

Christiani

seit 1931

Solarstromlabor

Versuchsanleitung Inselanlagentechnik
und Netzparalleltechnik



Inhaltsverzeichnis

1.	Allgemeine Informationen zum Solarstromlabor	7
1.1	Bildungspolitische Rahmenbedingungen	7
1.1.1	Hinweise zur Didaktik und Methodik	7
1.1.2	Verwendung des Experimentiermaterials; siehe auch Sicherheitshinweise	8
1.1.3	Die Versuchsanleitung zum Solarstromlabor für die Inselanlagentechnik	9
1.1.4	Grundausrüstung zum Solarstromlabor	10
1.2	Bedienhinweise	11
1.2.1	Sicherheitsbedingungen	11
1.2.2	Strahlungsquelle für das Solarmodul	11
1.2.3	Der Blei-Gel-Akkumulator	12
2.	Grundlageninformationen zur Photovoltaik	13
2.1	Allgemeines und Wissenswertes zur Photovoltaik.....	14
2.2	Zukünftige Energiepotentiale aus der Photovoltaik:	16
2.3	Physikalische Grundlagen zur Photovoltaik.....	17
2.4	Solarzellen, Funktionsweise, Bauarten, Daten	29
3.	Fachinformationen zur Photovoltaik-Inseltechnik	37
3.1	Schutzkonzepte bei Photovoltaikanlagen	37
3.2	Abschattungswirkung auf PV-Module	38
3.3	Akkumulatoren in Photovoltaikanlagen:.....	40
3.4	Der Laderegler in der Photovoltaikanlage.....	46
3.5	Wechselrichter in PV-Inselanlagen.....	52
3.6	Planungsbeispiele zu PV-Inselanlagen	55
3.7	Installationsmaterialien für PV-Inselanlagen	61
4.	Arbeitsblätter zur Photovoltaik-Inseltechnik.....	65
4.1	Gerätebeschreibung zu den Bauteilen im Solarstromlabor	65
4.2	Übungsaufgaben zu den Grundlageninformationen	72
4.3	Übungsaufgaben zu den Fachinformationen der PV-Inseltechnik.....	77
4.4	Versuche zur PV-Inseltechnik.....	82
4.4.1	Messungen am Solarmodul	82
4.4.2	Ermittlung von Messwerten zu den Komponenten einer PV-Inselanlage	90
4.4.3	Gesamtschaltkreise für PV-Inselanlagen	101
5.	Lösungsblätter zur Photovoltaik-Inseltechnik	105
	Die Lösungsseiten 105 bis 136 sind nur im Ausbilder-Exemplar enthalten!	
6.	Fachinformationen zur PV-Netzparalleltechnik.....	137
6.1	Das EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz)	137
6.2	Netzparallele Anlagen zur Netzeinspeisung.....	138
6.3	Anlagenplanung zur PV-Netzeinspeisung	140
6.4	Die Verkabelung der PV-Anlage mit Zentral- und Modulwechselrichtern	149

6.5	Neue Normen zur Installationspraxis von PV-Anlagen	151
6.6	Blitzschutz bei Photovoltaikanlagen	154
6.7	Vereinfachte Dimensionierung	156
7.	Arbeitsblätter zur Photovoltaik-Netzparalleltechnik	157
7.1	Gerätebeschreibung zu den Bauteilen im Solarstromlabor	157
7.2	Übungsaufgaben zu den Fachinformationen Netzparalleltechnik.....	160
7.3	Versuche zur PV-Netzparalleltechnik	165
7.3.1	Untersuchung des Netzeinspeisesystems „Letrika SMI 260“	165
7.3.2	PV-Stringkonzept mit dem Letrika SMI 260.....	167
7.3.3	PV-Netzparallelanlage mit Phasenüberwachung und Trennrelais.....	172
7.3.4	Planung eines Balkonkraftwerkes mit dem Letrika-System.....	173
7.3.5	Planung einer schulischen Photovoltaikanlage zur Netzeinspeisung	175
8.	Lösungsblätter zur PV-Netzparalleltechnik	177
	Die Lösungsseiten 175 bis 190 sind nur im Ausbilder-Exemplar enthalten!	
9.	Anhang: Datenblätter, Infos, Ausdrücke	197
9.1	Datenblatt zum PV-Modul im Solarstromlabor (Ausführung poly- oder monokristallin)	197
9.2	Datenblatt zum Solar-Laderegler PR0505	198
9.3	Datenblatt zum Inselwechselrichter:	199
9.4	Datenblatt zum Netzeinspeise-WR „Letrika SMI260“	200
9.5	Datenblatt zum „Letrika Communication Gateway“	201
9.6	Datenblatt zum PV Modul „ASE-165-GT-FT/MC – 170 Watt.....	202
9.7	Datenblatt zum Sunny Boy 2100 TL von SMA.....	203
9.8	Datenblatt zum Sunny Boy 1700	204
9.9	Datenblatt zum Fronius IG 20	205
9.10	Planungsausdruck für PV-Anlage mit SB 1700.....	206
9.11	Planungsausdruck für PV-Anlage mit SB 2100.....	207

