



KARL-FRANZENS-UNIVERSITÄT GRAZ
INSTITUT FÜR PHYSIK

23S PHY.L02UB FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM 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 | 9 |
| 5 | Versuchsdurchführung und Messergebnisse | 9 |
| 5.1 | Solarzelle mit Lampe | 9 |
| 5.2 | Solarzelle mit Sonnensimulator | 13 |
| 5.3 | Wärmepumpe | 13 |
| 6 | Auswertung | 15 |
| 6.1 | Solarzelle | 15 |
| 6.2 | Wärmepumpe | 15 |
| 7 | Diskussion | 15 |
| 7.1 | Solarzelle | 15 |
| 7.2 | Wärmepumpe | 15 |
| 8 | Zusammenfassung | 15 |

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

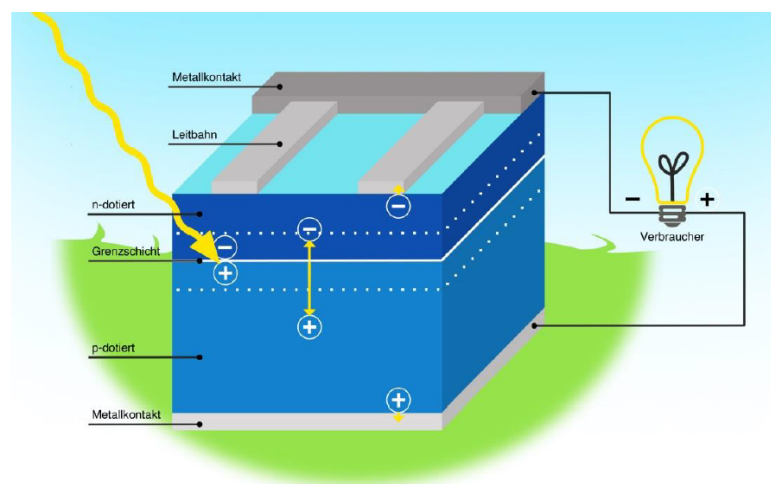


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer Solarzelle

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 Sperrschicht. 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 Sperrschicht dehnt sich weiter aus und kein Strom kann fließen. Damit verhält sich der p/n-Übergang als Gleichrichter und entspricht einer Diode. Wird die Sperrschicht 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 aufgespanntem, was dem Energieverlust aufgrund der Kennlinienkrümmung entspricht. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

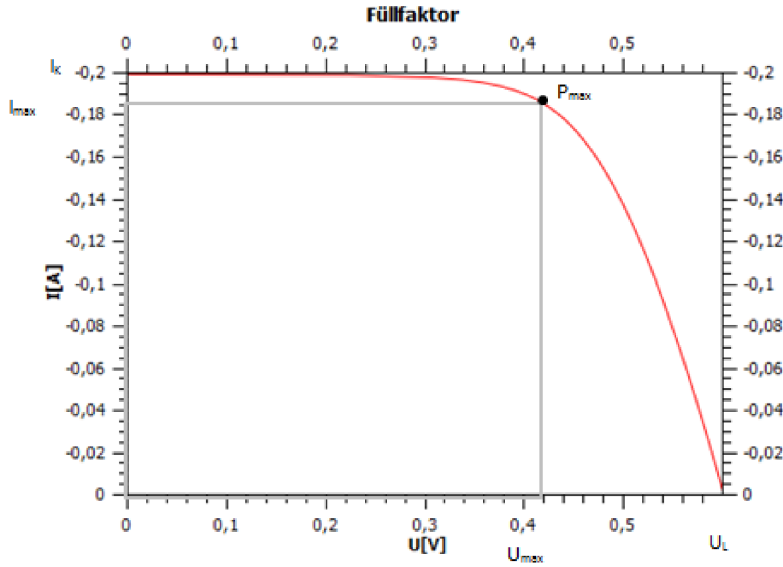


Abbildung 2.2: Punkt maximaler Leistung im invertierten Strom-Spannung-Diagramm

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 Lichtleistung P_{Licht} , erhält man den Wirkungsgrad η des Gesamtsystems. Der Wirkungsgrad beschreibt, wie viel Eingangsleistung tatsächlich umgesetzt werden kann.

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

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 Sperrschicht zusätzlich 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, entspannte 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) zugeführt. 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:

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

Die Wärmedifferenz ΔQ lässt sich dabei nach der folgenden Formel berechnen:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (7)$$

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 $\epsilon_{\max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$.

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

3 Versuchsanordnung

Das vorliegende Labor teilt sich in zwei Teilversuche auf, welchen 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.

