



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR PHYSIK

23S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENPRAKTIKUM 2
678 Bachelorstudium Physik, UG2002/2021W

III. Wirkungsgrad

WACHMANN Elias ZACH Andreas
12004232 12004790
Gruppe 12

Betreut von
Dr. Joachim KRENN

21.04.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	3
2 Voraussetzungen und Grundlagen	3
2.1 Solarzelle	3
2.2 Wärmepumpe	6
3 Versuchsanordnung	6
3.1 Solarzelle	6
3.2 Wärmepumpe	8
4 Geräteliste	10
5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse	11
5.1 Solarzelle mit Lampe	11
5.2 Solarzelle mit Sonnensimulator	14
5.3 Wärmepumpe	15
6 Auswertung	16
6.1 Solarzelle mit Lampe	16
6.2 Solarzelle mit Sonnensimulator	17
6.3 Wärmepumpe	19
7 Diskussion	22
7.1 Solarzelle	22
7.1.1 Solarzelle mit Lampe	22
7.1.2 Solarzelle mit Sonnensimulator	22
7.2 Wärmepumpe	22
8 Zusammenfassung	23
8.1 Solarzelle	23
8.2 Wärmepumpe	24

1 Aufgabenstellung [1, 2]

- Solarzelle
 - Kennlinie und Kenndaten von Solarzellen in Parallel- und Serienschaltung bestimmen
 - Aufnahme der Dunkel- und Hellkennlinie mittels Sonnensimulator
- Wärmepumpe
 - Messung des Temperaturverlaufes in zwei Wasserbehältern, der von der Pumpe aufgenommenen Leistung und der Drücke nach Kompression bzw. Expansion im Kältemittelkreislauf über 30 min.
 - Bestimmung der Leistungszahl und des Gütegrades als Funktion der Temperaturdifferenz.
 - Erstellung des p - H -Diagrammes des Kreisprozesses aufgrund der gemessenen Werte zu Beginn und am Ende der Messung.

2 Voraussetzungen und Grundlagen [1, 2]

2.1 Solarzelle

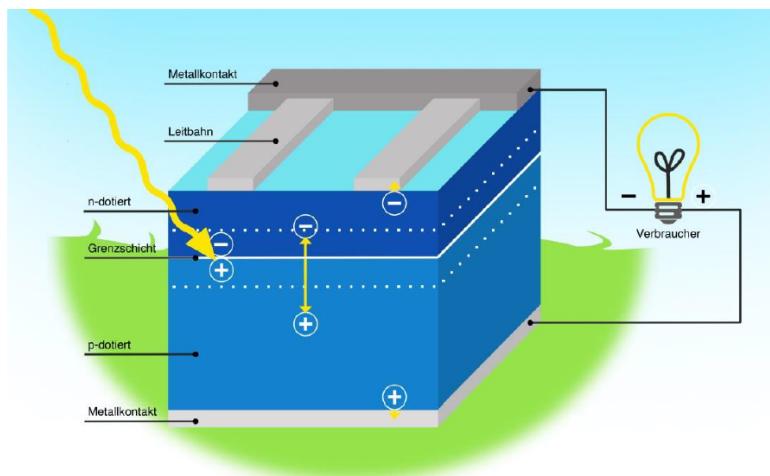


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Solarzelle

Die Solarzelle besteht aus einer n-dotierten und einer p-dotierten Schicht, zwischen denen sich eine elektrisch neutrale Grenzschicht befindet. Die n-Schicht enthält als frei bewegliche Ladungsträger Elektronen, während die p-Schicht Elektronenlöcher aufweist. Die

n-Schicht ist sehr dünn konstruiert, damit Sonnenlicht vor allem am p/n-Übergang absorbiert wird. Die p-Schicht dient der mechanischen Stabilität. Im vorliegenden Laborversuch werden monokristalline Siliziumsolarzellen verwendet. Die n-Schicht dieser Zellen wird durch oberflächennahes Einbringen von Phosphor-Atomen in das p-leitende Silizium-Substrat erzeugt, während die p-Schicht durch Dotieren mit Bor-Atomen entsteht. Die Fermi-Energie der n-Schicht wird dabei angehoben, jene der p-Schicht abgesenkt. Durch die unterschiedlichen Fermi-Niveaus wandern die Löcher in die n-Schicht und die Elektronen in die p-Schicht. Dadurch entsteht an der Grenzschicht eine von freien Ladungsträgern verarmte Sperrsicht. Durch diese Verschiebung der Ladungsträger bekommt das p-Gebiet eine negative, und das n-Gebiet eine positive Raumladung (Raumladungszone), welche das weitere Diffundieren der Ladungsträger verhindert. Erst durch Anlegen einer entgegengesetzten Spannung kann die entstandene Potentialbarriere abgebaut werden und Strom fließen. Wird eine äußere Spannung in umgekehrter Polarität angelegt, vergrößert sich die Potentialbarriere, die Sperrsicht dehnt sich weiter aus und kein Strom kann fließen. Damit verhält sich der p/n-Übergang als Gleichrichter und entspricht einer Diode. Wird die Sperrsicht mit Photonen einer genügend hohen Energie bestrahlt, so entstehen zusätzliche Elektron-Loch-Paare, welche die Energiebarriere überwinden können und ein Fotostrom in Sperrrichtung der Diode kann fließen. Aus der einfachen Diode ist dann eine Fotodiode geworden, welche als Solarzelle zur Stromerzeugung aus Strahlung verwendet werden kann.

Durch Ausmessen der Stromstärken zu in Durchlassrichtung angelegten Spannungen kann die $I-U$ -Kennlinie der Diode dargestellt werden. Per Konvention wird die Strom-Achse dabei invertiert dargestellt. Aus jener Kurve lassen sich Kenngrößen ablesen, wie etwa die Leerlaufspannung U_L bei keinem Stromfluss oder der Kurzschlussstrom I_K bei keiner angelegten Spannung. Die Leistung der Diode kann in Abhängigkeit von der Spannung über die Formel

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

berechnet werden. Der Punkt maximaler Leistung $P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max}$ dient in Kombination mit der Leerlaufspannung und dem Kurzschlussstrom der Berechnung des Füllfaktors FF

$$FF = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{U_L \cdot I_K} \quad (2)$$

Dieser Faktor beschreibt das Verhältnis der rechteckigen Flächen bis zum Punkt maximaler Leistung und der aus Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung aufgespannten, was dem Energieverlust aufgrund der Kennlinienkrümmung entspricht. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