Grundlageninformationen zur Photovoltaik

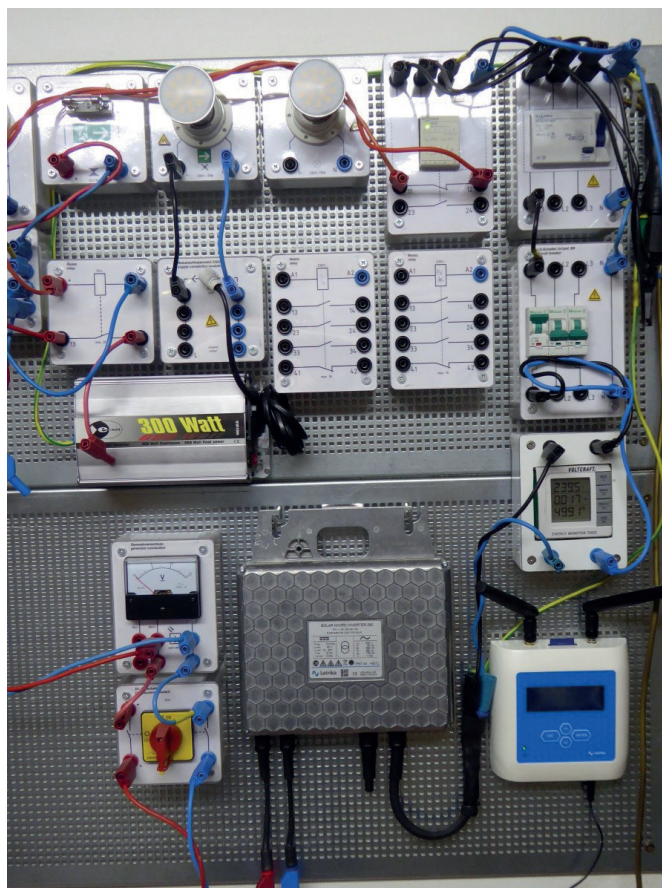
2. Grundlageninformationen zur Photovoltaik

