

## 1 Zielsetzung

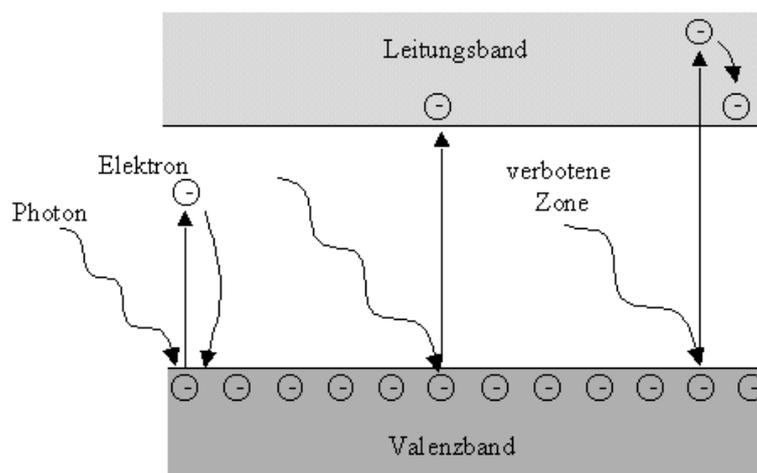
Ziel des Praktikums ist es, die Eigenschaften und Abhängigkeiten von Solarzellen zu verdeutlichen. Im ersten Praktikumsversuch soll erkannt werden, welche Auswirkungen die Auswahl eines Solarzellentyps hat, und wie sich die Solarmodule der vorhandenen Solaranlage unter sich verändernden äußeren Bedingungen verhalten.

Im zweiten Versuch soll das Verhalten bei höheren und niedrigeren Temperaturen und verschiedenen Verschaltungen verdeutlicht werden.

## 2 Grundlagen

Die meisten Solarzellen bestehen aus Silizium-Halbleitermaterial. Halbleiter haben definierte Energieniveaus. Dabei gibt es ein Leitungsband, ein Valenzband und dazwischen die sog. verbotene Zone.

Wenn ein Photon der Sonnenstrahlung mit genügend großer Energie auf eine Solarzelle trifft, hebt es ein Elektron aus dem Valenzband, über die verbotene Zone hinweg, in das Leitungsband. Somit trägt dieses Elektron im Leitungsband zur Stromerzeugung bei. Das Anheben von Elektronen durch Photonen in das Leitungsband wird als *innerer Photoeffekt* bezeichnet. Der Effekt wird durch folgende Abbildung verdeutlicht:



**Abbildung 2-1: Anhebung von Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband durch Photonen**

Ist die Energie eines Photons geringer als der Bandabstand, kann das Elektron nicht in das Leitungsband gelangen (Abb. 2-1 links). Ist die Energie im anderen Fall höher als der Bandabstand, wird das Elektron im Endeffekt zwar in das Leitungsband gehoben, aber es geht ein Teil der Energie verloren, da das Elektron ein energetisch höheres Niveau erreicht, und

von dort wieder auf das Leitungsband zurückfällt (Abb. 2-1 rechts). Da die Überschussenergie nicht genutzt werden kann, wird sie in Wärme umgewandelt.

### 3 Aufbau von Solarzellen

Der grundsätzliche Aufbau einer Solarzelle wird anhand einer Silizium-Solarzelle beschrieben. Abbildung 3-1 zeigt den Aufbau einer Silizium-Solarzelle.

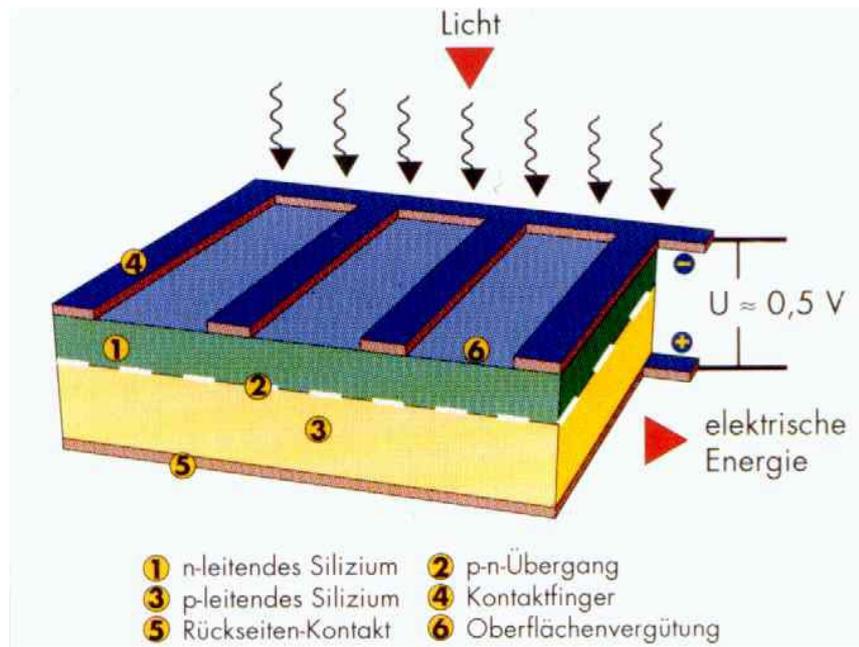


Abbildung 3-1: Prinzipieller Aufbau einer Silizium-Solarzelle [Bine,99]