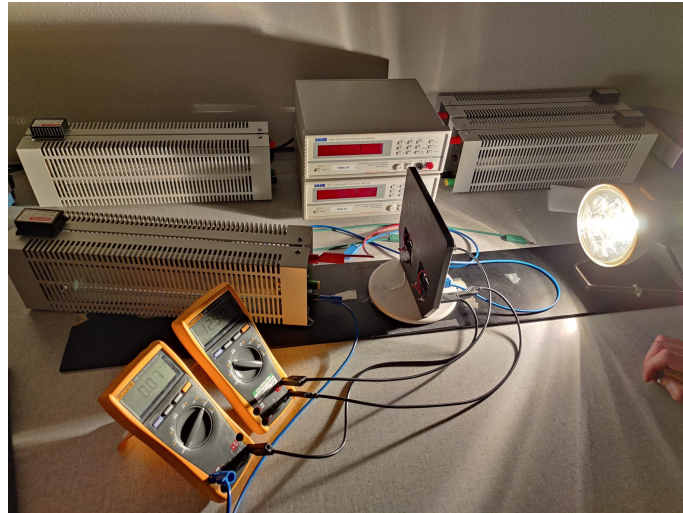


Abbildung 3.1: Aufbau des Versuchs zur Bestimmung der Kennlinie einer Solarzelle.

Für den zweiten Aufgabenteil wird nun auf den zweiten Versuchsaufbau gewechselt. Hier steht ein Sonnensimulator (rechts in Abbildung 3.2) zur Verfügung. Dieser ist in der Lage eine 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.

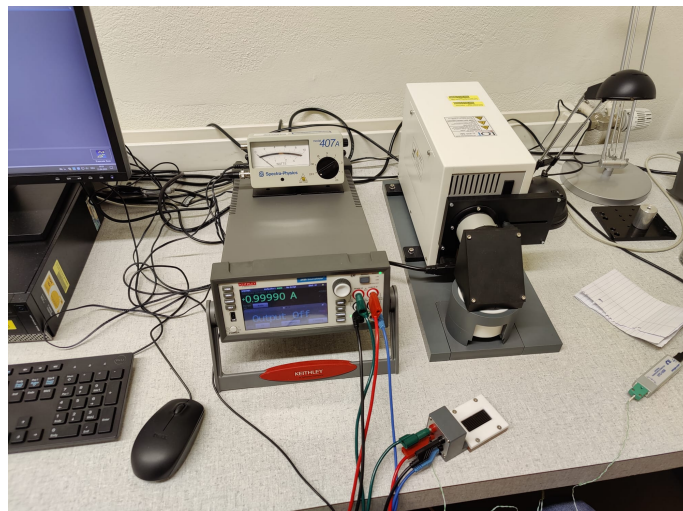


Abbildung 3.2: Aufbau des Versuchs zur Bestimmung der Dunkel- und Hellkennlinie mittels Sonnensimulator

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.