Photovoltaik = Stromgewinnung aus Sonnenlicht



**Ist es der Königsweg der elektrischen
Energieversorgung?**

**Wir untersuchen dies mit dem Solar-
stromlabor!**



Grundlageninformationen zur Photovoltaik

2.1 Allgemeines und Wissenswertes zur Photovoltaik

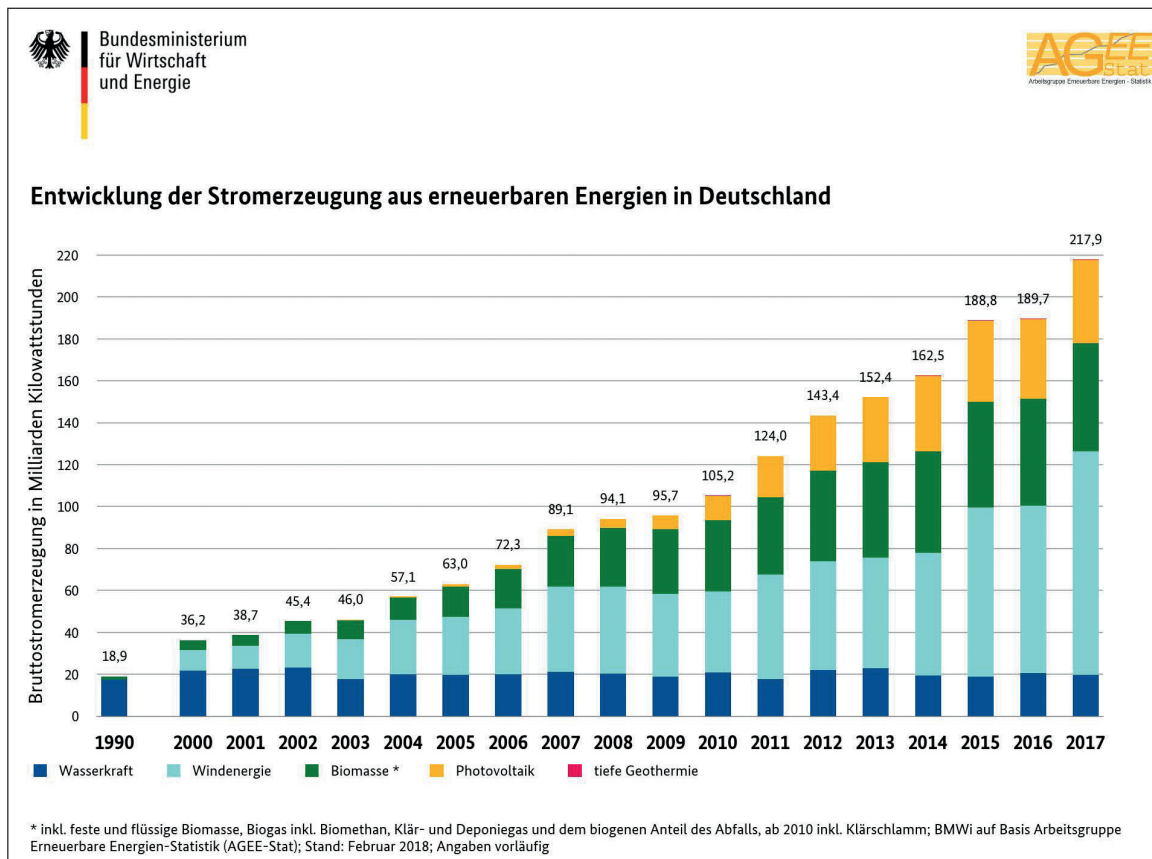
Die direkte Umwandlung von Licht in elektrischen Strom beruht auf dem photoelektrischen Effekt, der im Jahre 1839 von dem französischen Physiker Antoine César Becquerel entdeckt wurde.

1905 beschrieb Albert Einstein den photovoltaischen Effekt und 1930 entwickelte der Physiker Schottky die Theorie dazu.

Vor allem die technischen Möglichkeiten der ersten Siliziumsolarzellen ab 1954 und ihr vorteilhafter Einsatz in der Satellitentechnik führten zu einem neuen Technikbereich, der „Photovoltaik“.

2004 erreichte der Weltumsatz bei den Photovoltaik-Modulen erstmals 1000 MW = 1GW.

Davon wurden allein 500 MW in Deutschland verbaut.



Anfang 2010 sind in Deutschland bereits 10 GW PV-Leistung installiert, die etwa 9 Tera-Wattstunden (TWh) elektrische Energie liefern.

Bis 2020 steht die PV unter dem Wettbewerbsdruck mit den fossilen und anderen erneuerbaren Energiequellen.

Der weltweite Bestand der PV steigt in dieser Zeit auf über 350 GW an und zeigt sich immer deutlicher als die preiswerteste elektrische Energiequelle mit Stromgestehungskosten in Deutschland von ca. 6 Ct/kWh. In den sonnenreichen Ländern sinken diese bereits unter 3 Ct/kWh. (Siehe folgende Grafik des Fraunhofer-Institutes dazu)

