

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität
Graz

&

Institut für Physik der Universität Graz

FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2

Übungstitel: Wirkungsgrad

Betreuer: Assoz. Prof. Mag. Dr.rer.nat. Georg Koller

Gruppennummer: 4

Name: Martin Klotz, Philipp Werhounig

Kennzahl: 678

Matrikelnummer: 11909170, 11842163

Datum: 27.04.2022

SS 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung[1]	1
1.1 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	1
1.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle	1
1.3 Wärmepumpe	1
2 Voraussetzungen und Grundlagen [2]	2
2.1 Die Photozelle (photovoltaisches Element)	2
2.2 Kennlinien der Solarzelle und der Füllfaktor [3]	2
2.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad [5]	3
2.4 Wärmepumpe [6]	4
3 Beschreibung der Versuchsanordnung	6
3.1 Leistung und Wirkungsgrad eines Solarmoduls	6
3.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad	7
3.3 Wärmepumpe	7
4 Geräteliste	8
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	9
5.1 Solarzellen in Serienschaltung	9
5.2 Solarzellen in Parallelschaltung	10
5.3 Solarzellen in Serienschaltung (eine Solarzelle beschattet)	11
5.4 Diodenparameter und Wirkungsgrad	12
5.5 Wärmepumpe	14
6 Auswertung	15
6.1 Solarzellen in Serienschaltung	15
6.2 Solarzellen in Parallelschaltung	16
6.3 Solarzellen in Serienschaltung (eine Solarzelle beschattet)	17
6.4 Diodenparameter und Wirkungsgrad	17
6.5 Wärmepumpe	21
6.5.1 Das p-H-Diagramm der Wärmepumpe	22
7 Diskussion	23
7.1 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	23
7.2 Diodenparameter und Diodenkennlinie	23
7.3 Wärmepumpe	24
8 Zusammenfassung	25
8.1 Kennlinie und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	25
8.2 Diodenkennlinie und Wirkungsgrad	25
8.3 Wärmepumpe	25

1 Aufgabenstellung[1]

1.1 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

1. Die Kennlinie des Solarzellenmoduls $I(U)$ ist bei konstanter Temperatur aufzunehmen. Es sind ein $I(U)$ - und ein $P(U)$ -Diagramm zu erstellen. Ermitteln Sie weiters die Kenndaten Leerlaufspannung U_L , Kurzschlussstrom I_K , Spannung im bestmöglichen Betriebspunkt U_{MPP} , Strom im bestmöglichen Betriebspunkt I_{MPP} , Leistung P_{MPP} im bestmöglichen Betriebspunkt und den Füllfaktor. Diese Punkte sollen für folgende Fälle ermittelt werden:
 - Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden in Serie geschaltet.
 - Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden parallel geschaltet.
2. Die beiden Solarzellen des Solarzellenmoduls werden in Serie geschaltet. Der Effekt der teilweisen Abschattung einer Solarzelle ist zu untersuchen. Mit Hilfe eines Papierstreifens wird eine Solarzelle teilweise beschattet. Die Kennlinie des Solarzellenmoduls $I(U)$ ist bei konstanter Temperatur aufzunehmen. Es sind ein $I(U)$ - und ein $P(U)$ -Diagramm zu erstellen. Ermitteln Sie weiters die Kenndaten Leerlaufspannung U_L , Kurzschlussstrom I_K , Spannung im bestmöglichen Betriebspunkt U_{MPP} , Strom im bestmöglichen Betriebspunkt I_{MPP} , Leistung P_{MPP} im bestmöglichen Betriebspunkt und den Füllfaktor.

1.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Gegeben sind eine einzelne Solarzelle, ein Sonnensimulator als Lichtquelle, ein Leistungsmessgerät, sowie ein Quellennetzwerk (Sourcemeter) zur automatisierten Messung der Kennlinie.

1. Messung der Dunkelkennlinie: An der einzelnen, abgedeckten Solarzelle wird mit Hilfe des Sourceters automatisiert die Kennlinie aufgenommen. Fitten Sie den $I(U)$ -Verlauf mit der gegebenen Formel und bestimmen Sie die Parameter der Diode.
2. Messung der Hellkennlinie und Bestimmung des Wirkungsgrades. Die einzelne Solarzelle wird mit Hilfe des Sonnensimulators mit zwei verschiedenen Intensitäten (1000 W/m^2 und 400 W/m^2) bestrahlt. Aus den aufgenommenen Kennlinien werden die Diodenparameter, sowie im Punkt der maximalen Leistung (MPP) die Wirkungsgrade ermittelt.

1.3 Wärmepumpe

Mit einer Wärmepumpe wird Wärme von einem Wasserbehälter (blau) in einen anderen (rot) gepumpt.

1. Messung des Temperaturverlaufes in zwei Wasserbehältern, der von der Pumpe aufgenommenen Leistung und der Drücke nach Kompression bzw. Expansion im Kältemittelkreislauf über 1 Stunde.
2. Bestimmung der Leistungszahl und des Gütegrades als Funktion der Temperaturdifferenz.
3. Erstellung des p-H-Diagrammes des Kreisprozesses aufgrund der gemessenen Werte zu Beginn und am Ende der Messung.

2 Voraussetzungen und Grundlagen [2]

2.1 Die Photozelle (photovoltaisches Element)

Die vorliegende Photozelle ist eine Kristalldiode bestehend aus zwei unterschiedlich dotierten Hälften eines Halbleiterkristalls (Si). Dabei grenzt die n-leitende Schicht unmittelbar an einen p-leitenden Bereich. Die n-leitende Hälfte enthält viele frei bewegliche Elektronen und wenige Löcher (Löcher sind als positive Ladungsträger aufzufassen) in der p-leitenden Schicht ist es umgekehrt. An der Grenze (Junction) zwischen den beiden Schichten besteht daher ein starkes n-Gefälle in die eine und ein p-Gefälle in die andere Richtung. Daher diffundieren Elektronen in den p-leitenden Teil und Löcher in das n-leitende Material. Durch die sich dabei aufbauende elektrische Doppelschicht entsteht ein elektrisches Feld mit zunehmender Feldstärke das den weiteren Strom von Ladungsträgern schließlich unterbindet. Der Leistungsstrom im Feld der Doppelschicht kompensiert den Diffusionsstrom.

Betrachtet man den Vorgang an der p-n-Grenze aus der Sicht der Gitterionen, die als Raumladungen zurückbleiben, wenn „ihre“ Ladungsträger abgesaugt werden, so erkennt man, dass in jeder Hälfte eine Schicht entsteht, die hauptsächlich ortsfeste Ladungen enthält und daher keine Ladungstransport zulässt, wodurch der weiteren Ausdehnung der Schicht bereits bei einer Dicke von ca. 10^{-7} m eine Grenze gesetzt wird.

Wird an diese p-n-Diode eine Spannung so angelegt, dass die verbliebenen beweglichen Ladungsträger noch weiter aus der Grenzschicht abgezogen werden, so verbreitert sich diese schlecht leitende Mittelschicht d.h. der Widerstand wird größer. Polt man die Spannung um, so nimmt die Schichtdicke ab und der elektrische Widerstand wird kleiner. Das sogenannte Dunkelstromverhalten einer Solarzelle entspricht dem einer Halbleiterdiode.

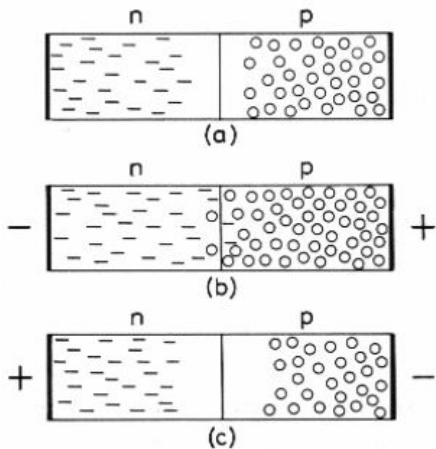


Abb. 1: p-n-Übergang: (a) ohne elektrisches Feld; (b) in Flussrichtung; (c) in Sperrrichtung.

Bei einer Solarzelle wird der Aufbau der Diode so verändert, dass die Übergangsschicht möglichst nahe an der Oberfläche liegt und möglichst viel eingestrahltes Licht in ihr absorbiert wird. Das Licht (Photonenenergie) erzeugt Ladungsträgerpaare, die im elektrischen Feld der Doppelschicht getrennt werden. Sind die beiden Halbleiterschichten durch einen Draht oder einen „Verbraucher“ miteinander verbunden, rekombinieren die Ladungsträgerpaare über diesen Weg, da dessen elektrischer Widerstand kleiner ist als jener durch die Übergangsschicht. Der Wirkungsgrad von Solarzellen wird durch Rekombinationsverluste bei der Ladungstrennung sowie durch die geringe Absorption in der dünnen Übergangsschicht (ca. 10^{-7} m dick) bestimmt.

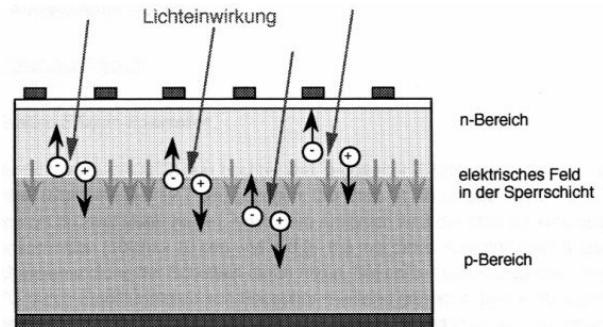


Abb. 2: Schematischer Schnitt durch eine Solarzelle (in Wirklichkeit ist die n-Schicht weit dünner, damit der pn-Übergang möglichst nahe an der Oberfläche ist.)

2.2 Kennlinien der Solarzelle und der Füllfaktor [3]

Zur Verwendung der elektrischen Leistung einer Solarzelle wird ein Verbraucher zwischen Plus- und Minuspol der Solarzelle geschaltet. Dabei bildet sich ein Spannungsteiler zwischen Innen- und Lastwiderstand, wodurch die übertragene Leistung an den Verbraucher je nach Widerstandsverhältnis variiert. Das entsprechende Verhalten kann in einer Strom-Spannungs- bzw. Spannungs-Leistungs-Kennlinie (Abb. 3) abgebildet werden.