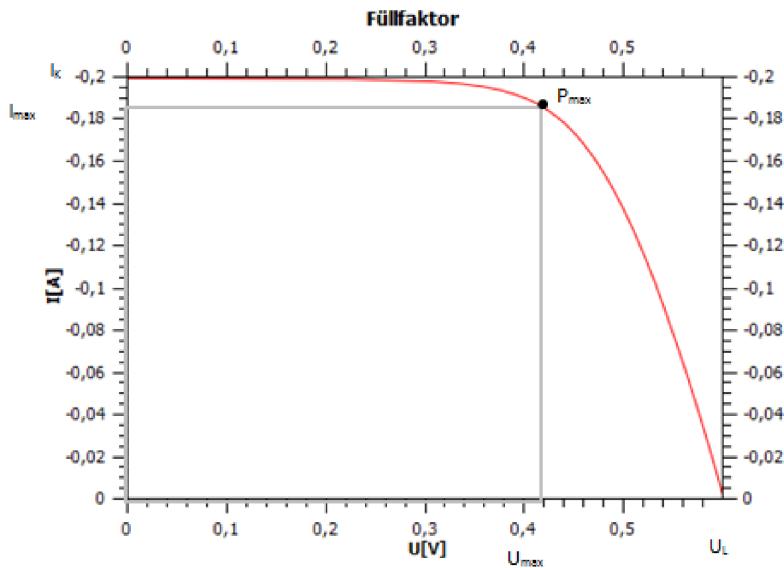


Abbildung 2.2: Punkt maximaler Leistung im invertierten Strom-Spannung-Diagramm

Im vorliegenden Laborversuch wird weiters die abgestrahlte Leistung eines Sonnensimulators berechnet. Hierzu skaliert man die auf der Solarzelle eintreffende Intensität I_{Licht} mit ihrer aktiven Fläche $A = a \cdot b$, wobei a und b Länge respektive Breite der aktiven Fläche beschreiben. Setzt man die maximale Ausgangsleistung der Solarzelle P_{\max} in Relation zur einfallenden Lichteistung P_{Licht} , erhält man den Wirkungsgrad η des Gesamtsystems. Der Wirkungsgrad beschreibt, wie viel Eingangsleistung tatsächlich umgesetzt werden kann.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{Licht}}} \quad (3)$$

Zur Bestimmung der Diodenparameter anhand der experimentell bestimmten I - U -Kurve wird die SHOCKLEY-Gleichung herangezogen. Für einen idealisierten p/n-Übergang mit abruptem Dotierungsprofil erhält man als Strom-Spannungs-Charakteristik $I(U)$ die Shockley-Gleichung:

$$I(U) = I_S \cdot \left(e^{\frac{q_e U}{k_B T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Dabei beschreibt U die an der Diode angelegte Spannung (positiv in Durchlassrichtung, negativ in Sperrrichtung), I_S den Sättigungsstrom, T die Temperatur, k_B die Boltzmann-Konstante und q_e die Elementarladung. Dieses idealisierte Verhalten ist meist in der Praxis nicht gegeben, weshalb man für eine reale Diode den Diodenfaktor f einführt. Wird die Sperrsicht zusätzliche beleuchtet, so entstehen Elektron-Loch-Paare, welche einen Fotostrom I_{ph} in Sperrrichtung verursachen. Aus der Shockley-Gleichung erhält man dann für eine beleuchtete Fotodiode:

$$I(U) = I_S \cdot \left(e^{\frac{q_e U}{f k_B T}} - 1 \right) - I_{\text{ph}} \quad (5)$$

2.2 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist eine thermodynamische Maschine, die einen Kreisprozess realisiert. Ein Arbeitsmedium (hier das Kältemittel R-134a) durchläuft vier Schritte. Zuerst wird es vom Kompressor vom Druck p_1 auf den Druck p_2 adiabatisch komprimiert. Dabei erwärmt sich das Arbeitsmedium auf die Temperatur T_k . Das Arbeitsmedium gibt dann über einen Wärmetauscher isobar Wärme an den Körper höherer Temperatur ab und wird annähernd auf dessen Temperatur T_2 abgekühlt, wobei es kondensiert. Danach wird das Arbeitsmedium anhand eines Ventils auf den niedrigeren Druck p_1 entspannt, wobei es erkaltet. Das nun kalte, enspannte Arbeitsmedium nimmt dann über einen zweiten Wärmetauscher isobar Wärme vom Körper niedrigerer Temperatur auf und erwärmt sich dabei auf annähernd dessen Temperatur T_1 , wobei es wieder verdampft. Nun beginnt der Kreisprozess von vorne. Durch diesen Vorgang wird dem kalten Reservoir (T_1) Wärme entzogen und dem warmen (T_2) zugefügt. Zusammengefasst besteht der idealisierte Kreisprozess aus einer adiabatischen Kompression, einer isobaren Abkühlung, einer isenthalpen Expansion und einer isobaren Erwärmung.

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Kreisprozesses wird die Leistungszahl ϵ eingeführt. Diese ist definiert als das Verhältnis des dem Reservoir T_2 durch die Pumpe zugeführten Wärmestroms \dot{Q} (Wärmemenge ΔQ pro Zeiteinheit Δt) zur aufgenommenen Leistung P des Kompressors:

$$\epsilon = \frac{\dot{Q}}{P} \quad (6)$$

Der Wärmestrom \dot{Q} lässt sich dabei nach der folgenden Formel berechnen:

$$\dot{Q} = c \cdot m \cdot \dot{T}, \quad (7)$$

wobei c die spezifische Wärmekapazität von Wasser und m die Masse des Wassers darstellt. Man definiert nun noch den Gütegrad η einer Wärmepumpe als Verhältnis der Leistungszahl ϵ der Wärmepumpe zur theoretisch maximal erreichbaren Leistungszahl, der Leistungszahl des Carnot-Prozesses $\epsilon_{\max} = \frac{T_h}{T_h - T_k}$. Dabei beschreibt T_h die Temperatur des warmen Reservoirs und T_k die Temperatur des kalten Reservoirs. Der Gütegrad ist also definiert als:

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_{\max}} \quad (8)$$

3 Versuchsanordnung

Das vorliegende Labor teilt sich in zwei Teilversuche auf, wessen Aufbau in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

3.1 Solarzelle

Der Versuch zur Solarzelle teilt sich nun weiter in zwei Aufbauten ein. Der erste der beiden ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Dabei wird der Aufbau, wie in [1] beschrieben, realisiert.

Die Lichtquelle, die Lampe rechts im Bild, wird hierzu 30 cm von den beiden Solarzellen entfernt positioniert. Ein variabler Widerstand fungiert als Last und die Messung wird wie nachfolgend beschrieben mit zwei Multimetern, jeweils für eine serielle als auch parallele Schaltung der beiden Solarmodule, durchgeführt.



Abbildung 3.1: Aufbau des Versuchs zur Bestimmung der Kennlinie einer Solarzelle.

Für den zweiten Aufgabenteil wird auf den zweiten Versuchsaufbau gewechselt. Hier steht ein Sonnensimulator (rechts in Abbildung 3.2) zur Verfügung. Dieser ist in der Lage einige gewisse konstante Lichtintensität zu erzeugen, welche auf die Solarzelle trifft. Letztere ist an ein Sourcemeter angeschlossen, welches automatisiert die Kennlinienaufzeichnung durchführt. Die Lichtintensität wird vor der Aufzeichnung noch mittels Powermeter gemessen.