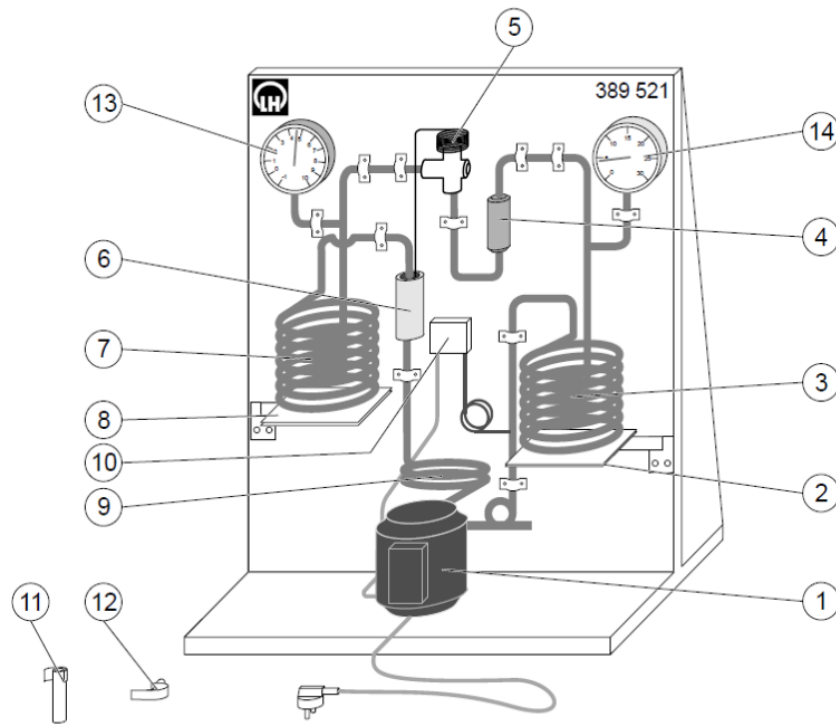


Abbildung 3.3: Versuchsaufbau. **1:** Kompressor 230 V, 50 Hz oder 60 Hz. Leistungsaufnahme ca. 130 W bei 50 Hz; **2:** ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter; **3:** Verflüssiger; **4:** Sammler/Reiniger; **5:** Expansionsventil; **6:** Temperaturfühler des Expansionsventils; **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 Einstecken 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 |
| 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, aufgebaut. Der Abstand zwischen Lampe und Solarzellenmodulen beträgt circa 30 cm. Nacheinander werden nun insgesamt drei Variationen 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 k Ω 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 großzügige-

re 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 verkabelte Sonnensimulator verwendet. Beginnend mit einer Messung bei Dunkelheit wird die Dunkelkennlinie bestimmt. Naturgemäß muss man dazu die Blende am Sonnensimulator schließen, sodass in die ansonst auch 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 Powermeter hat dabei eine Fläche von $A_{\text{PM}} = (2,27 \pm 0,06) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ und die rechteckige Solarzelle eine Fläche von $A_{\text{SZ}} = (6,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Unter Annahme einer homogenen Ausleuchtung des Bereichs im Sonnensimulator kann nun mittels Powermetermessung ein Wert von $0,09 \text{ W}$ für 400 W m^{-2} und $0,23 \text{ W}$ für 1000 W m^{-2} ermessens werden. Nach dem jeweiligen Einstellen der Bestrahlungsstärken wird der Powermetersensor durch die Solarzelle ersetzt und abermals eine Kennlinie aufgenommen. Dabei versteht sich, dass die Schieblende vollkommen geöffnet ist.

5.3 Wärmepumpe

Der zweite große Teil dieses Labortages beschäftigt sich mit einer Wärmepumpe in Form eines Kompressors, der Wärme aus einem Reservoir in ein anderes leitet. Da der Ver-

suchsaufbau bereits parat steht (siehe Abbildung 3.3), wird lediglich der nebenstehende PC in Betrieb genommen und 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 min langen Versuchsdauer vorzubeugen wird stets fleißig umgerührt (siehe Symbolbild in 5.1). Zu Beginn und anschließend im 5-minuten Takt werden zusätzlich die Drücke an den beiden Zubringerleitungen zu den Kompressoren gemessen. 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 $\Delta p = \pm 0,1$ 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 |

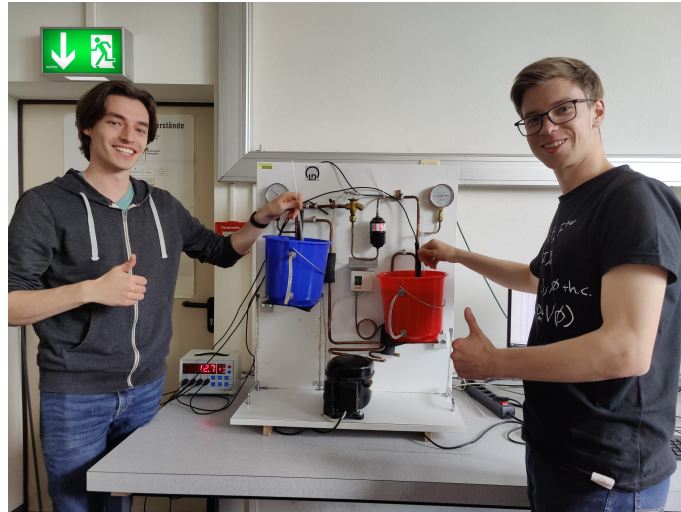


Abbildung 5.1: Symbolbild Experimentatoren

6 Auswertung

6.1 Solarzelle

6.2 Wärmepumpe

7 Diskussion

7.1 Solarzelle

7.2 Wärmepumpe

8 Zusammenfassung

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 | 7 |
| 3.3 | Schematischer Aufbau Wärmepumpe | 8 |
| 5.1 | Symbolbild Experimentatoren | 15 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Geräteliste | 9 |
| 5.1 | Messergebnisse Solarzelle seriell | 11 |
| 5.2 | Messergebnisse Solarzelle parallel | 12 |
| 5.3 | Messergebnisse Solarzelle seriell | 13 |
| 5.4 | Messergebnisse Drücke Wärmepumpe | 14 |