



## Photovoltaik als Beitrag einer nachhaltigen Energieversorgung

- Komponenten moderner Systeme zur Photovoltaiknutzung
- physikalisches Verhalten von Solarzellen und Photovoltaikmodulen bei unterschiedlichen Einflüssen

# Inhaltsverzeichnis

## Photovoltaik als Beitrag einer nachhaltigen Energieversorgung

Erfolgreiche Technologieentwicklung und wirtschaftliche Anreize haben in den letzten Jahrzehnten weltweit zu einem deutlichen Zuwachs an installierter Photovoltaikleistung geführt. Erzeugter Solarstrom wird direkt in das Netz eines Energieversorgers eingespeist oder bereits vor Ort verbraucht. Die Anwendungen reichen von Freiflächenanlagen mit mehreren 100 MW über gebäudeintegrierte Module bis zur Versorgung von autarken Kleinstverbrauchern.

Die Vorteile der direkten Umwandlung von Licht in Strom sind bekannt: Solarstrom trägt zur Entlastung der Umwelt bei, reduziert den Aufwand für den Stromtransport und sichert eine unabhängige und kostengünstige Energieversorgung.

Unter solarer Kühlung versteht man einen Prozess, bei dem der Kälteprozess direkt über Solarenergie angetrieben wird. Die Sonnenenergie dient damit als regenerative Energiequelle.

Vorteil von Solaranlagen zur Kühlung ist es, dass die Verfügbarkeit von solarer Energie mit dem Bedarf an Kühlung zunimmt. Sowohl für kleine dezentrale Anwendungen als auch im großtechnischen Maßstab gewinnen Konzepte zur solaren Kühlung an Bedeutung.

Um das Potenzial der Solarenergie für eine nachhaltige Energieversorgung weltweit bestmöglich auszuschöpfen, sind das Verständnis und die Weiterentwicklung auch teils sehr verschiedener Nutzungskonzepte zwingend erforderlich.

## Photovoltaik

### Basiswissen

**Basiswissen**  
Solarenergie  
**Basiswissen**  
Photovoltaik

### Technologische Grundlagen von Solarzellen

**ET 252**  
Messen an Solarzellen

### Untersuchung und Simulation von Systemen

**ET 255**  
Betriebsoptionen modularer Solarstromsysteme  
**ET 255.01**  
Photovoltaiksimulator  
**ET 255.02**  
Photovoltaikmodule für Solarstromsysteme  
**ET 255.03**  
Verbraucher in Solarstromsystemen

### Photovoltaikmodule richtig einsetzen

**ET 250**  
Messen an Photovoltaikmodulen  
**ET 250.01**  
Photovoltaik im Netzbetrieb  
**ET 250.02**  
Photovoltaik im Inselbetrieb

