

Institut für Experimentalphysik der Technischen Universität Graz

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM TECHNISCHE PHYSIK 1 & 2

PHY.M40 & PHY.M50

Übungstitel: Wirkungsgrad

Betreuer: Krenn, Joachim, Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr.rer.nat.

Name: Maximilian Pfandner / Daniel Unterhuber

Kennzahl: 678 Matrikelnummer: 12003925 / 12007444

Datum: 02.11.2022 WS 2022/23 SS

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
1.1	Wärmepumpe	3
1.2	Solarzelle	3
2	Voraussetzungen und Grundlagen	4
2.1	Wärmepumpe	4
2.2	Solarzelle	4
3	Beschreibung der Versuchsanordnung	6
3.1	Wärmepumpe	6
3.2	Solarzelle	7
3.2.1	Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	7
3.2.2	Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle	7
4	Material- und Geräteliste	9
4.1	Wärmepumpe	9
4.2	Solarzelle	9
5	Versuchsdurchführung und Messergebnisse	9
5.1	Wärmepumpe	9
5.2	Solarzelle	10
5.2.1	Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	10
5.2.2	Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle	12
6	Auswertung	12
6.1	Wärmepumpe	12
6.2	Solarzelle	15
6.2.1	Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	15
6.2.2	Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle	17

7 Diskussion und Zusammenfassung	20
7.1 Wärmepumpe	20
7.2 Solarzelle	20
7.2.1 Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung	20
7.2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle	21

Experimente zum Wirkungsgrad einer Wärmepumpe und Solarzellen

1 Aufgabenstellung

1.1 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 std.
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.

1.2 Solarzelle

1. Aufnahme der Kennlinie des Solarzellenmoduls bestehend aus 2 Solarzellen, die einmal seriell, seriell und eine Solarzelle verdeckt und einmal parallel verschaltet sind. Weiters sind ein $I(U)$ - und ein $P(U)$ -Diagramm zu erstellen. Die Kenndaten Leerlaufspannung (U_L), Kurzschlussstrom (I_K), sowie am Betriebspunkt maximaler Leistung (MPP) die Spannung (U_{MPP}), der Strom (I_{MPP}), die Leistung (P_{MPP}) sind zu ermitteln und schließlich ist der Füllfaktor zu berechnen.
2. Aufnahme der Dunkel- und Hellkennlinie einer Solarzelle mithilfe eines Sonnensimulators als Lichtquelle, eines Leistungsmessgerät, sowie eines Quellenmessgerät (Sourcemeter) zur automatisierten Messung der Kennlinie. Es sollen 3 Kennlinien aufgenommen werden. Eine Dunkelkennlinie und zwei Hellkennlinie (400 W/m^2 und 1000 W/m^2). Aus den aufgenommenen Kennlinien sollen die Diodenparameter, sowie im Punkt der maximalen Leistung (MPP) die Wirkungsgrade ermittelt werden.

2 Voraussetzungen und Grundlagen

2.1 Wärmepumpe

Die Wärmepumpe ist eine thermodynamische Maschine, die einen Kreisprozess technisch umsetzt. Dabei durchläuft das Arbeitsmedium (hier das Kältemittel R134a) vier Schritte. Es wird vom Kompressor vom Druck P_1 auf den Druck P_2 adiabatisch und isentrop komprimiert, dabei erwärmt sich das Arbeitsmedium auf die Temperatur T_k . Anschließend findet mithilfe eines Wärmetauschers eine isobare Abkühlung statt (Temperatur wird auf T_2 angenähert). Danach wird das Arbeitsmedium anhand eines Ventils auf den niedrigeren Druck P_1 entspannt, wobei es kalt wird. Zum Schluss findet eine isobare Erwärmung mithilfe eines Wärmetauschers statt. Hier wird das Arbeitsmedium der Temperatur T_1 angenähert. Nun beginnt der Kreisprozess von Neuem. Durch diesen Vorgang wird dem kalten Reservoir (T_1) Wärme entzogen und dem warmen (T_2) hinzugefügt. Für die Auswertung ist die Leistungszahl ε erforderlich. Sie ist definiert als Verhältnis der Wärmemenge ΔQ , die von der Wärmepumpe pro Zeiteinheit Δt dem Warmwasserreservoir (T_2) zugeführt wird, zur Leistung P des Kompressors:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P} \quad (1)$$

Dabei gilt $\dot{Q} = c \cdot m \cdot \frac{dT_2}{dt}$, wobei $c = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Ws kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ die spezifische Wärmekapazität von Wasser und m die Masse des Wassers darstellt. Der Gütegrad η einer Wärmepumpe ist als das Verhältnis von der Leistungszahl ε der Wärmepumpe zu der theoretisch erreichbaren, maximalen Leistungszahl $\varepsilon_{max} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$ gegeben.

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} \quad (2)$$

2.2 Solarzelle

Eine Solarzelle ist nichts anderes als eine Diode. Also ein Halbleiter, bestehend aus zwei unterschiedlich dotierten Bereichen, besser bekannt als p-n-Übergang. Durch das Dotieren (gezieltes Einbringen von Fremdatomen) werden zusätzliche Elektronen (negative Ladungsträger) bzw. Löcher (positive Ladungsträger) geschaffen. Dadurch kommt es zur Bildung der Raumladungszone, welche einen Gleichgewichtszustand zwischen Diffusionsprozessen und dem entstehenden elektrischen Feld darstellt. Wird nun von außen eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt, so kann ein Strom fließen. Im Gegensatz dazu fließt in Sperrrichtung kein Strom. Bei einer Solarzelle wird keine Spannung von außen angelegt, sondern hier reicht die Energie der Photonen aus, um weitere Elektronen-Lochpaare zu erzeugen. Diese können die Energiebarriere überwinden 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 (siehe Abbildung 1).

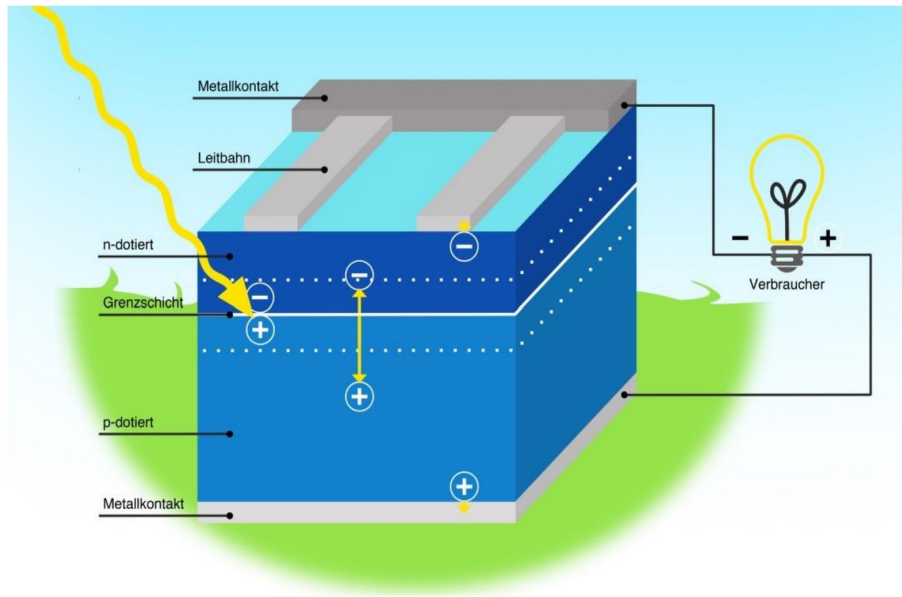


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Solarzelle [1]

Für einen idealisierten p/n-Übergang mit abrupten Dotierungsprofil, erhält man als Strom-Spannungs-Charakteristik $I(U)$ die Shockley-Gleichung:

$$I(U) = I_S \cdot (e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1) \quad (3)$$

Hier entspricht I_S dem Sättigungsstrom, T der Temperatur, k_B der Boltzmannkonstante und e der Elementarladung. Wird die Sperrschicht beleuchtet, so entstehen Elektron-Lochpaare, welche einen Fotostrom I_{ph} in Sperrrichtung verursachen. Aus der Shockley-Gleichung erhält man dann für eine beleuchtete Fotodiode:

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

Für die Aufgabenstellung sind noch folgende Zusammenhänge erforderlich:

$$FF = \frac{I_{\max} U_{\max}}{I_K U_L} \quad (5)$$

$$P_{\max} = I_{\max} U_{\max} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{Licht}}} \quad (7)$$

$$P_{\text{Licht}} = A \cdot I_{\text{Licht}} \quad I_{\text{Licht}} = \frac{P_{\text{mess}}}{A_{\text{mess}}} \quad (8)$$

Mit FF dem Füllfaktor, P_{mess} der gemessenen Leistung am Strahlungsmessgerät, A_{mess} der Fläche des Leistungsmessgeräts, P_{\max} der maximalen Leistung der Photodiode, U_{\max} der Spannung beim Punkt maximaler Leistung, I_{\max} der Stromstärke beim Punkt maximaler Leistung, U_L der Leerlaufspannung (Spannung an Photodiode bei $I=0$), I_K der Kurzschlussstromstärke (Strom an Photodiode bei $U=0$), P_{Licht} der Leistung die von der Lampe auf die Solarzelle trifft, A der aktiven Fläche der Solarzelle, I_{Licht} der Lichtintensität der Lampe und η dem Wirkungsgrad [2] [4] [1].