Abhängig von der Einstrahlung ergeben sich verschiedene Kennlinien, wobei der Strom direkt proportional zur Einstrahlung ist. Berechnet man sich mittels:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

die Leistung aus der Strom-Spannungs-Kennlinie, so erkennt man, dass es einen Punkt maximaler Leistung gibt, den sogenannten MPP mit der maximalen Leistung P_{MPP} und zugehörigem Strom I_{MPP} und zugehöriger Spannung U_{MPP} . Bei einer Solarzelle kann die maximale Leistung das Produkt aus Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom, die sogenannte ideale Leistung nicht überschreiten. Das Verhältnis von maximaler zu idealer Leistung nennt man Füllfaktor FF . Der Füllfaktor berechnet sich also zu:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_L I_K} \quad (2)$$

Die Füllfaktorverluste stellen jenen Anteil der solaren Strahlung dar, der aufgrund der elektrischen Eigenschaften der Solarzelle nicht in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dieser Füllfaktorverlust beträgt etwa 16 % für Siliziumzellen im Bezug auf die gesamte solare Strahlungsenergie, welche auf der Oberfläche der Solarzelle auftrifft.

In der folgenden Abbildung werden die oben besprochenen Kennlinien und Größen anschaulich dargestellt:

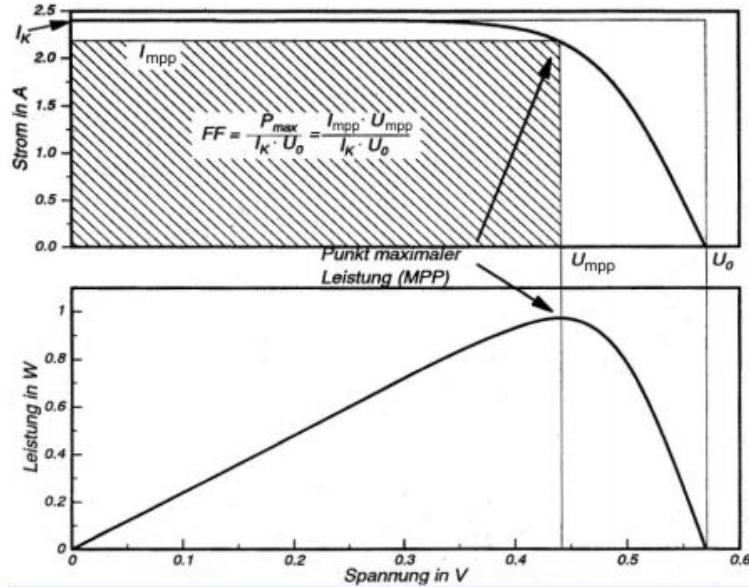


Abb. 3: $I(U)$ -, $P(U)$ -Diagramm und Füllfaktor anschaulich dargestellt[4]

2.3 Diodenparameter und Wirkungsgrad [5]

Für eine ideale Photodiode ohne Verunreinigung im Material, ohne parasitäre Kapazitäten, ohne parasitäre Widerstände und diskretem Dotierungsprofil kann die Diodenkennlinie durch die Shockley-Gleichung beschrieben werden. Diese beschreibt die Diode in Durchlassrichtung und in Sperrichtung bis zur Durchbruchsspannung. Wird die Diode mit einer Lichtquelle beleuchtet, so lösen sich in der Raumladungszone Elektronen aus ihrer Bindung und es entstehen Elektron-Loch-Paare. Durch Verluste und Rekombination weicht die reale von der idealen Kennlinie ab. Erstere kann durch das Eindioden- Modell beschrieben werden.

$$I = I_{S1} \left(e^{\frac{e(U - IR_S)}{f_1 k_b T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{U - IR_S}{R_p} \quad (3)$$

wobei I_{S1} dem Sättigungsstrom, U der an der Diode liegenden Spannung, I dem durch die Diode fließenden Strom, f_1 einer Proportionalitätskonstanten, I_{ph} der Stromstärke des Photostroms, der durch die Beleuchtung ausgelöst wird, R_S einem in Serie anliegenden und R_p einem parallel anliegenden parasitären Widerstand entspricht.

Da im Allgemeinen Dioden nicht homogen dotiert sind, kann die Kennlinie einer Diode auch mit dem Zweidioden-Modell beschrieben werden. Es nimmt an, dass die Diode zwei unterschiedlich dotierte Bereiche hat und daher in zwei parallel geschaltete Dioden aufgeteilt werden kann.

$$I = I_{S1} \left(e^{\frac{e(U - IR_S)}{f_1 k_b T}} - 1 \right) + I_{S2} \left(e^{\frac{e(U - IR_S)}{f_2 k_b T}} - 1 \right) - I_{ph} + \frac{U - IR_S}{R_p} \quad (4)$$

I_{S2} und f_2 entsprechen hier dem Sperrstrom bzw. der Proportionalitätskonstanten der zweiten Diode. Der parasitäre Serienwiderstand und Parallelwiderstand können aus der Steigung der $I(U)$ -Kennlinie bestimmt werden

$$R_S = \frac{dU}{dI} (I = 0A) \quad (5)$$

$$R_P = \frac{dU}{dI} (U = 0V) \quad (6)$$

Die oben genannten Ströme führen zu einer elektrischen Leistungsumsetzung P_{el} an der Diode. Ist die zugeführte Leistung der Strahlungsquelle P_0 bekannt, so kann damit der Wirkungsgrad η der Solarzelle berechnet werden.

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_0} \quad (7)$$

Bei bekannter Lichtintensität I kann die auf eine kreisförmige Fläche mit Durchmesser d eingestrahlte Leistung P_0 wie folgt berechnet werden

$$P_0 = I_0 \cdot \frac{d^2}{4} \quad (8)$$

Für eine rechteckige Fläche gilt folgende Beziehung für die Lichtleistung

$$P_0 = I_0 \cdot a \cdot b \quad (9)$$

wobei a und b die Seitenlängen des Rechtecks sind.

2.4 Wärmepumpe [6]

Eine Wärmepumpe dient zum Transport von Wärme durch Zuführung von Arbeit. Diese wird von einem warmen Reservoir in ein kaltes transferiert. Dabei wechselt in diesem Versuch der Aggregatzustand des Kühlmittels, wodurch zusätzlich zu den Wärmen aufgrund der Kompression bzw. Expansion noch latente Wärmen aufgenommen bzw. abgegeben werden. Dadurch ergibt sich eine hohe Temperaturdifferenz zwischen den beiden Wärmereservoirs.

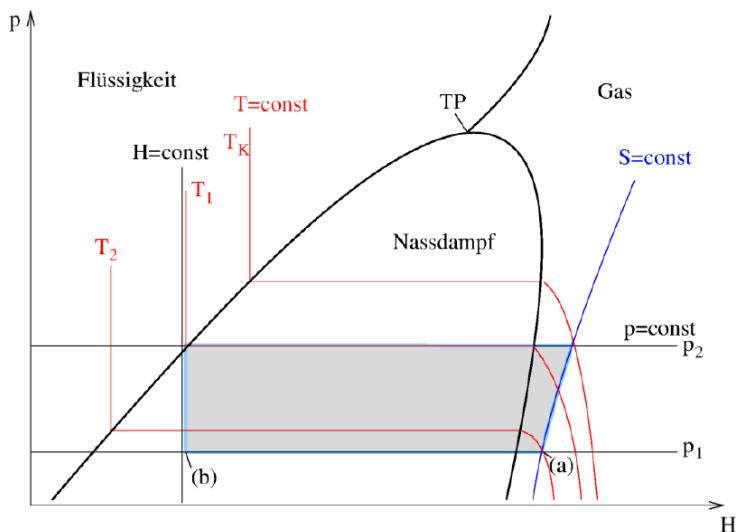


Abb. 4: p-H Diagramm des Kreisprozesses der Wärmepumpe

Wie in Abbildung 4 zu sehen, durchläuft der ideale Kreisprozess dabei 4 Zustandsänderungen. Zu Beginn erfolgt eine adiabatische Kompression vom niedrigen Durch p_1 auf den höheren Druck p_2 , gefolgt von einer isobaren Abkühlung bei

der ein Phasenübergang von gasförmig zu flüssig auftritt. Danach treten eine isenthalpe Expansion vom Druck p_2 auf p_1 sowie eine isobare Erwärmung auf. Ein Maß für die transportierte Wärmeleistung \dot{Q} im Verhältnis zur zugeführten Kompressorleistung P_0 ist die Leistungszahl ϵ

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{P_0} = \frac{cm \frac{dT_w}{dt}}{P_0} = \frac{c\rho V \frac{dT_w}{dt}}{P_0} \quad (10)$$

dabei entspricht T_w der Temperatur des warmen Reservoirs.

Theoretisch kann der maximale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine erreicht werden, wenn diese mit dem Carnot-Prozess betrieben wird. Daher definiert man als Güte des Kreisprozesses das Verhältnis vom realen Wirkungsgrad zum theoretisch maximal erreichbaren Wirkungsgrad ϵ_{max} des Carnot-Prozesses.

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{max}} = \epsilon \cdot \eta_C = \epsilon \cdot \left(1 - \frac{T_k}{T_w}\right) \quad (11)$$

T_k entspricht hier der Temperatur des kalten Resservoirs.

3 Beschreibung der Versuchsanordnung

3.1 Leistung und Wirkungsgrad eines Solarmoduls

Die Versuchsanordnung setzt sich zusammen aus einem Solarmodul mit zwei Solarzellen, die man wahlweise in Serie oder parallel schalten kann, einer Lampe zur Beleuchtung des Solarmoduls, einem Lastwiderstand zum Einstellen der verschiedenen Lastfälle bei der Aufnahme der $P(U)$ - und $I(U)$ -Kennlinien und zwei Multimetern zur Messung von Lastspannung, Laststrom und Lastwiderstand. Es ist darauf zu achten, den Abstand zwischen Solarmodul und Lampe während der Aufnahme einer Kennlinie unverändert zu lassen, da eine Abstandsveränderung zu enormen Leistungsunterschieden führt.



Abb. 5: Versuchsaufbau mit verstellbarem Lastwiderstand (hinten), Solarmodul (mitte links), Lampe (mitte rechts) und den beiden Multimetern für die Strom- und Spannungsmessung (mitte vorne)

3.2 Diodenparameter und Wirkungsgrad

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Lichtleistungsmessgerät zur Bestimmung der Strahlungsstärke der Quelle, der Solarzelle und dem Sonnensimulator, der sowohl die Rolle als Quelle und Last übernimmt. Das Leistungsmessgerät hat eine kreisförmige Absorptionsfläche und die Solarzelle eine rechteckige. Die Aufzeichnung der Kennlinie erfolgt mit der "KickstartSoftware".