Die gesamte Solarzelle ist nur 0,2 mm – 0,3 mm dick. Als Trägermaterial fungiert p-leitendes Silizium (Nr. 3). Darüber grenzt die n-leitende Silizium-Schicht an (Nr. 1). Sie ist mit nur 0,5  $\mu\text{m}$  extrem dünn, damit die Photonen die Schicht durchdringen können. Es entsteht, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, zwischen den Schichten ein p-n-Übergang (Nr. 2). Unter der n-leitenden Schicht befindet sich die rückseitige Kontaktfläche (Nr. 5). Diese ist vollflächig über die gesamte Zelle angebracht. Als oberer Kontakt dienen sog. Kontaktfinger (Nr. 4). Diese führen an der Oberfläche die anfallenden Elektronen ab. Die Kontaktfinger sind nicht vollflächig auf der Oberfläche angebracht, da sie für Photonen undurchlässig sind. Es entsteht nun zwischen den oberen und unteren Kontakten eine Gleichspannung. Bei Anschluss eines Verbrauchers kann der Solarzelle ein Gleichstrom entnommen werden.

## 4 Theorie der Solarzelle

### 4.1 Ersatzschaltbild

Im Ersatzschaltbild einer Solarzelle ist parallel zur Diode eine Stromquelle geschaltet. Bei Beleuchtung wird ein Photostrom  $I_{SC}$  erzeugt, der proportional zur Fläche  $A$  der Solarzelle und zur Bestrahlungsstärke  $G$  ist. Abbildung 4-1 zeigt ein Ersatzschaltbild der Solarzelle.

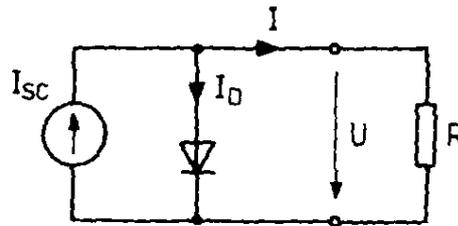


Abbildung 4-1: Vereinfachte Ersatzschaltung einer belasteten Solarzelle

Für die meisten Anwendungen reicht diese Beschreibung aus, da die Abweichung zwischen der berechneten Kennlinie und gemessenen Werten bei nur wenigen Prozent liegt. Die Leerlaufspannung  $U_{OC}$  nach dem Ersatzschaltbild in Abbildung 4-1 lässt sich mit folgender Formel berechnen.

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

- mit:
- $U_{OC}$  = Leerlaufspannung
  - $I_{SC}$  = Photostrom (Kurzschlussstrom der Solarzelle)
  - $I_S$  = Sättigungsstrom in Sperrrichtung (wächst exponentiell mit steigender Temperatur (ungefähre Verdoppelung alle 10 K))
  - $k$  = Boltzmannkonstante =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K
  - $T$  = Absolute Temperatur in Kelvin
  - $e$  = Elementarladung =  $1,602 \cdot 10^{-19}$  As

Der Kurzschlussstrom ist über einen modulabhängigen Faktor der Bestrahlungsstärke proportional.

$$I_{SC} = c_0 \cdot G$$

- mit:
- $I_{SC}$  = Kurzschlussstrom
  - $c_0$  = Proportionalitätsfaktor
  - $G$  = Einstrahlungsleistung

Im Gegensatz zum Kurzschlussstrom  $I_{SC}$ , der proportional zur Bestrahlungsstärke  $G$  ist, ist die Abhängigkeit der Leerlaufspannung von der Bestrahlungsstärke viel geringer.

## 4.2 Kennlinien und Abhängigkeiten von Solarzellen

Abbildung 4-2 zeigt die Kennlinie der beleuchteten Solarzelle im IV. Quadranten im Generatorzählsystem.