3 Beschreibung der Versuchsanordnung

3.1 Wärmepumpe

Es handelt sich um eine schon fertig aufgebaute Wärmepumpe, wie sie in der Abbildung 2 ersichtlich und beschrieben ist. Für die Durchführung des Experimentes werden die Temperatursensoren in den Wassereimern befestigt (diese waren schon montiert) und mit dem Temperaturmessgerät verbunden. Um die Temperaturverläufe aufzuzeichnen wird die Software Cassy Lab2 verwendet.

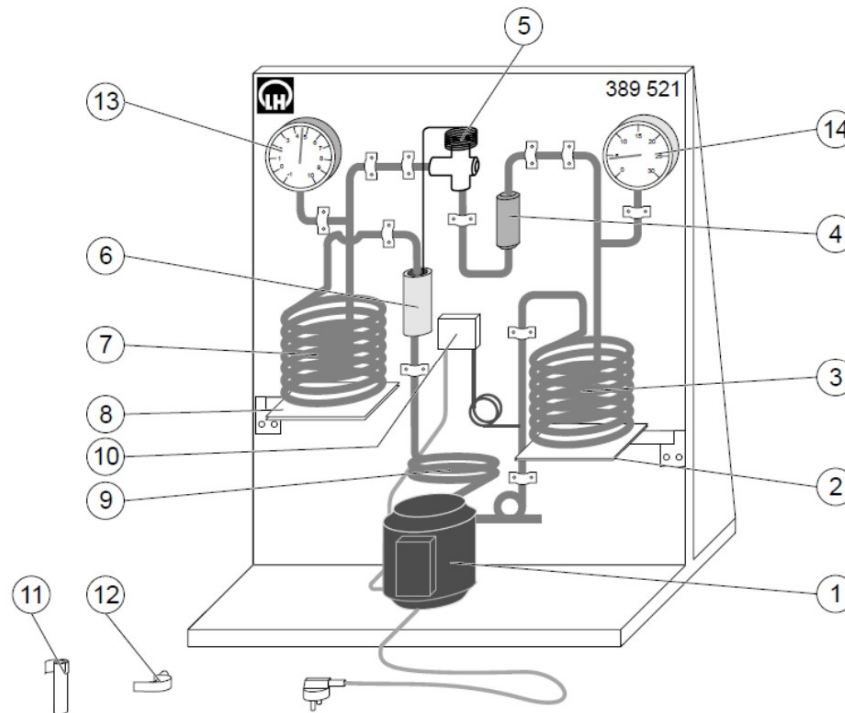


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Wärmepumpe. 1: Kompressor 230 V; 50/60 Hz. Leistungsaufnahme ca. 130 W bei 50 Hz; 2: ausschwenkbare Stellfläche für rot-markierten Warmwasserbehälter; 3: Verflüssiger; 4: Sammler/Reiniger; 5: Expansionsventil; 6: Temperaturfühler des Expansionsventils; 7: Verdampfer; 8: ausschwenkbare Stellfläche Kaltwasserbehälter; 9: Rohrwindungen als elastische Verbindung zwischen Kompressor und Wärmetauscher; 10: Druckwächter; 11: Kunststoffhalter (2x) für Thermometer und Temperaturfühler, zum Ankleben an Kupferrohre; 12: Kupfer-Messschuh (2x) zum Einstecken von Temperaturfühlern für Temperaturmessungen an den Kupferrohren des Kältemittelkreislaufs; 13: Manometer für die Niederdruckseite; innere Skala für Druckmessung von -1...+10 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R134a von -60 °C bis +40 °C; 14: Manometer für die Hochdruckseite; innere Skala: Druck von -1...+30 bar, äußerste Skala mit zugehöriger Taupunkttemperatur für R 134a von -60 °C bis + 85°C [4].

3.2 Solarzelle

3.2.1 Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Der Versuchsaufbau besteht aus einer Lichtquelle und einem Solarzellenmodul, sowie aus einem schaltbaren Widerstand und zwei Multimetern. Bei der Messung sollte der Abstand zwischen Lampe und Modul ca. 30 cm betragen. Nach der in Abbildung 3 gezeigten Schaltskizze wird die Messung der Hellkennlinie vorgenommen. Der Widerstand wird dabei so variiert, dass die gesamte Kennlinie gut mit Messpunkten abgedeckt wird. Im Bereich der maximalen Leistung (Knickbereich der $I(U)$ – Kennlinie) sollten die Messpunkte dichter gesetzt werden. Aus den erhaltenen Daten werden dann die geforderten Diagramme erstellt und ausgewertet. Zur Abschattung (siehe Abschnitt 1.1) wird eine der Zellen mit einem Papierstreifen abgedeckt.

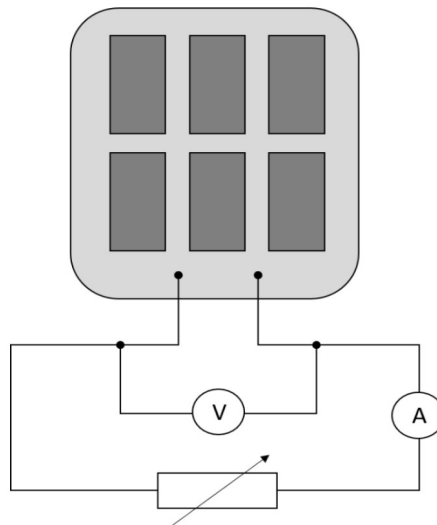


Abbildung 3: Schaltskizze zur Messung der Hellkennlinie des Solarzellenmoduls[1].

3.2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Dieser Versuch besteht aus einer Lichtquelle, die wahlweise mit einem Schieberegler abgedeckt werden kann (Sonnensimulator, siehe Abbildung 5), einer Solarzelle, einem Sourcemeter (siehe Abbildung 4), und einer eigenen Software (geschlossenes System von Keithley). Die Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie erfolgt automatisch. Das Sourcemeter („Quellenmessgerät“) übernimmt die Rollen als Quelle und als Last. Es kann daher Kennlinien in allen vier Quadranten des Strom-Spannungsdiagramms aufnehmen. In den Quadranten I und III (Strom und Spannung haben jeweils selbes Vorzeichen) dient es als Quelle, um einen Strom entsprechender Richtung durch die entsprechende Schaltung zu treiben. In den Quadranten II und IV dient es als Last. So wird z.B. die Solarzelle bei Bestrahlung im vierten Quadranten betrieben (siehe Abbildung 6). Um die Bestrahlung (W/m^2) einzustellen, wird ein Powermeter verwendet (siehe Abbildung 7).



Abbildung 4: Sourcemeter

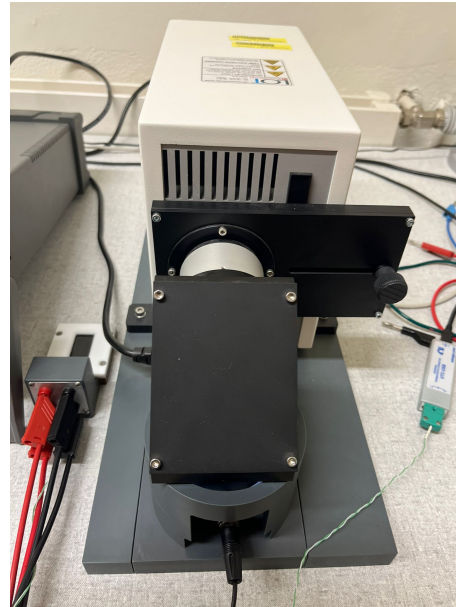


Abbildung 5: Sonnensimulator, links im Bild ist die eingesetzte Solarzelle sichtbar.