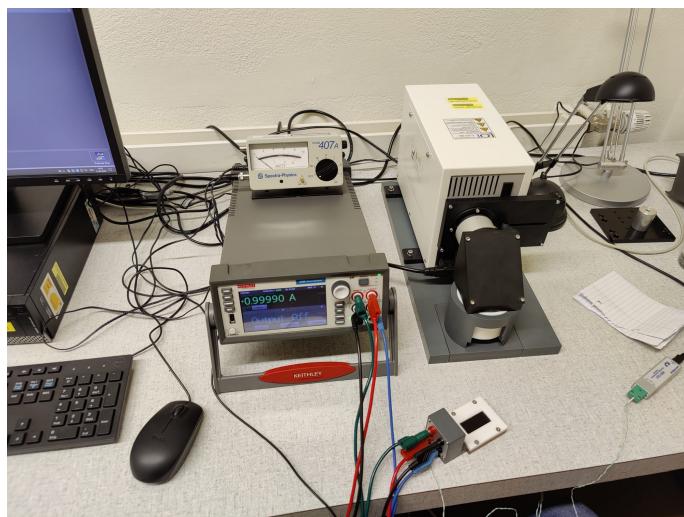


Abbildung 3.2: Aufbau des Versuchs zur Bestimmung der Dunkel- und Hellkennlinie mittels Sonnensimulator

3.2 Wärmepumpe

Für den Versuch zur Wärmepumpe wird der bereits aufgebaute Versuch, schematisch in Abbildung 3.3 dargestellt, verwendet. Lediglich die Temperaturmessgeräte werden noch mittels Cassy Lab2 Schnittstelle mit dem nebenstehenden Computer verbunden.

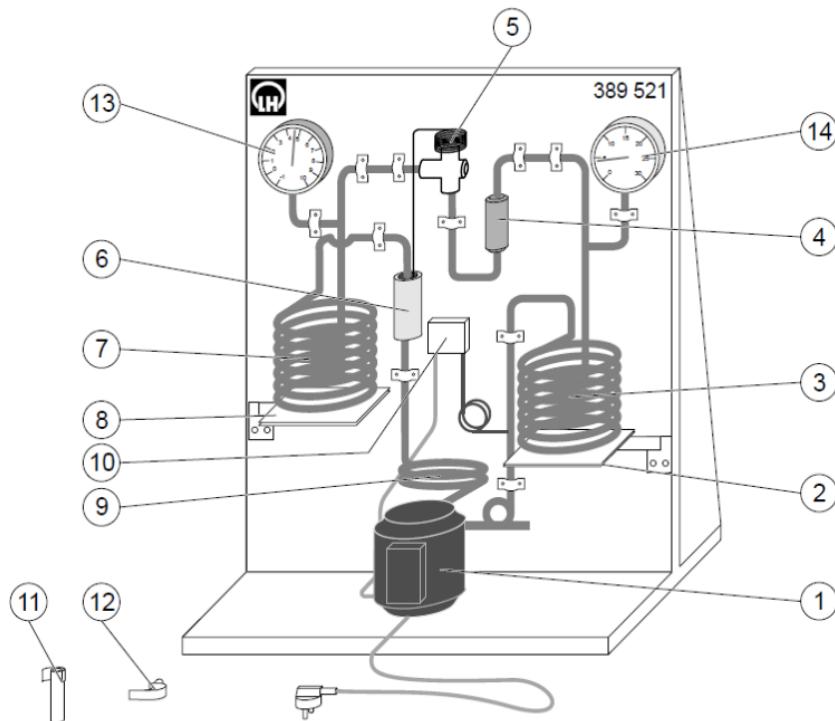


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau. **1:** Kompressor 230 V, 50 Hz oder 60 Hz. Leistungsaufnahme ca. 130 W bei 50 Hz; **2:** ausschwenkbare Stellfläche für rotmarkierten Warmwasserbehälter; **3:** Verflüssiger; **4:** Sammler/Reiniger; **5:** Expansionsventil; **6:** Temperaturfühler des Expansionsventils; **7:** Verdampfer; **8:** ausschwenkbare Stellfläche Kaltwasserbehälter; **9:** Rohrwindungen als elastische Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher; **10:** Druckwächter; **11:** Kunststoffhalter (2×) für Thermometer und Temperaturfühler, zum Anklemmen an Kupferrohre; **12:** Kupfer-Messschuh (2×) zum Einsticken von Temperaturfühlern für Temperaturmessungen an den Kupferrohren des Kältemittelkreislaufs; **13:** Manometer für die Niederdruckseite; innere Skala für Druckmessung von –1 bar bis 10 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R-134a von –60 °C bis 40 °C; **14:** Manometer für die Hochdruckseite; innere Skala: Druck von –1 bar bis 30 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R-134a von –60 °C bis 85 °C [2].

4 Geräteliste

Tabelle 4.1: Verwendete Geräte und wichtige Materialien

Gerät	Modell	Inv. Nummer	Anmerkung
2× Solarzelle	-	-	-
Lampe	-	-	-
Multimeter	Fluke 175 True RMS	-	-
Widerstand	variabel	-	-
Sourcemeter	Keithley 2450	310084940000	-
Powermeter	Spectra-Physics 407A	310041630000	-
Sonnensimulator	-	310094110000	-
PC mit Kickstart Software	-	-	-
Wärmepumpenaufbau	-	310070540000	siehe Abbildung 3.3
Kompressor	-	-	$P \approx 120 \text{ W}$
Eimer	5 L	-	-
Temperaturmessgeräte	-	666206	-
PC mit Cassy Lab2	-	-	-

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Solarzelle mit Lampe

Der Aufbau wird, wie in Unterabschnitt 3.1 beschrieben und in Abbildung 3.1 dargestellt, realisiert. Der Abstand zwischen Lampe und Solarzellenmodulen beträgt circa 30 cm. Nacheinander werden nun insgesamt drei Varianten desselben Aufbaus experimentell behandelt. Zuerst werden die beiden Solarzellenmodule in Serie geschaltet, anschließend parallel und zu guter Letzt wieder in Serie, diesmal wird jedoch ein Modul gänzlich von Lichteinfall abgeschirmt.

Zu Beginn wird der Schiebewiderstand auf seinen Maximalwert von $1\text{ k}\Omega$ eingestellt. Stückweise wird nun der Widerstandswert verringert indem die gesamte Bandbreite des variablen Widerstands ausgenutzt wird, um die Strom-Spannungskennlinie der Solarzelle bestimmen zu können. Bei jeder neuen Position des Schiebers (und damit neuem Widerstandswert) werden sowohl Strom als auch Spannung an Ampere- bzw. Voltmeter abgelesen und notiert. Im Bereich des annähernd linearen Verlaufs der Kurve werden großzügigere Widerstandswertschritte gewählt, im interessanten Bereich des Punkts der maximalen Leistung werden kleinere Schrittweiten am Widerstand gewählt. Die erhaltenen Messwerte für Strom und Spannung im seriellen Aufbau finden sich in Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Gemessene Ströme I und Spannungen U der beiden Solarzellenmodule in Serienschaltung zur Bestimmung der Kennlinie der Zelle. Der Verbraucherwiderstand wird mittels variablem Schiebewiderstand ($R_{\max} = 1 \text{ k}\Omega$) laufend verändert. Unsicherheiten laut Fluke-Datenblatt.