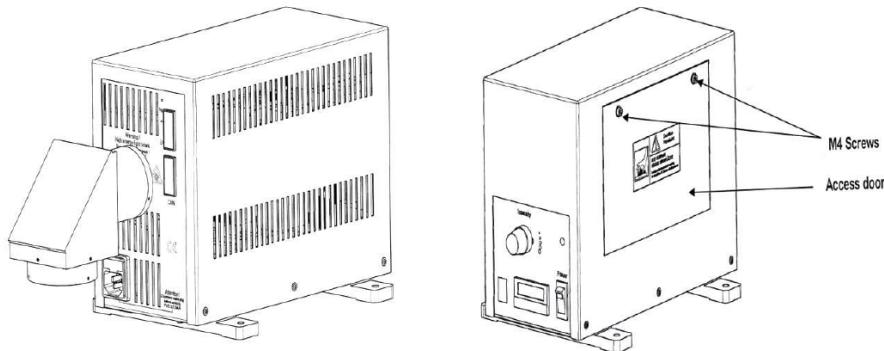


Abb. 6: Sonnensimulator mit 4-Pol-Anschluss zur Bestimmung der U-I-Kennlinie der Solarzelle

3.3 Wärmepumpe

Für die Zuführung der mechanischen Arbeit ist ein Kompressor mit einer Leistung von (130 ± 10) W. Dieser komprimiert das Kältemittel. Gegenteilig dazu befindet sich ein Expansionsventil im Kreislauf. Mit zwei Manometern wird der Druck und mit zwei Thermometern die Temperatur im kalten als auch im warmen Reservoir gemessen. Der Transport des Kältemittels erfolgt in Kupferrohren. Die Aufzeichnung der Temperatur erfolgt mit der Software Cassylab2

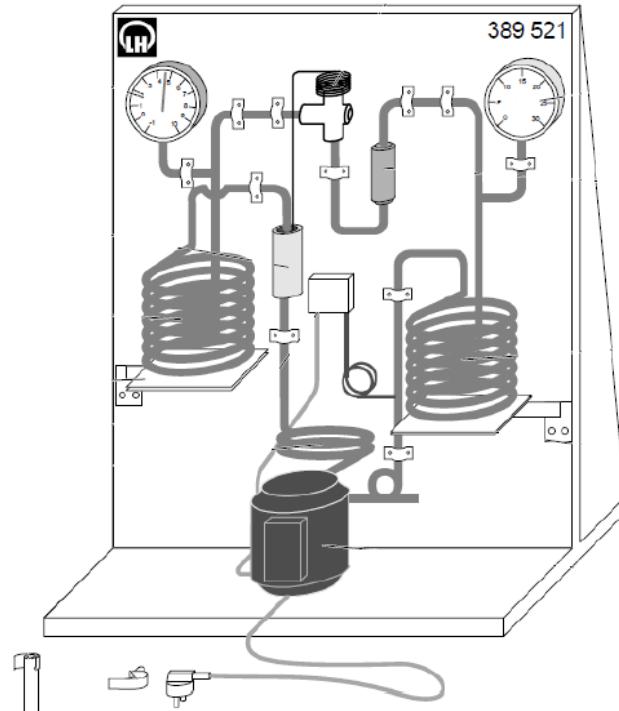


Abb. 7: Versuchsaufbau bestehend aus einem Kompressor, Mano- bzw. Thermotern und Peripherie

4 Geräteliste

Folgende Geräte wurden im Aufbau verwendet:

Tab. 1: Geräteliste

Abk.	Gerät	Type	Inventar Nr.
S	Solarzellenmodul	—	—
L	Lampe	—	—
W	verstellbarer Widerstand	0...1 kΩ	—
M	2xMultimeter	Fluke 175	—
Q	Quellenmessgerät	Keithley 2450	—
P	Strahlungsleistungsmessgerät	—	—
W	Wärmepumpe mit Messperipherie	LD Didactics	—
SO	Sonnensimulator	—	—

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Solarzellen in Serienschaltung

Bei der Serienschaltung werden je ein Plus- und ein Minuspol der beiden Solarzellen miteinander verbunden. Die beiden verbleibenden Kontakte bilden den Plus- bzw. Minuspol der Serienschaltung.

Es werden insgesamt rund 20 Messpunkte mit Strom- und Spannungswert aufgenommen, wobei darauf geachtet wird in der Nähe des MPP mehrere Messpunkte aufzunehmen, um diesen möglichst genau zu erwischen. Den MPP kann man daran erkennen, dass es plötzlich gleichzeitig zu schnellen Änderungen der Spannung und des Stroms kommt, wenn der Widerstandswert verändert wird.

Tab. 2: Messwerte bei der Serienschaltung

U ...Lastspannung, Unsicherheit $\Delta U = \pm(0,15\% + 2LSB)$ [7]

I ...Laststrom, Unsicherheit $\Delta I = \pm(1\% + 3LSB)$

I / mA	ΔI / mA	U / V	ΔU / V
0,00	0,03	12,34	0,04
11,1	0,1	12,20	0,04
19,6	0,2	11,99	0,04
30,0	0,3	11,76	0,04
38,9	0,4	11,53	0,04
50,5	0,5	11,13	0,04
53,9	0,6	10,80	0,04
55,4	0,6	10,62	0,04
56,2	0,6	10,54	0,04
56,7	0,6	10,29	0,04
57,1	0,6	10,09	0,04
57,7	0,6	9,56	0,03
57,9	0,6	9,05	0,03
58,0	0,6	8,01	0,03
58,7	0,6	6,19	0,03
60,3	0,6	3,96	0,03
62,6	0,7	2,10	0,02
66,1	0,7	0,15	0,02

In der obersten Zeile steht die Leerlaufspannung und in der untersten Zeile der Kurzschlusstrom.

5.2 Solarzellen in Parallelschaltung

Bei der Parallelschaltung werden je Plus- und Pluspol bzw. Minus- und Minuspol der beiden Solarzellen miteinander verbunden. Der Pluspol der Parallelschaltung kann dann bei einem der beiden Pluspole abgegriffen werden und der Minuspol bei einem der beiden Minuspole.

Es werden wieder insgesamt rund 20 Messpunkte mit Strom- und Spannungswert aufgenommen, wobei darauf geachtet wird in der Nähe des MPP mehrere Messpunkte aufzunehmen, um diesen möglichst genau zu erwischen.

Tab. 3: Messwerte bei der Parallelschaltung

U ...Lastspannung, Unsicherheit $\Delta U = \pm(0,15\% + 2LSB)$ [7]

I ...Laststrom, Unsicherheit $\Delta I = \pm(1\% + 3LSB)$

I / mA	ΔI / mA	U / V	ΔU / V
0,00	0,03	5,91	0,03
10,1	0,1	5,84	0,03
20,0	0,2	5,80	0,03
30,0	0,3	5,75	0,03
40,5	0,4	5,69	0,03
60,2	0,6	5,59	0,03
75,3	0,8	5,51	0,03
90,2	0,9	5,42	0,03
100,0	1,0	5,34	0,03
106,4	1,1	5,29	0,03
109,7	1,1	5,26	0,03
114,9	1,2	5,19	0,03
119,9	1,2	5,07	0,03
123,5	1,3	4,84	0,03
124,6	1,3	4,70	0,03
124,8	1,3	3,96	0,03
125,6	1,3	3,03	0,02
125,7	1,3	1,98	0,02
126,4	1,3	1,04	0,02
128,0	1,3	0,24	0,02

In der obersten Zeile steht die Leerlaufspannung und in der untersten Zeile der Kurzschlusstrom.

5.3 Solarzellen in Serienschaltung (eine Solarzelle beschattet)

Bei der Serienschaltung werden je ein Plus- und ein Minuspol der beiden Solarzellen miteinander verbunden. Die beiden verbleibenden Kontakte bilden den Plus- bzw. Minuspol der Serienschaltung. Zusätzlich wird nun eine der beiden Zellen mit einem Blatt beschattet.

Es werden insgesamt wieder rund 20 Messpunkte mit Strom- und Spannungswert aufgenommen. Um hier den MPP finden zu können, wird ein anderer Lastwiderstand verwendet, der sich über mehrere Größenordnungen verteilt einstellen lässt.

Tab. 4: Messwerte bei der Serienschaltung mit einer verschatteten Solarzelle
 U ...Lastspannung, Unsicherheit $\Delta U = \pm(0,15\% + 2LSB)$ [7]
 I ...Laststrom, Unsicherheit $\Delta I = \pm(1\% + 3LSB)$

I / mA	ΔI / mA	U / V	ΔU / V
0,00	0,03	10,30	0,04
0,12	0,03	10,29	0,04
0,21	0,03	10,28	0,04
0,51	0,04	10,23	0,04
1,01	0,04	10,13	0,04
1,43	0,04	10,03	0,04
1,97	0,05	9,84	0,03
2,19	0,05	9,63	0,03
2,21	0,05	9,52	0,03
2,24	0,05	9,43	0,03
2,26	0,05	9,24	0,03
2,27	0,05	9,29	0,03
2,30	0,05	9,19	0,03
2,26	0,05	9,05	0,03
2,37	0,05	8,06	0,03
2,54	0,06	7,62	0,03
2,51	0,06	7,03	0,03
2,69	0,06	5,95	0,03
3,20	0,06	4,15	0,03
3,73	0,07	3,00	0,02
4,14	0,07	1,67	0,02
4,36	0,07	0,01	0,02

In der obersten Zeile steht die Leerlaufspannung und in der untersten Zeile der Kurzschlusstrom.

5.4 Diodenparameter und Wirkungsgrad

Zu Beginn wird die Dunkelkennlinie der Solarzelle aufgenommen. Dazu wird die Solarzelle im dafür vorgesehenen Halter des Quellenmessgeräts platziert. Im Programm wird ein Spannungsbereich von -1 V bis 1 V und eine maximale Stromstärke von $0,4\text{ A}$ gewählt. Die Strombegrenzung dient zum Vermeiden des Betriebs der Solarzelle bei zu hohen Sperrströmen. Dies kann zu Stromflüssen im Ampere-Bereich führen, die in weiterer Folge Hitzeentwicklung verursachen und die Diode zerstören. Um die Kennlinie in den 4 Quadranten aufnehmen zu können wird unter 'Sensing Mode' die Einstellung '4-wire' ausgewählt und die entsprechenden Messgrößen im Diagramm eingestellt.