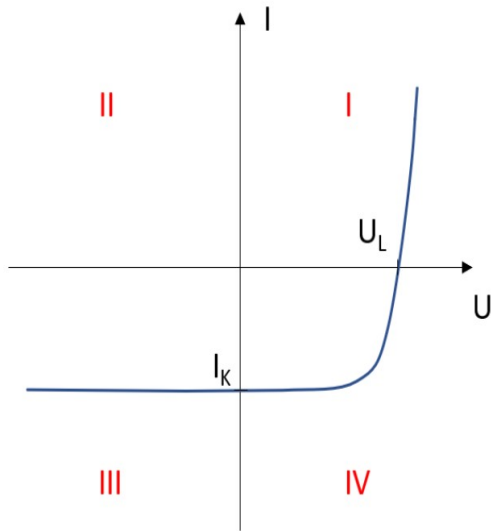


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Hellkennlinie der Solarzelle in den Quadranten I, III und IV. Eingezeichnet sind der Kurzschluss-Strom I_K bei $U = 0$ und die Leerlaufspannung U_L bei $I = 0$. Der Punkt maximaler Leistung befindet sich im Bereich des Knicks der Kennlinie im Quadranten IV. Im Quadranten III kann die Solarzelle als Photodetektor betrieben werden, da der gemessene Strom der einfallenden Bestrahlungsstärke (Leistung pro bestrahlte Fläche) proportional ist [1] .



Abbildung 7: Powermeter

4 Material- und Geräteliste

4.1 Wärmepumpe

Tabelle 1: Auflistung der verwendeten Materialien und Gerätschaften beim Versuch mit dem Wärmepumpe

Material/Gerät	Nummer	Typ	Anzahl
Wärmepumpe	310070540000	für genaue Beschreibung siehe Abbildung 2	1
Temperatur-Messgerät	666 206	digital	1
Cassy Lab2		Software	1
Eimer		Mindestvolumen 4 Liter	2

4.2 Solarzelle

Tabelle 2: Auflistung der verwendeten Materialien und Gerätschaften beim Versuch mit den Solarzellen

Material/Gerät	Nummer	Typ	Anzahl
Solarzellenmodul		bestehend aus 2 Zellen	1
Lichtquelle		Lampe	1
Multimeter	AP - 03	Fluke	2
variabler Widerstand	VRH 320	1 k Ω	3
		100 Ω	1
Stromkabel			
Sourcemeter	310084940000	2450 Sourcemeter Keithley	1
Powermeter	310041630000	Spectra-Physics model 407A	1
Sonnensimulator	310094110000	Lampe mit Umlenkspiegel LSB51R	1
Software		”Kickstart” Keithley	1

5 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

5.1 Wärmepumpe

Zuerst werden die Drücke abgelesen. Es ergibt sich $P_{1,Anfang} = (4,5 \pm 0,1)$ bar und $P_{2,Anfang} = (5,2 \pm 0,2)$ bar bei $T_{1,Anfang} = (21,9 \pm 0,1)$ °C und $T_{2,Anfang} = (20,8 \pm 0,1)$ °C. Nun werden die beiden Eimer mit jeweils 4 Liter Wasser gefüllt. Anschließend werden diese in die richtigen Positionen bei der Wärmepumpe gebracht (siehe Abbildung 2 bei den Wärmetauschern). Die Software Cassy Lab2 wird gestartet. Hier wird das Temperatur-Messgerät (666209/666454) im Fenster „Einstellungen anzeigen“ unter „Anderes Gerät verwenden“ hinzugefügt. Dafür wählt man als Schnittstelle ”COM”(entspricht USB). Nun muss beim Messparameter T_2 noch ein Häkchen angeklickt werden, um beide Temperaturverläufe aufzunehmen. Die Messzeit wird auf eine Stunde festgelegt. Jetzt kann der Kompressor eingeschaltet und die Messung gestartet werden. Während

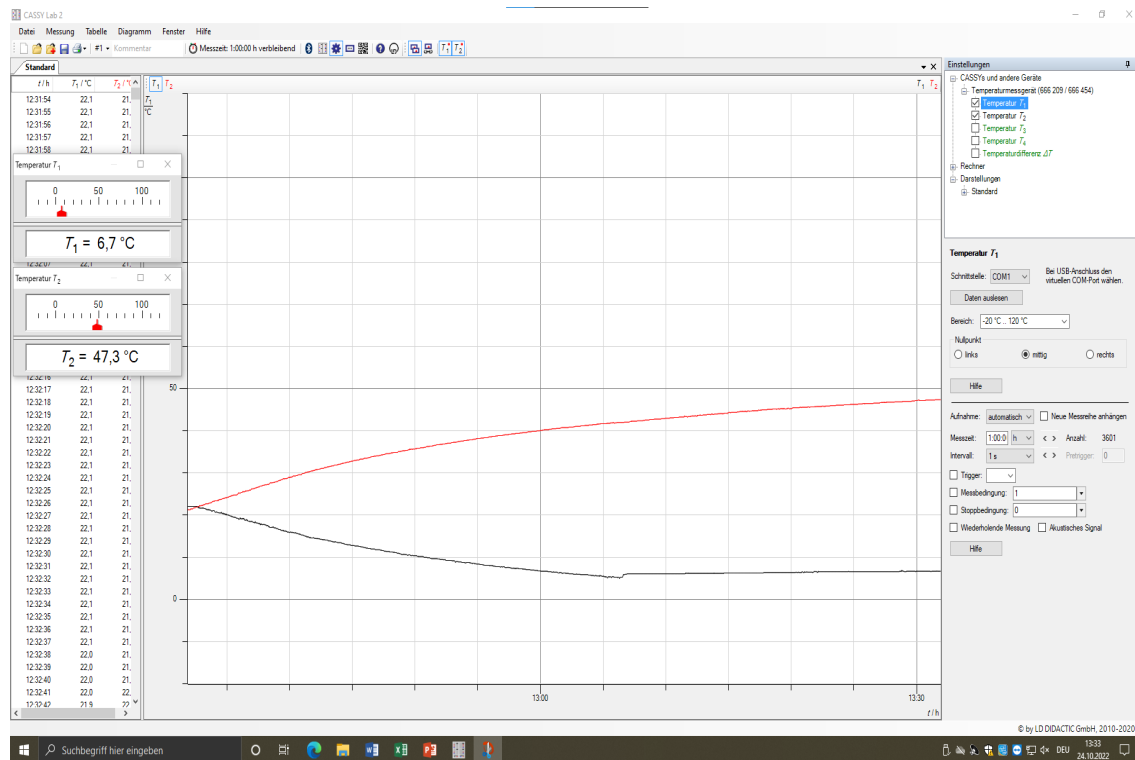


Abbildung 8: Screenshot der aufgenommenen Messwerte. Auf der vertikalen Achse ist die Temperatur in °C und auf der horizontalen Achse die Zeit in Stunden aufgetragen. In rot ist $T_2(t)$ und in schwarz ist $T_1(t)$ aufgetragen.

des gesamten Versuches (eine Stunde) werden beide Wasserreservoir gut umgerührt. Nach Ende der Stunde werden die aufgenommenen Daten als csv-Datei gespeichert. In der Abbildung 8 ist ein Screenshot von den aufgenommenen Daten zu sehen. Hier sieht man bereits, dass nach ungefähr 30 Minuten mit der Temperaturmessung von T_1 etwas schief gelaufen ist. Schließlich werden wiederum die Drücke abgelesen und es ergibt sich $P_{1,Ende} = (1,9 \pm 0,1)$ bar und $P_{2,Ende} = (16 \pm 0,2)$ bar bei $T_{1,Ende} = (6,7 \pm 0,1)$ °C und $T_{2,Ende} = (47,4 \pm 0,1)$ °C.