I / mA	$\Delta I / \text{mA}$	U / V	$\Delta U / \text{V}$
0,00	0,03	11,65	0,02
11,70	0,15	11,48	0,02
15,19	0,19	11,40	0,02
19,8	0,3	11,300	0,019
24,2	0,3	11,200	0,019
26,6	0,3	11,150	0,019
28,9	0,4	11,100	0,019
30,9	0,4	11,060	0,019
34,0	0,4	10,980	0,019
38,5	0,5	10,860	0,019
43,5	0,5	10,720	0,019
48,4	0,6	10,550	0,018
52,0	0,6	10,390	0,018
54,5	0,6	10,240	0,018
55,6	0,6	10,140	0,018
56,6	0,6	9,940	0,017
57,1	0,7	9,810	0,017
57,2	0,7	9,670	0,017
57,3	0,7	9,550	0,017
57,3	0,7	9,400	0,017
57,2	0,7	9,340	0,017
57,3	0,7	8,980	0,016
57,8	0,7	7,770	0,014
58,2	0,7	6,250	0,012
58,7	0,7	5,490	0,011
59,5	0,7	4,310	0,009
61,2	1,0	2,720	0,007
63,3	1,0	0,690	0,004
65,5	1,0	0,1200	0,0004
65,4	1,0	0,0000	0,0002

Anschließend werden die beiden Solarzellenmodule parallel verbunden und eine erneute Messserie wird dokumentiert. Die Messergebnisse finden sich in Tabelle 5.2.

Tabelle 5.2: Gemessene Ströme I und Spannungen U der beiden Solarzellenmodule in Parallelschaltung zur Bestimmung der Kennlinie der Zelle. Der Verbraucherwiderstand wird mittels variablem Schiebewiderstand ($R_{\max} = 1 \text{ k}\Omega$) laufend verändert. Unsicherheiten laut Fluke-Datenblatt.

I / mA	$\Delta I / \text{mA}$	U / V	$\Delta U / \text{V}$
0,00	0,03	5,793	0,011
5,98	0,09	5,850	0,011
7,82	0,11	5,834	0,011
9,34	0,13	5,820	0,011
11,49	0,15	5,810	0,011
13,28	0,17	5,796	0,011
18,6	0,3	5,765	0,011
28,0	0,4	5,710	0,011
36,2	0,4	5,660	0,011
45,7	0,5	5,602	0,011
53,7	0,6	5,552	0,011
60,6	1,0	5,507	0,011
67,1	1,0	5,460	0,011
70,7	1,1	5,438	0,011
78,6	1,1	5,386	0,011
91,2	1,3	5,295	0,010
98,1	1,3	5,245	0,010
111,0	1,5	5,145	0,010
127,4	1,6	5,000	0,010
141,8	1,8	4,850	0,010
150,2	1,9	4,770	0,010
169	2	4,480	0,009
184	3	3,850	0,008
185	3	1,500	0,005
189	3	0,0200	0,0003
189	3	0,0000	0,0002

Zu guter Letzt wird die Anordnung wieder seriell verschaltet und eine der beiden Zellen mittels mehreren Blättern Papiers vor einfallendem Licht abgeschirmt. Die Messergebnisse finden sich in Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Gemessene Ströme I und Spannungen U der beiden Solarzellenmodule in Serienschaltung, wobei eine der beiden Zellen vor dem einfallenden Licht abgeschirmt ist, zur Bestimmung der Kennlinie der Zelle. Der Verbraucherwiderstand wird mittels variablem Schiebewiderstand ($R_{\max} = 1 \text{ k}\Omega$) laufend verändert. Unsicherheiten laut Fluke-Datenblatt.

I / mA	$\Delta I / \text{mA}$	U / V	$\Delta U / \text{V}$
0,00	0,03	10,100	0,018
2,93	0,06	2,860	0,007
2,95	0,06	1,820	0,005
2,96	0,06	1,100	0,004
2,97	0,06	0,620	0,003
2,99	0,06	0,4720	0,0010
2,97	0,06	0,0000	0,0002

5.2 Solarzelle mit Sonnensimulator

Für den zweiten Teilversuch mit Solarzellen wird nun der bereits aufgebaute und verkaubte Sonnensimulator verwendet. Beginnend mit einer Messung bei Dunkelheit wird die Dunkelkennlinie bestimmt. Naturgemäß muss man dazu die Blende am Sonnensimulator schließen, sodass in die ansonsten vollkommen abgedunkelte Kammer kein Licht eindringen kann. Mittels des zur Verfügung gestellten Softwareprogramms *Kickstart* wird nun vollautomatisch die Kennlinie aufgenommen und abgespeichert.

Schließlich wird die Hellkennlinie für zwei Bestrahlungsstärken (400 W m^{-2} und 1000 W m^{-2}) aufgenommen. Um sicherzustellen, dass die korrekte Bestrahlungsstärke eingestellt ist, wird diese mittels Powermeter gemessen. Der kreisrunde Sensor des Powermeters hat dabei eine Fläche von $A_{PM} = (2,27 \pm 0,06) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ und die rechteckige Solarzelle eine Fläche von $A_{SZ} = (6,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Unter Annahme einer homogenen Ausleuchtung des Bereichs im Sonnensimulator kann nun mittels Powermetermessung ein Wert von $0,09 \text{ W}$ für $(400 \pm 14) \text{ W m}^{-2}$ und $0,23 \text{ W}$ für $(1000 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$ ermessnen werden. Nach dem jeweiligen Einstellen der Bestrahlungsstärken wird der Powermetersonsor durch die Solarzelle ersetzt und abermals eine Kennlinie aufgenommen. Dabei versteht sich, dass die Schiebeblende vollkommen geöffnet ist.

5.3 Wärmepumpe

Der zweite große Teil dieses Labortags beschäftigt sich mit einer Wärmepumpe in Form eines Kompressors, der Wärme aus einem Reservoir in ein anderes leitet. Da der Versuchsaufbau bereits parat steht (siehe Abbildung 3.3), wird lediglich der nebenstehende PC in Betrieb genommen, die Temperatursensoren werden verbunden und mittels Cassy Lab2 in Messbereitschaft versetzt. Bevor die Messung jedoch starten kann, werden die beiden Kübel (rot und blau, respektive für warmes und kaltes Reservoir) mit ca. 4 L Wasser gefüllt. Zeitgleich wird nun die Messung der Temperatur am PC und der Kompressor gestartet. Damit die Messung nicht durch Wärmekonvektion verfälscht wird und nicht zuletzt auch um Langeweile bei den Experimentierenden während der 30 Minuten langen Versuchsdauer vorzubeugen, wird stets fleißig umgerührt (siehe Symbolbild 5.1). Zu Beginn und anschließend im 5-Minuten-Takt werden zusätzlich die Drücke an den beiden Zubringerleitungen zu den Kompressoren abgelesen und notiert. Die aufgezeichneten Temperaturdaten werden schließlich als csv-Datei abgespeichert, die Drücke ergeben sich zu den in Tabelle 5.4 aufgelisteten.