Grundlageninformationen zur Photovoltaik

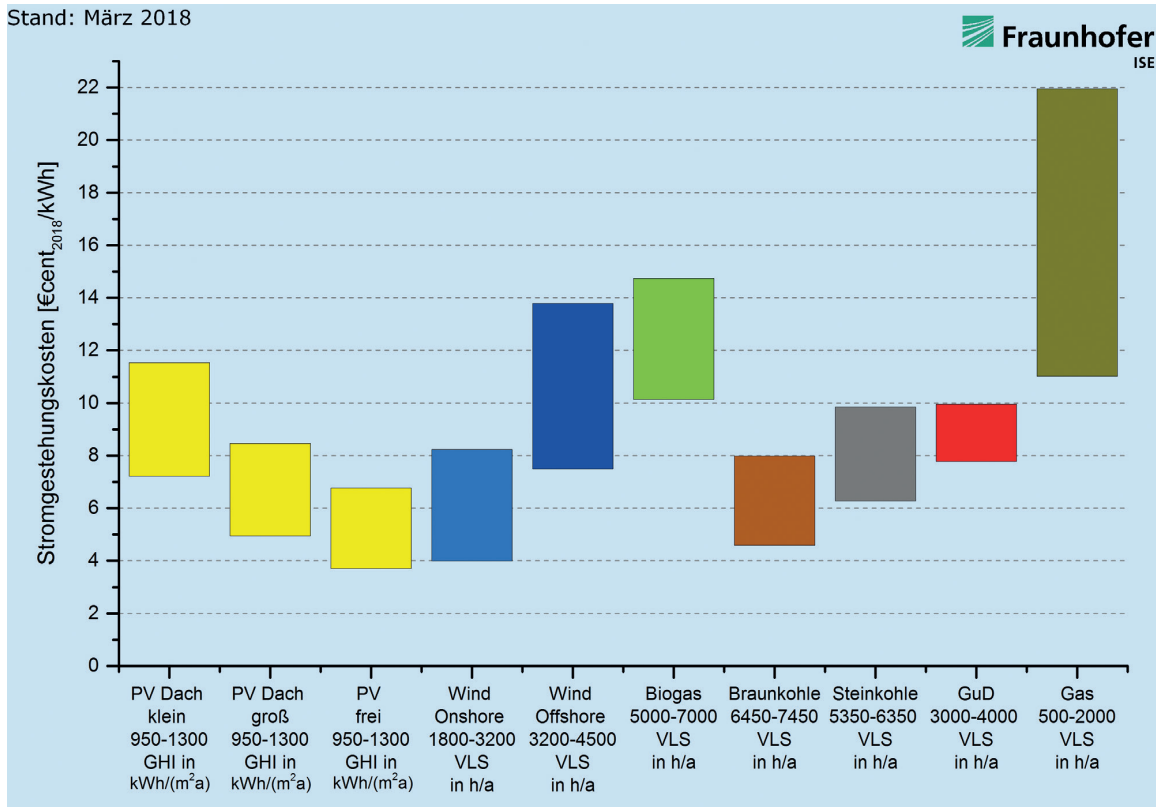
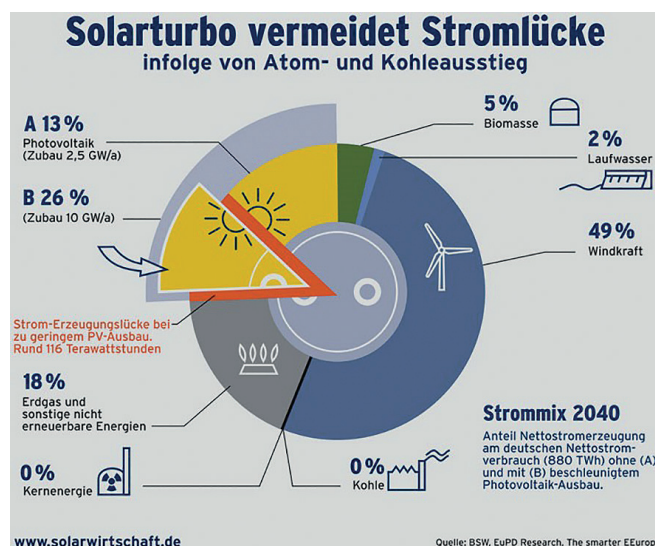


Abb.: GHI = Globale Horizontale Strahlung (Irradiation); VLS = Voll-Last-Stunden

Mit dem Wissensstand von 2020 zur weltweiten Klimakrise müssen dringend CO₂-freie Energiequellen die fossilen Energieträger ablösen. Durch die Sektorenkopplung werden zukünftig alle Wirtschaftsbereiche bevorzugt mit elektrischer Energie versorgt werden. Z. B. wird im Verkehr die Elektromobilität stark ausgebaut werden und im Heizungsbereich die Wärmepumpentechnik.