5.2 Solarzelle

5.2.1 Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Der Versuch wird, wie im Abschnitt 3.2.1 beschrieben, aufgebaut. Die Lichtquelle wird eingeschaltet und die Messwerte durch Einstellen des variablen Widerstandes (dabei ändert sich Strom und Spannung) an den beiden Multimetern abgelesen. Dabei wird einmal strom- und einmal spannungsgeführt gemessen, sodass die Diodenkennlinie gut reproduziert werden kann. Dieses Vorgehen wird bei Verdeckung einer Seite und bei Parallelschaltung der beiden Solarzellen wiederholt. Die Messergebnisse sind in der Tabelle 3 dargestellt. Weiters wurde jeweils der Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung gemessen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 3: Messergebnisse beim Versuch mit dem Solarzellenmodul. In der Spaltenüberschrift ist jeweils ersichtlich, wie die beiden Solarzellen verschaltet, bzw. wie der Versuch durchgeführt worden ist. Es wurde die Spannung U und der Strom I gemessen. Weiters wurde die Unsicherheit ΔU und ΔI der Multimeter (siehe Handbuch) berücksichtigt [3].

Serie ohne Abdeckung				Serie mit Abdeckung			
U / mV	ΔU / mV	I / mA	ΔI / mA	U / mV	ΔU / mV	I / mA	ΔI / mA
146,0	0,4	-74,5	0,4	508,0	1,0	-12,60	0,04
207,0	0,5	-75,0	0,4	999	2	-12,40	0,04
254,0	0,6	-75,0	0,4	2037	3	-12,30	0,04
297,0	0,6	-75,4	0,4	4040	6	-12,00	0,04
349,0	0,7	-75,5	0,4	6050	9	-11,50	0,04
398,0	0,8	-75,3	0,4	8050	12	-10,90	0,04
466,0	0,9	-75,4	0,4	9920	15	-9,22	0,04
498,0	0,9	-75,8	0,4	10200	16	-8,20	0,04
548,0	1,0	-75,8	0,4	10350	16	-7,30	0,04
597,0	1,1	-76,1	0,4	10490	16	-6,30	0,04
597,0	1,1	-76,0	0,4	10570	16	-5,60	0,04
597,0	1,1	-75,4	0,4	10620	16	-5,14	0,04
2060	3	-73,0	0,4	10700	16	-4,30	0,03
3975	6	-71,1	0,4	10760	16	-3,50	0,03
5990	9	-68,7	0,4	Parallel ohne Abdeckung			
U / mV	ΔU / mV	I / mA	ΔI / mA	U / mV	ΔU / mV	I / mA	ΔI / mA
7950	12	-66,8	0,4	390,0	0,8	-195,0	0,5
9990	15	-64,9	0,4	1810	3	-195,0	0,5
10510	16	-57,76	0,09	2405	4	-195,0	0,5
10990	17	-42,90	0,07	3650	6	-193,0	0,5
11090	17	-38,40	0,07	4550	7	-189,0	0,5
11180	17	-34,40	0,06	5050	8	-167,0	0,5
11329	17	-27,70	0,06	5345	8	-136,0	0,4
11450	17	-21,10	0,05	5466	8	-118,0	0,4
11510	17	-17,50	0,05	5543	9	-104,0	0,4
11560	18	-14,30	0,04	5603	9	-90,0	0,4
11590	18	-12,10	0,04	5665	9	-78,0	0,4
11610	18	-11,05	0,04	5705	9	-65,0	0,4
				5732	9	-58,00	0,09
				5790	9	-40,00	0,07
				5850	9	-21,00	0,05
				5887	9	-10,00	0,04
				5894	9	-6,00	0,04

Tabelle 4: Leerlaufspannung U_L und Kurzschlussstrom I_K beim Versuch mit dem Solarzellenmodul. In der Zeilenüberschrift ist jeweils ersichtlich, wie die beiden Solarzellen verschaltet, bzw. wie der Versuch durchgeführt worden ist. Weiters wurde die Unsicherheit ΔU_L und ΔI_K der Multimeter (siehe Handbuch) berücksichtigt.

	U_L / mV	ΔU_L / mV	I_K / mA	ΔI_K / mA
Serie ohne Abdeckung	12100	18	-76,9	0,4
Serie mit Abdeckung	10900	17	-11,30	0,04
Parallel ohne Abdeckung	5922	9	-200,0	0,5

5.2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Durch Schließen des Schiebers beim Sonnensimulator wird die Solarzelle abgedunkelt. Die Software "Kickstart" des Unternehmens Keithley wird gestartet und die nötigen Einstellungen vorgenommen. Für die genaue Vorgangsweise wird hier auf die Anleitung zur Computergesteuerten Messung einer $I(U)$ -Kennlinie mit dem Sourcemeter verwiesen. Anschließend wird die Dunkelkennlinie aufgenommen und als csv-Datei gespeichert. Danach wird durch Öffnen des Schiebers die Solarzelle bestrahlt. Die Fläche $((40,10 \pm 0,05) \cdot (17,7 \pm 0,05)) \text{ mm}^2 = (710 \pm 3) \text{ mm}^2$ der Solarzelle, sowie die Fläche des Powermeters $((16,90 \pm 0,05)/2)^2 \cdot \pi \text{ mm}^2 = (224,3 \pm 1,4) \text{ mm}^2$ wird mithilfe eines Messschiebers gemessen. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass beim Sonnensimulator jene Bestrahlungsstärke eingestellt werden muss (Regler befindet sich auf der Rückseite), dass das Powermeter 0,22 W (für 1000 W/m²) anzeigt und 0,09 W (für 400 W/m²) anzeigt. Die Bestrahlungsstärke wird jeweils richtig eingestellt und eine Hellkennlinie mithilfe der Software aufgenommen und als csv-Datei gespeichert.

6 Auswertung

An dieser Stelle sei angemerkt, dass wenn nicht explizit etwas anderes angegeben ist, kumulierte Unsicherheiten mit der Ableitungsmethode bestimmt werden.

6.1 Wärmepumpe

Die aufgenommenen Daten werden in einem Diagramm geplottet (siehe Abbildung 9). Wie schon bereits vorher angedeutet, ist gut zu erkennen, dass ca. ab Minute 35 mit der Aufnahme der Temperatur T_1 etwas schiefgelaufen ist. Der Fehler muss bei der Messung gewesen sein, denn der Temperaturverlauf des warmen Wasserreservoirs sieht plausibel aus, was für eine funktionierende Apparatur spricht. Anschließend wird mithilfe numerischer Differenziation (hier wurde der Differenzenquotient verwendet) die Ableitung des Temperaturverlaufes T_2 gebildet. Jetzt kann nach der Gleichung 1 die Leistungszahl in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz geplottet werden (siehe 10) und nach der Gleichung 2 auch der Gütegrad (siehe Abbildung 11). An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Plots jeweils nur bis ca. Minute 30 erstellt wurden, da dann der Temperaturverlauf T_1 fehlerhaft ist.

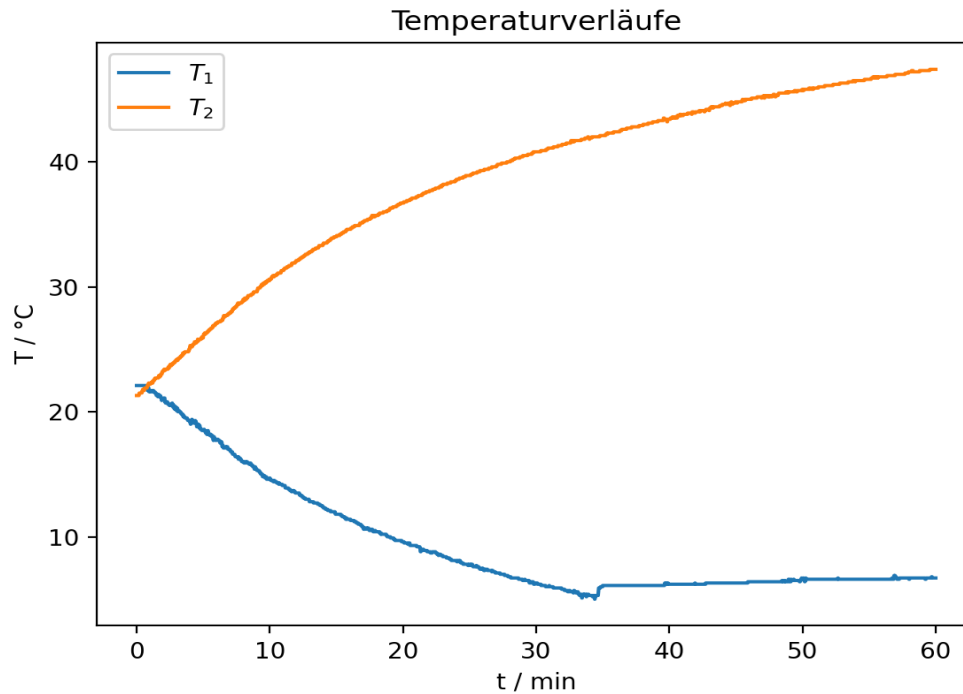


Abbildung 9: Plot der aufgenommenen Messwerte. Auf der vertikalen Achse ist die Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ und auf der horizontalen Achse die Zeit in Minuten aufgetragen. In Orange ist $T_2(t)$ und in Blau ist $T_1(t)$ aufgetragen.

