kurzschlussstrom auslösen ($I_K = I_K(E, \vartheta)$)
- Trenner auf Plus- und Minusseite
- Strangdioden (optional) in jedem Strang
 - Entkopplung der einzelnen Modulstränge bei Kurzschluss oder Abschaltung in einem der Stränge und damit Vermeidung eines Rückstroms durch den gestörten Strang.
 - in netzgekoppelten Anlagen meist ohne Strangdioden (Vermeidung der Leistungsreduktion infolge der Durchlassverluste, wegen $I_{Rück,zul} \approx 7 \cdot I_K$ keine Schädigung zu erwarten)



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

PV-Generatoren (DC)

Übersicht



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

- **Systemspannung: $U_L(E_{\max}, \vartheta_{\min})$**

Max. Leerlaufspannung der in Reihe geschalteten PV-Module
→ Maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} bei
→ Minimaler Zellbetriebstemperatur ϑ_{\min}

- **Systemstrom: $I_K(E_{\max}, \vartheta_{\max})$**

Maximaler Kurzschlussstrom der parallel geschalteten PV-Module
→ Maximale Bestrahlungsstärke E_{\max} bei
→ Maximaler Zellbetriebstemperatur ϑ_{\max}

- **Schwankungsbereich des MPPs (U_{MPP}, I_{MPP})**

→ legt erforderlichen Spannungs-Arbeitsbereich des MPP-Trackers fest
→ $U_{MPP,\min}(E_{\min}, \vartheta_{\max})$
bei minimaler Bestrahlungsstärke E_{\min} und maximaler Zellbetriebstemperatur ϑ_{\max}

- **Idealer Energieertrag eines PV-Generators:** $E_{\text{ideal}} = A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} \cdot E_{G(\text{hor/gen})} \cdot \Delta t$

mit A_{PV} : Fläche des PV-Generators

η_{PV} : (Umwandlungs-) Wirkungsgrad des PV-Generators

$E_{G(\text{hor/gen})}$: Globale Bestrahlungsstärke auf den horizontal/geneigt montierten PV-Generator

Δt : betrachtetes Zeitintervall

$H_G = E_G \cdot \Delta t$: Globalstrahlung [Ws/m^2]

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

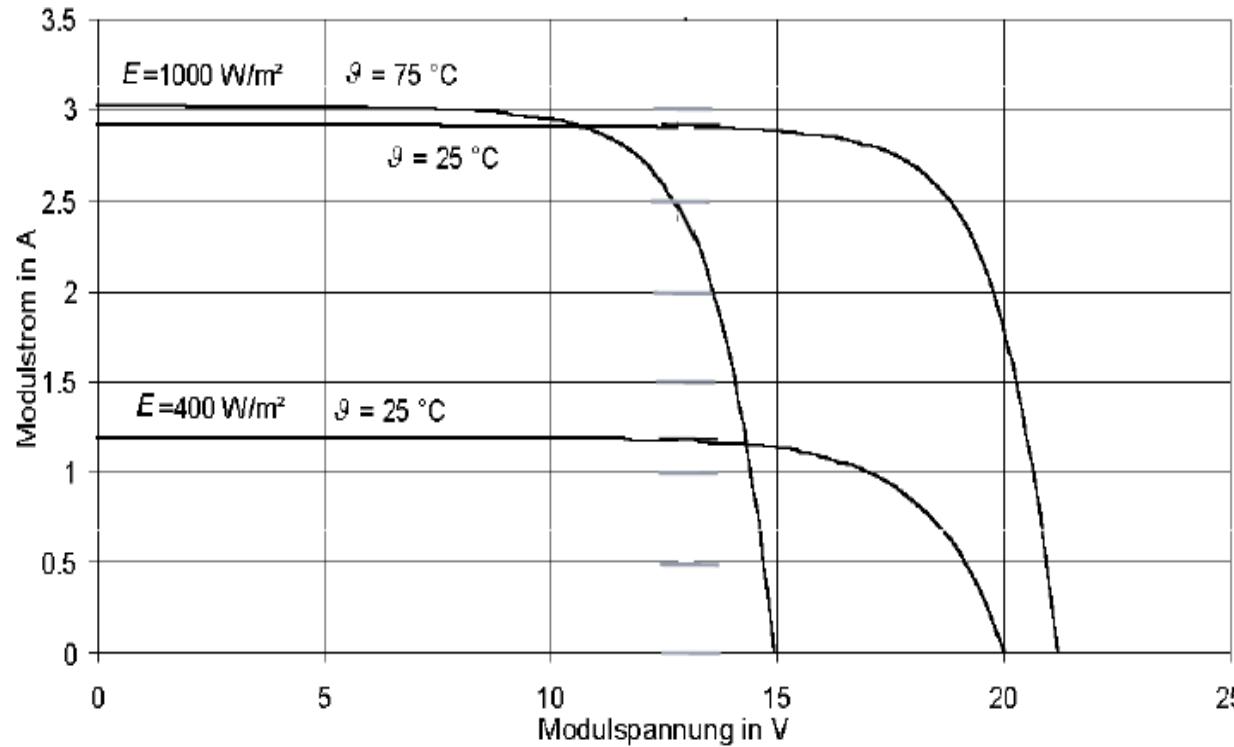
- Es gibt zwei Arten von Belastungen:

- Gleichstrombelastung
 - Ohmscher Widerstand, Gleichstromsteller, Akkumulator
- Wechselstrombelastung
 - Energieeinspeisung in ein ein- oder dreiphasiges Wechselstromnetz über einen ein- oder dreiphasigen Wechselrichter



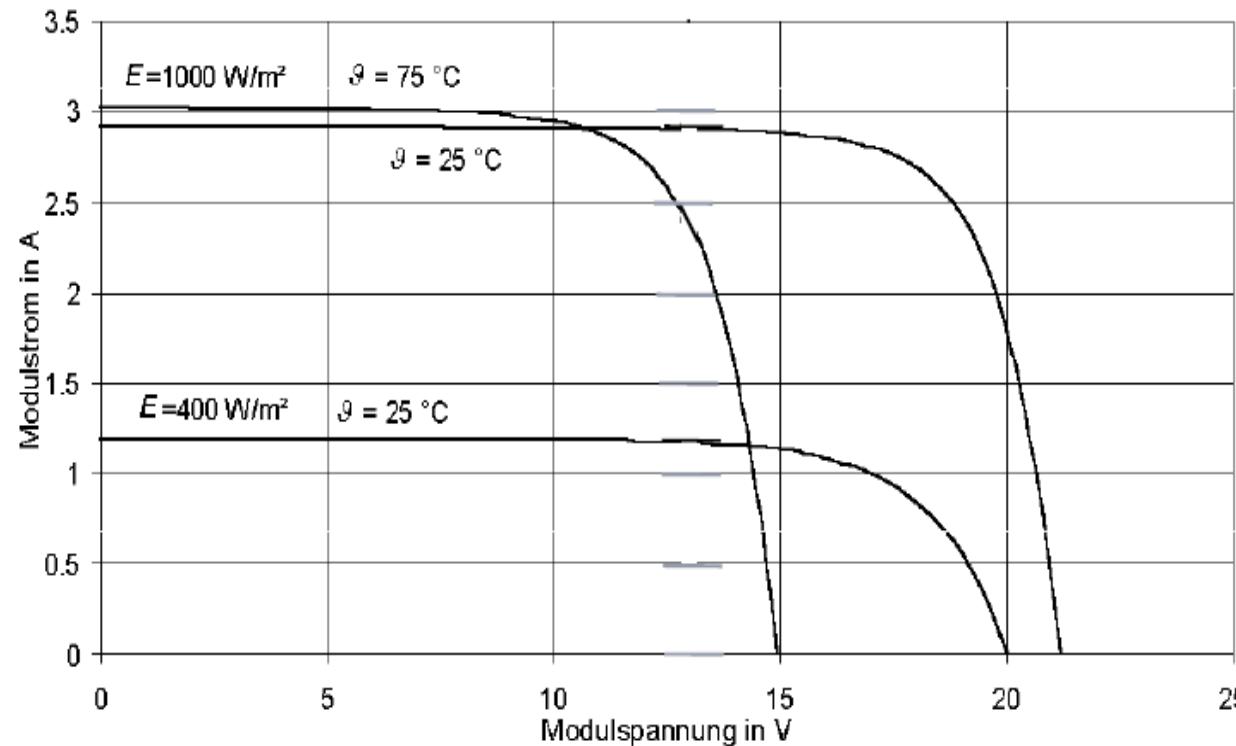
Belastung von PV-Generatoren (MPP)