Dabei kann sich die PV als universelle Stromquelle weltweit sehr hohe Einsatzpotentiale erschließen.

Deutschland müsste nach dieser Entwicklung und dem geplanten Atom- und Kohleausstieg bereits jetzt den PV-Ausbau auf ca. 10 GW jährlich steigern. Momentan liegt der jährliche Zubau von PV-Kraftwerken bei 2,5 GW. (Siehe nebenstehende Grafik)



Wesentliche Argumente für die Photovoltaik in Deutschland

- Durch das „Erneuerbare Energien-Gesetz“ rechnen sich Photovoltaikanlagen für jeden Betreiber – auch für den Privatmann!
- Mit der Energiegewinnung über die Photovoltaik belasten wir weder die Umwelt noch die nächsten Generationen mit Folgelasten wie z. B. die atomaren und fossilen Energien!

Grundlageninformationen zur Photovoltaik

- Es entstehen keine Emissionen wie Abgase, Lärm, Staub, giftige Abfälle und hohe Entsorgungslasten nach dem Lebensdauerende der Energieanlage.
- PV-Module arbeiten im gemäßigten Klima Deutschlands effizient und viele Jahrzehnte!
- Die übliche Lebensdauer von PV-Modulen ist etwa 10 mal länger als ihre energetische Amortisationsdauer von 2 Jahren!
- Mit der Photovoltaik erhalten wir aus unbegrenzter und kostenloser Sonnenenergie die wertvollste Energieform – den elektrischen Strom!
- **Zur Zeit steht uns keine optimalere Energieform zur Verfügung!**

2.2 Zukünftige Energiepotentiale aus der Photovoltaik:

Im Vergleich zu den natürlichen Sonnenenergiesystemen wie der energetischen Biomassenutzung kann mit der Photovoltaik die Energieernte pro Flächeneinheit um den Faktor 100 vergrößert werden!

Beispiel:

Auf einer Fläche von 1 ha können 1000 Liter Rapsöl mit einem Energieinhalt von **10 kWh/l** in einem Jahr geerntet werden.

Dies sind 10.000 kWh aus 10.000 m² oder **1 kWh/m² a!**

Bei der Photovoltaik können aus **1 m² Fläche ca. 100 kWh** el. Energie (Edelenergie Strom) gewonnen werden – also 100-Mal mehr Energie als über die Biomasse!

Für Deutschland mit einem Jahresstrombedarf von etwa 600 TWh ergeben sich nach verschiedenen wissenschaftlichen Erhebungen folgende Energie-Potentiale für die Photovoltaik:

- **100 TWh aus Dachflächen**
- **20 TWh aus Fassadenanlagen**
- **20 TWh aus Verkehrsflächen**
- **150 TWh von Freiflächenanlagen auf 1 % der Landfläche!**

Insgesamt könnten in Deutschland bis zu 50 % der elektrischen Energie über die Photovoltaik gewonnen werden!

Mit weiteren **erneuerbaren Energiequellen**, wie der Windenergie, der Wasserkraft, der Biomasse, der Geo- und Solarthermie könnten innerhalb weniger Jahrzehnte bis zu **100 % des elektrischen Energiebedarfes** und langfristig sogar **100 % der gesamten Primärenergiebedarfs** gedeckt werden!