### Solare Kühlung

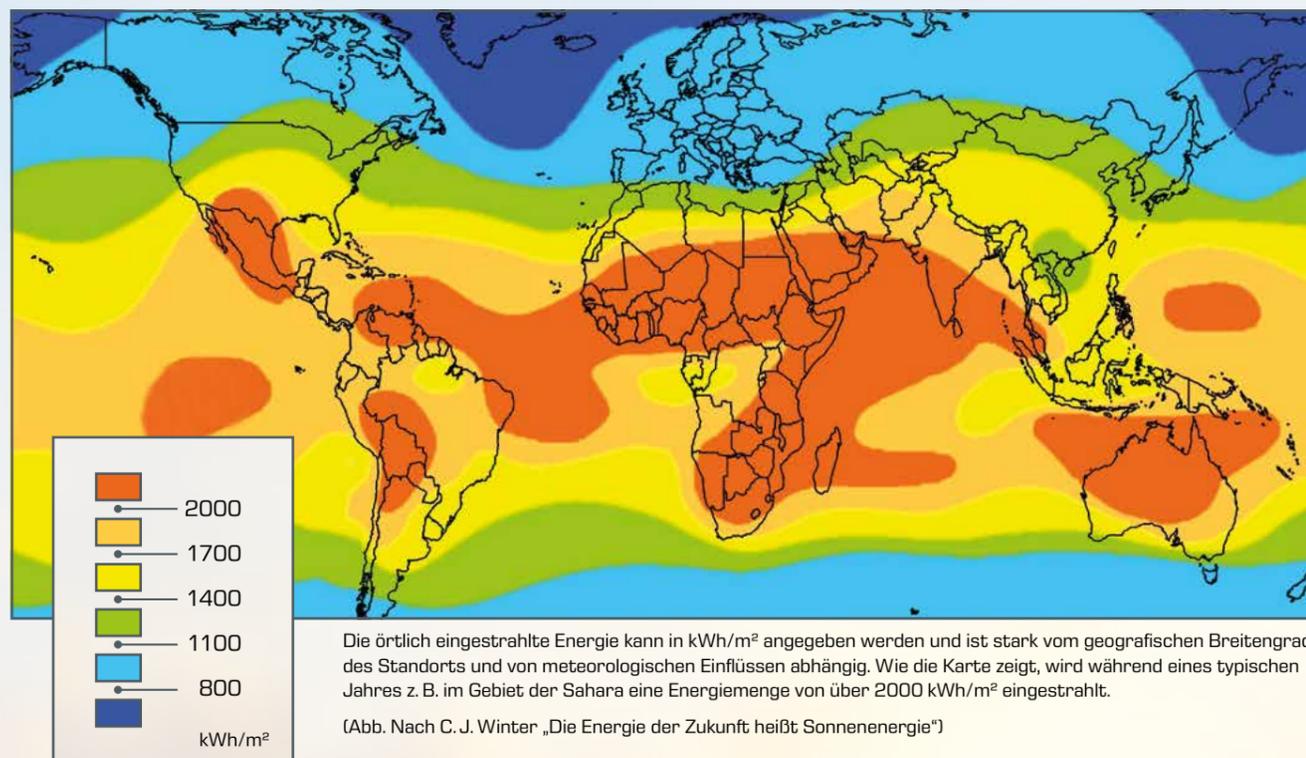
**ET 256**  
Kühlen mit Solarstrom

# Basiswissen Solarenergie

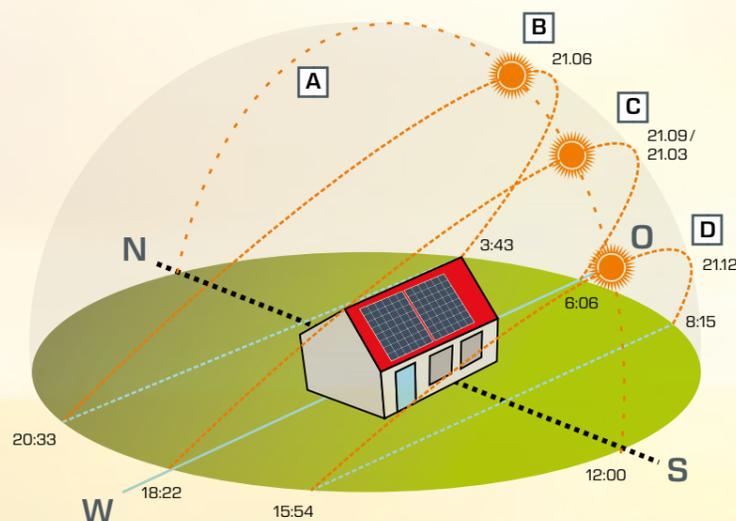
## Energie im Überfluss

Die jährlich auf die Kontinente eingestrahlte Energiemenge der Sonne übertrifft den globalen Energiebedarf nahezu um das 2000-fache. Gerade im Hinblick auf die globale Klima-

problematik ist es naheliegend, dieses Potenzial bestmöglich zu nutzen.



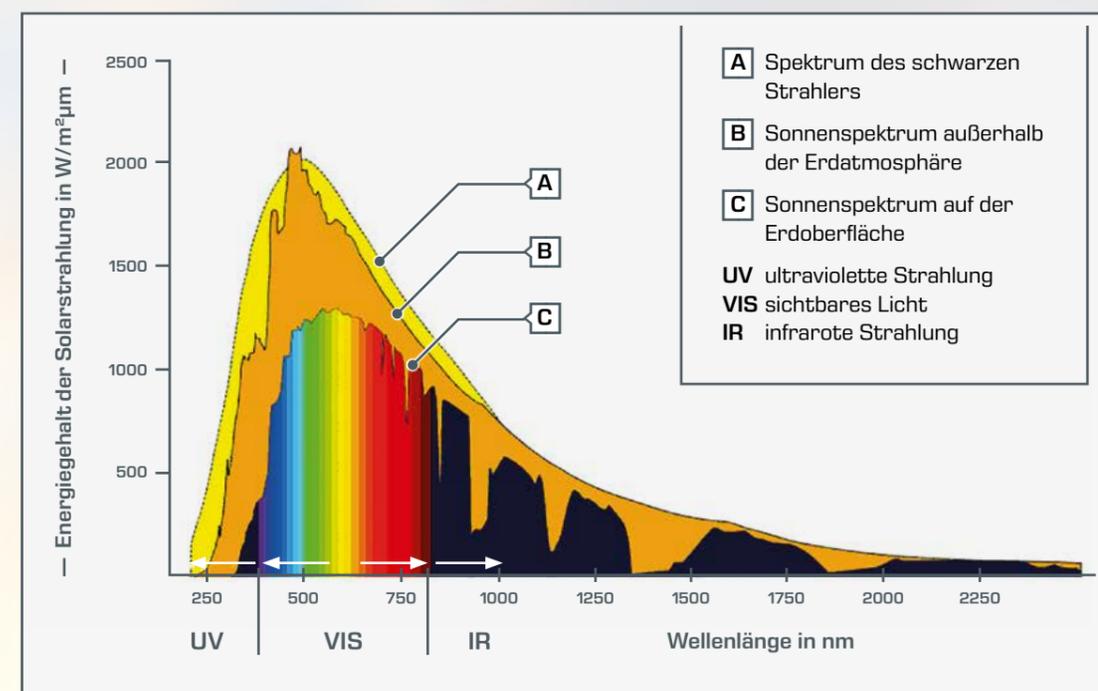
Die Ausrichtung der absorbierenden Flächen zur Himmelsrichtung und ihre Neigung spielen eine wesentliche Rolle bei der Optimierung des Ertrags einer Solaranlage. Die Abbildung zeigt die auf der Erde sichtbare Sonnenbahn zu verschiedenen Jahreszeiten. Die vermerkten Uhrzeiten für Sonnenauf- und Untergang ergeben sich am Standort Berlin:



- A** Zenit
- B** Sommersonnenwende
- C** Frühlings-/Herbstanfang
- D** Wintersonnenwende

Um die Nutzung der Solarstrahlung zu optimieren, ist es erforderlich, die Eigenschaften der Solarstrahlung zu kennen. Hierbei ist insbesondere die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichts von Interesse. Durch spektroskopische Untersuchungen kann der Energiegehalt des Sonnenlichts bei verschiede-

nen Wellenlängen bestimmt werden. Gelingt es nun, die spektralen Eigenschaften des Empfängers bzw. Absorbers besser an das Sonnenspektrum anzupassen, ist eine wesentliche Bedingung zur Verbesserung der Energiebilanz gegeben.



## Das Spektrum des Sonnenlichts

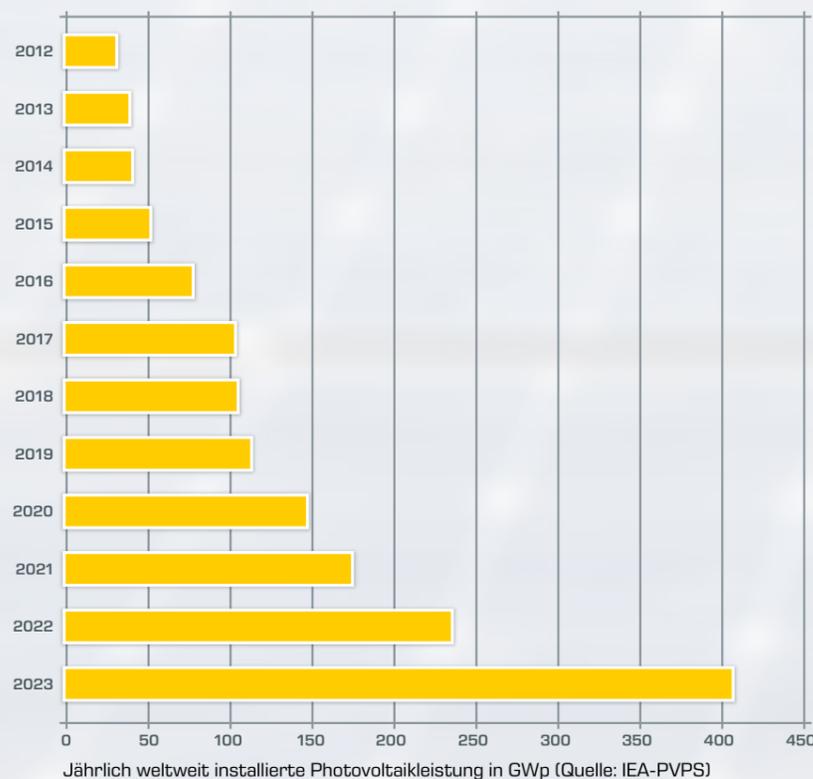
Im Inneren der Sonne führen Fusionsprozesse zu Temperaturen von bis zu  $15 \cdot 10^8$  K. Das Spektrum des emittierten Sonnenlichts beruht jedoch auf Prozessen in äußeren Schichten des Sonnenkörpers. Die spektrale Zusammensetzung lässt sich theoretisch durch einen sogenannten schwarzen Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 5777 K beschreiben.