Ohmscher Widerstand

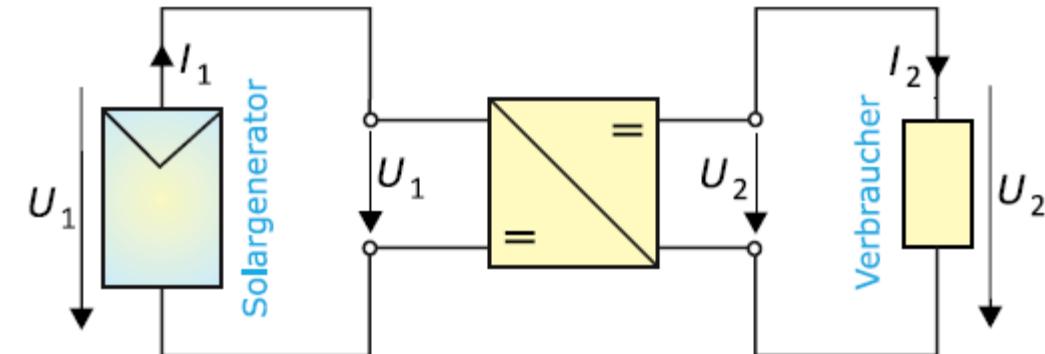


- Ein fester Widerstandswert führt je nach vorliegenden Betriebsbedingungen beim PV-Generator (Bestrahlungsstärke E, Zellbetriebstemperatur ϑ) zu unterschiedlichen Arbeitspunkten (MPP, X). Um dem PV-Generator im vorliegendem Beispiel jedoch auch bei von $E = 400 \text{ W/m}^2$ und $\vartheta = 25^\circ\text{C}$ abweichenden Betriebsbedingungen die maximal mögliche Leistung zu entziehen, muss der Widerstandswert verändert werden
- Berechnen Sie die Leistungen im MPP bei allen 3 Generatorkennlinien

- Eine Veränderung der Spannung am PV-Generator kann in einfacher Weise auch durch Zwischenschaltung eines Gleichstromstellers erfolgen. Bei einem Gleichstromsteller lassen sich dessen Eingangsspannung U_1 (= Ausgangsspannung U des PV-Generators) und seine Ausgangsspannung U_2 (= Verbraucherspannung) unabhängig voneinander über das Tastverhältnis a einstellen (Nachweis: → „Fazit“ beim Tiefsetzsteller/ Hochsetzsteller).



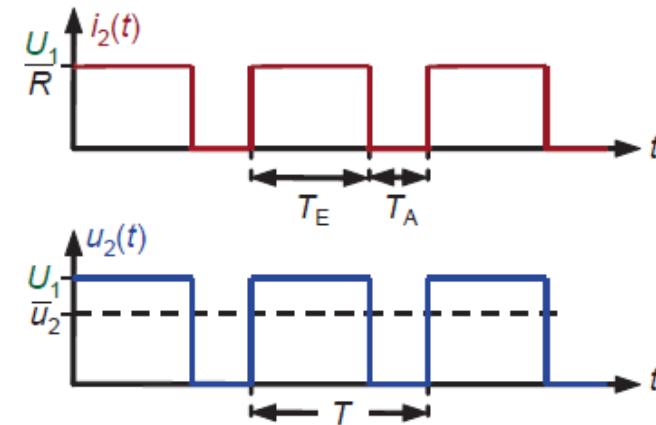
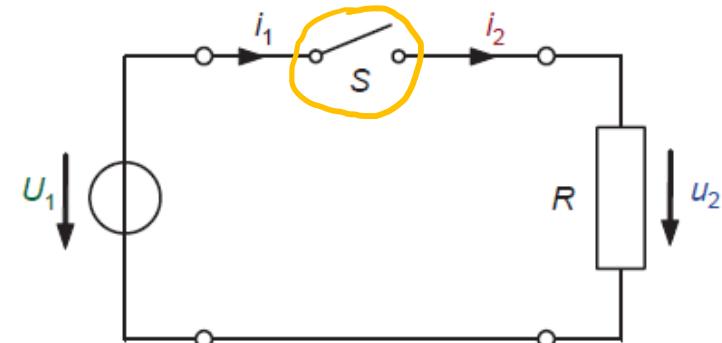
- **Arten von Gleichstromstellern** (ausführliche Behandlung in EE2-ER „Elektrische und regenerative Energietechnik“ und in EE6-AT „Antriebe und Leistungselektronik“):
 - Potenzialverbindende Gleichstromsteller
 - Tiefsetzsteller ($U_2 \leq U_1$)
 - Hochsetzsteller ($U_2 > U_1$)
 - Invertierender Hoch-Tiefsetzsteller (Umkehrsteller, $|U_2| \leq \geq U_1$)
 - Hoch-Tiefsetzsteller (nicht invertierend, $U_2 \leq \geq U_1$)
 - Potenzialtrennende Gleichstromsteller
 - Sperrwandler
 - Durchflusswandler



Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- Arten von Gleichstromstellern (DC/DC-Wandler) (ausführliche Behandlung in EE2-ER „Elektrische und regenerative Energietechnik“ und in EE6-AT „Antriebe und Leistungselektronik“):

- Tiefsetzsteller:



Schalter S

Real ein el. Schalter



Transistor

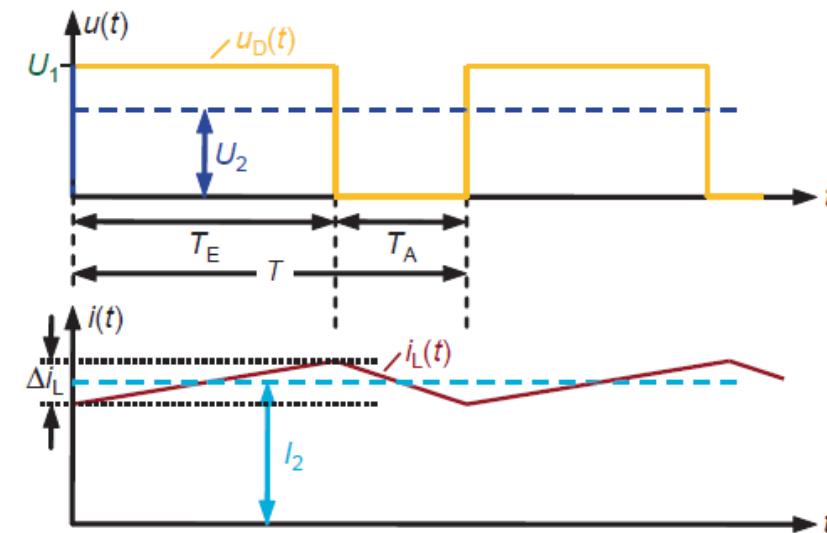
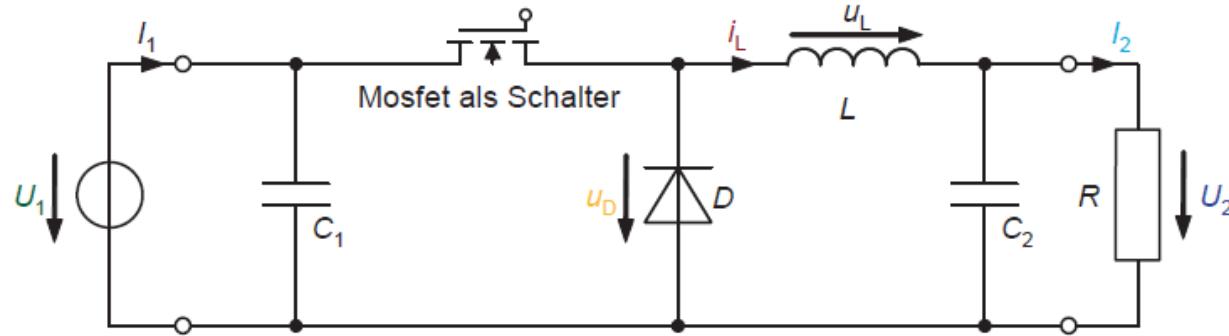