Tabelle 5.4: Messergebnisse Drücke Wärmepumpe. Gemessene Drücke an den jeweiligen Zubringerleitungen p_k für die warme (rote) Seite und p_w für die kalte (blaue) Seite zum Zeitpunkt t in Minuten vom Startpunkt. Die Unsicherheit ergibt sich zu $\Delta p = 0,1$ bar

t / min	p_k / bar	p_w / bar
0	3,7	5,4
5	2,9	6,8
10	2,4	8,0
15	2,0	8,9
20	1,9	9,8
25	1,7	10,6
30	1,9	11,3

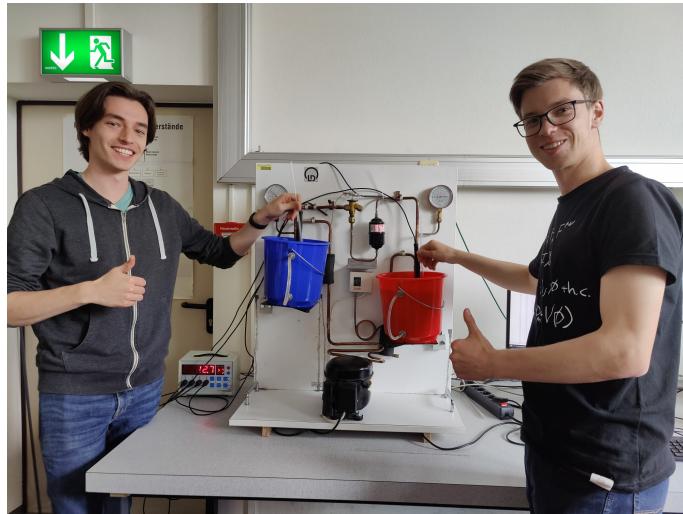


Abbildung 5.1: Symbolbild Experimentatoren

6 Auswertung

6.1 Solarzelle mit Lampe

Zur Auswertung zum Versuch mit den Solarzellen werden die jeweiligen Messreihen in einem $I(U)$ - sowie einem $P(U)$ -Diagramm dargestellt. Aus den Messdaten wird der Punkt der maximalen Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, sowie der Füllfaktor FF der Zelle errechnet. Die Ergebnisse sind für Serienschaltung in Abbildung 6.1 und für Parallelschaltung in Abbildung 6.2 dargestellt. Zudem sind die Werte für den Versuch mit einer verdeckten Zelle in Abbildung 6.3 abgebildet.

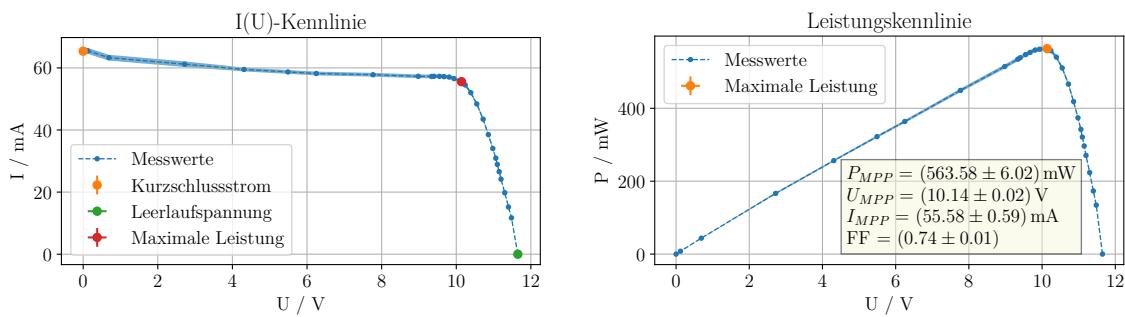


Abbildung 6.1: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Serienschaltung zweier Solarzelle. Aus den Messwerten werden der Kurzschlussstrom (links: orange), die Leerlaufspannung (links: grün) sowie der maximale Leistungspunkt (links:rot, rechts: orange) abgelesen. Die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, sowie der Füllfaktor FF der Zelle werden aus den Messwerten berechnet.

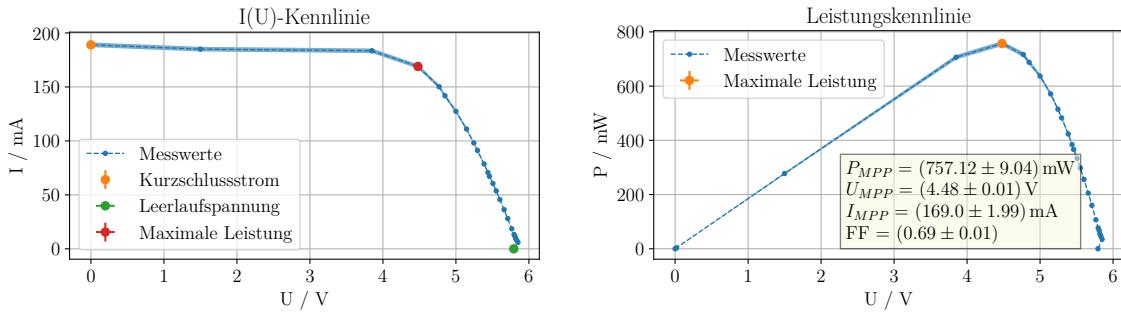


Abbildung 6.2: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Parallelschaltung zweier Solarzelle. Aus den Messwerten werden der Kurzschlussstrom (links: orange), die Leerlaufspannung (links: grün) sowie der maximale Leistungspunkt (links:rot, rechts: orange) abgelesen. Die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, sowie der Füllfaktor FF der Zelle werden aus den Messwerten berechnet.

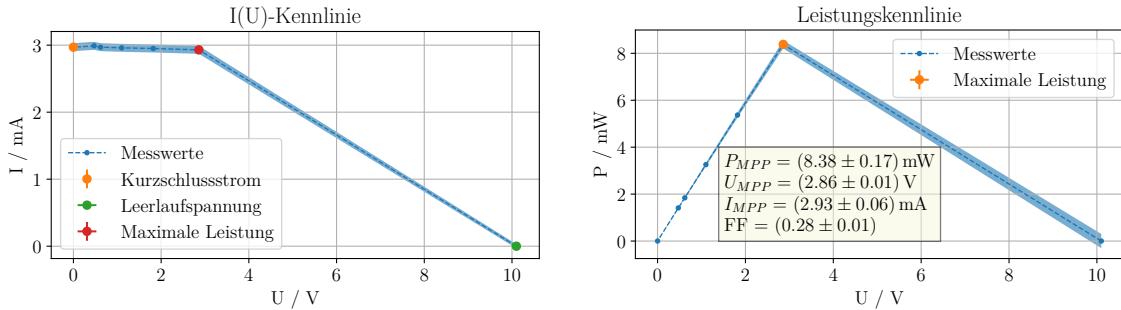


Abbildung 6.3: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Serienschaltung zweier Solarzelle wobei eine abgedunkelt wurde. Aus den Messwerten werden der Kurzschlussstrom (links: orange), die Leerlaufspannung (links: grün) sowie der maximale Leistungspunkt (links:rot, rechts: orange) abgelesen. Die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, sowie der Füllfaktor FF der Zelle werden aus den Messwerten berechnet.