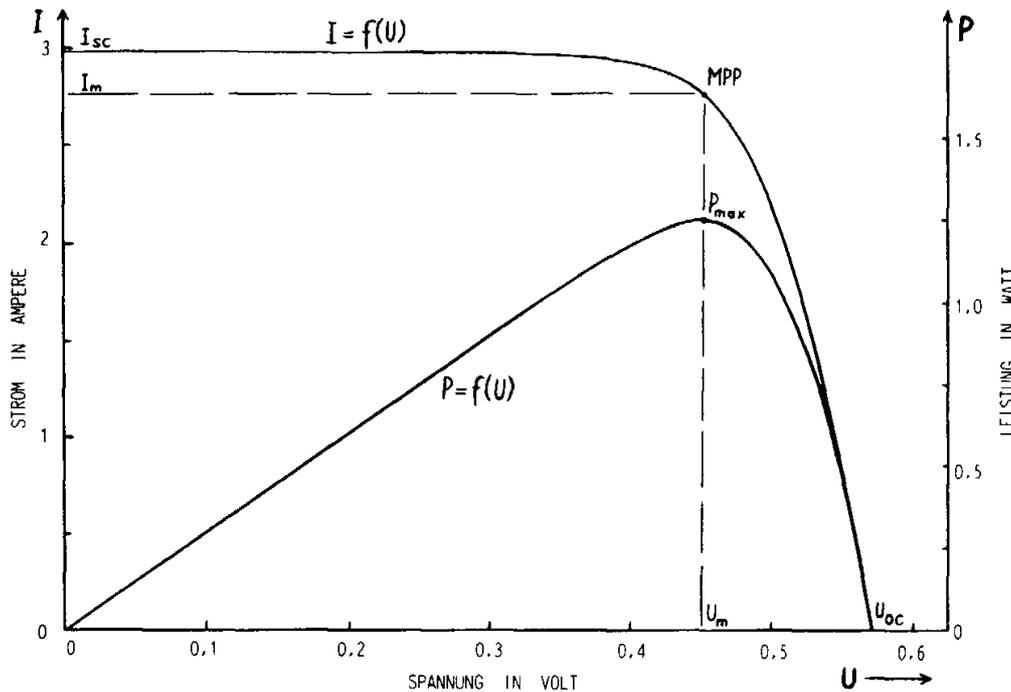


Abbildung 4-2: Kennlinie  $I=f(U)$  und  $P=f(U)$  einer Solarzelle

Für kleine Spannungen verhält sich die Solarzelle annähernd wie eine ideale Konstantstromquelle mit  $I_{SC}$ . Erst bei Spannungen in der Nähe der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  fällt der Strom relativ steil ab, da die Diode in der Ersatzschaltung in Abbildung 4-1 links beginnt zu leiten.

Außer dem Strom ist auch die Leistung interessant. In Abbildung 4-2 ist ebenfalls die Leistungskurve in Abhängigkeit von der Spannung gezeichnet. Wenn der Strom oder die Spannung gleich null ist, kann keine Leistung entnommen werden. Das Maximum in der Leistungskurve wird Maximum-Power-Point (MPP) genannt. Die Leistung im MPP errechnet sich aus:

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} < U_{OC} \cdot I_{SC}$$

mit:  $P_{MPP}$  = Leistung im MPP

$U_{MPP}$  = Spannung im MPP

$I_{MPP}$  = Strom im MPP

Die Spannung und der Strom sind abhängig von der Zellentemperatur und von der Einstrahlung. Abbildungen 4-3 und 4-4 zeigen die Abhängigkeiten dieser beiden Parameter.

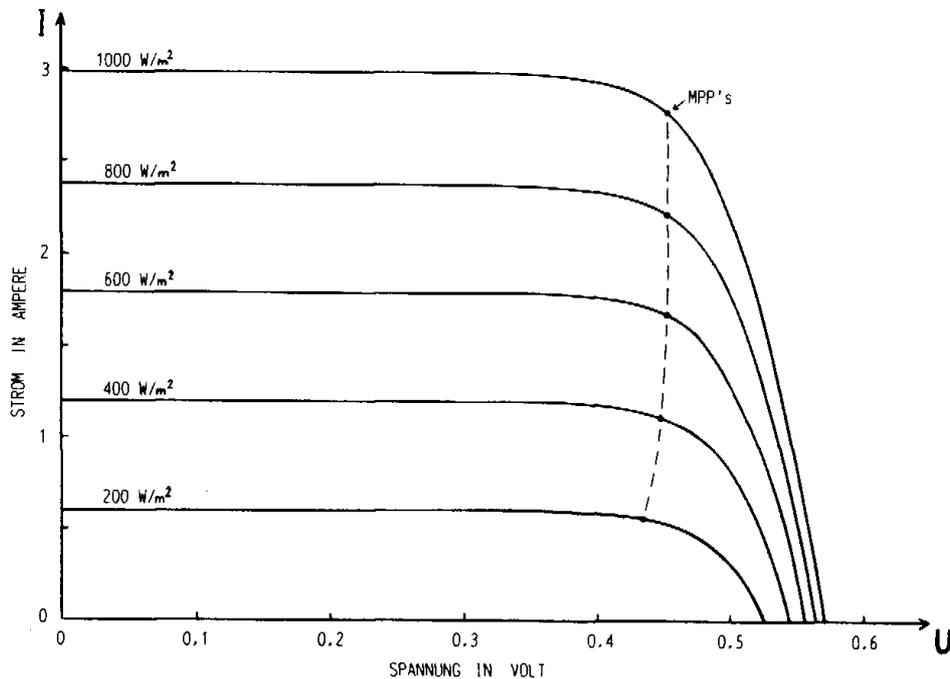


Abbildung 4-3: Kennlinie  $I=f(U)$  der Solarzelle mit der Bestrahlungsstärke  $G$  als Parameter