Auf dem Weg zur Erdoberfläche wird die Solarstrahlung in der Atmosphäre durch Streuung und Absorption abgeschwächt.

# Basiswissen Photovoltaik

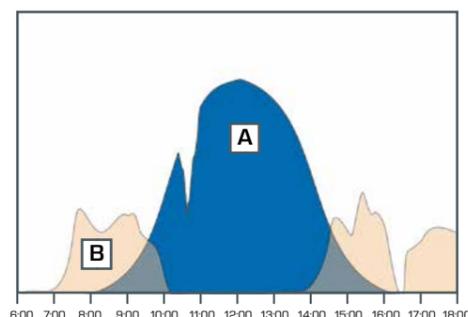
Die energetische Amortisationszeit bezeichnet den Zeitraum, den eine Photovoltaikanlage benötigt, um so viel Energie zu erzeugen, wie für ihre Herstellung, Installation und Wartung verbraucht wurden. 2023 betrug dieser Zeitraum laut IEA (International Energy Agency) in Europa etwa 1 bis 1,3 Jahre.

Weltweit wurden bis Ende 2023 Anlagen mit insgesamt mehr als 1580 GW elektrischer Leistung installiert. Wie aus dem nachfolgenden Diagramm zu entnehmen ist, erhöhte sich die Leistung der jeweils neu installierten Anlagen in den Jahren 2022 und 2023 von 236 GWp auf mehr als 400 GWp.



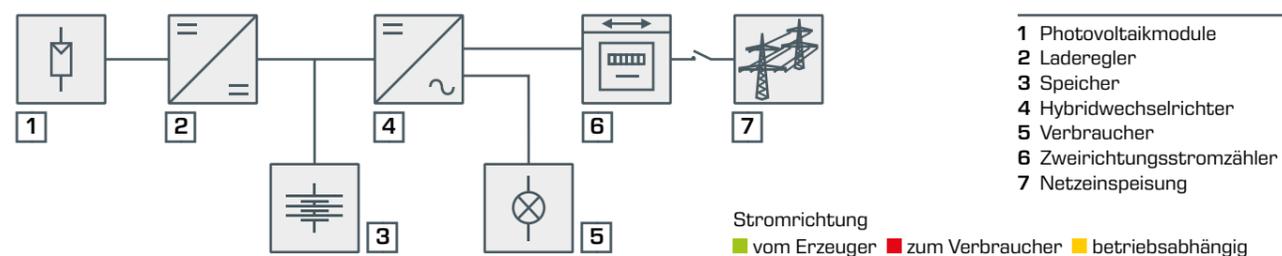
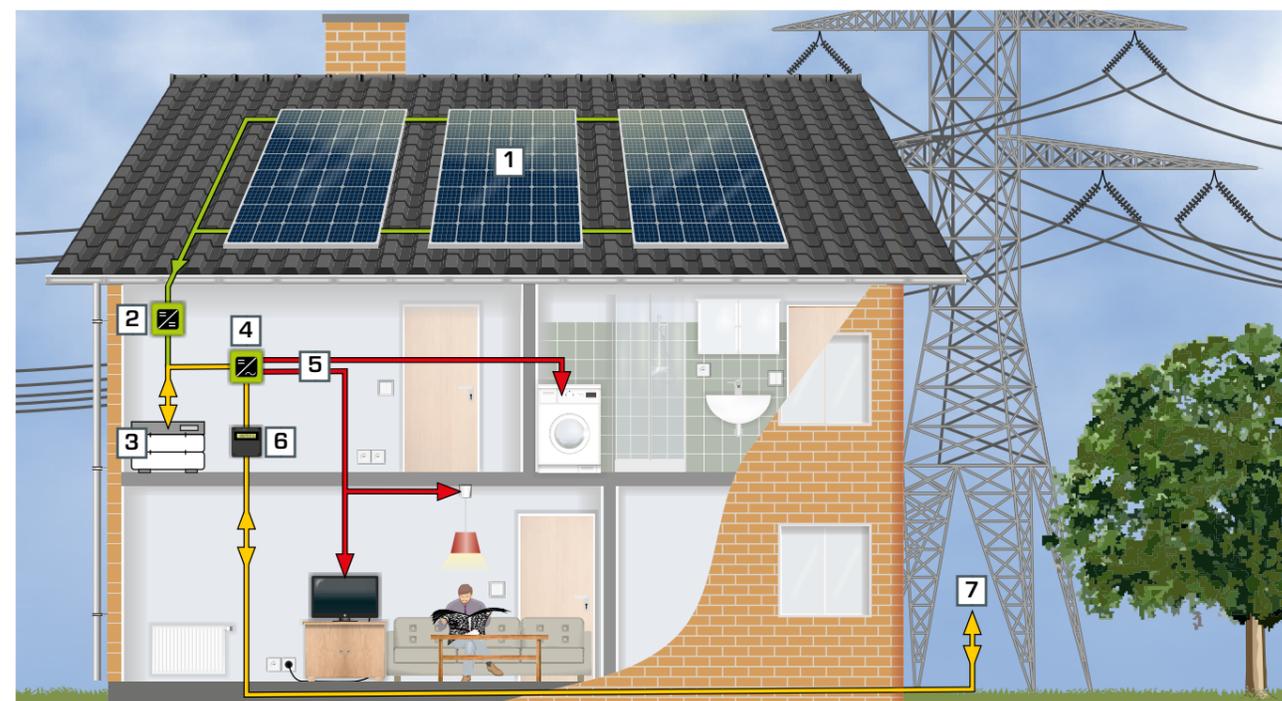
## Solarstrom und Strombedarf in einem Wohngebäude

Typische Messdaten für den erzeugten Solarstrom und den Strombedarf eines Wohngebäudes während eines Tages zeigen den Bedarf für gespeicherten Strom. Erst durch das Speichern von Strom wird es möglich, den Bedarf in den Morgen- und Abendstunden zu decken.