Für die Aufnahme der $U(I)$ -Kennlinie der mit Licht bestrahlten Solarzelle wird der Sonnensimulator eingeschaltet und mit dem Leistungsmessgerät und dem Durchmesser des Sensors die Strahlungstärke bestimmt. Danach erfolgt die Aufnahme gleich wie bei der Dunkel-Kennlinie.

Die Kennlinie wird für eine Lichtintensität von 400 W m^{-2} bzw. 1000 W m^{-2} aufgenommen. Der Durchmesser des Leistungsmessgeräts beträgt $(17,1 \pm 0,1)\text{ mm}$ und die Seitenlängen der Solarzelle betragen $(16,8 \pm 0,1)\text{ mm}$ bzw. $(38,8 \pm 0,1)\text{ mm}$.

Um die oben angegebenen Lichtintensitäten zu erhalten wird nach Formel 8 eine Lichtleistung von $(92 \pm 1)\text{ mW}$ bzw. $(231 \pm 3)\text{ mW}$ eingestellt.

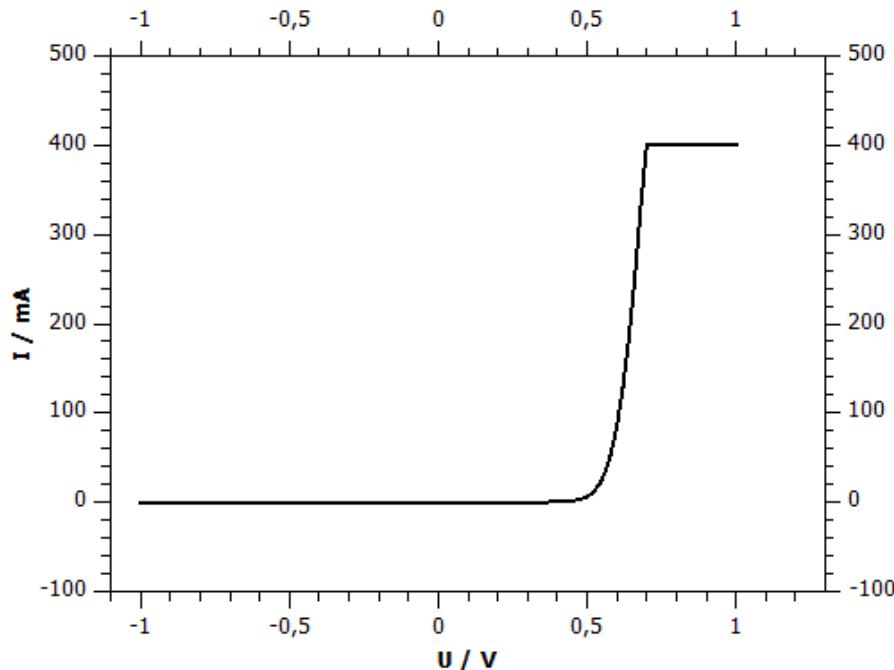


Abb. 8: Stromstärke I über der Spannung U an der Diode ohne Lichtquelle
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

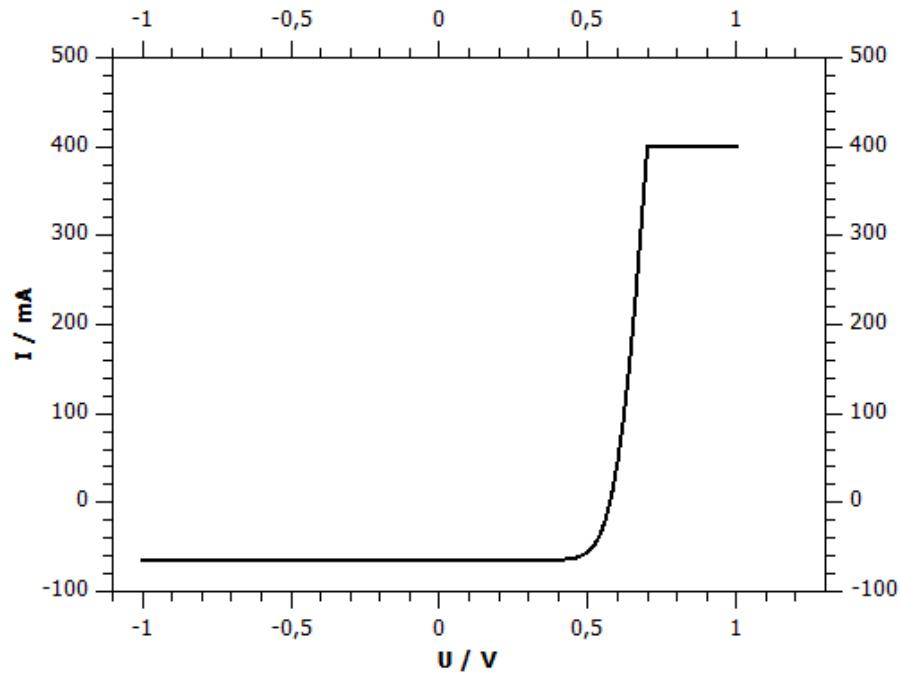


Abb. 9: Stromstärke I über der Spannung U an der Diode mit einer Leistung von 400 mW bei der Lichtquelle
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

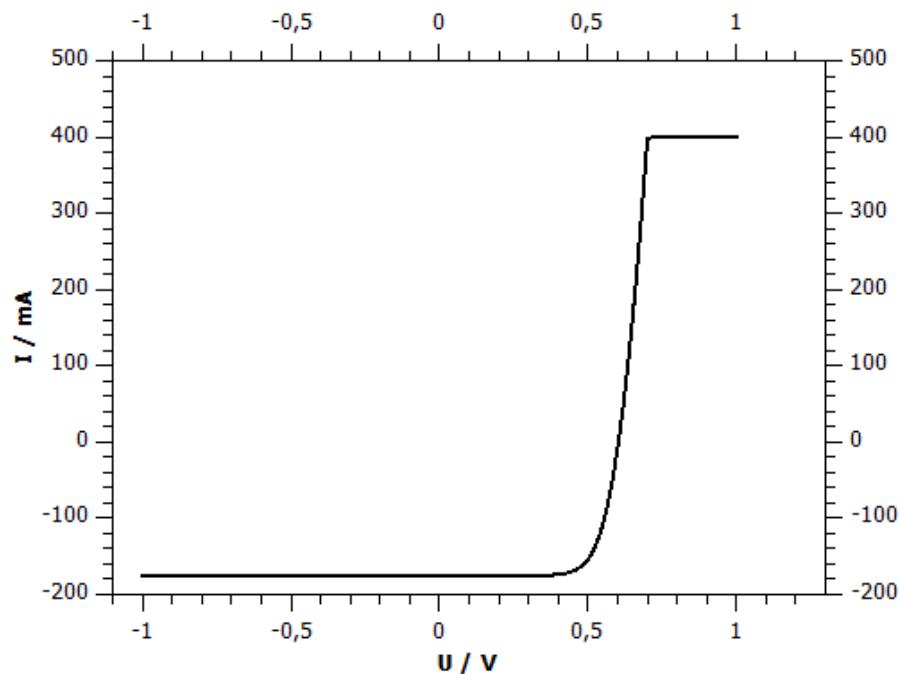


Abb. 10: Stromstärke I über der Spannung U an der Diode mit einer Leistung von 1000 mW bei der Lichtquelle
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

5.5 Wärmepumpe

Als Reservoirs werden zwei Behälter mit jeweils $(4,00 \pm 0,05)\text{l}$ Wasser gefüllt. Diese werden so platziert, dass die spiralförmige Kupferleitung vollständig von Wasser bedeckt ist. In Cassylab2 wird die Aufzeichnung der Temperaturen beider Reservoirs ausgewählt, ein Zeit-Intervall von 1 s eingestellt und die Messung sowie der Kompressor gestartet. Mithilfe der Manometer werden die Drücke beim kalten sowie beim warmen Reservoir gleich zu Beginn für die Erstellung des p(H)-Diagramms bestimmt. Die Messdauer beträgt 80 min. Während der Messung müssen beide Gefäße gleichmäßig durchmischt werden. In den beiden Temperatur-Diagrammen ist während der Messung ein konvergierender Verlauf zu erkennen.

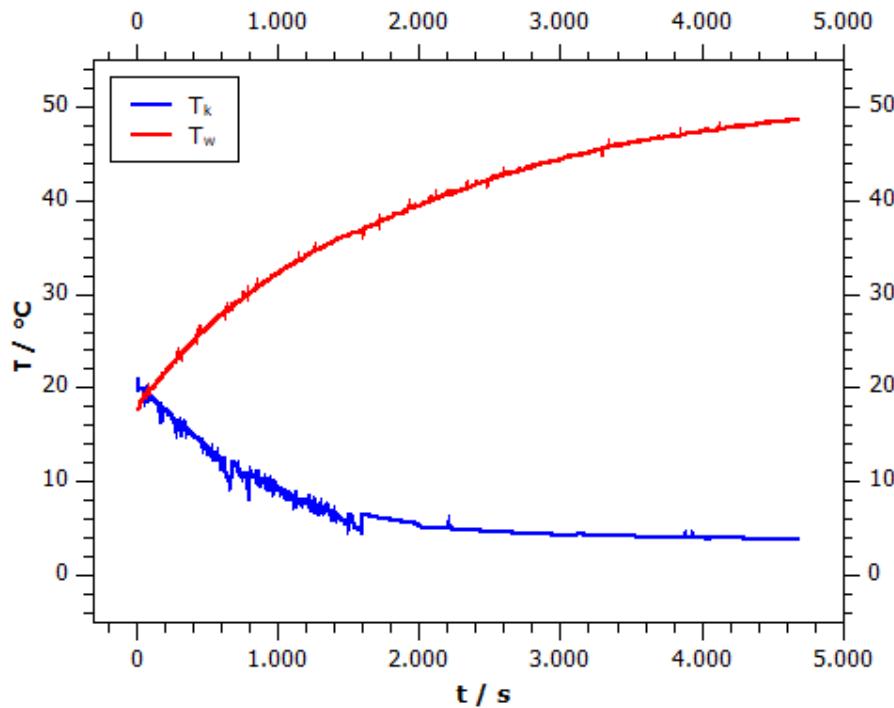


Abb. 11: Temperatur des kalten Reservoirs T_k und des warmen Reservoirs T_w über der Zeit t
 $\Delta t = 1 \text{ min}, \Delta T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Für die Drücke und Temperaturen zu Beginn und am Ende der Messung ergeben sich folgende Werte.