6.2 Solarzelle mit Sonnensimulator

Die Diodencharakteristik wird im Folgenden ausgewertet. Die Gleichung nach Shockley, welche prinzipiell implizite Korrekturterme beinhaltet, ist in Gleichung 4 und Gleichung 5 schon vereinfacht ohne diese Terme dargestellt. Erstere Gleichung wird zum fitten der Dunkelkennlinie und letztere zum fitten der Hellkennlinie hinzugezogen. Dabei werden die freien Parameter Sättigungsstrom I_S , Diodenfaktor f und für die Hellkennlinie auch der Photostrom I_{ph} ermittelt. Die Dunkelkennlinie ist in Abbildung 6.4, die Hellkennlinie in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6, respektive für eine Bestrahlungsintensität von $(400 \pm 13) \text{ W m}^{-2}$ und $(1000 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$ dargestellt.

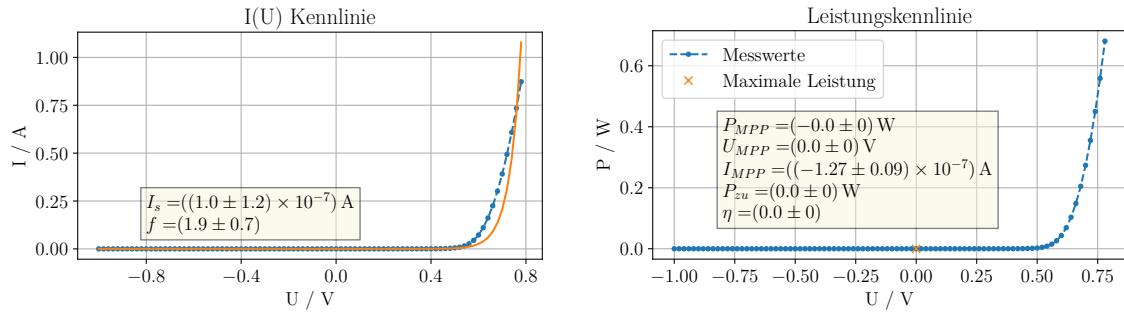


Abbildung 6.4: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Dunkelkennlinie der Solarzelle. Aus den Messwerten werden der Sättigungsstrom I_S , der Diodenfaktor f sowie die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, die zugeführte Leistung P_{zu} und der Wirkungsgrad η der Zelle ermittelt. Für die Dunkelkennlinie ergibt sich natürlich $P_{zu} = 0 \text{ W}$ und somit kann η nicht sinnvoll definiert werden und ist auf 0 gesetzt.

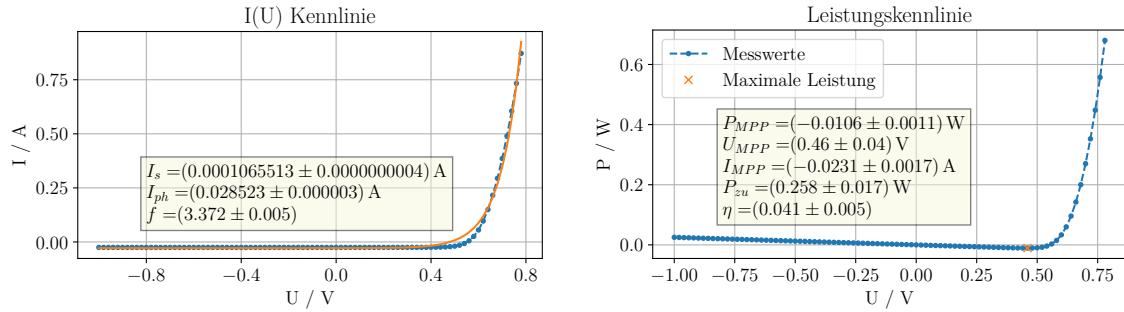


Abbildung 6.5: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Hellkennlinie der Solarzelle mit einer Bestrahlungsintensität von $(400 \pm 14) \text{ W m}^{-2}$. Aus den Messwerten werden der Sättigungsstrom I_S , der Diodenfaktor f , der Photostrom I_{ph} sowie die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, die zugeführte Leistung P_{zu} und der Wirkungsgrad η der Zelle ermittelt.

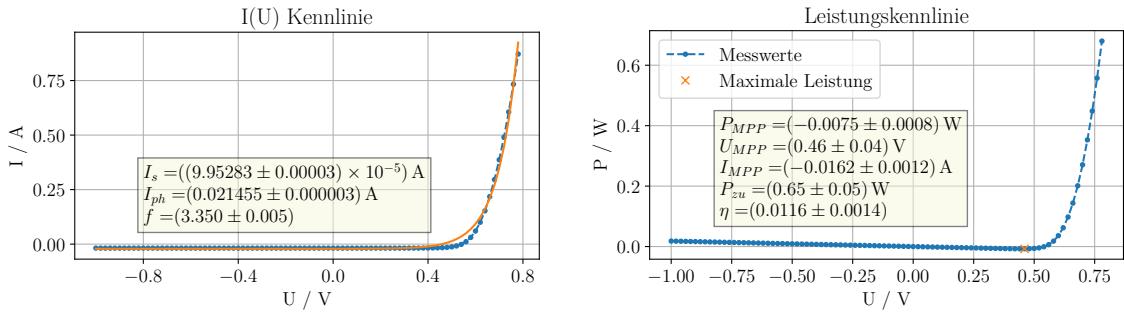


Abbildung 6.6: $I(U)$ -/ $P(U)$ -Hellkennlinie der Solarzelle mit einer Bestrahlungsintensität von $(1000 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$. Aus den Messwerten werden der Sättigungsstrom I_S , der Diodenfaktor f , der Photostrom I_{ph} sowie die maximale Leistung P_{MPP} , die Spannung U_{MPP} und der Strom I_{MPP} bei maximaler Leistung, die zugeführte Leistung P_{zu} und der Wirkungsgrad η der Zelle ermittelt.

6.3 Wärmepumpe

Die von Cassy Lab 2 erhaltenen Daten zu den beiden Temperaturkurven werden mittels Python-Skript eingelesen und in Abbildung 6.7 dargestellt.

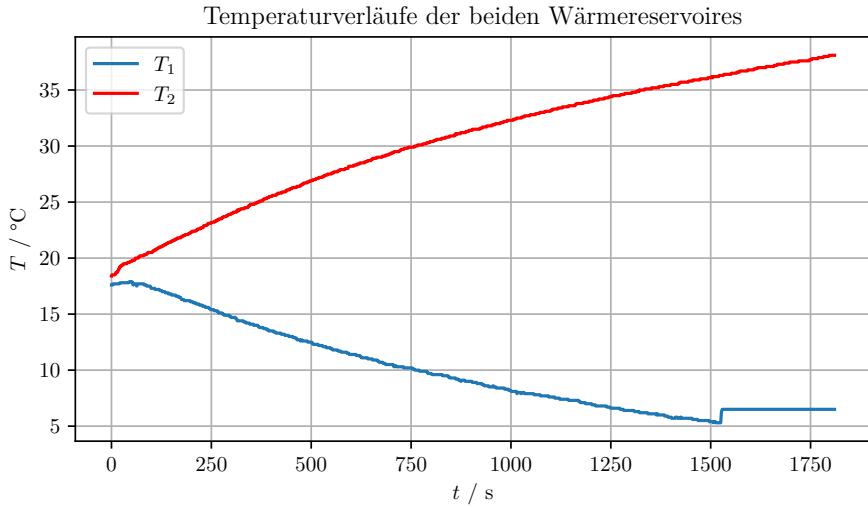


Abbildung 6.7: Plot des zeitlichen Verlaufs der aufgezeichneten Daten der beiden Wärmereservoirs $T_1(t)$ und $T_2(t)$.