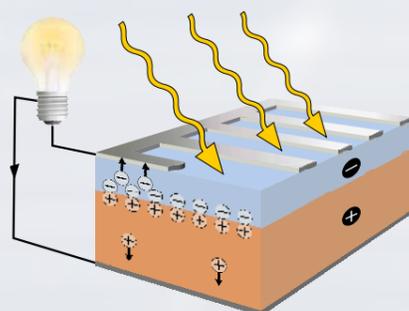


A Stromerzeugung durch Photovoltaikmodule  
B Deckung des Strombedarfs durch Speicher

## Anlagenkomponenten zur Solarstromnutzung



## Funktionsweise von Halbleitersolarzellen



Eine Halbleitersolarzelle wandelt die Strahlungsenergie des Lichts in elektrische Energie um. Die Bedingung dafür ist eine ausreichende Energie bzw. Wellenlänge der absorbierten Lichtquanten (Photonen). Nur wenn die absorbierte Energie im Halbleiter ausreicht, kann ein Elektron aus der Bindung des atomaren Kristallgitters befreit werden. Das nun bewegliche Elektron hinterlässt einen freien Platz im Kristallgitter. Dieses sogenannte Loch trägt eine positive elektrische Ladung und ist ebenfalls frei im Halbleiter beweglich.

Um diese beweglichen elektrischen Ladungsträger nutzen zu können, wird in den Halbleiter ein elektrisches Feld eingebaut, indem er durch geeignete Fremdatome dotiert wird.

Unter dem Einfluss dieses internen elektrischen Feldes können erzeugte positive und negative Ladungsträger in der Solarzelle getrennt werden. Damit wird es möglich, die Solarzelle als Quelle in einem Stromkreis zu nutzen.

## Solarstrom effizient nutzen

Um den photovoltaischen Solarstrom zu sammeln, werden z. B. 36 einzelne Solarzellen zu einem Modul zusammengesetzt. Bei der nachfolgenden Nutzung des Solarstroms können verschiedene Konzepte unterschieden werden:

- Inselbetrieb
- Netzbetrieb
- Netzbetrieb mit Speicher

Ein Inselbetrieb ist z. B. für Anwendungen an entlegenen Standorten ohne Anbindung an ein öffentliches Stromnetz passend. Wichtig für eine Stromversorgung

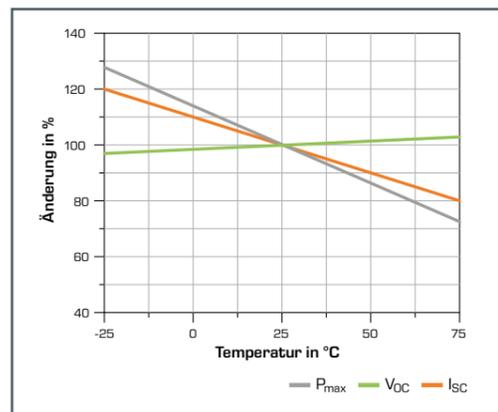
ohne Unterbrechungen ist hier ein Speicher, um die elektrische Energie z. B. auch bei Nacht nutzen zu können.

Netzgekoppelte Photovoltaikanlagen speisen den Solarstrom direkt in ein öffentliches Netz ein. Hier wird ein Wechselrichter benötigt, der den Gleichstrom der Photovoltaikmodule in Wechselstrom passender Frequenz und Spannung umwandelt.

Bei einem Überangebot von eingespeistem Strom kann das öffentliche Stromnetz instabil werden. Um diesen Effekt

zu vermeiden, wird der Eigenverbrauch von Solarstrom in Deutschland finanziell gefördert. Die erforderlichen netzgekoppelten Photovoltaikanlagen werden durch Speicher erweitert. Durch geschickte Steuerung von Verbrauch und Speicherbeladung kann der Anteil an selbst genutztem Solarstrom deutlich erhöht werden.

# ET 252 Messen an Solarzellen



Mit ET 252 werden die Auswirkungen der Temperatur auf die Solarzelle gezielt untersucht.

Zum Produkt:



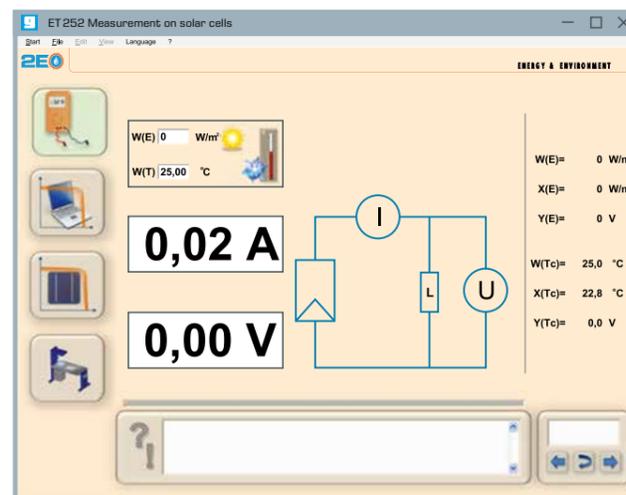
ET 252 ermöglicht die grundlegenden Zusammenhänge der Photovoltaik in durchdachten Experimenten zu vermitteln.

Hauptkomponenten des Versuchsgertes sind vier Solarzellen, die mit einer einstellbaren Beleuchtungseinheit bestrahlt werden. Durch ein geregeltes Peltierkühlelement können die Solarzellen gezielt temperiert werden. Dadurch werden vergleichende Messreihen zum Einfluss der Temperatur auf die Kenngrößen der Zellen ermöglicht.

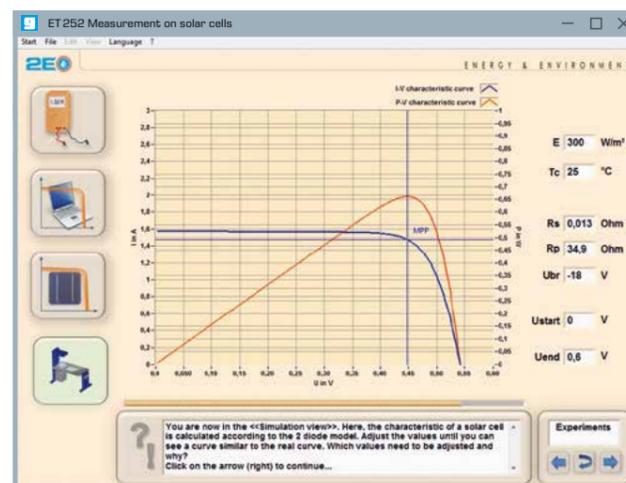


## Software mit Tutorfunktion

Mit der umfangreichen GUNT-Software werden alle Gerätefunktionen über eine USB-Schnittstelle von einem externen PC bedient. Neben der Steuerung von Helligkeit und Temperatur wird hier auch die automatisierte Messung der Kennlinien über die steuerbare Stromsenke parametrisiert.