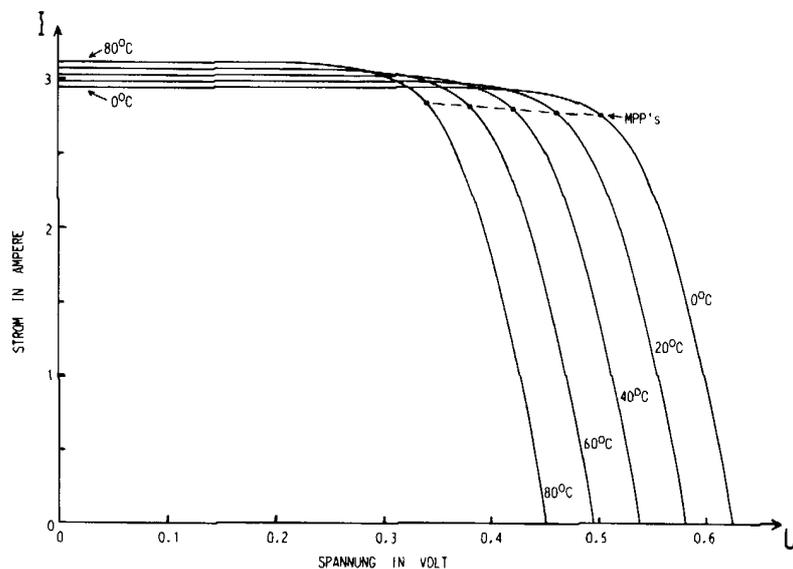


Abbildung 4-4: Kennlinie  $I=f(U)$  der Solarzelle mit der Zellentemperatur als Parameter

Bei der Abhängigkeit von Spannung und Strom von der Einstrahlung (Abb. 4-3) erkennt man sehr schön die Proportionalität des Kurzschlussstromes zur Bestrahlungsstärke. Die Leerlaufspannung nimmt dagegen mit steigender Bestrahlungsstärke nur wenig zu. Dies hat zur Folge, dass die Leerlaufspannung schon bei sehr geringen Einstrahlungen (z.B. in der Dämmerung) sehr groß sein kann. Die Spannung im MPP ist dagegen fast konstant.

Abbildung 4-4 zeigt die Abhängigkeit von Spannung und Strom von der Temperatur der Solarzelle. Die Leerlaufspannung verringert sich bei zunehmender Temperatur stärker als der Kurzschlussstrom sich erhöht. Somit wandert der MPP nach links.

Normalerweise werden die wichtigsten elektrischen Größen wie der Kurzschlussstrom, die Leerlaufspannung und die Leistung im MPP auf dem Typenschild von Solarzellen auf die Standard-Testbedingungen bezogen, damit Vergleich unter verschiedenen Solarzellen möglich sind. Die Standard-Testbedingungen sind:

- eine Einstrahlungsleistung von  $1000\text{W/m}^2$ ,
- ein Air Mass von 1,5 und
- eine Zelltemperatur von  $25\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 4.3 Füllfaktor und Wirkungsgrad

Der Füllfaktor beschreibt die Qualität von Solarzellen. Er gibt das Verhältnis der Maximalleistung zum Produkt von Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom an.

$$FF = \frac{P_{\max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}$$

mit:  $P_{MPP}$  = Leistung im MPP  
 $U_{OC}$  = Leerlaufspannung  
 $I_{SC}$  = Kurzschlussstrom

Der Füllfaktor trifft eine Aussage darüber, wie gut die I/U-Kennlinie der Solarzelle dem Rechteck aus  $I_{SC}$  und  $U_{OC}$  angenähert ist. Er ist stets kleiner als 1.

Neben dem Füllfaktor gibt es den Wirkungsgrad. Er gibt den Anteil an, der von der Solarzelle in Strom umgewandelt wurde.

Die Formel für den Wirkungsgrad lautet:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A} = \frac{FF \cdot U_{OC} \cdot I_{SC}}{G \cdot A}$$

mit:  $P_{MPP}$  = Leistung im MPP  
 $G$  = Bestrahlungsstärke  
 $A$  = Solarzellenfläche  
 $FF$  = Füllfaktor  
 $U_{OC}$  = Leerlaufspannung  
 $I_{SC}$  = Kurzschlussstrom

## 4.4 Solarmodule

### 4.4.1 Serieschaltung von Zellen

Wenn man Solarzellen in Serie verschaltet, addieren sich die Spannungen. Der Strom wird durch die schwächste Zelle bestimmt. In der folgenden Graphik wird diese Eigenschaft deutlich.