Tab. 5: Messwerte Wärmepumpe

p_k ...Druck im kalten Reservoir, $\Delta p_k = 0,1 \text{ bar}$

p_w ...Druck im warmen Reservoir, $\Delta p_w = 0,1 \text{ bar}$

T_k ...Temperatur im kalten Reservoir, $\Delta T_k = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

T_w ...Temperatur im warmen Reservoir, $\Delta T_w = 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$

Nr.	t / min	p_k / bar	p_w / bar	$T_k / \text{ }^\circ\text{C}$	$T_w / \text{ }^\circ\text{C}$
1	3	3,8	5,8	19,2	19,3
2	80	1,8	15,3	4,0	48,3

6 Auswertung

Die Unsicherheiten für die Leistung und den Füllfaktor werden mittels der Größtunsicherheitsmethode berechnet. Somit ergibt sich die Unsicherheit der Leistung ΔP :

$$\Delta P = \Delta U \cdot I + U \cdot \Delta I \quad (12)$$

und die Unsicherheit des Füllfaktors ΔFF

$$\Delta FF = \frac{\Delta P_{MPP}}{U_L I_K} + \frac{P_{MPP} \Delta U_L}{U_L^2 I_K} + \frac{P_{MPP} \Delta I_K}{U_L I_K^2} \quad (13)$$

6.1 Solarzellen in Serienschaltung

Mit Hilfe der Daten aus Abschnitt 5.1 lassen sich nun das $I(U)$ - und $P(U)$ -Diagramm erstellen. Die Unsicherheiten der Leistungen ergeben sich mittels Formel (12).

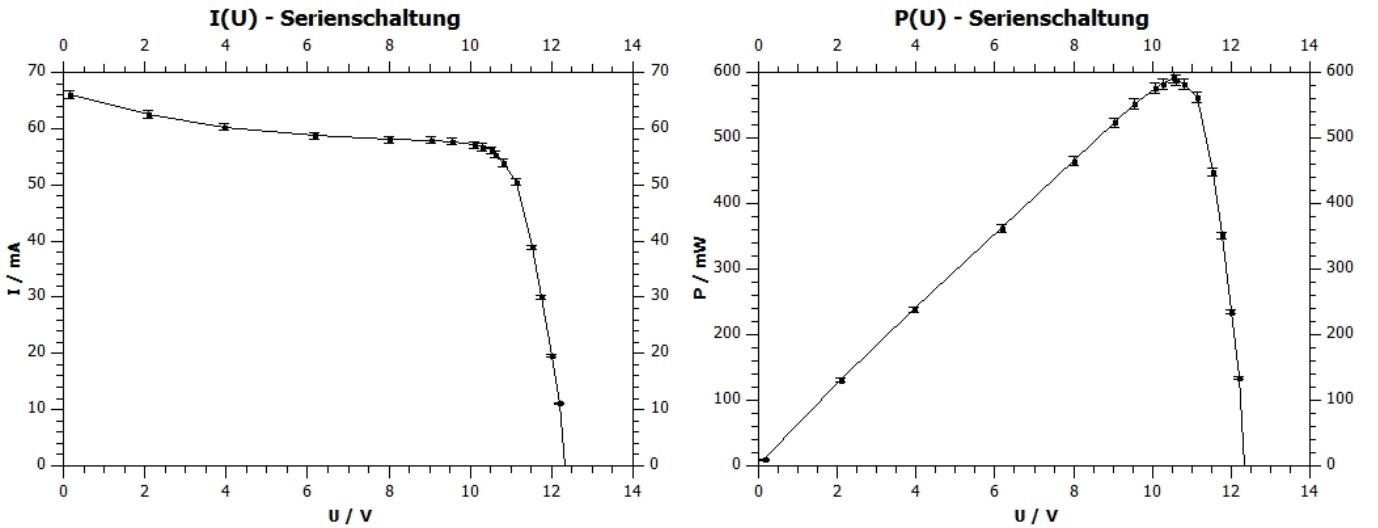


Abb. 12: $I(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Serienschaltung **Abb. 13:** $P(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Serienschaltung

Aus den berechneten Leistungen lässt sich nun der MPP finden, dieser befindet sich am Punkt maximaler Leistung P_{MPP} und zusätzlich lässt sich aus der Tabelle die zugehörige Spannung U_{MPP} und der zugehörige Strom I_{MPP} ablesen. Zusätzlich lässt sich nun auch der Füllfaktor FF mit der Unsicherheit (13) berechnen. Die Größen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Tab. 6: Auswertung der Serienschaltung

U_L ...Leerlaufspannung, Unsicherheit $\Delta U_L = 0,04$ V

I_K ...Kurzschlussstrom, Unsicherheit $\Delta I_K = 0,7$ mA

U_{MPP} ...Spannung im MPP, Unsicherheit $\Delta U_{MPP} = 0,04$ V

I_{MPP} ...Strom im MPP, Unsicherheit $\Delta I_{MPP} = 0,6$ mA

P_{MPP} ...Leistung im MPP, Unsicherheit $\Delta P_{MPP} = 8$ mW

FF ...Füllfaktor, Unsicherheit $\Delta FF = 0,020$

U_L / V	I_K / mA	U_{MPP} / V	I_{MPP} / mA	P_{MPP} / mW	FF / a.u.
12,34	66,1	10,54	56,2	592	0,726

6.2 Solarzellen in Parallelschaltung

Mit Hilfe der Daten aus Abschnitt 5.2 lassen sich nun das $I(U)$ - und $P(U)$ -Diagramm erstellen.

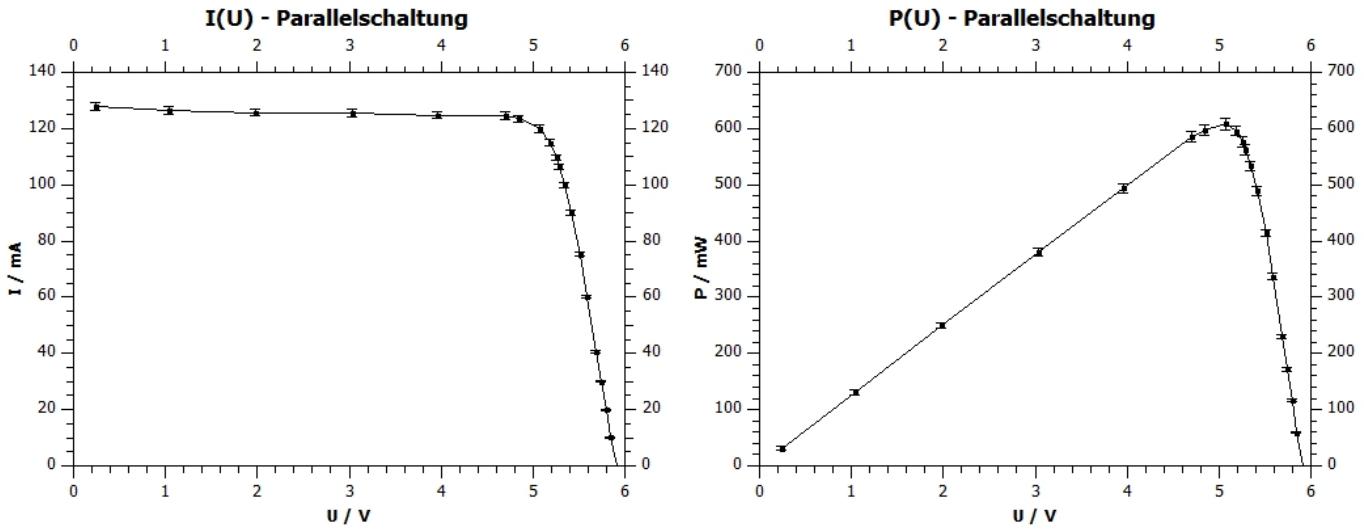


Abb. 14: $I(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Parallelschaltung **Abb. 15:** $P(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Parallelschaltung

Analog zu Abschnitt 6.1 lassen sich wieder die entsprechenden Größen für den MPP sowie der Füllfaktor finden. Die Größen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Tab. 7: Auwertung der Parallelschaltung

U_L ...Leerlaufspannung, Unsicherheit $\Delta U_L = 0,04 \text{ V}$

I_K ...Kurzschlussstrom, Unsicherheit $\Delta I_K = 1,3 \text{ mA}$

U_{MPP} ...Spannung im MPP, Unsicherheit $\Delta U_{MPP} = 0,04 \text{ V}$

I_{MPP} ...Strom im MPP, Unsicherheit $\Delta I_{MPP} = 1,2 \text{ mA}$

P_{MPP} ...Leistung im MPP, Unsicherheit $\Delta P_{MPP} = 10 \text{ mW}$

FF ...Füllfaktor, Unsicherheit $\Delta FF = 0,025$

U_L / V	I_K / mA	U_{MPP} / V	I_{MPP} / mA	P_{MPP} / mW	$FF / \text{a.u.}$
5,91	128,0	5,07	119,9	608	0,804

6.3 Solarzellen in Serienschaltung (eine Solarzelle beschattet)

Mit Hilfe der Daten aus Abschnitt 5.3 lassen sich nun das $I(U)$ - und $P(U)$ -Diagramm erstellen.