Die GUNT-Software enthält eine integrierte Tutorfunktion, die in didaktisch ausgewogenen Schritten den Einstieg in die Grundlagen der Photovoltaik erleichtert und die verschiedenen Messmöglichkeiten des Geräts verdeutlicht.



Im Simulationsmodus können Einflüsse spezifischer Zellenparameter auf die Strom-/Spannungskennlinie untersucht werden.



## Lerninhalte

- physikalisches Verhalten von Solarzellen bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke und Temperatur
- Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien
- Berechnung von Stromstärke und erzielbarer Leistung auf Basis des Ein-Diodenmodells
- Einfluss von Beleuchtungsstärke und Temperatur auf die Kennlinien
- Verschaltung von Solarzellen in Parallel- und Reihenschaltung
- Wirkung von Bypassdioden
- Leistungsminderung durch Verschattung

# ET 255 Modulares Solarstromsystem mit Zubehör

Solarstrom aus Photovoltaikanlagen kann für die Einspeisung in ein öffentliches Stromnetz (netzparalleler Betrieb) oder für den lokalen Verbrauch (Inselbetrieb) genutzt werden. In modernen Solarstromsystemen umfasst die bedarfs- und verfügbarkeitsgesteuerte Nutzung die Kombination beider Betriebsoptionen. Zur Steuerung der Energieströme kommen Speicher und sogenannte Energiemanagementsysteme zum Einsatz.

Um anspruchsvolle Versuche mit aktuellen Komponenten aus der Photovoltaikpraxis zu ermöglichen, bietet GUNT ein System aus aufeinander abgestimmten Versuchskomponenten an. Zusammen mit den Zubehören kann das Verhalten eines Solarstromsystems bei variierenden Betriebsbedingungen untersucht werden.

Zum Produkt:



Über die GUNT-Software auf einem externen PC erfolgt die Bedienung des Solarstromsystems sowie die Erfassung und Darstellung der Messwerte. Zudem können Versuchsabläufe mit definierten Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen gesteuert werden.

Die netzwerkfähige GUNT-Software ermöglicht die Verfolgung und Auswertung der Versuche an beliebig vielen Arbeitsplätzen über eine LAN/WLAN-Anbindung mit dem lokalen Netzwerk.



LAN



Systemdiagramm mit Programmgeber

Simulierte Kennlinie

- | 🎓 | Lerninhalte  |
|---|--|
| ■ | Komponenten moderner Systeme zur Photovoltaiknutzung untersuchen           |
| ■ | Leistungsoptimierung durch Maximum Power Point Tracking (MPP Tracker)      |
| ■ | Funktion von Wechselrichtern und Laderegler                                |
| ■ | Speicherverhalten bei variierender Beleuchtungsstärke und Temperatur       |
| ■ | Wirkungsgrad und dynamisches Verhalten von Anlagenkomponenten              |
| ■ | Energiemanagementsysteme für die Eigenverbrauchsoptimierung im Netzbetrieb |
| ■ | Batteriemagementsysteme für die optimierte Nutzung von Speichern           |
| ■ | Anwendungsfälle bei wechselnder Netzverfügbarkeit                          |
| ■ | Versuche bei Vorgabe von Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen                |

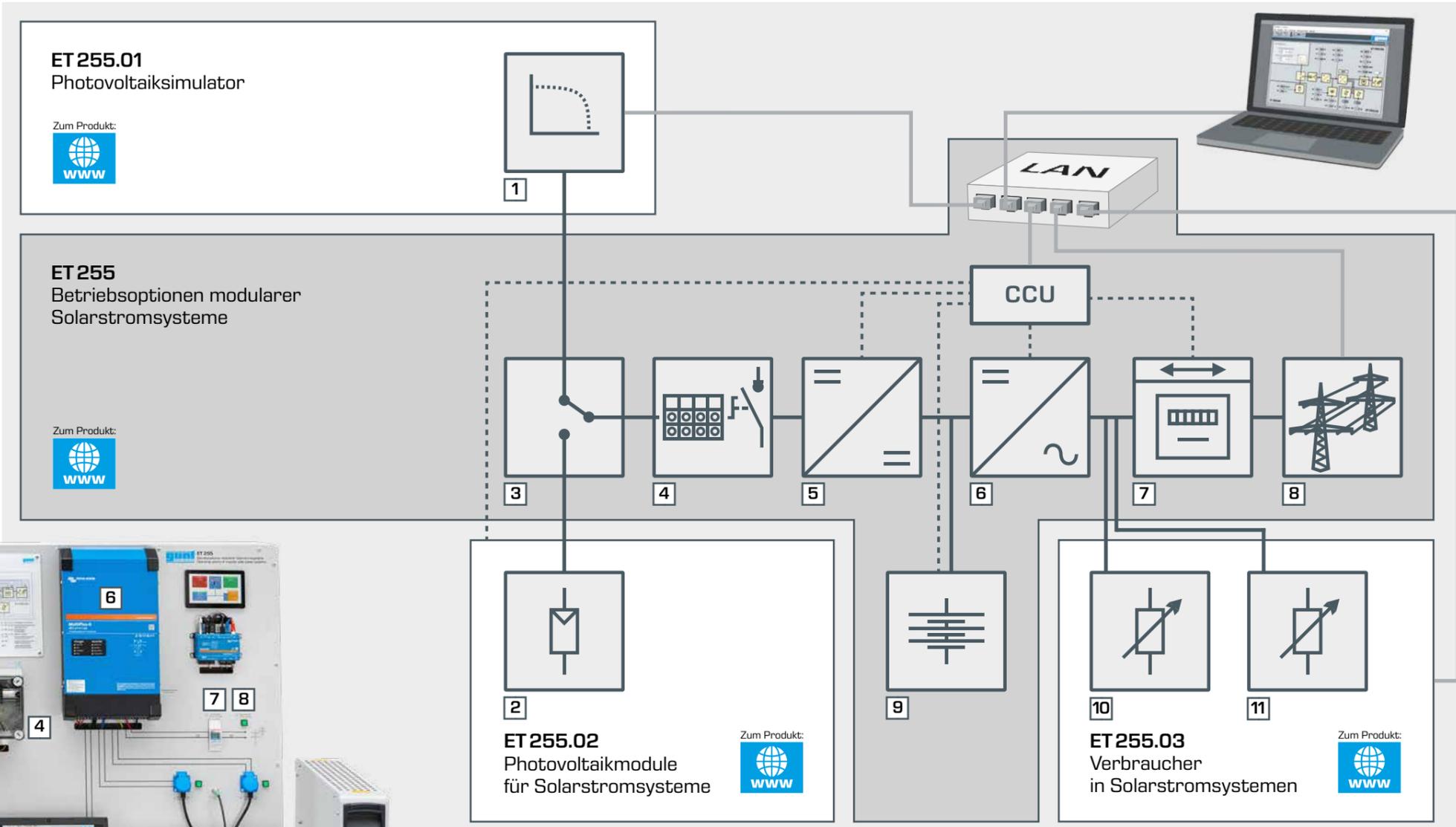
# Vernetzte Komponenten eines modernen Solarstromsystems mit ET 255