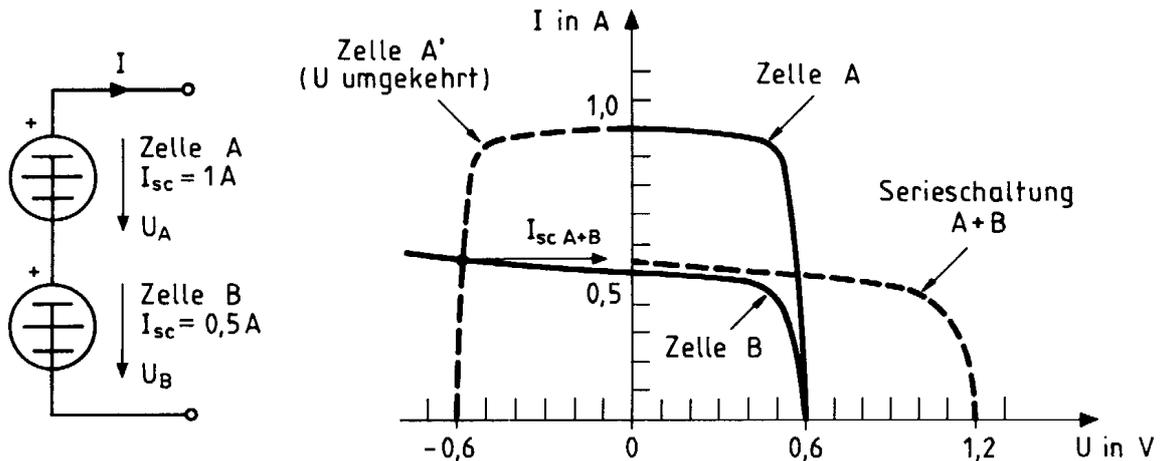


Abbildung 4-5: Serieschaltung und Kennlinie zwei verschiedener Solarzellen

In diesem Beispiel sind zwei Zellen (A+B) in Serie geschaltet. Die Zelle B hat (z.B. durch Teilbeschattung) nur den halben Kurzschlussstrom wie Zelle A. Die entstehende I/U-Kennlinie des Moduls wirkt wie eine über die x-Achse gestreckte I/U-Kennlinie der Zelle B. Wird die Serieschaltung der beiden Zellen kurzgeschlossen, wird die gesamte von der Zelle A produzierte Leistung in der Zelle B in Wärme umgesetzt, denn bei Zelle B sind Strom und Spannung gleich gerichtet. Der Strom beträgt dann in Abbildung 4-5  $I_{sc}$ . Bei einer Serieschaltung von nur zwei Zellen hält dies die Zelle B problemlos aus.

Die in Abbildung 4-5 gezeigte Situation tritt in geringerem Umfang auch bei Solarzellen auf, die gleichmäßig bestrahlt werden, da die einzelnen Solarzellen infolge der Exemplarstreuung nie ganz identisch sein können. Die Maximalleistung der Serieschaltung ist daher immer etwas geringer als die Summe der Maximalleistungen der einzelnen Zellen.

### 4.4.2 Parallelschaltung von Zellen

Bei der Parallelschaltung von Solarzellen addieren sich die Ströme der einzelnen Zellen. Die Spannung bleibt hingegen gleich wie bei einer einzelnen Zelle. Auch hier sind infolge der Exemplarstreuung die Kennlinien der einzelnen Zellen nicht ganz gleich. Deshalb ist die

Maximalleistung einer Parallelschaltung ebenfalls geringer als die Summe der Maximalleistungen der einzelnen Zellen.

Am häufigsten tritt die Beschattung einer Zelle auf. Diese Zelle wirkt dann als Verbraucher. In diesem Fall wird die beschattete Solarzelle im 1. Quadranten gemäß Bild 4-2, also in Durchlassrichtung, betrieben. Am gefährlichsten ist dieser Zustand für die beschattete Zelle, wenn gleichzeitig das ganze Modul auch noch im Leerlauf ist, so dass die noch bestrahlten Zellen eine Spannung nahe der Leerlaufspannung  $U_{OC}$  haben. Abbildung 4-6 zeigt diesen Fall.

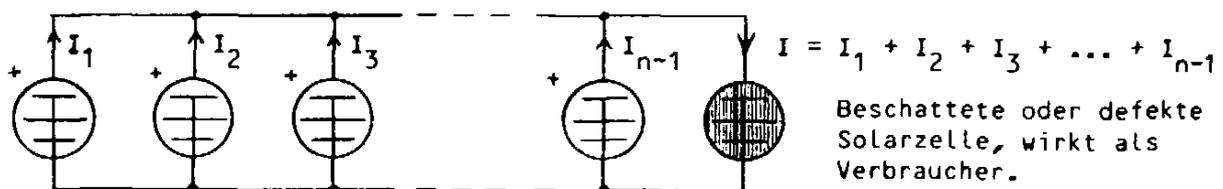


Abbildung 4-6: Parallelschaltung von Solarzellen mit einer defekten oder beschatteten Zelle

In diesem Fall speisen alle bestrahlten Nachbarzellen die beschattete Zelle. Wenn nicht allzu viele Zellen parallel verschaltet sind, kann die Zelle nicht zerstört werden.

## 5 Versuchsanleitung

### 5.1 Photovoltaikanlage

Bevor Sie mit dem Versuch beginnen, sollten Sie sich die Solaranlage auf dem Dach anschauen. Machen Sie sich mit den verschiedenen Modultypen vertraut und überlegen Sie, welche Module leistungsstärker, welche leistungsschwächer sind.

Danach schalten Sie den Versuchsstand am Hauptschalter ein. Die beiden oberen Anzeigen zeigen die aktuelle Einstrahlungsleistung der Sonnenstrahlung auf die geneigte Fläche an. Unter dem Hauptschalter befinden sich 6 Schalter. Durch Betätigen eines Wahlschalters wird ein Solarmodul nach unten in das Labor auf die Buchsen „+ und – Solaranlage“ geschaltet.