Anschließend wird nach Gleichung 6 die Leistungszahl der Wärmepumpe berechnet. Als spezifische Wärmekapazität von Wasser wird $c = 4184 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ verwendet, die Masse beträgt $m \approx 4 \text{ kg}$. Die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors beträgt $P \approx 120 \text{ W}$. Da sich die aufgenommene Kurve $T_2(t)$ als zu verrauscht für eine sinnvolle numerische

Differentiation erwies, wurde dies mit einem SAVITZKY-GOLAY-Filter von `scipy.signal` geglättet und differenziert. Dargestellt wird die Leistungszahl ϵ in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta T(t) = T_2(t) - T_1(t)$. Auch diese Differenzkurve wurde zur besseren Darstellbarkeit mit einem Savitzky-Golay-Filter geglättet. Die Leistungszahl ϵ in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz ΔT ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

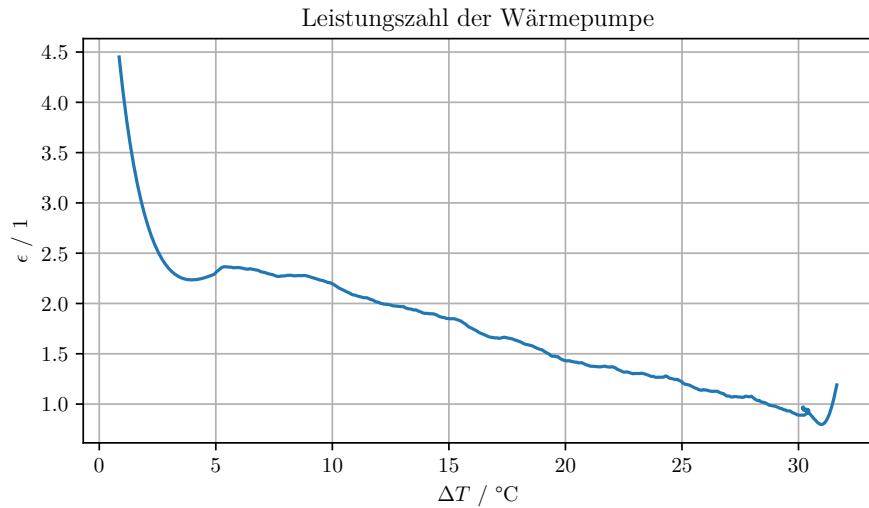


Abbildung 6.8: Plot der Leistungszahl der Wärmepumpe nach Gleichung 6 in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$.

Der ideale Wirkungsgrad (bzw. Leistungszahl) wird von einem Carnot-Kreisprozess erzieht. Berechnet man zu jedem Zeitschritt die Carnot-Leistungszahl und dividiert die soeben dargestellte Kurve durch die Carnot-Kurve, so erhält man den Gütegrad η der Wärmepumpe. Die zeitabhängige Carnot-Leistungszahl wurde wieder per Savitzky-Golay-Filter geglättet. Der Gütegrad ist in Abbildung 6.9 wieder gegen die Temperaturdifferenz ΔT aufgetragen.

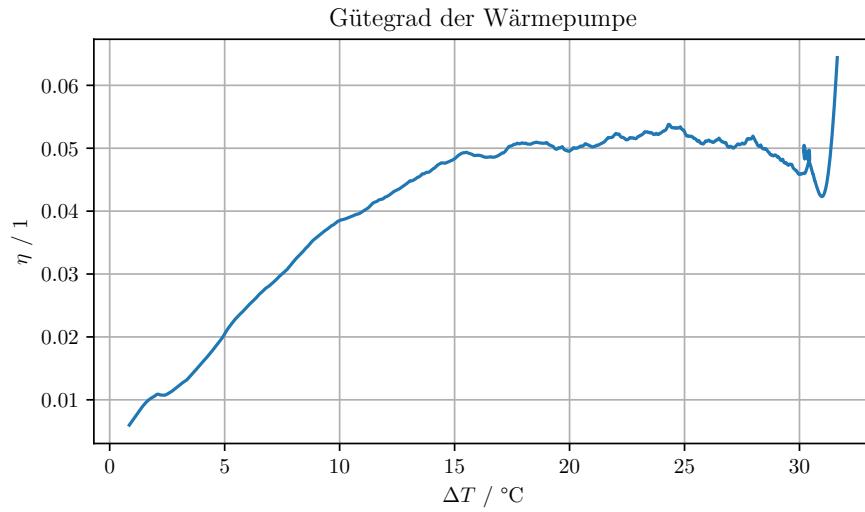


Abbildung 6.9: Gütegrad $\eta = \epsilon/\epsilon_{\text{Carnot}}$ der Wärmemaschine in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_2 - T_1$.

Zu guter Letzt wird der Kreisprozess noch in das $\log(p)$ - H -Diagramm mit dem verwendeten Kältemittel R-134a eingezeichnet. Hierzu werden die Daten aus Tabelle 5.4 verwendet. Das Diagramm wird einmal für die Daten zu Beginn des Experiments ausgefüllt und anschließend am Ende. Die beiden Diagramme finden sich in den Abbildungen 6.10 und 6.11.

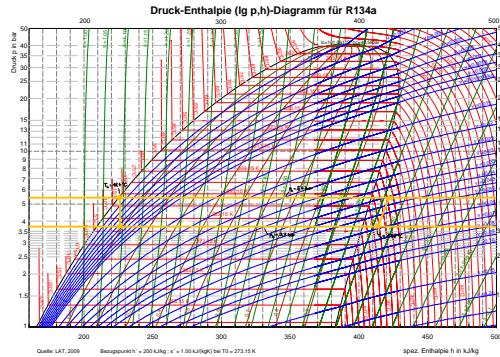


Abbildung 6.10: $\log(p)$ - H -Diagramm des Kreisprozesses zu Beginn des Experiments.

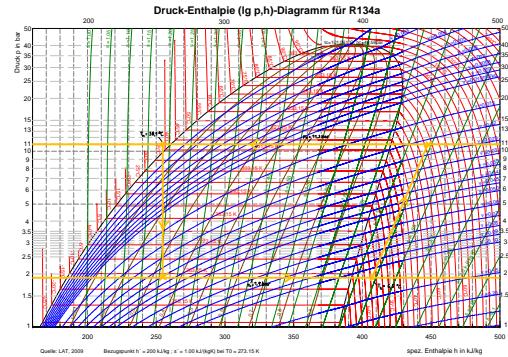


Abbildung 6.11: $\log(p)$ - H -Diagramm des Kreisprozesses am Ende des Experiments.