## Aufbau des Gesamtsystems ET 255 mit Zubehör

Der Versuchsstand ET 255 enthält vernetzte Komponenten eines Solarstromsystems wie einen Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator als Speicher, einen MPP-Laderegler, einen Netzwechselrichter und einen Zweirichtungstromzähler sowie ein Energiemanagementsystem (EMS). Das Energiemanagementsystem erfasst die Energieströme und steuert die einzelnen Komponenten des Systems.

Als Solarstromquelle dienen entweder der Photovoltaiksimulator ET 255.01 oder die Photovoltaikmodule ET 255.02. Für eine ausreichende Beleuchtungsstärke sollte der Versuchsstand mit Sonnenlicht oder der optional erhältlichen künstlichen Lichtquelle HL 313.01 betrieben werden.

ET 255.03 enthält zwei steuerbare elektrische Verbraucher, die bei Versorgung durch ET 255 unterschiedlich priorisiert sind.



- |   |                           |   |
|---|---------------------------|---|
| 1 Photovoltaiksimulator ET 255.01                   | 5 MPP-Laderegler          | 9 Speicher                                  |
| 2 Photovoltaikmodule ET 255.02                      | 6 Netzwechselrichter      | 10 einstellbarer AC-Verbraucher 1 ET 255.03 |
| 3 Umschalter  | 7 Zweirichtungstromzähler | 11 einstellbarer AC-Verbraucher 2 ET 255.03 |
| 4 Gleichstrom-Trennschalter mit Überspannungsschutz | 8 Netzanschluss           |   |

Der Versuchsstand wird über die GUNT-Software auf einem externen PC (nicht im Lieferumfang enthalten) gesteuert, der über eine Netzwerk-Schnittstelle verbunden wird. In der zentralen Kommunikations- und Steuereinheit (CCU) werden

Daten aus dem Netzwechselrichter, dem Zweirichtungstromzähler, dem Batteriemanagementsystem des Speichers, dem MPP-Laderegler und den Photovoltaikmodulen erfasst.

# ET 250 Messen an Photovoltaikmodulen



Mit diesem Versuchsstand können die wesentlichen Aspekte beim Betrieb von Photovoltaikmodulen praxisnah vermittelt werden. ET 250 verfügt über zwei Module, die wahlweise in Reihe oder parallel geschaltet werden. Der Neigungswinkel der Module kann individuell eingestellt werden. Für die Versuche steht ein Messverstärker zur Verfügung, der alle relevanten Messwerte übersichtlich anzeigt. Aus den Messwerten können Strom-Spannungs-Kennlinien erstellt werden. Diese Kennlinien sind ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Photovoltaikanlage.

Zum Produkt:

Für Laborversuche unter gleichmäßigen Lichtverhältnissen empfehlen wir unsere **künstliche Lichtquelle HL 313.01**.



Zum Produkt:

Mit Hilfe dieser Lichtquelle können reproduzierbare Versuchsbedingungen in Räumen erzeugt werden. Die Lichtquelle enthält acht Halogenstrahler, die in zwei Reihen angeordnet sind. Der Neigungswinkel der einzelnen Halogenstrahler kann verstellt werden, um den jeweiligen Versuch mit möglichst senkrecht einstrahlendem Licht zu betreiben.

## Lerninhalte

- physikalisches Verhalten von Photovoltaikmodulen bei wechselnder Beleuchtungsstärke, Temperatur und Verschattung
- Kennenlernen wichtiger Kenngrößen wie Kurzschlussstrom, Leerlaufspannung und maximale Leistung
- Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien in Parallel- und Reihenschaltung
- Einfluss der Neigung der Photovoltaikmodule
- Bestimmung des Wirkungsgrades

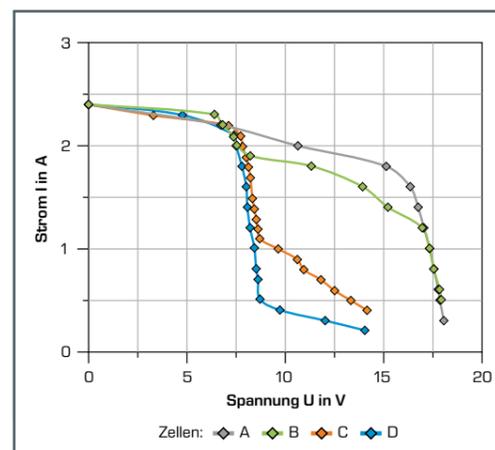


### Komponenten und Zubehör

- 1 Schiebewiderstand als veränderliche Last
- 2 Messverstärker
- 3 Neigungsmesser
- 4 Temperaturlaufnehmer
- 5 Beleuchtungsstärkeaufnehmer
- 6 schwenkbare Photovoltaikmodule

### Versuche bei Verschattungen

Die Verschattung stellt an vielen Standorten eine wesentliche Ursache für Ertragseinbußen dar. Auch zu diesem Effekt sind daher gezielte Versuche mit ET 250 vorgesehen. Die Ergebnisse können mit dokumentierten Referenzversuchen verglichen werden.