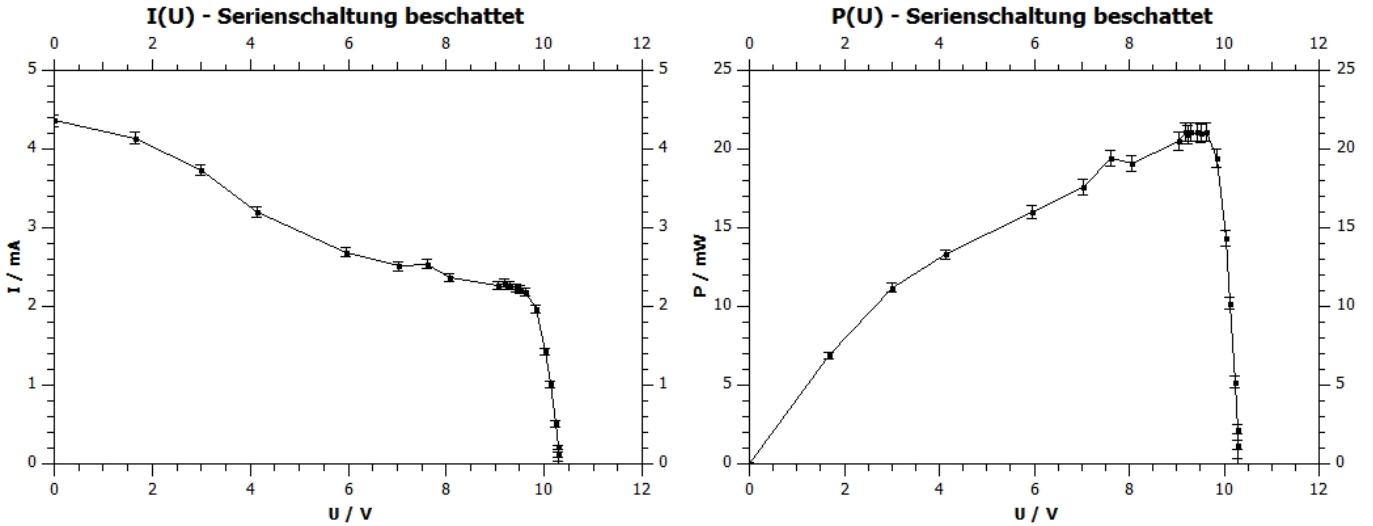


Abb. 16: $I(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Serienschaltung mit einer beschatteten Zelle

Abb. 17: $P(U)$ -Diagramm bei Solarzellen in Serienschaltung mit einer beschatteten Zelle

Analog zu Abschnitt 6.1 lassen sich wieder die entsprechenden Größen für den MPP sowie der Füllfaktor finden. Die Größen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Tab. 8: Auswertung der verschatteten Serienschaltung

U_L ...Leerlaufspannung, Unsicherheit $\Delta U_L = 0,04 \text{ V}$

I_K ...Kurzschlussstrom, Unsicherheit $\Delta I_K = 0,07 \text{ mA}$

U_{MPP} ...Spannung im MPP, Unsicherheit $\Delta U_{MPP} = 0,03 \text{ V}$

I_{MPP} ...Strom im MPP, Unsicherheit $\Delta I_{MPP} = 0,05 \text{ mA}$

P_{MPP} ...Leistung im MPP, Unsicherheit $\Delta P_{MPP} = 0,6 \text{ mW}$

FF ...Füllfaktor, Unsicherheit $\Delta FF = 0,022$

U_L / V	I_K / mA	U_{MPP} / V	I_{MPP} / mA	P_{MPP} / mW	$FF / \text{a.u.}$
10,30	4,36	9,29	2,27	21,1	0,470

6.4 Diodenparameter und Wirkungsgrad

Um die Parameter für das 1- bzw. 2-Diodenmodell der Diode zu bestimmen werden zu Beginn aus Formel 5 und 6 die parasitären Widerstände für die bestrahlte Diode bestimmt. Dazu wird eine lineare Approximation durchgeführt. Für den linearen Fit des parasitären Parallelwiderstands wird ein Bereich von $-0,2 \text{ V}$ bis $0,2 \text{ V}$ bei beiden Lichtleistungen gewählt. Für den Fit des parasitären Serienwiderstands bei der Intensität von 400 W m^{-2} wird ein Bereich von $0,52 \text{ V}$ bis $0,56 \text{ V}$ und bei der Intensität von 1000 W m^{-2} ein Bereich von $0,58 \text{ V}$ bis $0,62 \text{ V}$ gewählt. Es ergeben sich folgende Steigungen und parasitäre Widerstände

Dabei ergeben sich die Widerstände aus den Kehrwerten der Steigungen.

$$\Delta R = \frac{1}{c^2} \cdot \Delta c \quad (14)$$

Tab. 9: Fit-Parameter und parasitäre Widerstände 400 Wm^{-2} k_P ...Steigung bei $U = 0 \text{ V}$ k_S ...Steigung bei $I = 0 \text{ A}$ R_P ...parasitärer Parallelwiderstand R_S ...parasitärer Serienwiderstand

k_P / mAU^{-1}	$\Delta k_P / \text{mAU}^{-1}$	k_S / mAU^{-1}	$\Delta k_S / \text{mAU}^{-1}$	R_P / Ω	$\Delta R_P / \Omega$	R_S / Ω	$\Delta R_S / \Omega$
0,096	0,016	1630	170	10400	1700	0,61	0,06

Tab. 10: Fit-Parameter und parasitäre Widerstände 1000 Wm^{-2} k_P ...Steigung bei $U = 0 \text{ V}$ k_S ...Steigung bei $I = 0 \text{ A}$ R_P ...parasitärer Parallelwiderstand R_S ...parasitärer Serienwiderstand

k_P / mAU^{-1}	$\Delta k_P / \text{mAU}^{-1}$	k_S / mAU^{-1}	$\Delta k_S / \text{mAU}^{-1}$	R_P / Ω	$\Delta R_P / \Omega$	R_S / Ω	$\Delta R_S / \Omega$
0,13	0,04	2670	140	7692	2400	0,375	0,020

Für die Dunkelkennlinie der Diode ist der Photostrom $I_{ph} = 0 \text{ A}$.

Bei der Lichtleistung von 400 Wm^{-2} bzw. 1000 Wm^{-2} wird ein konstanter Fit im Bereich von -1 V bis 0 V durchgeführt. Es ergeben sich folgende Werte für den Photostrom

Tab. 11: Photostrom I_0 ...Lichtintensität I_{ph} ...Betrag des Photostroms

Nr.	I_0 / Wm^{-2}	I_{ph} / mA	$\Delta I_{ph} / \text{mA}$
1	400	65,2764	0,0020
2	1000	175,515	0,003

In Formel 3 bzw. 4 gibt der letzte Summand die Stromstärke aufgrund der parasitären Widerstände I_{par} an.

$$\Delta I_{par} = \frac{1}{R_p} \cdot \Delta U + \frac{R_S}{R_P} \cdot \Delta I + \frac{I}{R_P} \cdot \Delta R_S + \frac{U - IR_S}{R_P^2} \cdot \Delta R_P \quad (15)$$

Dabei ergibt sich für alle Intensitäten ein maximaler Wert von

$$I_{par} = (0,11 \pm 0,02) \text{ mA}$$

Dieser ist im Vergleich zu den restlichen Stromanteilen gering und kann deshalb beim Fit des Sättigungstroms und der Konstanten f_1 vernachlässigt werden. Somit ergibt sich für die approximierende Funktion vom 1- bzw. 2-Diodenmodell

$$I = I_{S1}(e^{\frac{eU}{f_1 k_B T}} - 1) - I_{ph} \quad (16)$$

$$I = I_{S1}(e^{\frac{eU}{f_1 k_B T}} - 1) + I_{S2}(e^{\frac{eU}{f_2 k_B T}} - 1) - I_{ph} \quad (17)$$

Mit den Parametern f_1 , f_2 , I_{S1} und I_{S2} wird ein nicht-linearer Fit für die Diodenkennlinie erstellt.

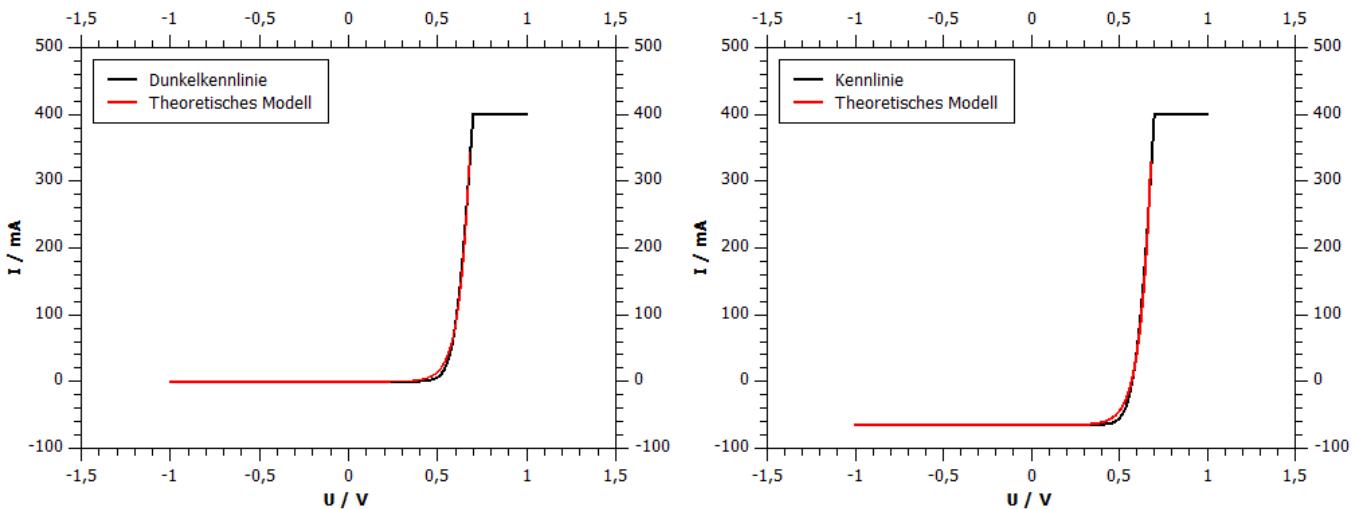


Abb. 18: 1-Dioden-Modell dunkel,
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

Abb. 19: 1-Dioden-Modell $I_0 = 400 \text{ Wm}^{-2}$,
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

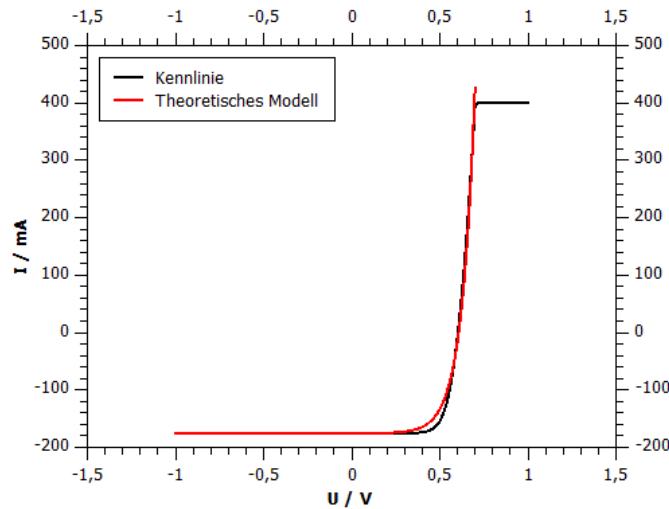


Abb. 20: 1-Dioden-Modell $I_0 = 1000 \text{ Wm}^{-2}$,
 $\Delta I = 0,012\%$, $\Delta U = 0,012\%$

Der Fit mit dem 2-Dioden-Modell stellt in allen 3 Fällen keine merkbare Verbesserung gegenüber dem 1-Dioden-Modell dar.