1) Fahren Sie nun die Kennlinie jeden Solarmoduls durch. Beginnen Sie mit dem Kurzschlussstrom. Durch Veränderung der Widerstände kann vom Kurzschluss bis kurz vor den Leerlauf die Kennlinie abgefahren werden. Zum Schluss nehmen Sie die Leerlaufspannung auf.

Achten Sie besonders darauf, dass der Strom durch das 1 k $\Omega$ -Potentiometer 3,5 A nicht überschreitet. Stellen Sie sinnvolle Abtastungsschritte ein, und versuchen Sie nur bei möglichst gleichmäßigen Einstrahlungsverhältnissen zu messen. Nehmen Sie die Daten der Einstrahlungssensoren bei stark wechselnden Bedingungen ebenfalls auf.

Benutzen Sie die dafür vorgefertigten Blätter.

2) Zeichnen Sie für jedes Modul die Strom/Spannungskennlinie und die Leistungskurve in die dafür vorgesehenen Diagramme.

3) Berechnen Sie die Wirkungsgrade und Füllfaktoren der einzelnen Module unter Berücksichtigung folgender Daten:

Modul	Fläche/Modul in m <sup>2</sup>
Webasto Solarflex	0,25
Tessag ASE 100	0,82
Siemens ST 40	0,42
Siemens SM 110	0,86
Tessag ASE 30 Opak	0,6

Tessag ASE 30 Semi	0,6
--------------------	-----

Modul	$U_{OC}$ in V (gem.)	$I_{SC}$ in A (gem.)	$U_{MPP}$ in V (gem.)	$I_{MPP}$ in A (gem.)	$P_{MPP}$ in W (gem.)	Bestrahlungsstärke G in $W/m^2$	Wirkungsgrad	Füllfaktor
Webasto Solarflex								
Tessag ASE 100								
Siemens ST 40								
Siemens SM 110								
Tessag ASE 30 Opak								
Tessag ASE 30 Semi								

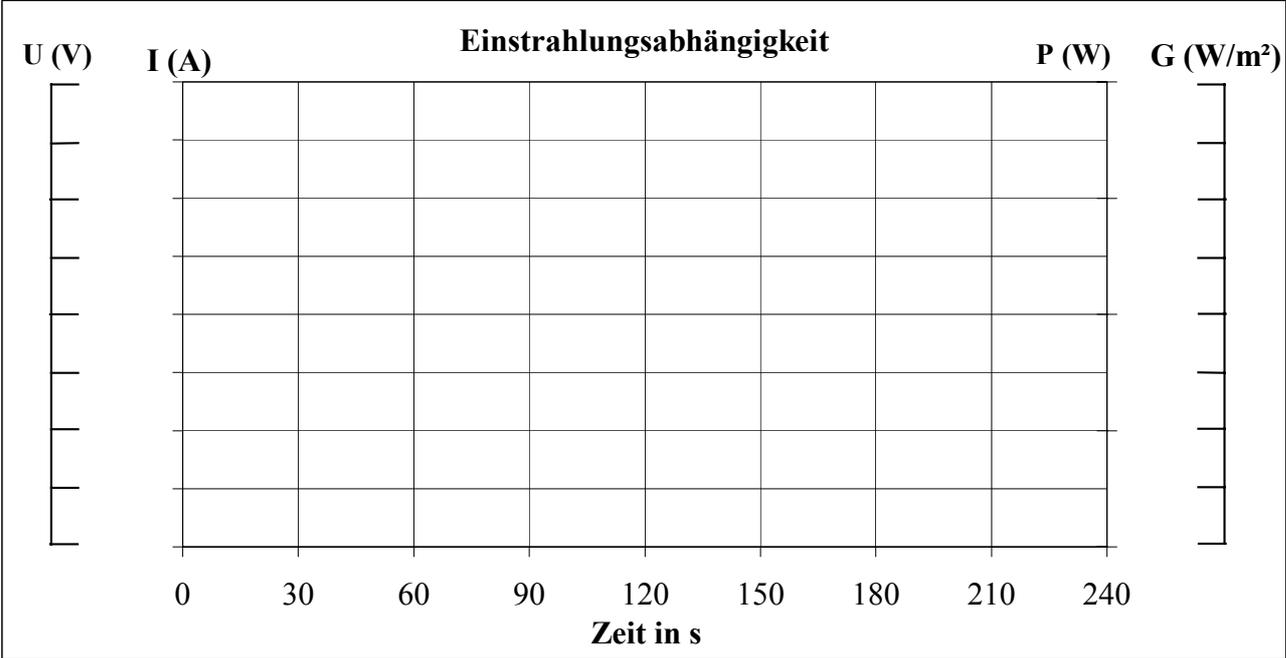
Vergleichen Sie die Daten mit den Herstellerangaben. Warum liegen die berechneten Wirkungsgrade und Füllfaktoren unter denen der Hersteller?