Strom-Spannungs-Kennlinien für Verschattungen einzelner Zellen



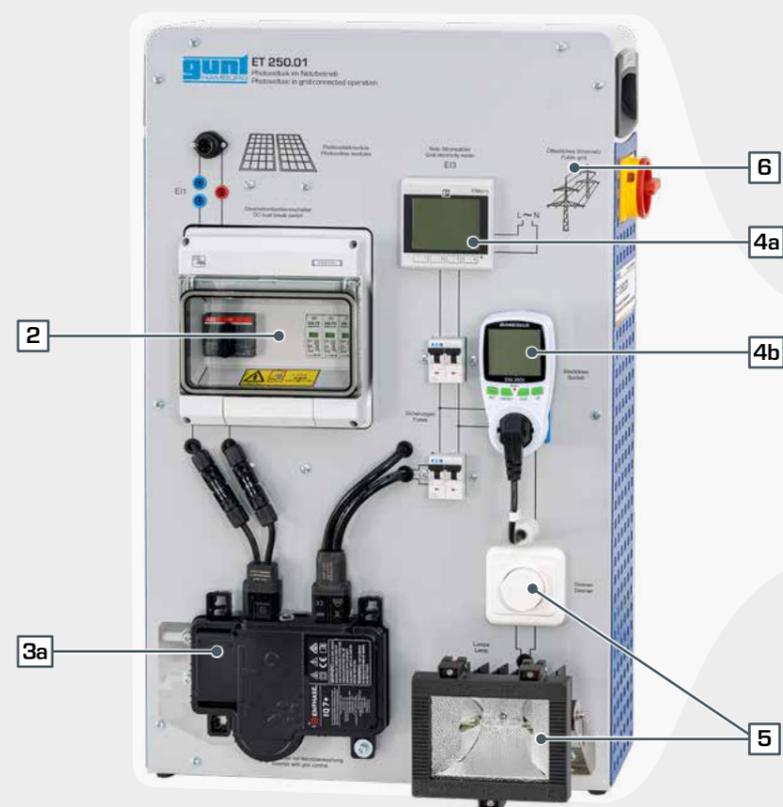
Verschattung durch Wolken

# ET 250.01 Photovoltaik im Netzbetrieb

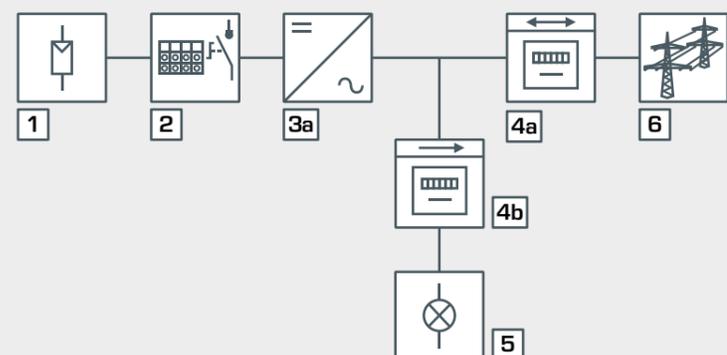
ET250.01 ist als Erweiterungsmodul für ET250 konzipiert und bietet die Möglichkeit, die Lerninhalte von ET250 sinnvoll zu ergänzen. ET250.01 enthält Komponenten aus der Photovoltaikpraxis, die zur Nutzung des Solarstroms bei Anbindung an ein öffentliches Stromnetz benötigt werden. Der Wechsel-

richter mit Leistungsoptimierung (MPP) arbeitet im netzgeführten Betrieb und variiert Strom und Spannung für die maximale Leistung der Photovoltaikmodule. Die entnommenen oder eingespeisten Strommengen werden über einen modernen Zweirichtungstromzähler erfasst.

Zum Produkt:



ET 250.01 Photovoltaik im Netzbetrieb

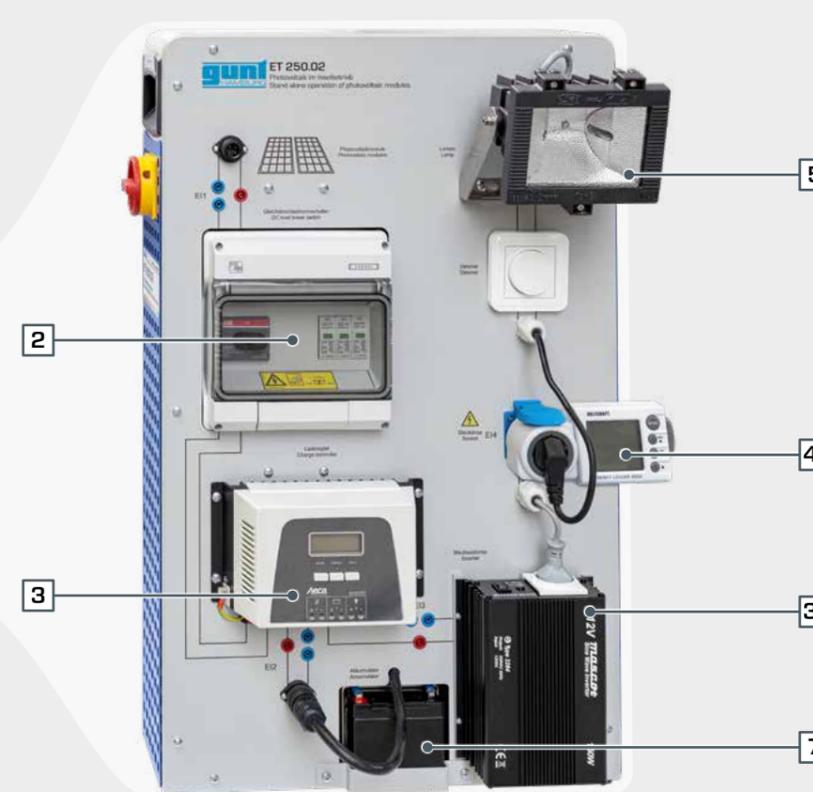


# ET 250.02 Photovoltaik im Inselbetrieb

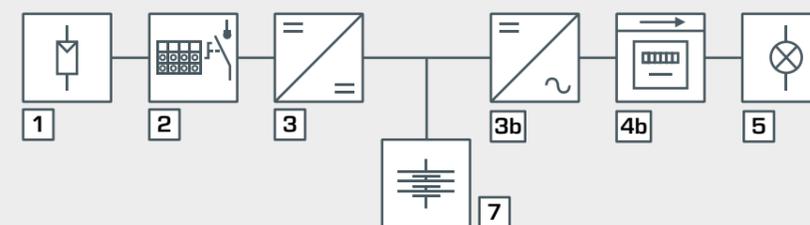
Auch ET250.02 ist ein Erweiterungsmodul für ET250. Das Gerät ermöglicht wesentliche Aspekte der Solarstromnutzung in Inselsystemen zu unterrichten. ET250.02 enthält dazu alle erforderlichen Komponenten: Der Laderegler mit Leistungs-

optimierung (MPP) überwacht die Spannung des Akkumulators und optimiert den Arbeitspunkt der Photovoltaikmodule. Im Inselbetrieb können einfachere Wechselrichter verwendet werden, da eine Überwachung der Netzspannung nicht benötigt wird.