MOSFET



IGBT

■ Tiefsetzsteller:

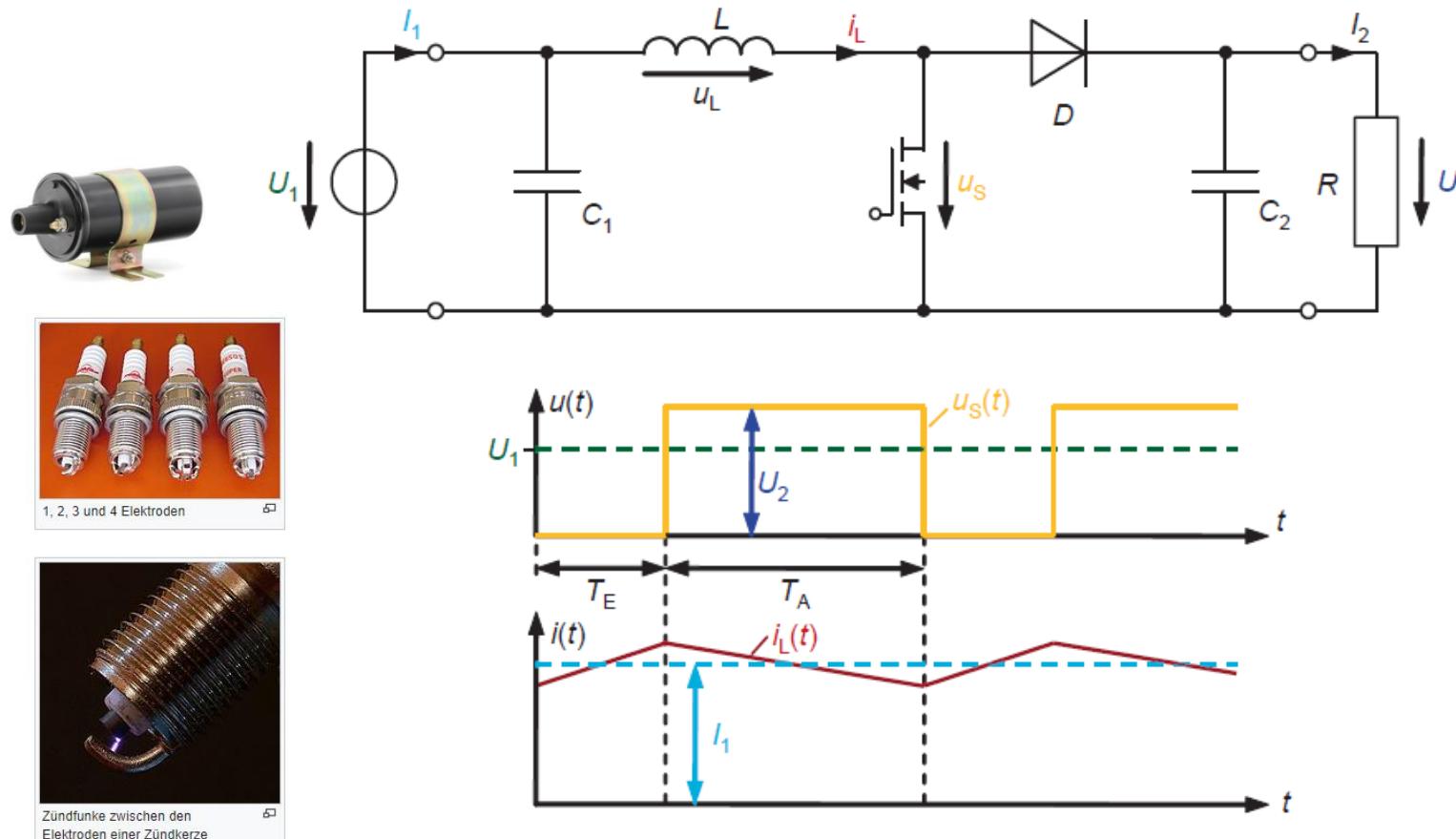


Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Belastung von PV-Generatoren

Gleichstromsteller

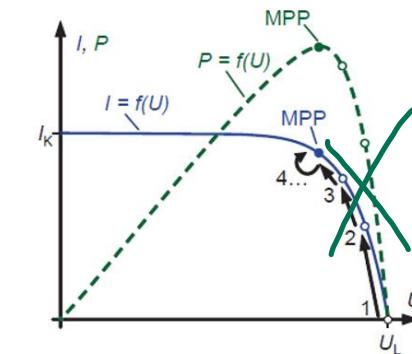
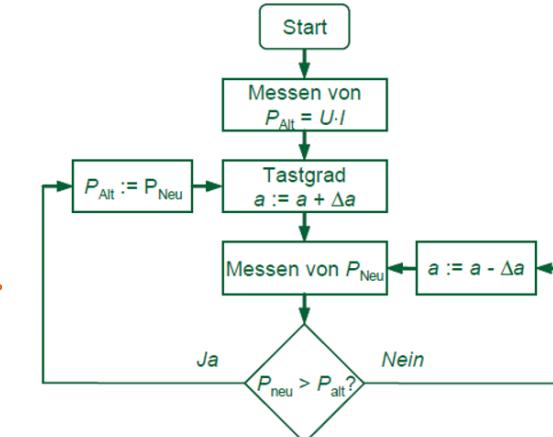
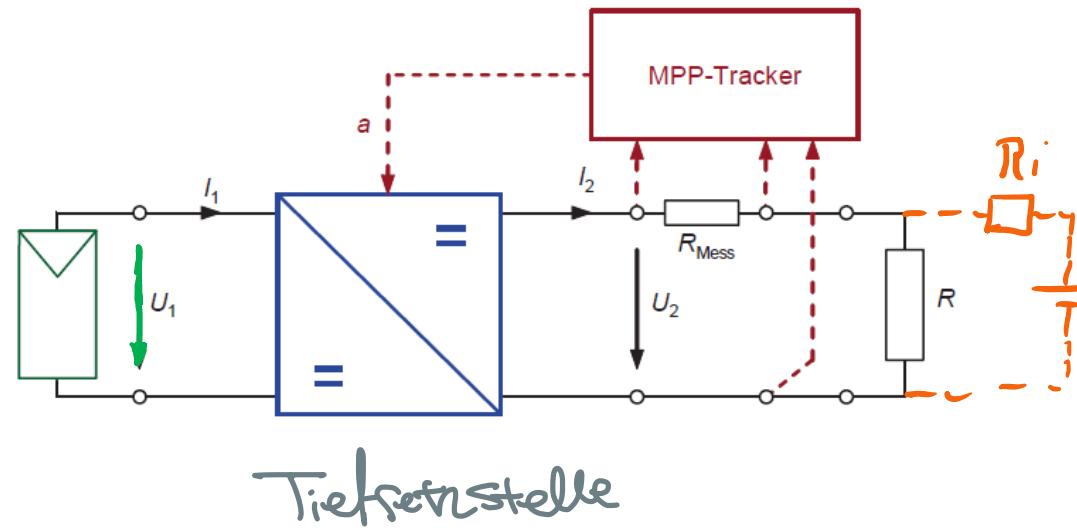
■ Hochsetzsteller:



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

MPP-Tracking

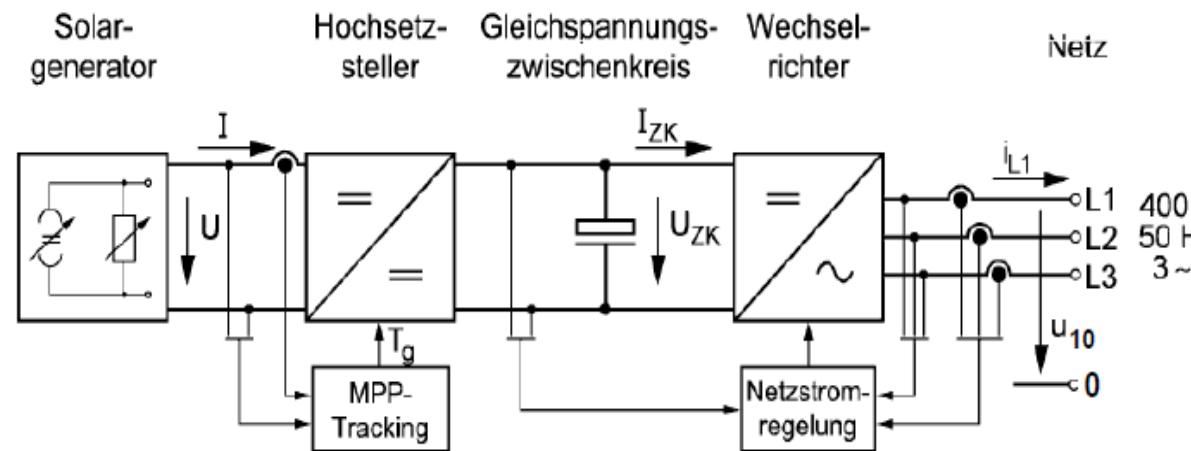
- Um dem Solargenerator immer die maximal mögliche Leistung zu entziehen, muss der Generator stets im jeweiligen Punkt maximaler Leistung belastet werden. Aufgabe des MPP-Trackings ist es, durch Messung von Strom und Spannung das Tastverhältnis a so zu verändern und einzustellen, dass die abgegebene Leistung maximiert wird.



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

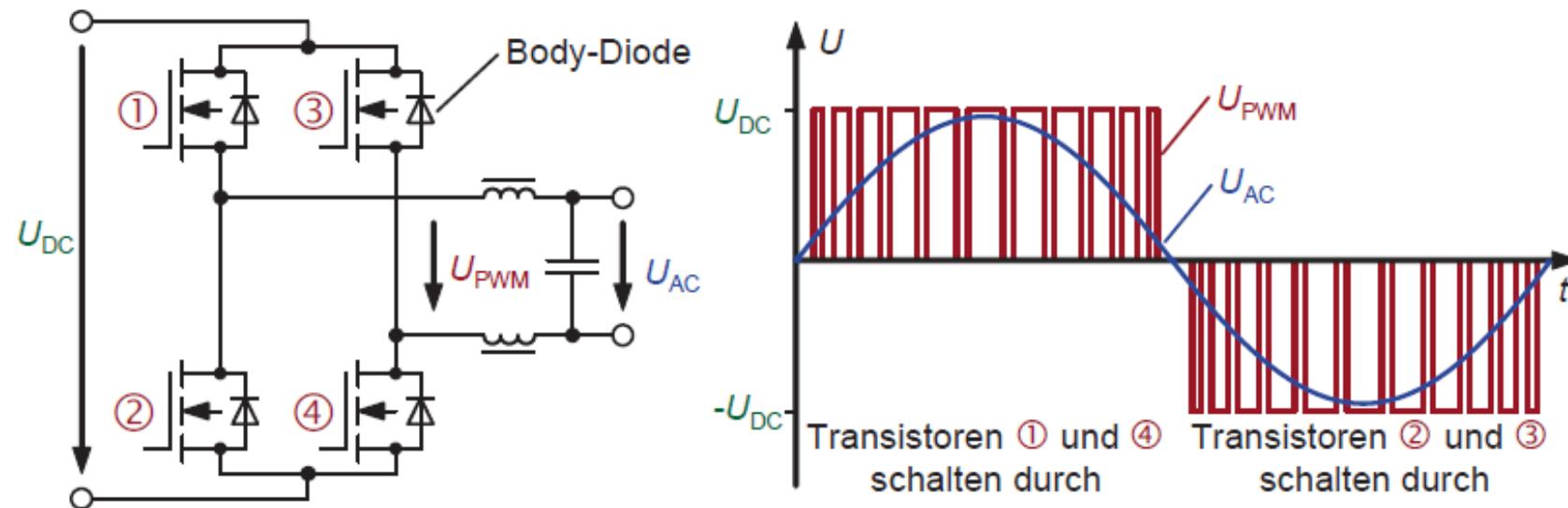
■ Wechselrichter

- Bei den bisherigen Beispielen für die Belastung von PV-Generatoren wurden nur Gleichstromverbraucher betrachtet. In der öffentlichen Elektrizitätsversorgung werden jedoch fast ausschließlich Wechselstromsysteme verwendet. Darüber hinaus werden gängige Verbraucher (z.B. Haushaltsgeräte) ebenfalls mit Wechselstrom betrieben. Zur Umformung von Gleichstrom in Wechselstrom werden sog. Wechselrichter eingesetzt.