Der Handlungsdruck zur Nutzung erneuerbarer Energien wird aufgrund folgender Rahmenbedingungen in den nächsten Jahren stark ansteigen:

- **Weltweite Veränderungen des Klimas wegen der Folgen fossiler Energienutzung!**
- **Importabhängigkeit vieler Länder von fossilen und atomaren Energieträgern!**
- **Explodierende Preise bei fossilen und atomaren Energieträgern!**
- **Befreiung von Abhängigkeiten fossiler Energieströme und Schaffung vieler neuer Arbeitsplätze für junge Menschen bei erneuerbarer Energienutzung!**
- **Staatliche Regelungen zum verstärkten Einsatz Erneuerbarer Energien wie die Fortschreibung des „Erneuerbaren Energien-Gesetzes“ (EEG) von 2000 oder das deutsche Klimaschutzgesetz von 2019**
- **Die technische Entwicklung mit „Integrierter Photovoltaik“, wie sie im folgenden Bild dargestellt ist. (Quelle unbekannt)**
- **Durch Neuentwicklungen bei den PV-Zellen und Modulen mit PERC-Zellen, Bifacialen Modulen, usw. entstehen weitere effiziente Nutzungsmöglichkeiten der Photovoltaik.**

Grundlageninformationen zur Photovoltaik



2.3 Physikalische Grundlagen zur Photovoltaik

a) Leerlaufspannung

- Die Leerlaufspannung ist die höchste Spannung einer Spannungsquelle.
- Sie ist unter anderem zur Beurteilung des notwendigen Personen- und Geräteschutzes wichtig.
- Ab 50 V AC und 120 V DC müssen bei elektrischen Energieanlagen nach DIN VDE 0100 besondere Schutzmaßnahmen gegen Stromschlagsgefahren getroffen werden!
- Die Höhe der Modul-Leerlaufspannung gibt Auskunft über die Anzahl der in Reihe geschalteten Solarzellen.
- Heute schaltet man meist viele Module zu einem Strang in Reihe.
- Dabei ergeben sich Strangspannungen bis zu 800 Volt oder höher.

b) Kurzschlussstrom

- Der Kurzschlussstrom ist der höchste Strom im Stromkreis!
- Normalerweise löst im Kurzschlussfall die Stromkreissicherung aus, damit Spannungsquellen und Leitungen geschützt werden.
- Bei Solarmodulen erhöht sich im Kurzschlussfall der Strom nur unwesentlich über den Nennstrom. Module und Leitungen werden nicht zerstört.
- Der Fachmann spricht in der Photovoltaik deshalb von **Kurzschlussfestigkeit und Eigensicherheit** der Module.
- Deshalb kann im Fehlerfall der Kurzschlussstrom nicht zur Abschaltung durch eine **Sicherung** verwendet werden.
- Die Höhe des Modulkurzschlussstromes gibt Auskunft über die Bestrahlungsstärke, die Größe der Solarzellenfläche, bzw. der parallel geschalteten Zellen und deren Qualität!