Modul	$U_{OC}$ in V	$I_{SC}$ in A	$U_{MPP}$ in V	$I_{MPP}$ in A	$P_{MPP}$ in W	Bestrahlungsstärke G in $W/m^2$	Wirkungsgrad	Füllfaktor
Webasto Solarflex	21	1,58	16,8	1,49	25,03	1000	10,01%	0,75
Tessag ASE 100	42,5	3,20	34,5	2,90	100,05	1000	12,20%	0,74
Siemens ST 40	22,2	2,59	16,6	2,41	40,01	1000	9,53%	0,70
Siemens SM 110	21,7	6,90	17,5	6,30	110,25	1000	12,82%	0,74
Tessag ASE 30 Opak	49	1,13	36	0,89	32,04	1000	5,34%	0,58
Tessag ASE 30 Semi	49	1,02	36	0,75	27,00	1000	4,50%	0,54

- 4) Wählen Sie ein beliebiges Modul, und schalten Sie die Last so, dass die Leistung maximal wird. Warten Sie nun auf Änderungen der Globalstrahlung. Notieren Sie die Zeit (alle 10 sec), die Änderung der beiden Pyranometer und die Spannungs- und Stromänderung. Bei sehr konstanten Einstrahlungsverhältnissen ist dieser Versuch nicht durchführbar.

Tragen Sie die Daten in die angegebene Tabelle und in einem Diagramm auf. Was fällt auf? Wie verhalten sich die Leistung, Strom und die Spannung bei einer Änderung der Einstrahlungsstärke?

Zeit in s	U (V)	I (A)	P(W)	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					
110					
120					
130					
140					
150					
160					
170					
180					
190					
200					
210					
220					
230					
240					













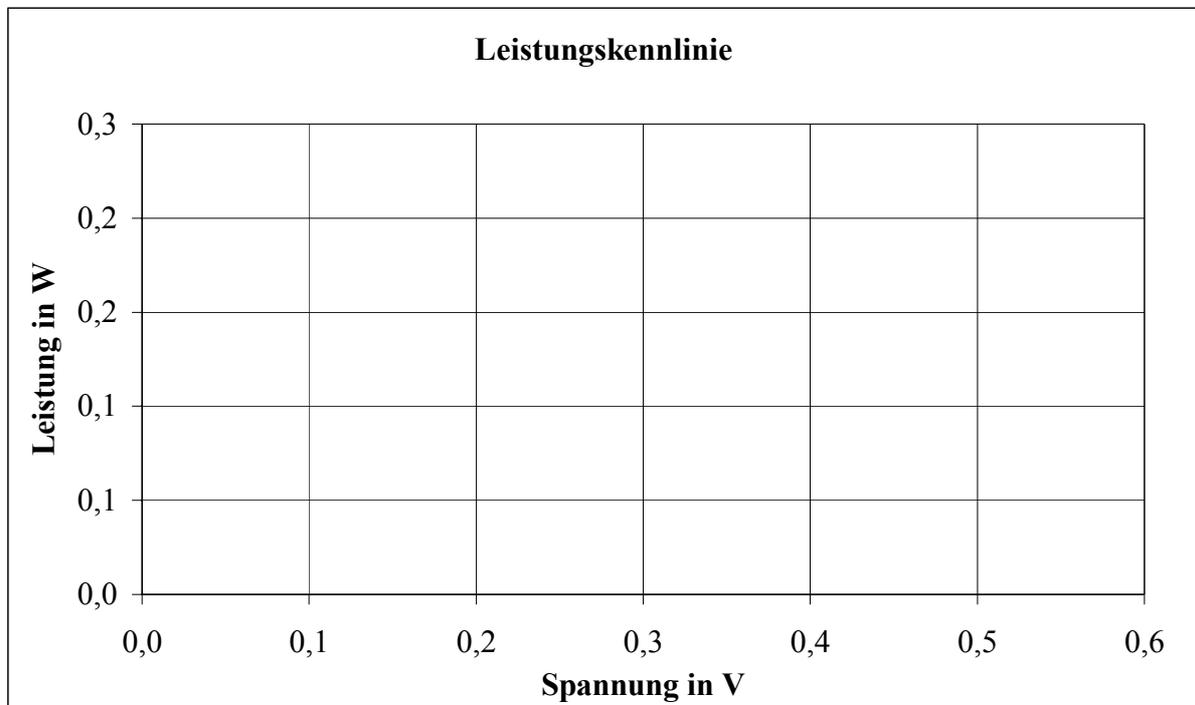
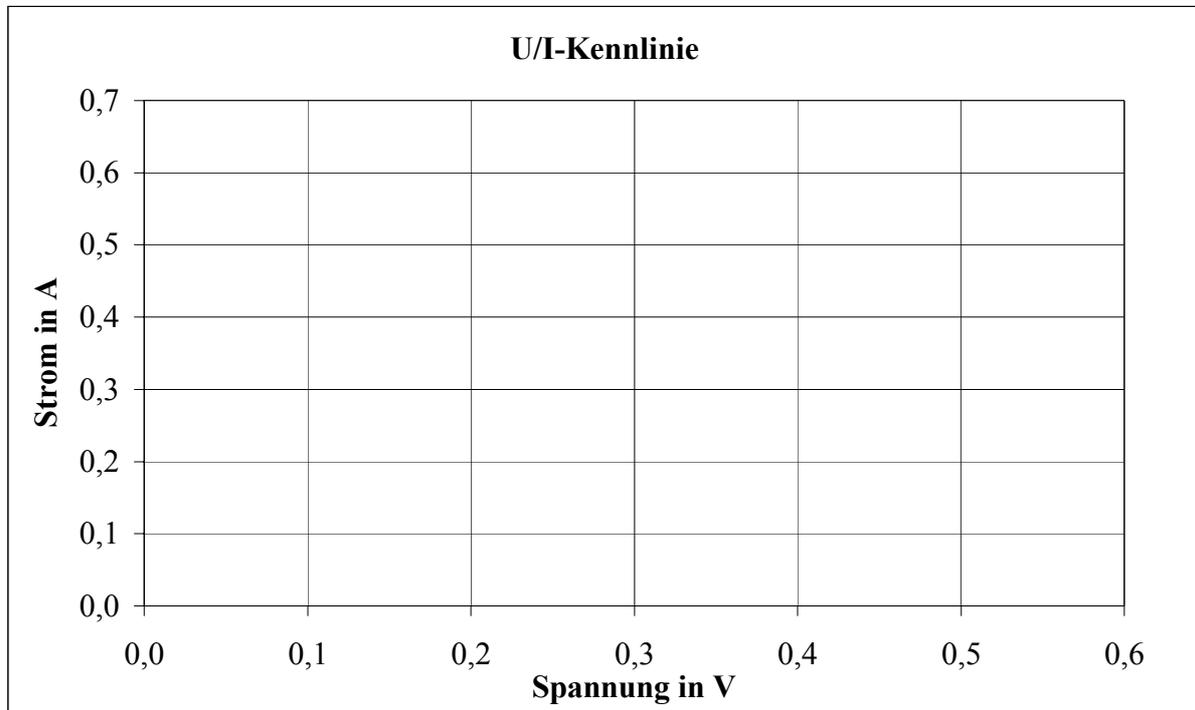