■ Wechselrichter – PWM Brücke

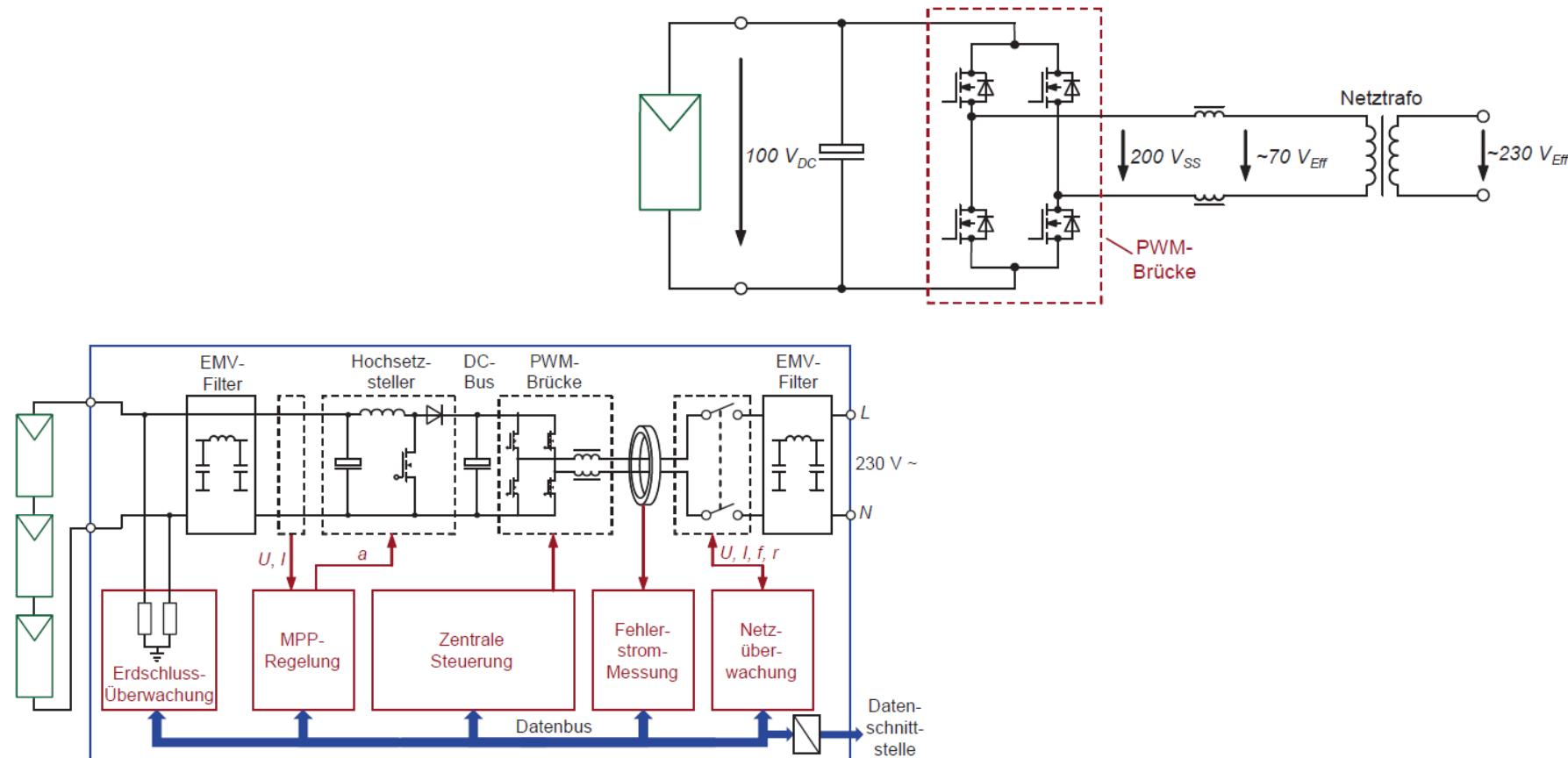
- Ähnlich wie bei den Gleichstromstellern werden auch hier elektronische Schalter (Transistoren, MOSFETs) kontinuierlich an- und ausgeschaltet
- Die Einschaltzeit wird wie zuvor durch das Tastverhältnis a definiert
- Bei dem Wechselrichter ändert sich das Tastverhältnis allerdings sinusförmig
- Die sinusförmige Änderung des Tastverhältnisses wird PWM genannt – Pulse Width Modulation
- Der Mittelwert dieser PWM Spannung ergibt eine Sinusspannung



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

■ Wechselrichter – PWM Brücke

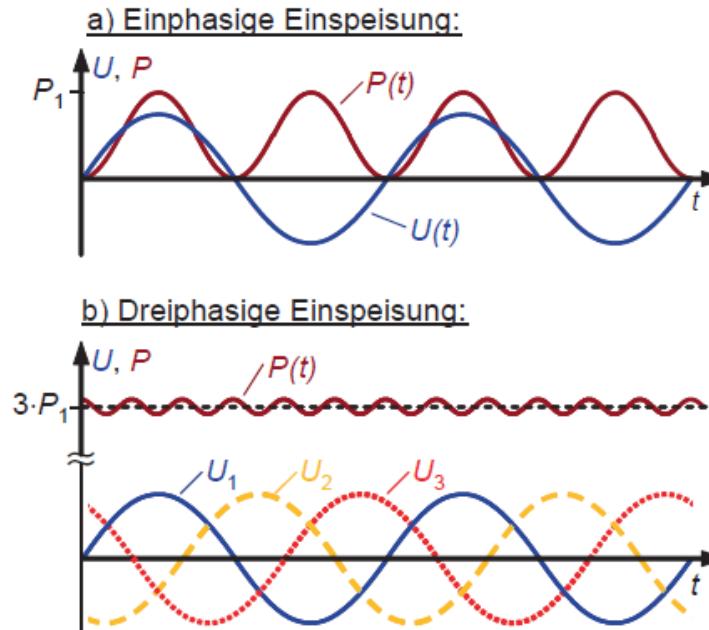
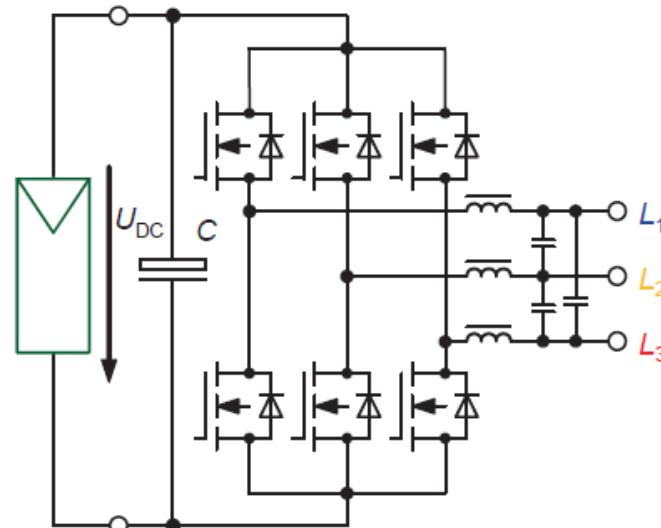
- Der Wechselrichter kann über einen Netztrafo in Netz einspeisen und ist damit galvanisch isoliert
- Viele Wechselrichter sind, um den Wirkungsgrad zu erhöhen, „Trafолос“ (TL) – brauchen dann aber Fehlerstromüberwachung (Funktioniert wie ein FI-Schutzschalter)



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Dreiphasiger Wechselrichter

- Für höhere Leistungen (über 5kW) sind die Wechselrichter heutzutage meist 3-phäsig ausgelegt („Drehstrom“)
- Das heißt der Wechselrichter (DC/AC) formt aus einer DC Spannung 3 AC Spannungen die um 120° verschoben sind (U_{L1} , U_{L2} , U_{L3})
- Das „Drehstromnetz“ benötigt eine minimale DC Spannung von $230 \cdot \sqrt{3} \cdot 230\text{Vrms} = 567\text{V}$



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

Wirkungsgrad-Definitionen bei PV-Wechselrichtern:

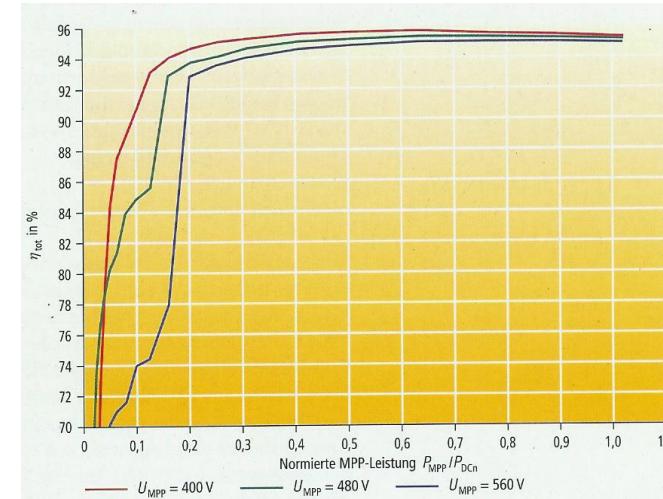
▪ Umwandlungswirkungsgrad

$$\eta_{UM} = \frac{P_{AC(1)}}{P_{DC}} = \frac{\text{Grundschwingungs-Ausgangswirkleistung}}{\text{Eingangs-Gleichstromleistung}} = \eta_{UM}(P_{DC}, U_{DC})$$

in Datenblättern als Bemessungs- (Nenn-) Wirkungsgrad angegeben

beschreibt die Verluste bei der Umwandlung des Gleichstroms in Wechselstrom:

- Durchlass-, Schalt- und Sperrverluste der Leistungshalbleiter
- Eigen-Leistungsbedarf der Steuerung, Regelung, Betriebsdatenerfassung, etc.
- Transformatorverluste (falls vorhanden)
- Verluste im Leistungsschalter



▪ Europäischer Wirkungsgrad (EN 50524)

- Bei welcher Bestrahlungsstärke soll der Umwandlungswirkungsgrad gemessen werden – STC?
- Da die Bestrahlungsstärke nicht immer gleich ist und die Wechselrichter drauf unterschiedlich reagieren wurde der Europäische Wirkungsgrad eingeführt:

$$\eta_{Euro}(U_{DC}) = 0,03 \cdot \eta_{5\%} + 0,06 \cdot \eta_{10\%} + 0,13 \cdot \eta_{20\%} + 0,1 \cdot \eta_{30\%} + 0,48 \cdot \eta_{50\%} + 0,2 \cdot \eta_{100\%}$$

= mit den solaren Bestrahlungsverhältnissen in Europa gewichteter Wirkungsgrad

Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

4 Photovoltaik

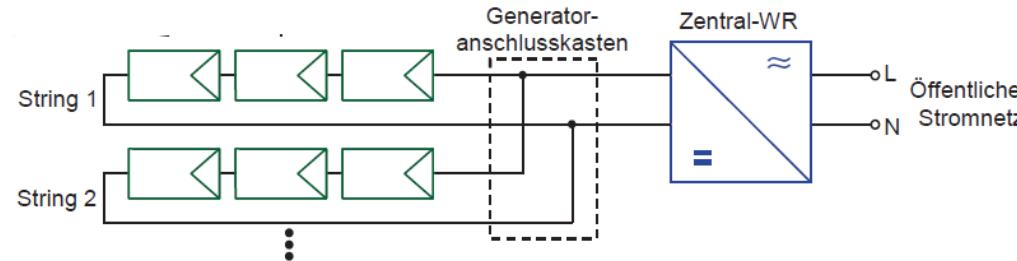
4 Photovoltaik

- 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**

- **Konzept mit zentralem Wechselrichter (und zentralem Gleichstromsteller)**
- **Zentralwechselrichterkonzept**

➤ Grundsätzliche Vor- und Nachteile:

- + Einsatz nur eines Wechselrichters mit hohem Wirkungsgrad
- Hohe Mismatch-Verluste verursacht durch die Reihen-/ Parallelschaltung von PV-Modulen mit abweichenden Parametern (z.B. UMPP, IMPP, PMPP) infolge von Exemplarstreuungen
- Hoher Aufwand für DC-seitige Verkabelung
- Keine Anlagenredundanz bei Ausfall des Zentral-Wechselrichters
- Schwierige Anlagenerweiterbarkeit



Quelle: SMA Technologies

■ Konzepte mit dezentralen Wechselrichtern

- U.a. aufgrund der diskutierten Problematik der Teilabschaltung und der damit einhergehenden Leistungsminderung empfehlen sich für PV-Anlagen größerer Leistung dezentrale Konzepte mit mehreren Teilgeneratoren.

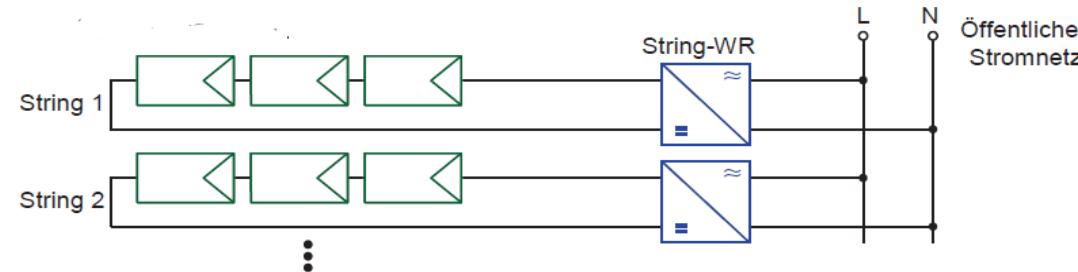
➤ Grundsätzliche Vor- und Nachteile:

- + Verringelter Einfluss von Teilabschattungen
- + Geringere Mismatch-Verluste
- + Reduzierter Aufwand für DC-seitige Verkabelung
- + Hohe Anlagenredundanz
- + Einfache Anlagenerweiterbarkeit
- Einsatz mehrerer Wechselrichter mit geringerem Wirkungsgrad



- Konzepte mit dezentralen Wechselrichtern
- Strangwechselrichterkonzept (Stringkonzept)

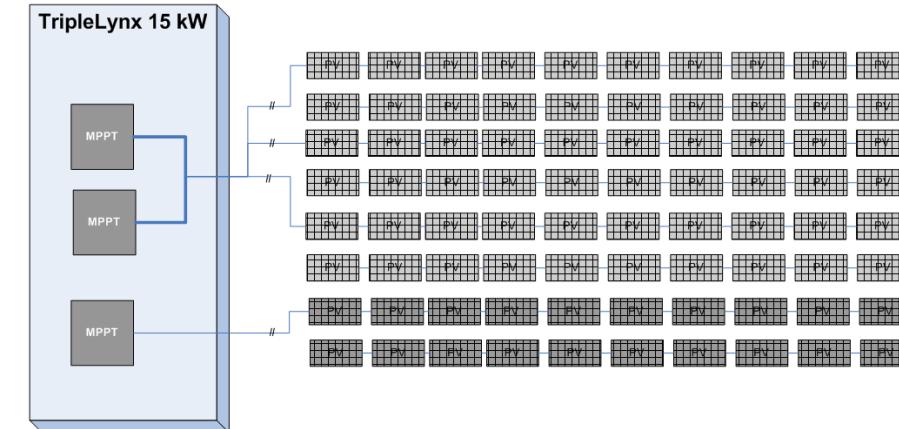
- Bei den Teilgeneratoren handelt es sich entweder um einzelne Strings zur Reduzierung der Auswirkungen von Teilabschattungen oder um Strings unterschiedlicher Einstrahlungsverhältnisse (z.B. nach Osten, Süden und Westen orientiert)



Dreiphasiger Stringinverter mit 3 DC Eingängen (3 MPP Tracker):