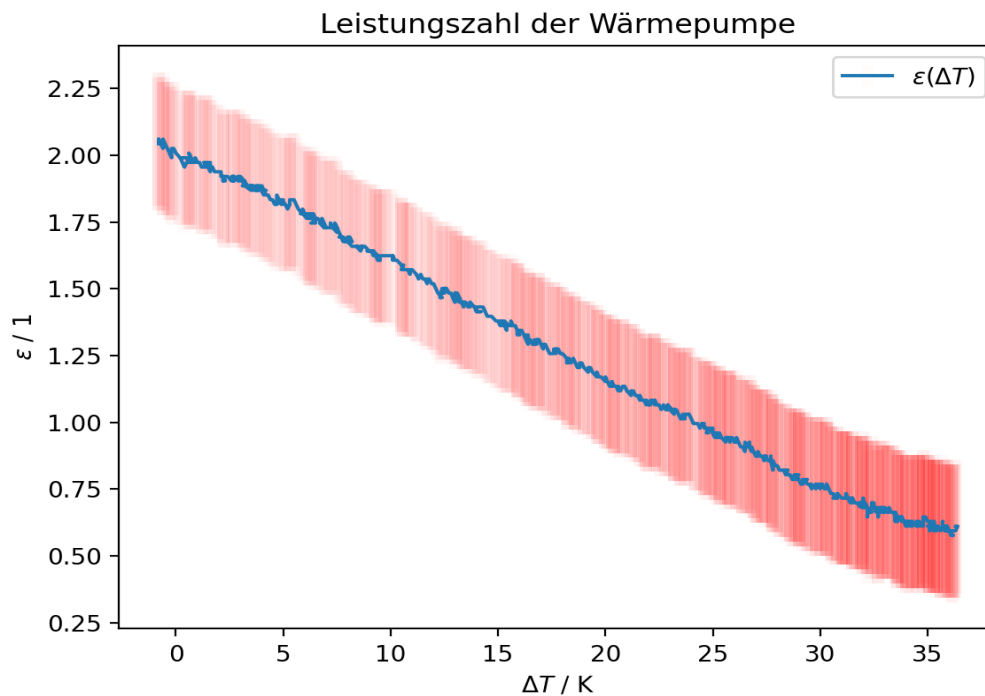


Abbildung 10: Plot der berechneten Werte für die Leistungszahl ε . Auf der vertikalen Achse ist die Leistungszahl und auf der horizontalen Achse die Temperaturdifferenz $T_2 - T_1 = \Delta T$ in Kelvin aufgetragen. In Rot ist der Unsicherheitsschlauch eingefärbt.

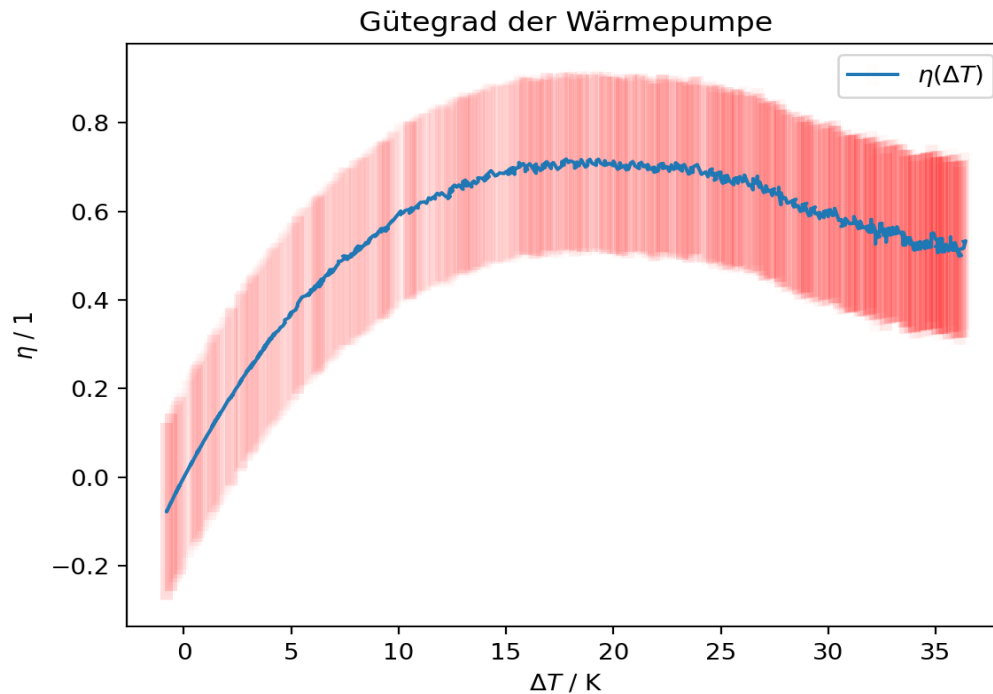


Abbildung 11: Plot der berechneten Werte für den Gütegrad η . Auf der vertikalen Achse ist der Gütegrad und auf der horizontalen Achse die Temperaturdifferenz $T_2 - T_1 = \Delta T$ in Kelvin aufgetragen. In Rot ist der Unsicherheitsschlauch eingefärbt.

Schließlich kann auch der Kreisprozess im p-H Diagramm eingetragen werden (siehe Abbildung 12). Dazu werden die aufgenommenen Messwerte (Druck und Temperatur) am Ende Aufnahmen genutzt.

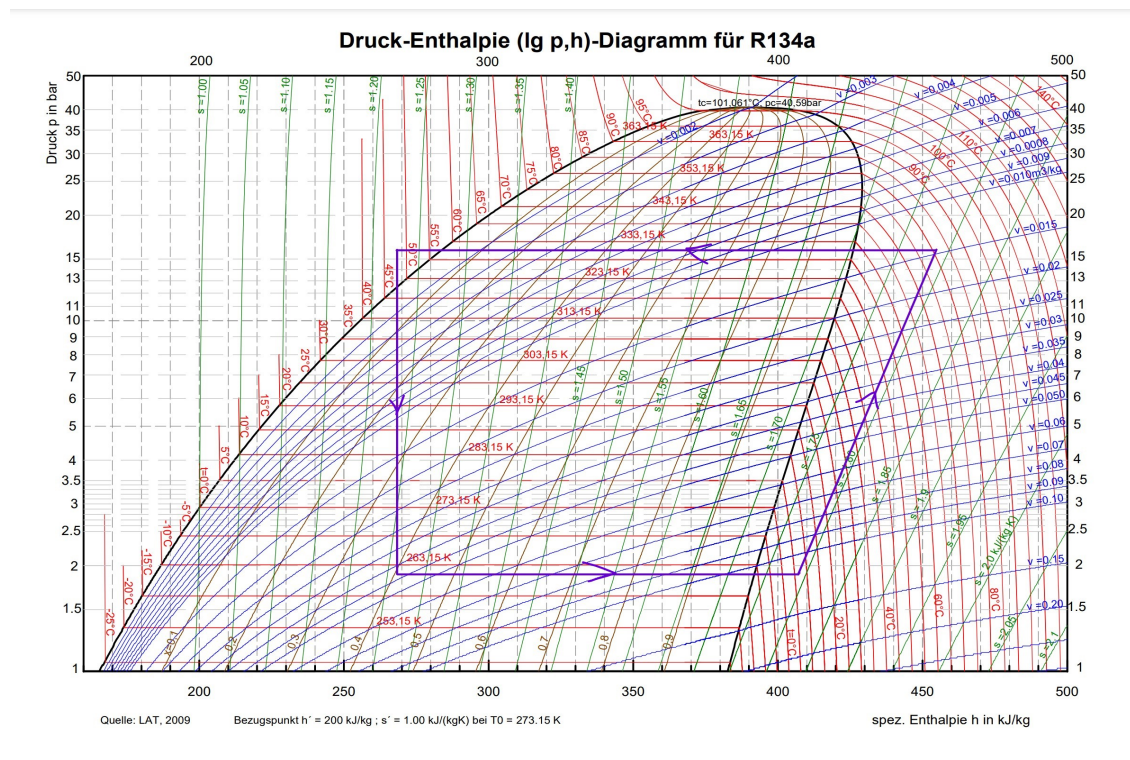


Abbildung 12: p-H Diagramm [5], in Violett ist der linkslaufende Kreisprozess eingetragen.