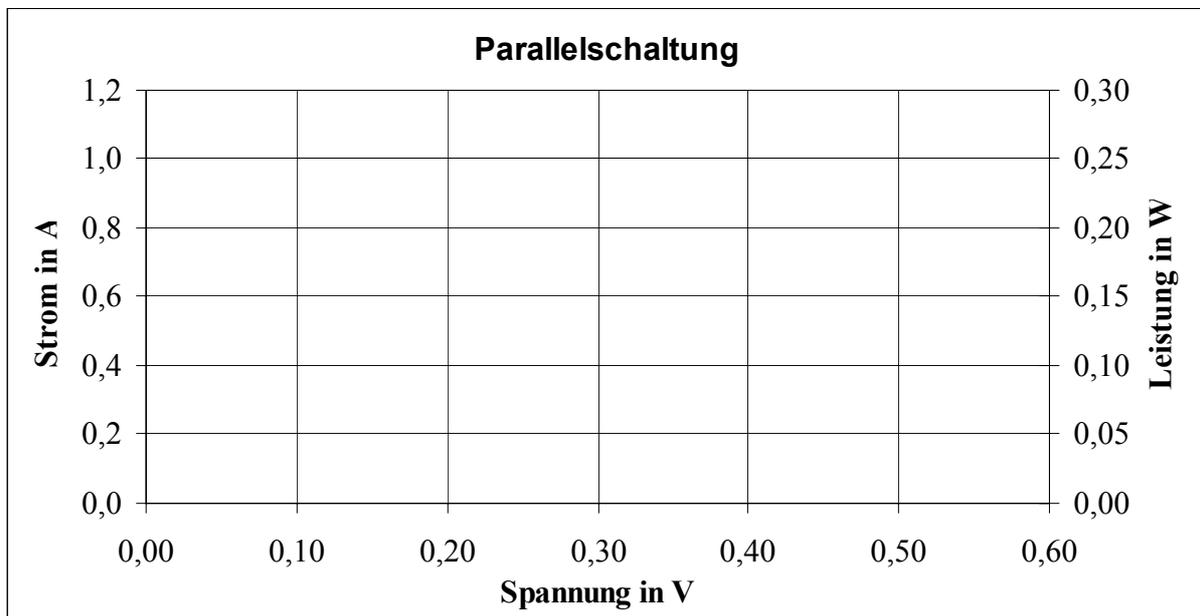
- 2) Zeichnen Sie alle U/I-Kennlinien und alle Leistungskennlinien in die vorgefertigten Diagramme. Was fällt auf?





- 4) Verschalten Sie die nun die neun Solarzellen parallel. Welche Spannungswerte und Stromwerte würden theoretisch erreicht? Zeichnen Sie auch hier die U/I-Kennlinie und die Leistungskurve in ein Diagramm.

U (V)	I (A)	P (W)



Warum addieren sich die Ströme nicht?