Tab. 12: Fit-Parameter 1-Dioden-Modell

I_{S1} ...Sättigungsstrom
 f_1 ...Diodenparameter

Nr.	$I_{S1} / \mu\text{A}$	$\Delta I_{S1} / \mu\text{A}$	$f_1 / 1$	$\Delta f_1 / 1$
1	2,3	0,4	2,24	0,03
2	6,0	1,0	2,40	0,04
3	55	8	2,95	0,04

Im weiteren Verlauf wird im Punkt der maximalen Leistung der Wirkungsgrad der Solarzelle bestimmt. Dazu wird die Leistung der Diode P über der Spannung aufgetragen. Es wird der Bereich ausgewählt, in dem die Leistung an der Diode negativ ist, da die Diode dort Leistung abgibt.

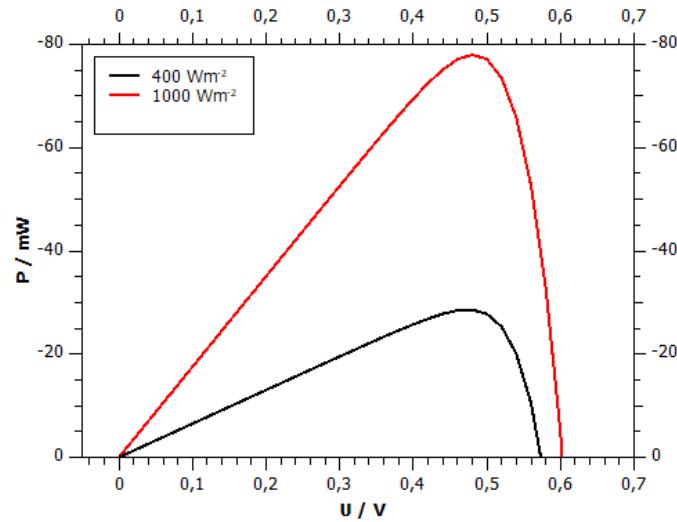


Abb. 21: Leistung $I_0 = 1000 \text{ Wm}^{-2}$,
 $\Delta U = 0,012\%$, $\Delta P = 0,024\%$

Der Wirkungsgrad wird nach Formel 7, 9 und 8 ausgerechnet.

$$\eta = \frac{\pi d^2}{4ab} \cdot \frac{P_{MPP}}{P_0} \quad (18)$$

$$\Delta\eta = \frac{\pi d^2}{4ab} \left(\frac{1}{P_0} \cdot \Delta P_{MPP} + \frac{P_{MPP}}{P_0^2} \cdot \Delta P_0 \right) + \frac{P_{MPP}}{P_0} \left(\frac{\pi d^2}{4a^2b} \cdot \Delta a + \frac{\pi d^2}{4ab^2} \cdot \Delta b + \frac{\pi d}{2ab} \cdot \Delta d \right) \quad (19)$$

Tab. 13: Wirkungsgrad der Solarzelle

P_0 ...Lichtleistung, $\Delta P_0 = 1 \text{ mW}$

P_{MPP} ...Betrag der elektrischen Leistung im MPP, $\Delta P_{MPP} = 0,024\%$

η ...Wirkungsgrad, $\Delta\eta = 0,004$

Nr.	I_0 / Wm^{-2}	P_0 / mW	P_{MPP} / mW	$\eta / 1$
1	400	92	28,60	0,122
2	1000	231	78,00	0,133

6.5 Wärmepumpe

Um das Rauschen der Temperaturen zu minimieren, wird sowohl T_k als auch T_w jeweils über 2 min gemittelt. Danach wird mithilfe des Differenzenquotienten die Ableitung von T_w approximiert und nach Formel 7 die Leistungszahl berechnet.

$$\Delta\epsilon = \frac{c\varrho \frac{dT_w}{dt}}{P_0} \cdot \Delta V + \frac{c\varrho V}{P_0} \cdot \Delta \frac{dT_w}{dt} + \frac{c\varrho V \frac{dT_w}{dt}}{P_0^2} \cdot \Delta P_0 \quad (20)$$

Dieser wird über der Temperaturdifferenz $T_w - T_k$ in einem Diagramm dargestellt.

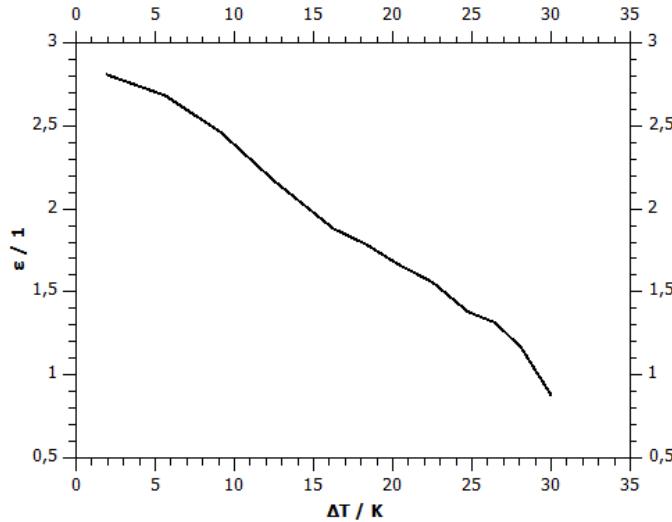


Abb. 22: Leistungszahl ϵ über der Temperaturdifferenz zwischen warmem und kalten Reservoir ΔT ,
 $\delta\Delta T = 0,2^\circ\text{C}$

Mit Formel 11 lässt sich die Güte des Prozesses über der Temperaturdifferenz darstellen. In der nachfolgenden Formel ist die zugehörige Unsicherheit gegeben.

$$\Delta\eta = \left(1 - \frac{T_k}{T_w}\right) \cdot \Delta\epsilon + \epsilon \frac{1}{T_w} \cdot \Delta T_k + \epsilon \frac{T_k}{T_w^2} \cdot \Delta T_w \quad (21)$$

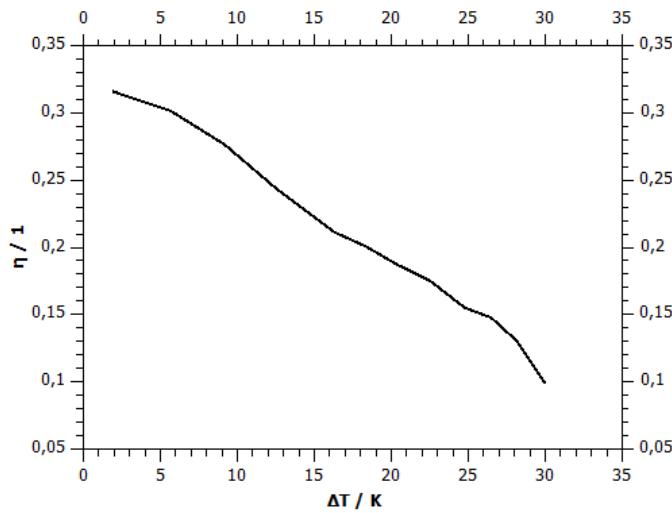


Abb. 23: Güte η über der Temperaturdifferenz zwischen warmem und kalten Reservoir ΔT ,
 $\delta\Delta T = 0,2^\circ\text{C}$

6.5.1 Das p-H-Diagramm der Wärmepumpe

Durch Verwendung des im Anhang gegebenen p-H-Diagramms für das verwendete Kältemittel R134a lässt sich das p-H-Diagramm für den verwendeten Kreisprozess erstellen. Dies erfolgt durch Verwendung der Werte p_h , p_k , T_h und T_k am Ende der Messreihe, wenn die Werte beinahe stationär sind.

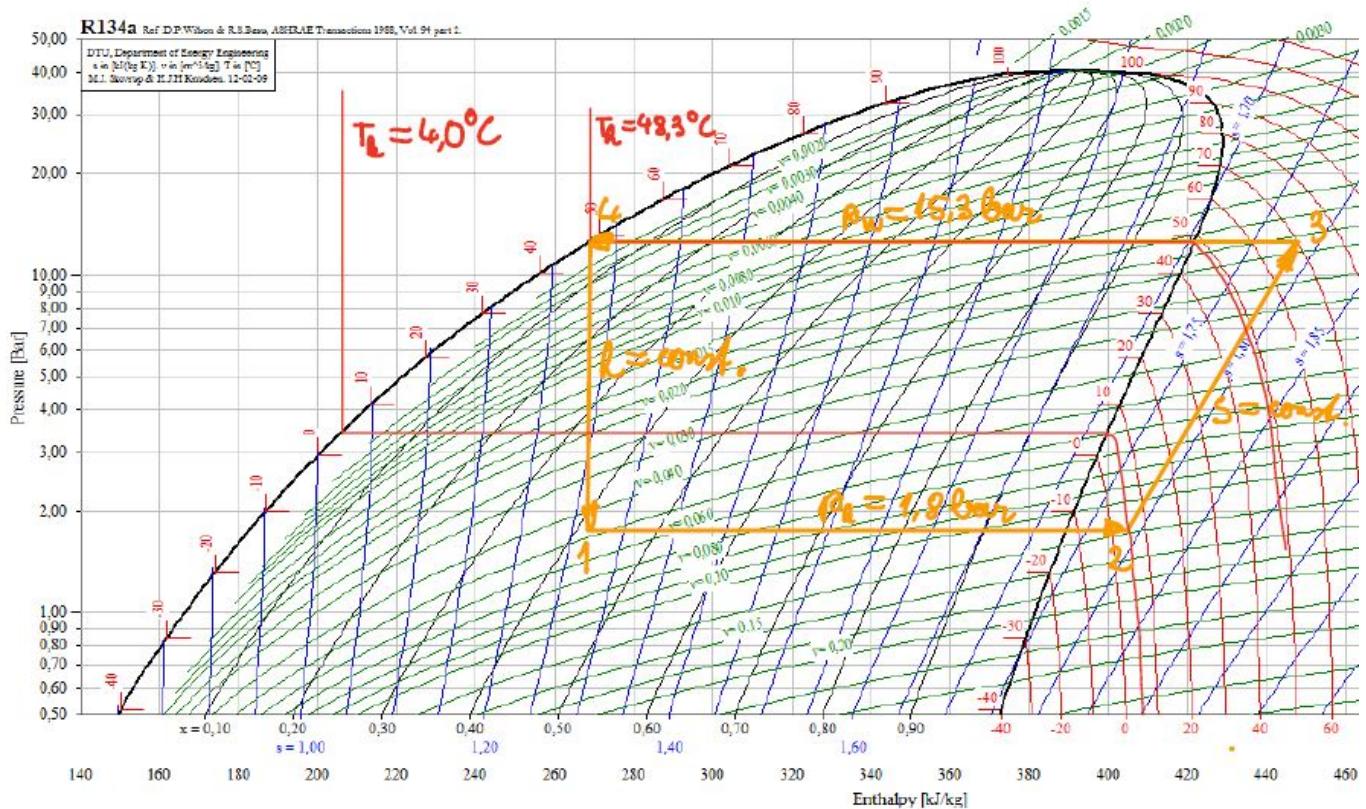


Abb. 24: Das p-H-Diagramm des verwendeten Kreisprozesses am Ende der Messreihe. In rot wurden die Isothermen, die den Temperaturen der beiden Wäremreservoirs entsprechen eingezeichnet und in orange wurde der Kreisprozess selbst eingezeichnet. Der Kreisprozess setzt sich idealisiert zusammen aus einer isobaren Erwärmung $1 \rightarrow 2$, einer adiabatischen Kompression $2 \rightarrow 3$, einer isobaren Abkühlung $3 \rightarrow 4$ und einer isenthalpen Entspannung $4 \rightarrow 1$