6.2 Solarzelle

6.2.1 Teil 1: Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Die aufgenommenen Messwerte werden jeweils in einem Diagramm geplottet (siehe Abbildungen 13, 14 und 15). Anschließend wird die Leistung $P = I \cdot U$ in Abhängigkeit der Spannung U geplottet. Aus diesem Diagramm wird dann der Punkt der maximalen Leistung P_{MPP} bestimmt, der sich bei U_{MPP} und I_{MPP} befindet. Schließlich wird noch der Füllfaktor nach Gleichung 5 berechnet. Hier sei angemerkt, dass die Unsicherheiten der Messwerte (siehe Tabelle 3) zu klein sind, um in den Diagrammen sichtbar zu sein, deshalb wurden sie weggelassen.

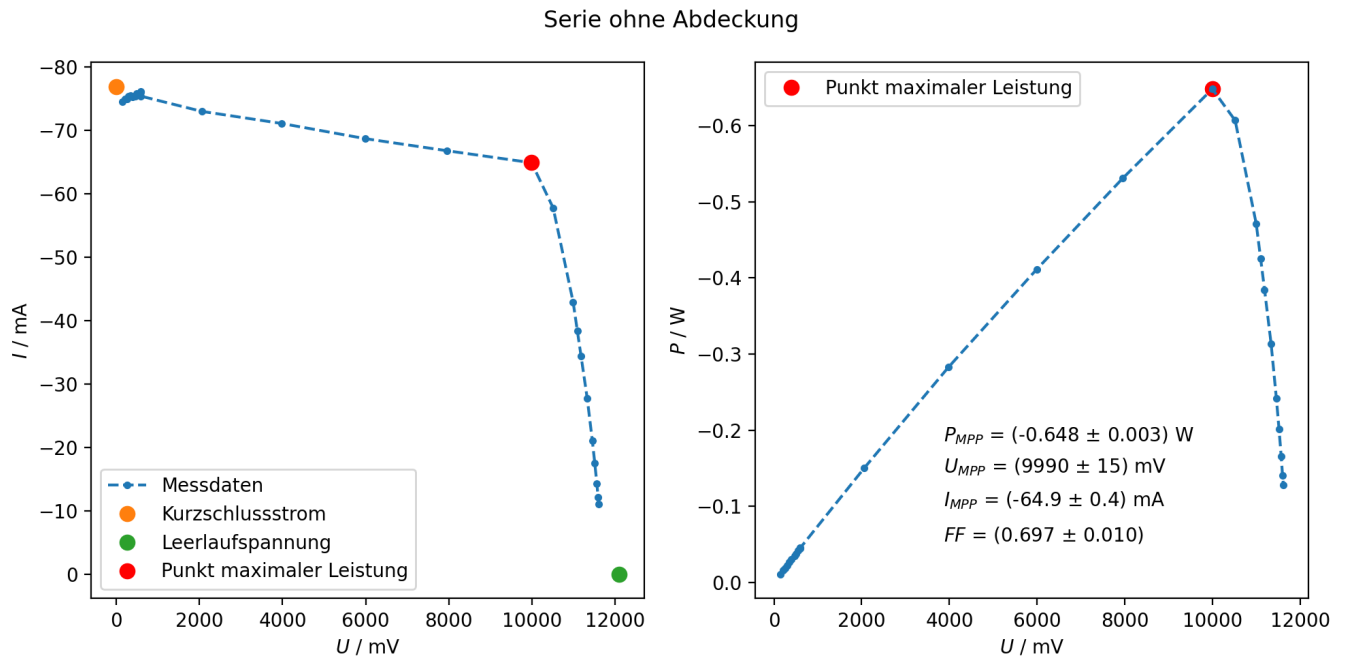


Abbildung 13: links: Plot der aufgenommenen Messwerte (siehe Legende) beim Versuch mit dem Solarzellenmodul, wobei die beiden Solarzellen in Serie verschaltet sind und nicht abgedeckt sind. rechts: Plot der berechneten Werte für die Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U , in der Grafik ist die maximale Leistung P_{MPP} bei der Spannung U_{MPP} und dem Strom I_{MPP} eingezeichnet. FF ist der aus den Werten berechnete Füllfaktor.

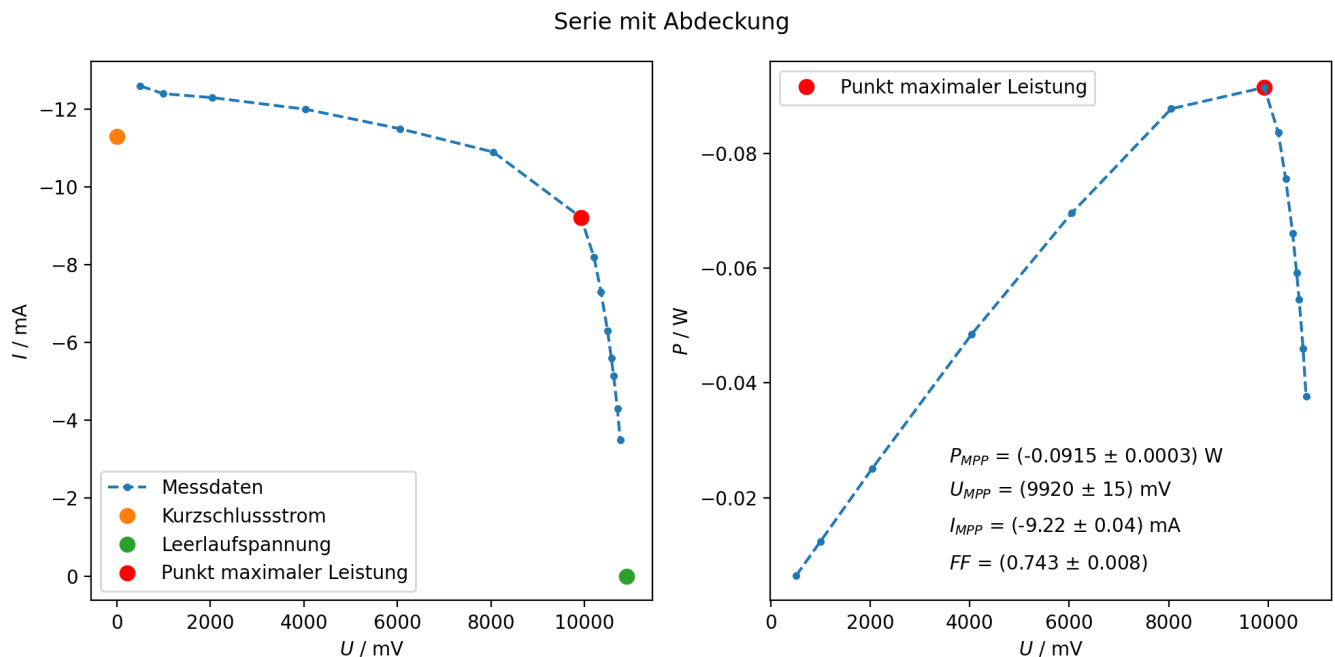


Abbildung 14: links: Plot der aufgenommenen Messwerte (siehe Legende) beim Versuch mit dem Solarzellenmodul, wobei die beiden Solarzellen in Serie verschaltet sind und abgedeckt sind. rechts: Plot der berechneten Werte für die Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U , in der Grafik ist die maximale Leistung P_{MPP} bei der Spannung U_{MPP} und dem Strom I_{MPP} eingezeichnet. FF ist der aus den Werten berechnete Füllfaktor.