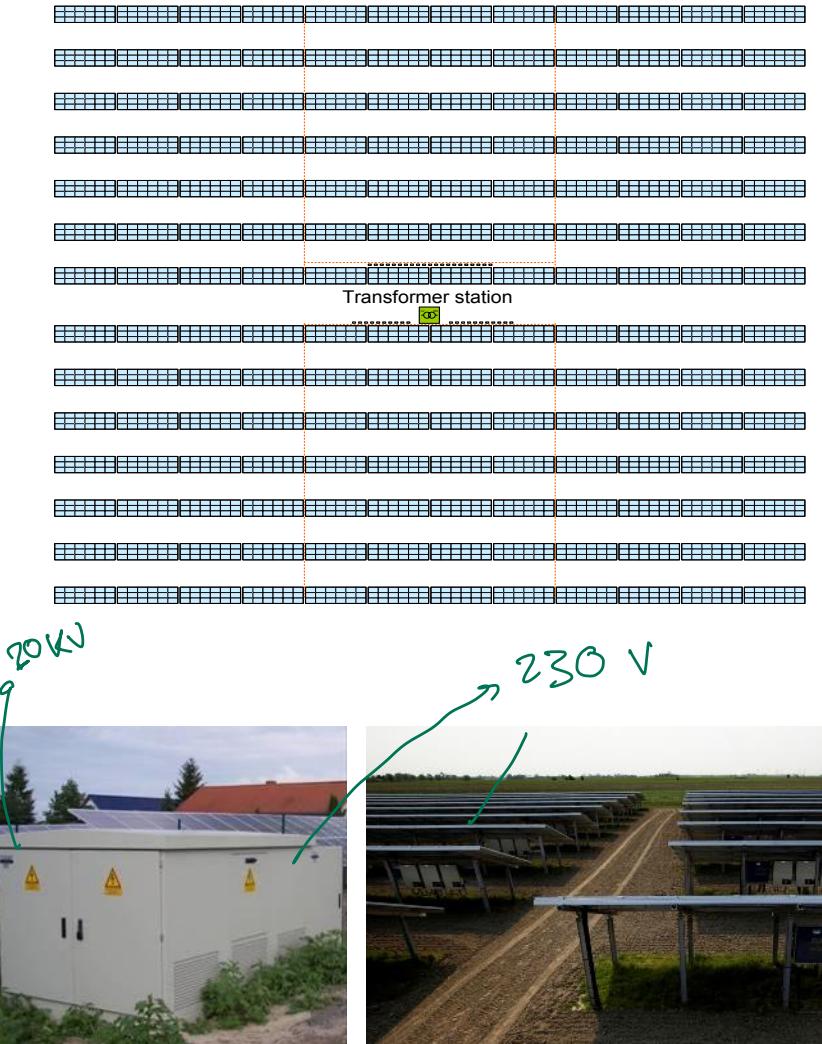
Quelle: Danfoss AS



- **Konzepte mit dezentralen Wechselrichtern**

- **Strangwechselrichterkonzept (Stringkonzept)**

- Strangwechselrichter eignen sich auch gut um Zentralwechselrichter in großen PV Anlagen zu ersetzen

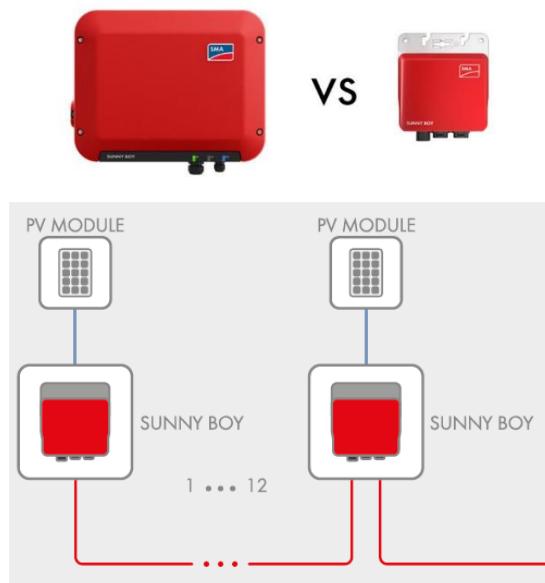


■ Konzepte mit dezentralen Wechselrichtern

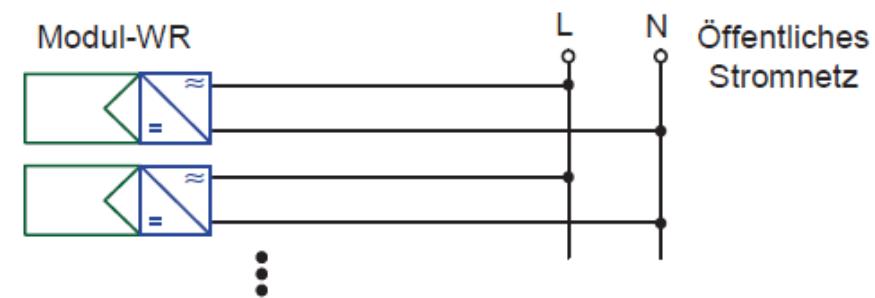
■ Modulwechselrichterkonzept

➤ Vor- und Nachteile:

- + Hoher Systemwirkungsgrad durch optimale Anpassung des Wechselrichters an das PV-Modul (Betrieb im jeweiligen MPP)
- + Keine DC-seitige Verkabelung
- + Einfache Erweiterbarkeit einer bestehenden PV-Anlage
- Modulwechselrichter mit geringerem Wirkungsgrad und hohem Preis



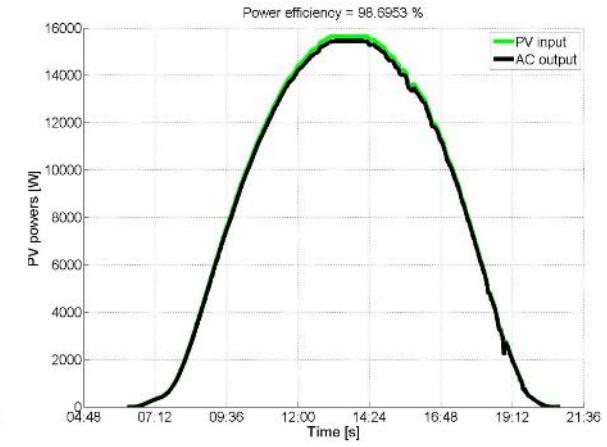
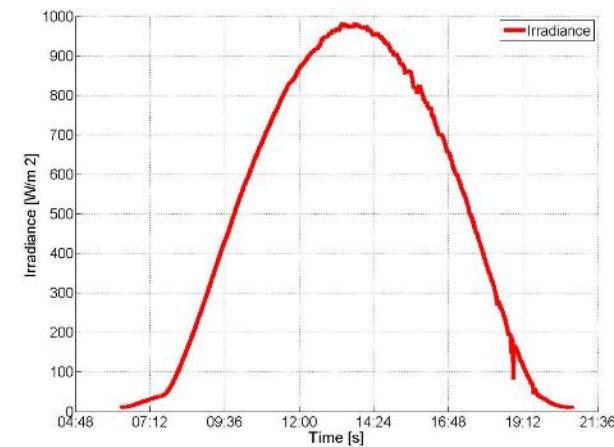
Quelle: SMA Technologies



Quelle: Photovoltaik, K. Mertens, 2015

- In Wechselrichtern der verschiedenen Hersteller meist integrierte Datenerfassungsfunktionen:

- DC-seitig (eingangsseitig): Spannung U_{DC} , Strom I_{DC} , Leistung P_{DC}
- AC-seitig (ausgangsseitig): Spannung U_{AC} , Strom I_{AC} , Leistung P_{AC} , Frequenz f
- Anzahl der Datensätze: 5 Datensätze / Tag ... 1 Datensatz / min.
- Betriebsdauer des Wechselrichters
Eingespeiste Energiemenge
Ermittlung als Tages-, Wochen-, Monats- und/oder Jahreswerte
- Gerätetestatus und Störungen
- Daten werden entweder direkt gespeichert oder über Datenlogger zwischengespeichert und über einen PC ausgelesen
Datenauswertung über mitgelieferte Hersteller-Software.