7 Diskussion

7.1 Solarzelle

7.1.1 Solarzelle mit Lampe

Es konnte für eine Solarzelle in serieller, als auch paralleler Schaltung die $I(U)$ - und $P(U)$ -Kennlinie ermittelt werden, welche mit den erwarteten Kennlinie in guter Übereinstimmung steht. Dabei liefert die serielle Schaltung eine höhere Spannung bei niedrigerer Stromstärke, wohingegen die Parallelschaltung höheren Strom zu niedrigerer Spannung liefert. Zudem wurde die Kennlinie auch für den Fall, bei dem eine der beiden Zellen verdeckt ist, aufgenommen. Hier zeigt sich ein wesentlicher Abfall in der maximalen Leistung der Zellen, was wiederum durch die verdunkelte Zelle, welche als schlechter Leiter und somit Widerstand wirkt, erklärt werden kann.

Für die Versuchsdurchführung ist weiter zu beachten, dass die Lampe schon einige Zeit eingeschaltet sein sollte, damit sich für die Lampe, als auch für die Solarzellen, eine gewisse konstante Temperatur eingestellt hat.

7.1.2 Solarzelle mit Sonnensimulator

Mittels der vereinfachten Shockley-Gleichungen in 4 und 5 entspricht der Fit nicht ganz dem Modell, welches implizite Korrekturen vorsieht. Jedoch konnte nichtsdestotrotz ein guter Fit erzielt werden. Abweichungen können zum Teil auf das vereinfachte Modell, jedoch auch auf Gegebenheiten, wie die Homogenität der Ausleuchtung und Messungenauigkeiten des Keithley-Gerätes, zurückgeführt werden.

7.2 Wärmepumpe

Beim Unterversuch zur Wärmepumpe war ununterbrochenes Umrühren der Wärmere-servoireimer von höchster Bedeutung, da sich ansonsten hinderliche lokale Extrema in den aufgezeichneten Temperaturkurven („spikes“) ergeben. Trotz größter Sorgfalt während des Experiments waren die Datensätze letztlich dennoch verrauscht, weswegen sie erst geglättet werden mussten, bevor sie sinnvoll in Diagrammen dargestellt oder gar numerisch differenziert werden konnten. Nach circa 1500 s steigt die Temperatur des kalten Reservoirs sprungartig an, was durch das Freiwerden latenter Wärme beim Frieren des Wassers erklärt werden kann. Die zeitabhängigen Kurven für Leistungszahl und Gütegrad des Aufbaus wirken plausibel.

8 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieses Praktikumlabors nochmals zusammengefasst.

8.1 Solarzelle

Serienschaltung zweier Solarzellen

- $P_{MPP} = (564 \pm 6) \text{ mW}$
- $U_{MPP} = (10,14 \pm 0,02) \text{ V}$
- $I_{MPP} = (55,6 \pm 0,6) \text{ mA}$
- $U_L = (11,65 \pm 0,02) \text{ V}$
- $I_K = (65,4 \pm 1,0) \text{ mA}$
- $FF = 0,74 \pm 0,01$

Parallelschaltung zweier Solarzellen

- $P_{MPP} = (757 \pm 9) \text{ mW}$
- $U_{MPP} = (4,48 \pm 0,01) \text{ V}$
- $I_{MPP} = (169 \pm 2) \text{ mA}$
- $U_L = (5,792 \pm 0,011) \text{ V}$
- $I_K = (189 \pm 3) \text{ mA}$
- $FF = 0,69 \pm 0,01$

Serienschaltung zweier Solarzellen (wobei eine verdunkelt ist)

- $P_{MPP} = (8,38 \pm 0,17) \text{ mW}$
- $U_{MPP} = (2,86 \pm 0,02) \text{ V}$
- $I_{MPP} = (2,93 \pm 0,06) \text{ mA}$
- $U_L = (10,100 \pm 0,018) \text{ V}$
- $I_K = (2,97 \pm 0,06) \text{ mA}$
- $FF = 0,28 \pm 0,01$

Dunkelkennlinie

- $f = 1,9 \pm 0,7$

Hellkennlinie bei $(400 \pm 13) \text{ W m}^{-2}$

- $f = 3,372 \pm 0,005$
- $P_{MPP} = (-0,0106 \pm 0,0011) \text{ W}$
- $U_{MPP} = (0,46 \pm 0,04) \text{ V}$
- $I_{MPP} = (-0,0231 \pm 0,0017) \text{ A}$
- $\eta = 0,041 \pm 0,005$

Hellkennlinie bei $(1000 \pm 30) \text{ W m}^{-2}$

- $f = 3,350 \pm 0,005$
- $P_{MPP} = (-0,0075 \pm 0,0008) \text{ W}$
- $U_{MPP} = (0,46 \pm 0,04) \text{ V}$
- $I_{MPP} = (-0,0162 \pm 0,0012) \text{ A}$
- $\eta = 0,0116 \pm 0,0014$

8.2 Wärmepumpe

Im vorliegenden Praktikumsversuch wurden zeitabhängige Temperaturverläufe zweier Wärmereservoirs einer grundlegenden Wärmepumpe aufgezeichnet. Aus diesen Daten wurden anschließend eine zeitabhängige Leistungszahlkurve dargestellt und mit der Carnot-Leistungszahlkurve verglichen, woraus der Gütegrad des vorliegenden Aufbaus berechnet werden konnten. Letztlich wurden die Daten des Kreisprozesses zu Beginn und am Ende noch in ein $\log(p)$ - H -Diagramm eingetragen.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Knoll, A. Schöffmann und G. Paltauf. Die Solarzelle. Website. URL: <https://moodle.uni-graz.at/mod/resource/view.php?id=1239702>.
- [2] A. Hohenau. Wärmepumpe. Website. URL: <https://moodle.uni-graz.at/mod/resource/view.php?id=1239703>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Aufbau einer Solarzelle	3
2.2	Füllfaktor	5
3.1	Aufbau Kennlinie Solarzelle Lampe	7
3.2	Aufbau Hell- und Dunkelkennlinie Solarzelle Sonnensimulator	8
3.3	Schematischer Aufbau Wärmepumpe	9
5.1	Symbolbild Experimentatoren	16
6.1	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Serienschaltung Solarzelle	16
6.2	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Parallelschaltung Solarzelle	17
6.3	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Kennlinie Seriellschaltung – abgedunkelt Solarzelle	17
6.4	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Dunkelkennlinie Solarzelle – Sonnensimulator	18
6.5	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Hellkennlinie Solarzelle – Sonnensimulator	18
6.6	$I(U)$ -/ $P(U)$ -Hellkennlinie Solarzelle – Sonnensimulator	19
6.7	Temperaturverlauf Wärmepumpe	19
6.8	Leistungszahl Wärmepumpe	20
6.9	Gütegrad Wärmepumpe	21
6.10	$\log(p)$ - H -Diagramm Anfang	21
6.11	$\log(p)$ - H -Diagramm Ende	21

Tabellenverzeichnis

4.1	Geräteliste	10
5.1	Messergebnisse Solarzelle seriell	12
5.2	Messergebnisse Solarzelle parallel	13
5.3	Messergebnisse Solarzelle seriell	14
5.4	Messergebnisse Drücke Wärmepumpe	15