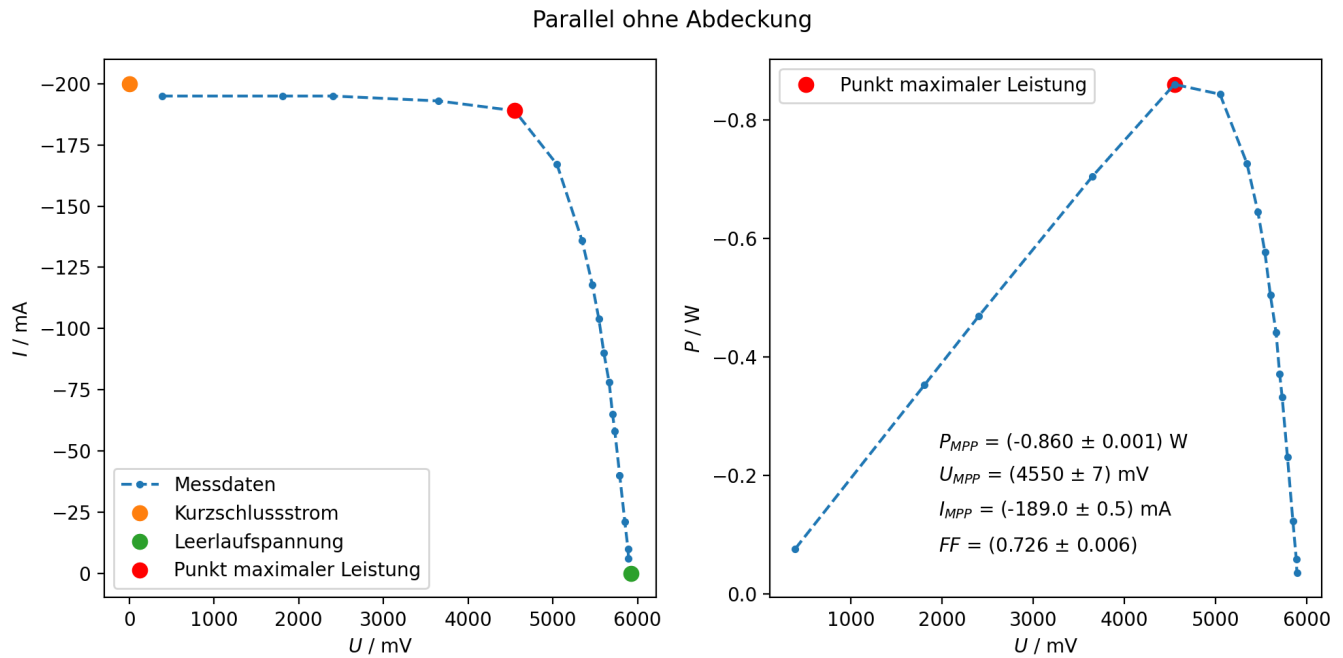


Abbildung 15: links: Plot der aufgenommenen Messwerte (siehe Legende) beim Versuch mit dem Solarzellenmodul, wobei die beiden Solarzellen Parallel verschaltet sind und nicht abgedeckt sind. rechts: Plot der berechneten Werte für die Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U , in der Grafik ist die maximale Leistung P_{MPP} bei der Spannung U_{MPP} und dem Strom I_{MPP} eingezeichnet. FF ist der aus den Werten berechnete Füllfaktor.

6.2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Hier sei angemerkt, dass der Sonnensimulator nicht ganz richtig eingestellt wurde. Also nicht 400 W/m^2 und 1000 W/m^2 , sondern 40 W/m^2 und 100 W/m^2 . Die aufgenommenen Daten werden jeweils in einem Diagramm geplottet (siehe Abbildungen 16, 17 und 18) und mit der jeweiligen Gleichung (3 für die Dunkelkennlinie und 4 für die Hellkennlinie) gefittet. Hier erkennt man, dass dieses Modell nicht sehr gut geeignet ist, um Fotodioden zu beschreiben. Es gibt bessere Modelle (z.B. Eindiodenmodell oder Zweidiodenmodell). Bei diesen Gleichungen handelt es sich aber um implizite Funktionen, die mit Python nicht mehr trivial behandelbar sind. Deshalb wird im Rahmen dieser Auswertung darauf verzichtet.

Anschließend kann anhand der Daten im 3. Quadranten analog wie beim Teil 1 die Leistung über der Spannung aufgetragen werden und der Punkt der maximalen Leistung ermittelt werden. Schließlich kann auch der Wirkungsgrad anhand der Gleichungen 7 und 8 berechnet werden (siehe Abbildungen 19 und 20).

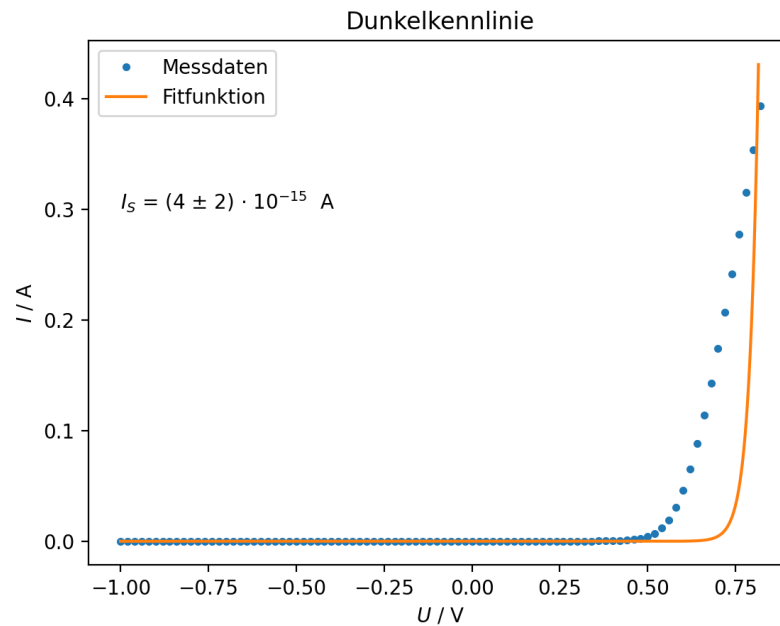


Abbildung 16: Plot der aufgenommenen Messwerte. Auf der vertikalen Achse ist der Strom I und auf der horizontalen Achse die Spannung U aufgetragen. I_S entspricht dem Fitparameter.

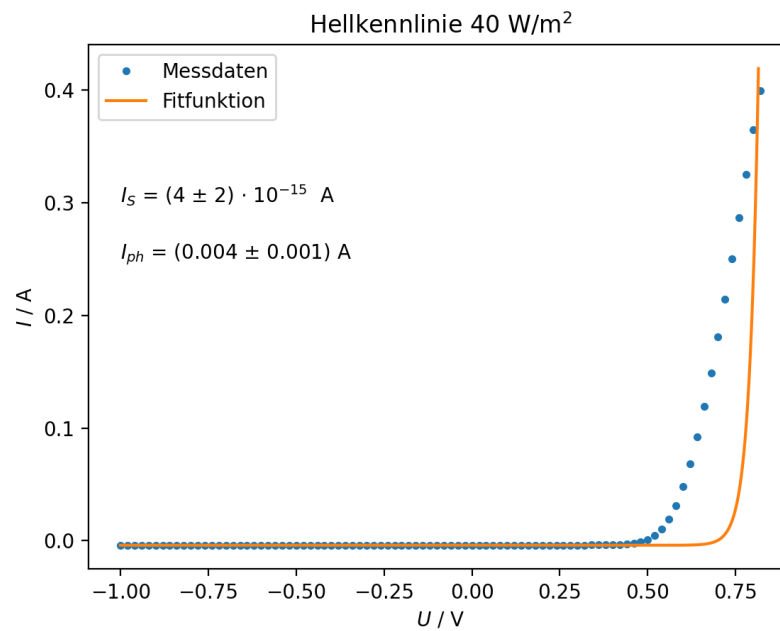


Abbildung 17: Plot der aufgenommenen Messwerte. Auf der vertikalen Achse ist der Strom I und auf der horizontalen Achse die Spannung U aufgetragen. I_S und I_{ph} entsprechen den Fitparametern.