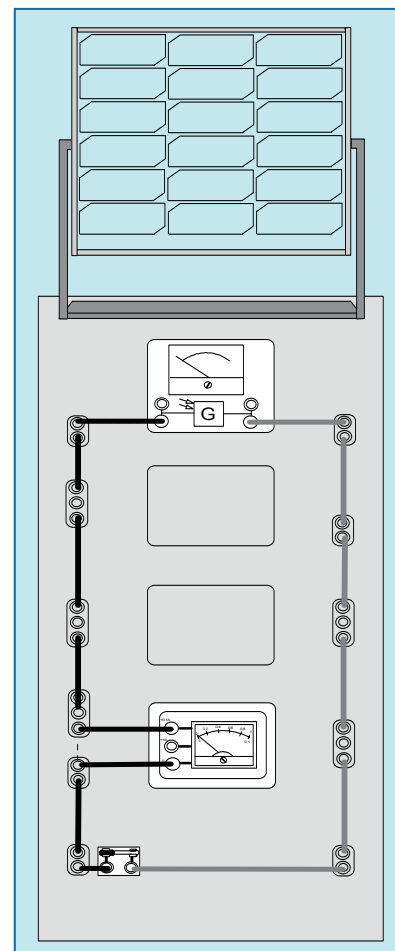


Abb.: Leerlaufspannungs- und Kurzschlussstrommessung am PV-Modul

Grundlageninformationen zur Photovoltaik

c) Belastung der Spannungsquelle

- Wenn der Fachmann von starker Belastung einer elektrischen Energiequelle spricht, meint er, dass ein sehr großer Strom aus ihr entnommen wird.
- Eine große Belastung wird durch einen geringen Verbraucherwiderstand bei großer Spannung verursacht ($I = U/R$)!
- Wenn die Spannung an der Quelle – z.B. an der Steckdose im Haus mit 230 Volt – bei zunehmender Belastung (Strom) nur wenig zurückgeht, liegt eine „**Spannungsquelle**“ vor! Typische Spannungsquellen sind Akkus, Batterien, die öffentliche Stromversorgung, Notstromaggregate, usw.!
- Bleibt dagegen bei unterschiedlicher Belastung der Stromfluss nahezu stabil, so spricht man von einer „**Stromquelle**“. Hier verändert sich dann die Spannung sehr stark!
- Solarzellen und Solarmodule haben **Stromquellencharakter**.
- Bei starker Belastung von Solarzellen bricht die Spannung ein!

$$\rightarrow U = \text{😊}$$

$$\rightarrow I = \text{😊}$$

Bei elektrischen Energiequellen kann die Spannung U oder der Strom I stabil bleiben!

Abb.: Spannungs- und Stromquelle

d) Solarzelle – Solarmodul – Solargenerator

- Die Spannung einzelner „**Solarzellen**“ erreicht im Leerlauf ca. 0,6 Volt. Deshalb werden für die üblichen Spannungsbereiche von Modulen mehrere Zellen in Reihe geschaltet.
- Damit erhält man ein „**Solarmodul**“, das aus etwa 10 – 100 Solarzellen (6 – 60 Volt) bestehen kann. Standardmodule haben meist 60 Zellen.
- Beim Bau größerer Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) werden mehrere Solarmodule in Reihen- und Parallelschaltung zu einem „**Solargenerator**“ aufgebaut.

e) Solarzellen und Sonnenkollektoren

Mit **Solarzellen**, die in der Photovoltaik eingesetzt werden kann aus der Sonnenenergie elektrische Energie gewonnen werden.

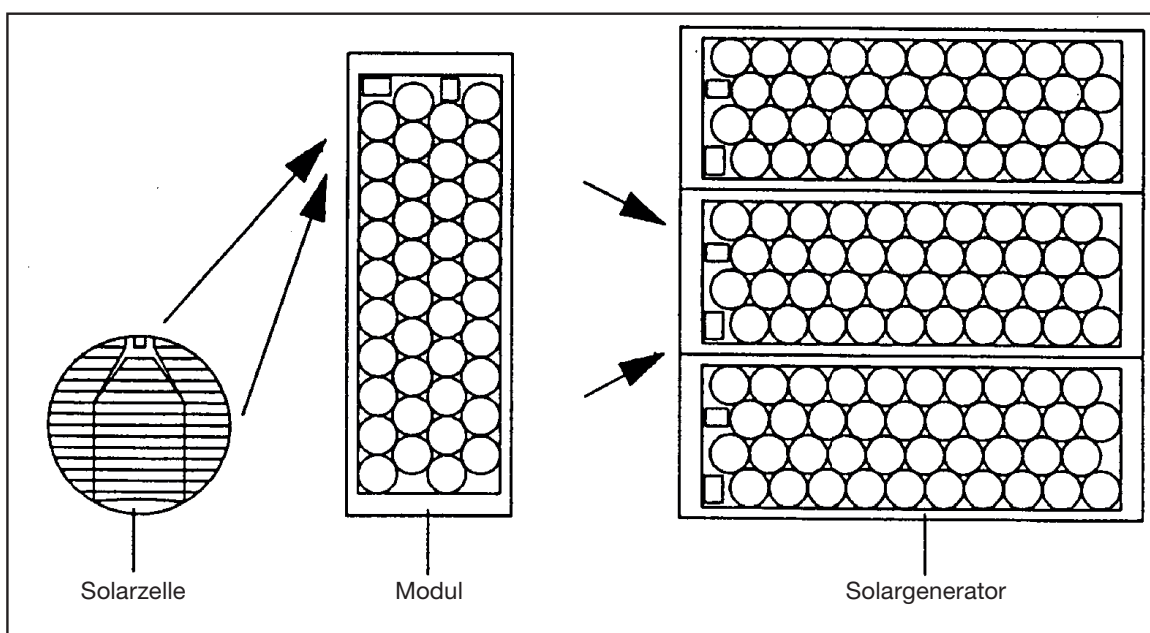


Abb.: Von der Solarzelle zum Modul