7 Diskussion

7.1 Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Beim Vergleich der Serienschaltung $P_{MPP} = (592 \pm 8) \text{ mW}$ und der Parallelschaltung $P_{MPP} = (608 \pm 10) \text{ mW}$ lässt sich erkennen, dass die Parallelschaltung nur wenig mehr Leistung liefert im Vergleich zur Serienschaltung.

Dies scheint vor allem daran gelegen zu haben, dass sich der Abstand zur Lampe zwischen den Messungen etwas verändert hat. Eigentlich wäre zu erwarten, dass die Parallelschaltung schon etwas deutlicher mehr Leistung als die Serienschaltung liefert, da es bei der Serienschaltung aufgrund der beiden verschiedenen in Serie geschalteten Innenwiderstände eigentlich zu größeren Verlusten als bei der Parallelschaltung kommen sollte. Dies liegt daran, dass bei der Parallelschaltung die Spannung der beiden Module angeglichen wird, während die Ströme der beiden Module sich addieren. Meist gibt es weniger Unterschied zwischen den Spannungen der Module als zwischen den Strömen der Module und daher weist die Parallelschaltung geringere interne Verluste auf.

Bei der Messung der Serienschaltung mit der abgeschatteten Solarzelle ergibt sich wie fatal es ist eine Zelle in einer Serienschaltung zu haben, die teils oder ganz beschattet ist oder aus sonstigen Gründen nicht die volle Leistung liefert. Denn es lässt sich erkennen, dass beim Verbraucher bei einer Serienschaltung weit weniger als die Hälfte der Leistung ankommt als bei den vorherigen Messungen zur Serien- und Parallelschaltung. Folglich geht durch die Beschattung einer Zelle nicht nur die Leistung dieser einen Zelle für den Verbraucher verloren, sondern auch der Großteil der Leistung des zweiten intakten Moduls. Aus diesem Grund gibt es bei Solaranlagen technische Vorkehrungen, sodass etwa Zellen in einer Serienschaltung kurzgeschlossen werden können, falls deren Leistung eingebrochen ist, um somit nicht die Leistung der gesamten Serienschaltung zum Einbruch zu bringen.

Bei der Serienschaltung mit der abgeschatteten Solarzelle, musste man außerdem aufgrund des höheren Innerwiderstandes einen stärkeren Lastwiderstand verwenden, um den MPP überhaupt detektieren zu können.

Die gemessenen Füllfaktoren liegen eher im unteren Bereich des Literaturwerts von 0,75 bis 0,85 für kristalline Solarzellen [8]. Dies lässt sich vermutlich darauf zurückführen, dass der ausgelegte Wirkungsbereich der Solarzellen bei stärkeren Einstrahlungen liegt als die von der Laborlampe bereitgestellte Einstrahlung.

7.2 Diodenparameter und Diodenkennlinie

Die aufgenommenen Kennlinien decken sich mit dem theoretischen 1-Dioden Modell. Da die hier verwendete Solarzelle eine relativ geringe Absorptionsfläche hat, treten auch weniger stark Inhomogenitäten im Material bzw. auf der Oberfläche der Solarzelle auf. Deshalb erzielt die Verwendung des 2-Dioden Modells keine bessere Approximation.

In den I(U)-Diagrammen steigt der Strom ab einer Grenze von 400 mA nicht weiter an. Dies geschieht nicht aufgrund von elektrischen Eigenschaften der Solarzelle. In diesem Bereich wirkt die Strombegrenzung der Versorgung.

Betrachtet man die an der Diode umgesetzte elektrische Leistung, so sollte diese nach Formel 7 bei annähernd konstantem Wirkungsgrad bei größerer einfallender Lichtleistung ansteigen. Dieser Zusammenhang lässt sich in Abbildung 21 erkennen.

Zur Bestimmung des Photostroms müsste eigentlich der Sperrstrom abgezogen werden. Dieser ist allerdings so gering, dass er nicht in das Messergebnis einfließt.

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle hängt vom verwendeten Material und dessen Struktur ab. Monokristalline Solarzellen erreichen einen Wirkungsgrad von 20 bis 22 % und polykristallin eine zwischen 15 und 20 % [9]. Die im Versuch verwendete Solarzelle erreicht einen Wirkungsgrad von $(12,2 \pm 0,4)\%$ bzw. $(13,3 \pm 0,4)\%$. Dieser liegt nicht im Bereich der oben angeführten Werte. Die verwendete Solarzelle wird oft bewegt, wodurch es zu Verunreinigungen bzw. Beschädigungen der Oberfläche kommen kann. Verändert sich die Oberfläche, so wird das Licht schlechter absorbiert und der Wirkungsgrad sinkt.

7.3 Wärmepumpe

Die Temperatur-Verläufe stimmen im Rahmen der Unsicherheit mit der Theorie [6] überein. Der Temperatur-Verlauf des kalten Reservoirs weist im Vergleich zum warmen Reservoir ein hohes Rauschen auf. Diese beträgt bis zu 1°C . Da Wasser eine Wärmekapazität von $4,19 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ hat, müsste eine Energie von $(33,5 \pm 3,4) \text{ kJ}$ zugeführt. Dies kann weder durch Unregelmäßigkeiten noch durch äußere Einflüsse verursacht werden. Dies weist auf einen Defekt beim Sensor oder beim Expansionsventil hin.

Die Temperatur des kalten Reservoirs am Ende des Experiments beträgt $(4,0 \pm 0,1) ^{\circ}\text{C}$. Allerdings hat das Kühlmittel eine wesentlich tiefere Temperatur, wodurch Eis im kalten Reservoir entsteht. Da der Wärmeleitkoeffizient zwischen Wasser und Eis bzw. Kupfer und Eis wesentlich geringer ist als zwischen Kupfer und Wasser, wirkt die Eissicht als Isolation.

Der Verlauf des Wirkungsgrades stimmt nicht mit der Theorie [6] überein. Dies kann auf die starken Sprünge im kalten Reservoir zurückgeführt werden.

8 Zusammenfassung

8.1 Kennlinie und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Für die Messung der Serienschaltung von Solarzellen finden sich in Tabelle 6 die wichtigsten Ergebnisse und für die Messung der Parallelschaltung in Tabelle 7.

Bei der Messung der Serienschaltung mit einer beschatteten Solarzelle ergab sich, dass es im Rahmen solch einer Serienschaltung zu enormen Leistungseinbußen kommt und folglich sollte man Zellen, die Leistungseinbrüche haben überbrücken, um nicht enorme Leistungseinbußen am ganzen seriellen Strang zu haben. Die Ergebnisse zur beschatteten Serienschaltung finden sich in Tabelle 8.

8.2 Diodenkennlinie und Wirkungsgrad

Für die Messung der Solarzelle im Sonnensimulator ergaben sich folgende Messergebnisse.

$$\eta(I_0 = 400 \frac{W}{m^2}) = (0,122 \pm 0,004)$$

$$\eta(I_0 = 1000 \frac{W}{m^2}) = (0,133 \pm 0,004)$$

Bezüglich der Diodenkennlinie sei auf Abschnitt 6.4 verwiesen.

8.3 Wärmepumpe

Bei diesem Versuch wurde der Verlauf der Leistungszahl einer Wärmepumpe abhängig von der Temperaturdifferenz ermittelt, vergleiche Abbildung 22. Weiters wurde schematisch anhand der gemessenen Werte das p-H-Diagramm erstellt, vergleiche Abbildung 24.

Literatur

- [1] Aufgerufen am 04.05.2022, Seite 1. URL: https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1412738/mod_resource/content/1/Solarzelle-Bsp5.pdf.
- [2] Aufgerufen am 04.05.2022 Seite 7 und 8. URL: https://moodle.uni-graz.at/pluginfile.php/1412738/mod_resource/content/1/Solarzelle-Bsp5.pdf.
- [3] Aufgerufen am 04.05.2022, Seite 11 und 12. URL: <https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/ETP1/Photovoltaik.pdf>.
- [4] Aufgerufen am 04.05.2022, Abbildung 7.10. URL: <https://www.uni-kassel.de/eecs/fileadmin/datas/fb16/Fachgebiete/FSG/Download/Lehre/ETP1/Photovoltaik.pdf>.
- [5] Aufgerufen am 04.05.2022. URL: <https://moodle.uni-graz.at/mod/resource/view.php?id=1004289>.
- [6] Aufgerufen am 04.05.2022. URL: <https://moodle.uni-graz.at/mod/resource/view.php?id=1004290>.
- [7] Aufgerufen am 04.05.2022. URL: <https://www.fluke.com/de-de/produkt/elektrische-pruefungen/digitalmultimeter/fluke-175>.
- [8] Aufgerufen am 04.05.2021. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/F%C3%BCllfaktor_\(Solarzelle\)](https://de.wikipedia.org/wiki/F%C3%BCllfaktor_(Solarzelle)).
- [9] Aufgerufen am 04.05.2022. URL: <https://www.photovoltaik.org/wissen/photovoltaik-wirkungsgrad#:~:text=Die%20beiden%20wichtigsten%20Modultypen%20sind,15%20bis%2020%5C%20Prozent%20erreichen..>