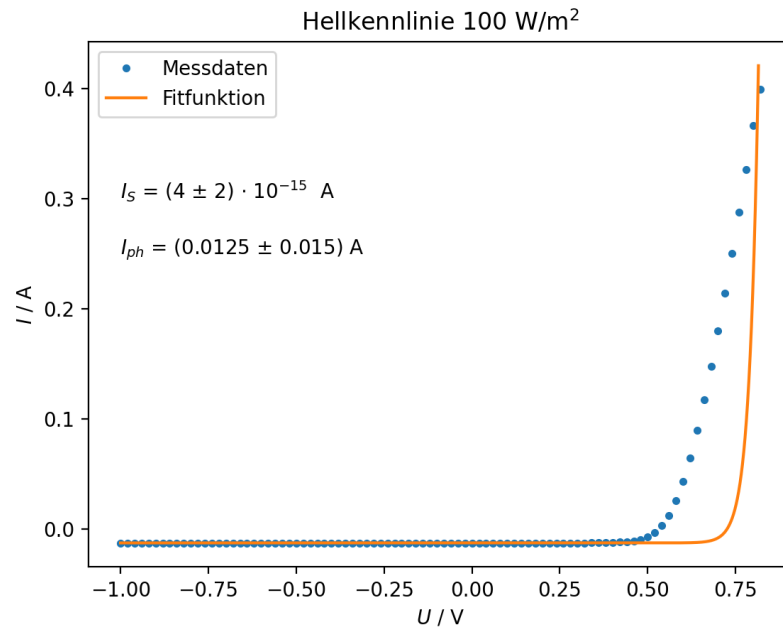


Abbildung 18: Plot der aufgenommenen Messwerte. Auf der vertikalen Achse ist der Strom I und auf der horizontalen Achse die Spannung U aufgetragen. I_S und I_{ph} entsprechen den Fitparametern.

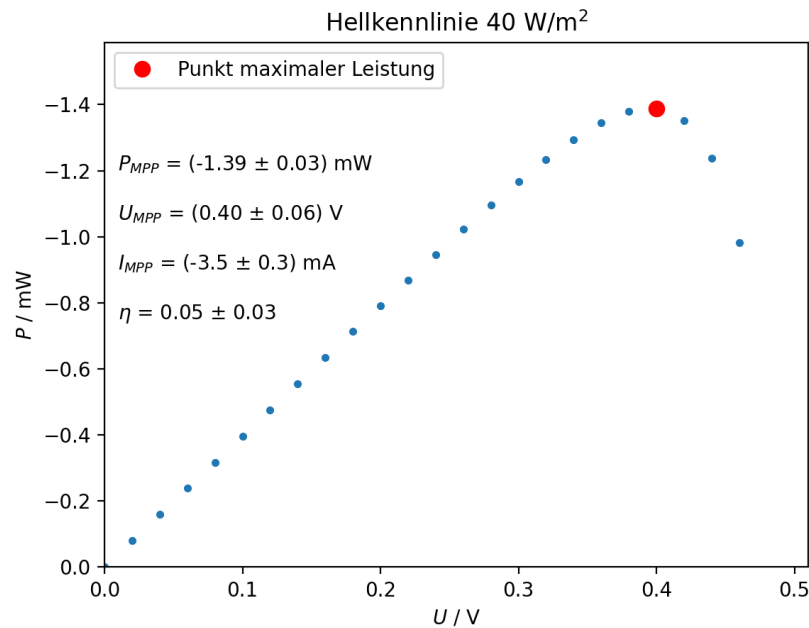


Abbildung 19: Plot der berechneten Werte für die Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U , in der Grafik ist die maximale Leistung P_{MPP} bei der Spannung U_{MPP} und dem Strom I_{MPP} eingezeichnet. η ist der aus den Werten berechnete Wirkungsgrad.

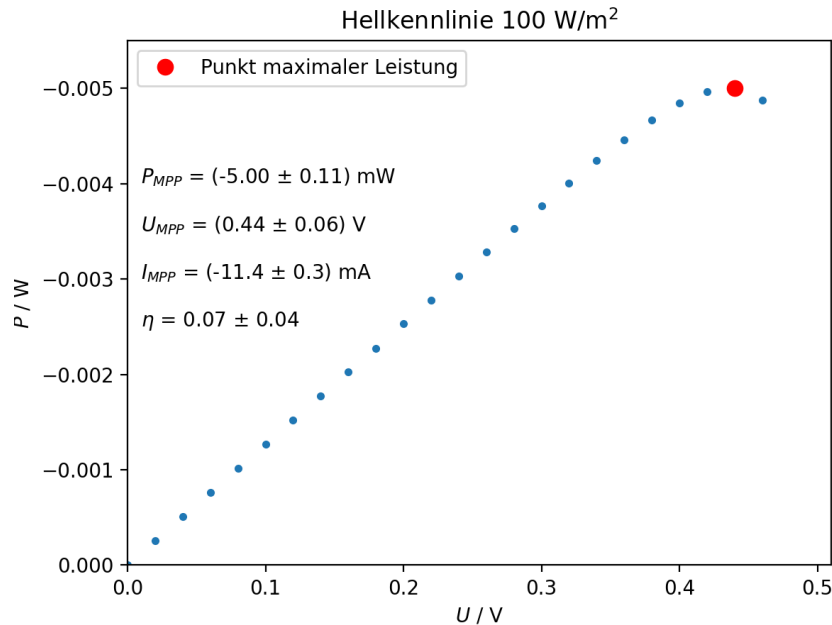


Abbildung 20: Plot der berechneten Werte für die Leistung P in Abhängigkeit der Spannung U , in der Grafik ist die maximale Leistung P_{MPP} bei der Spannung U_{MPP} und dem Strom I_{MPP} eingezeichnet. η ist der aus den Werten berechnete Wirkungsgrad.

7 Diskussion und Zusammenfassung

7.1 Wärmepumpe

Anhand einer Wärmepumpe wurde der linkslaufende Kreisprozess demonstriert. Dabei wurde die Leistungszahl (siehe Abbildung 10) und der Gütegrad (siehe Abbildung 11) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz der beiden Wasserreservoirs bestimmt. Weiters wurde der Kreisprozess in einem pH-Diagramm eingetragen (siehe Abbildung 12).

7.2 Solarzelle

7.2.1 Teil 1: : Kennlinien und Kenndaten von Solarzellen bei Bestrahlung

Mittels eines Solarzellenmoduls, bestehend aus 2 Solarzellen, die einmal in Serie, einmal in Serie mit Abdeckung einer Zelle und einmal parallel verschaltet wurden, wurde jeweils die Strom-Spannungskennlinie aufgenommen, die Leistung über der Spannung aufgetragen, den Punkt der maximalen Leistung identifiziert und den Füllfaktor berechnet (siehe Abbildungen 13, 14 und 15).

7.2.2 Teil 2: Diodenparameter und Wirkungsgrad einer Solarzelle

Hier wurde das Komplettsystem des Unternehmens Keithley genutzt, um Strom-Spannungskennlinien einer Fotodiode aufzunehmen. Die Daten wurden gefittet, bei den Hellkennlinien wurden analog wie bei Teil 1 Diagramme erstellt, wo die Leistung über der Spannung aufgetragen ist. Daraus wurde wiederum der Punkt der maximalen Leistung bestimmt und schließlich der Wirkungsgrad bestimmt (siehe Abbildungen 16 bis 20).

Literatur

- [1] Andreas Hohenau. *Wärmepumpe*. Hrsg. von Karl Franzens Universität Graz. Graz, 2022. URL: <https://moodle.uni-graz.at/>.
- [2] W. Demtröder. *Experimentalphysik: Atome, Moleküle und Festkörper*. 4., überarbeitete Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN: 9783642039119. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1528518>.
- [3] Echteffektiv-Digitalmultimeter Fluke Serie 170. *Fluke Corporation*. URL: <https://www.fluke.com/de-at>.
- [4] P. Knoll, A. Schöffmann, G. Paltauf. *Die Solarzelle*. Hrsg. von Karl Franzens Universität Graz. Graz, 2022. URL: <https://moodle.uni-graz.at/>.
- [5] Prof. Dr.-Ing. Markus Eck. *Druck-Enthalpie ($\lg p, h$)-Diagramm für R134a*. 2009. URL: <https://lat.mb.hs-osnabrueck.de/download/Praktikum/K%E4ltemaschine/log%20p,%20h%20Diagramm%20134a.pdf>.