- Technische Daten ausgewählter PV-Wechselrichter im Nennleistungsbereich von 340 VA (Modulwechselrichter) bis 2,4 MVA (Zentralwechselrichter):
- Erläuterungen:
 - Max. DC Spannung $\geq U_{L\max} = U_L(E_{\max}, \vartheta_{\min})$
 - $U_{MPP}(E_{\max}, \vartheta_{\min}) = U_{MPP\max} \leq$ MPP-Bereich DC $\leq U_{MPP\min} = U_{MPP}(E_{\min}, \vartheta_{\max})$
 - Max. DC Strom $\geq I_{K\max} = I_K(E_{\max}, \vartheta_{\max})$

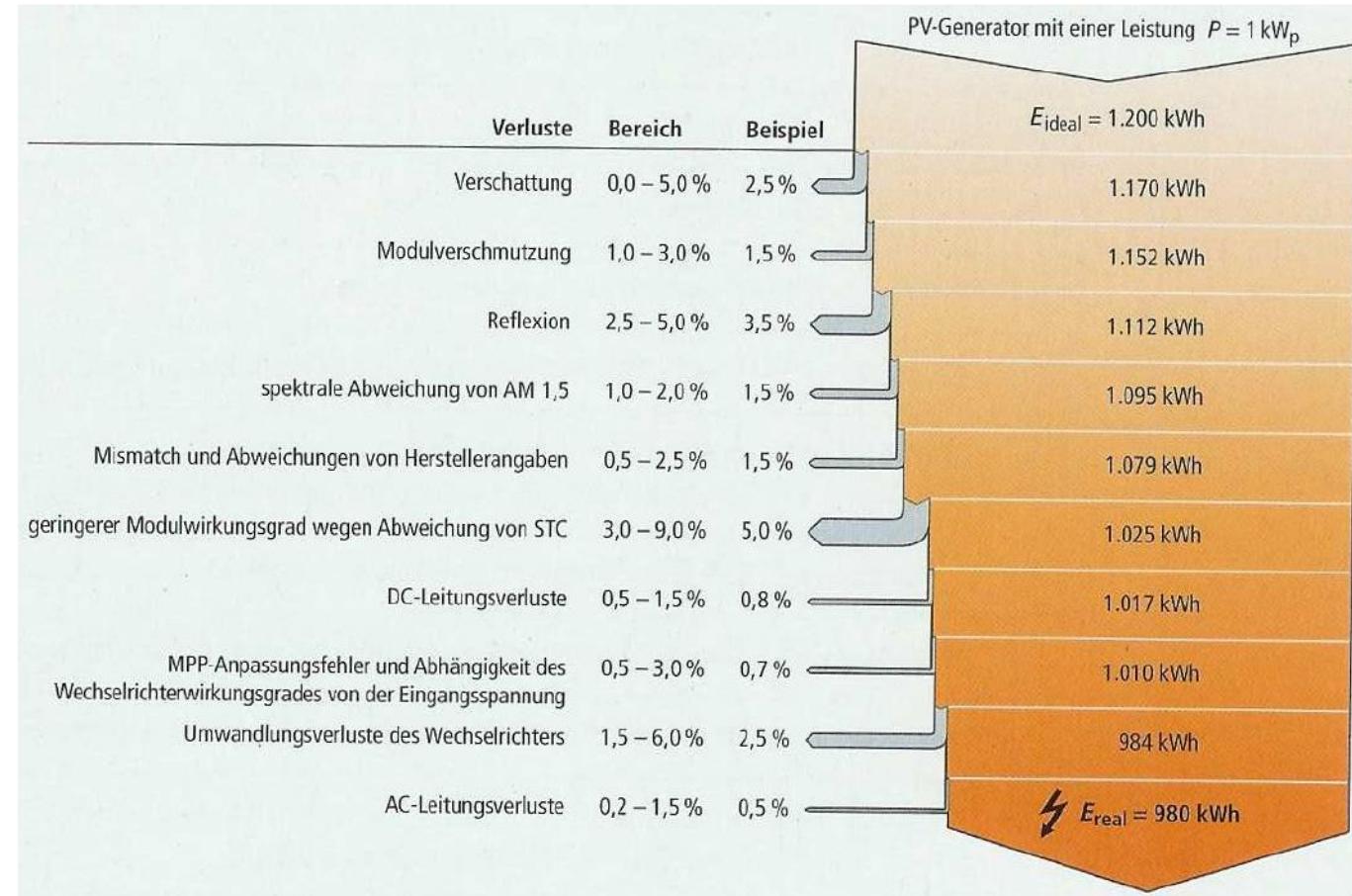
Gerät		Enecsys SMI-D360	Sunways NT2500	SMA 6000TL	REFUSOL 15 K	SINVERT PVS2400
Topologie		Enecsys	HERIC	H5	UtraEta	PVS
Phasen		1	1	1, koppelbar	3	3
Nennleistung AC	kVA	0,34	2,5	6,0	15,0	2400
max. AC-Leistung	kVA	0,34	2,5	6,0	16,5	2400
max. DC-Leistung	kW	0,38	2,65	6,2	17,5	2452
max. DC-Spannung	V	54	900	700	900	1000
MPP-Bereich DC	V	30...42	340...750	333...500	460...800	570...750
max. DC-Strom	A	13,4	7,5	19	36	4416
Einspeisung ab	W	k.A.	4	10	20	k.A.
Nacht-Verbrauch	W	<0,03	<0,1	0,25	<0,2	k.A.
Klirrfaktor, AC-Strom	%	<5	<3	<4	<2,5	k.A.
max. Wirkungsgrad	%	95,4	97,8	98,0	>98,0	98,7
Euro-Wirkungsgrad	%	93,5	97,4	97,7	97,7	98,6
Masse	kg	1,8	26	31	38	8520

Quelle: V. Quaschning, Regenerative Energiesysteme, 2013

- Ausgehend von dem im Kapitel „PV-Generatoren“ definierten idealen Energieertrag E_{ideal} eines PV-Generators und den dort bereits diskutierten Abweichungen (welche zum realen Energieertrag E_{real} des PV-Generators führen), sind zur Beurteilung der Güte von PV-Anlagen noch die nachgeschalteten Komponenten (Gleichstromsteller, Wechselrichter, Ladestromregler) zu berücksichtigen.

- Erläuterungen:

- Die Verlustfaktoren 1-4 und 6 wurden bereits im Zusammenhang mit dem realen Energieertrag E_{real} des PV-Generators diskutiert
- Mismatch-Verluste verursacht durch die Reihen-/ Parallelschaltung von PV-Modulen mit abweichenden Parametern (z.B. U_{MPP} , I_{MPP} , P_{MPP}) infolge von Exemplarstreuungen



■ Beurteilung der Güte einer PV-Anlage:

- Performance Ratio:

$$PR = \frac{\text{realer Energieertrag } E_{\text{real}}}{\text{idealer Energieertrag } E_{\text{ideal}}}$$

PR typ. 0,7...0,85, standortunabhängige Kennzahl

mit idealem Energieertrag des PV-Generators: $E_{\text{ideal}} = A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} \cdot E_{G(\text{hor/gen})} \cdot \Delta t$

mit A_{PV} : Fläche des PV-Generators

η_{PV} : (Umwandlungs-) Wirkungsgrad des PV-Generators

$E_{G(\text{hor/gen})}$: Globale Bestrahlungsstärke auf den horizontal / geneigt montierten PV-Gen.

Δt : betrachtetes Zeitintervall

$H_G = E_G \cdot \Delta t$: Globalstrahlung [Ws/m^2]

- Spezifischer Ertrag / Final Yield:

$$Y_F = \frac{\text{realer Energieertrag } E_{\text{real}}}{\text{Nennleistung des PV-Generators } P_{MPP}}$$

in $\left[\frac{kWh}{kW_p} \right] = [h] \equiv$ Vollaststunden, über einen Tag, Monat oder Jahr