Zum Produkt:



ET 250.02 Photovoltaik im Inselbetrieb



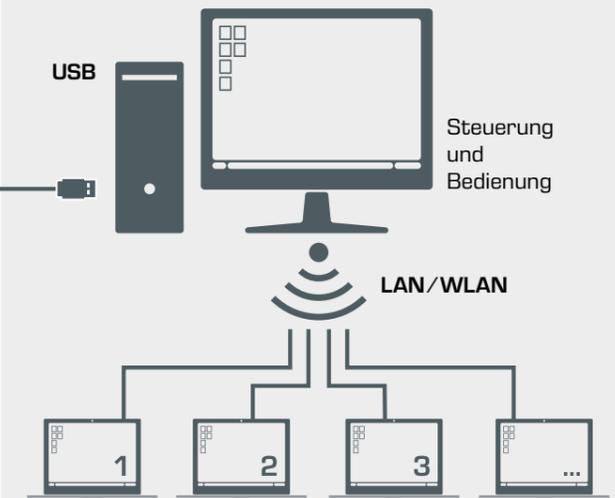
- 1 Photovoltaikmodule aus ET 250
- 2 Gleichstrom-Trennschalter mit Überspannungsschutz
- 3 Laderegler mit Leistungsoptimierung (MPP)
- 3a netzgeführter Wechselrichter mit Leistungsoptimierung (MPP)
- 3b einfacher Wechselrichter
- 4a Zweirichtungstromzähler Netzeinspeisung
- 4b Stromzähler Eigenverbrauch
- 5 Halogenlampe mit Dimmer
- 6 Netzeinspeisung
- 7 Akkumulator als Speicher

Lerninhalte	
■	Komponenten aus der Praxis der Solarstromnutzung
■	Funktion von Gleichstrom-Trennschalter und Überspannungsschutz
■	Funktion von Ladereglern und Wechselrichtern
■	Einfluss der Auslastung auf den Wirkungsgrad der Komponenten
■	Einfluss von Schwankungen des solaren Energieangebots und des Stromverbrauchs auf den Systemwirkungsgrad
■	Funktion von modernen Stromzählern
■	Energiebilanz im Inselbetrieb und Netzbetrieb

# ET 256 Kühlen mit Solarstrom



- Kompressionskälteanlage für den Betrieb mit Photovoltaikmodulen aus ET 250, den Photovoltaikmodulen ET 255.02 oder mit Labornetzteil ET 256.01
- Steuereinheit startet den Kompressor, sobald ausreichend elektrische Leistung der Photovoltaikmodule zur Verfügung steht
- lange Kühldauer durch Kältespeicher und Dämmung
- netzwerkfähige GUNT-Software zur Steuerung und Bilanzierung der Energieströme



GUNT-Software zur Gerätesteuerung und Messdatenerfassung via PC

HL 313.01  
Künstliche  
Lichtquelle

ET 256.01 Labor-  
netzteil

ET 250 Messen an Photovoltaikmodulen  
oder  
ET 255.02 Photovoltaikmodule

ET 256 Kühlen mit Solarstrom  
auf Laborwagen WP300.09

**Lerninhalte**

- Versorgung einer Kompressionskälteanlage mit Strom aus Photovoltaikmodulen
- Komponenten einer Photovoltaik-Kälteanlage
- Betrieb des Verdichters bei wechselndem Leistungsangebot und Kältebedarf
- Be- und Entladen von Kältespeichern
- Leistungszahl der Kälteanlage in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen
- Kältekreisprozess im log p,h-Diagramm
- Bilanzierung der Energieströme

Das Versuchsgerät ET 256 enthält eine Kühlkammer, die durch einen typischen Kompressionskältekreislauf gekühlt wird. Als besonderes Merkmal besteht die Möglichkeit, den eingesetzten Hubkolbenverdichter über ein Steuergerät direkt durch Strom aus Photovoltaikmodulen von ET 250 oder ET 255.02 zu versorgen. Alternativ kann die Versorgung über das Labornetzteil ET 256.01 erfolgen.

Zum Produkt:

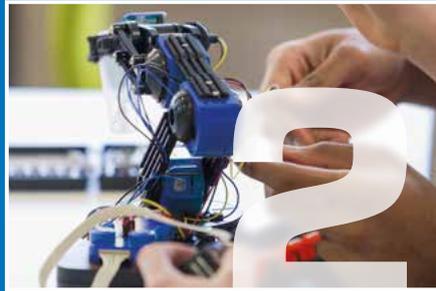


## Das GUNT-Gesamtprogramm



### Technische Mechanik und Konstruktionslehre

- Statik
- Festigkeitslehre
- Dynamik
- Maschinendynamik
- Konstruktionslehre
- Werkstoffprüfung



### Mechatronik

- Technisches Zeichnen
- Schnittmodelle
- Längenprüftechnik
- Maschinen- und Gerätetechnik
- Fertigungstechnik
- Montagetechnik
- Instandhaltung
- Maschinenzustandsüberwachung
- Automatisierung und Regelungstechnik



### Thermische Energietechnik

- Thermodynamische Grundlagen
- Wärmeübertrager
- Thermische Fluidenergiermaschinen
- Verbrennungsmotoren
- Kältetechnik
- Versorgungstechnik



### Technische Strömungsmechanik

- Stationäre Strömung
- Instationäre Strömung
- Umströmung von Körpern
- Elemente aus dem Rohrleitungs- und Anlagenbau
- Strömungsmaschinen
- Verdrängermaschinen
- Wasserbau



### Prozesstechnik

- Mechanische Verfahrenstechnik
- Thermische Verfahrenstechnik
- Chemische Verfahrenstechnik
- Biologische Verfahrenstechnik
- Wasserbehandlung



### 2E Energy & Environment

- | Energy                                   | Environment |
|--|-------------|
| ■ Solarenergie                           | ■ Wasser    |
| ■ Wasserkraft und Meeresenergie          | ■ Luft      |
| ■ Windkraft                              | ■ Boden     |
| ■ Biomasse                               | ■ Abfall    |
| ■ Geothermie                             |             |
| ■ Energiesysteme                         |             |
| ■ Energieeffizienz in der Gebäudetechnik |             |

## Kontakt

G.U.N.T. Gerätebau GmbH  
Hanskampring 15-17  
22885 Barsbüttel  
Deutschland

+49 40 670854-0  
sales@gunt.de  
www.gunt.de



Besuchen Sie uns  
im Internet unter  
[www.gunt.de](http://www.gunt.de)